ЖУРНАЛ ОСНОВАН в 1880 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

12
1970
ДЕКАБРЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.311

Осуществление ленинского плана электрификации

Доктор техн. наук, проф. П. С. НЕПОРОЖНИЙ
Министр энергетики и электрификации СССР

Еще до Великой Октябрьской социалистической революции Владимир Ильич Ленин в своих ранних работах рассматривал вопросы применения электрической энергии в различных отраслях народного хозяйства, подчеркивал преимущество электричества перед другими видами энергии и указывал, что электрификация является могучим фактором ликвидации противоположности между городом и деревней.

Построение социализма в нашей стране В. И. Ленин ставил в неразрывную связь с электрификацией страны и созданием крупной индустрии. Внедрение электричества в народное хозяйство должно было привести к изменению хозяйственного уклада страны, к превращению отсталой России в передовую индустриальную державу, к социалистической перестройке преобладающего в стране мелкотоварного сельскохозяйственного производства.

Разработанный по указанию В. И. Ленина виднейшими специалистами план ГОЭЛРО сыграл выдающуюся роль в преобразовании страны. По этому плану, одобренному в декабре 1920 г. на VIII Всероссийском съезде Советов, намечалось сооружение в течение 10—15 лет двадцати тепловых и десяти гидравлических электростанций общей мощностью 1 750 *Мвт,* в том числе Шатурской и Каширской ГРЭС, Волховской ГЭС.

В своем выступлении на съезде В. И. Ленин назвал план ГОЭЛРО «второй программой» нашей партии. Глубокий смысл этого утверждения заключается в том, что план ГОЭЛРО дополнил политическую программу партии программой экономического строительства социализма.

Первенцы плана ГОЭЛРО сооружались в невероятно трудных условиях, однако строители самоотверженно преодолевали трудности. В 1922 г. была пущена в эксплуатацию Каширская ГРЭС мощностью 12 *Мвт,* которая имела в то время большое значение для развития промышленности Москвы и области. Опыт сжигания низкосортного подмосковного угля оказал решающее влияние на широкое применение этого вида топлива на многих электростанциях и промышленных предприятиях.

В декабре 1925 г. вступила в строй первая очередь Шатурской ГРЭС мощностью 32 *Мвт.* Эта электростанция в то время являлась самой крупной в мире торфяной электростанцией и сыграла большую роль в электроснабжении Москвы.

Огромное значение для создания экономической основы социализма имел пуск в декабре 1926 г. Волховской ГЭС с первоначальной выработкой 240 млн. *квт·ч* электроэнергии в год.

Уже к 1930 г. производство электроэнергии в Советской Республике превышало дореволюционный уровень в 4,2 раза.

Знаменательным шагом в электрификации нашей страны в период первых пятилеток было сооружение Днепровской ГЭС — самой мощной тогда гидроэлектростанции Европы. Эта станция стала энергетическим центром нового индустриального района.

Первый агрегат Днепрогэс был пущен в апреле 1932 г., а в 1939 г. гидроэлектростанция достигла проектной мощности — 560 *Мвт.*

Сооружение Днепровской ГЭС было настоящим инженерным подвигом, подлинной школой, воспитавшей многочисленные квалифицированные кадры инженерно-технических работников и рабочих различных специальностей, ознаменовало собой дальнейшее развитие энергетического строительства.

План ГОЭЛРО был успешно выполнен к 1935 г. Вместо 30 было введено в строй 40 электростанций, выработка электроэнергии превысила установленную цифру более чем вдвое и составила 20 млрд. *квт·ч.* Успешное наращивание мощности и повышение коэффициента ее использования по-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

зволило Советскому Союзу выйти на второе место в Европе и третье место в мире по производству электроэнергии, опередив такие развитые в промышленном отношении капиталистические страны, как Англия, Франция и Италия.

Таких результатов энергостроители добились благодаря неустанной помощи и поддержке партии, правительства и лично В. И. Ленина.

Осуществление ленинских предначертаний по электрификации в последующие годы велось еще более интенсивно. В 1940 г. мощность электростанций составила более 11 млн. *квт*, а выработка электроэнергии превысила 48 млрд. *квт·ч*. В годы Великой Отечественной войны многие электростанции, линии электропередачи и подстанции были разрушены, но на Востоке страны, куда была перебазирована значительная часть промышленности, создавались новые энергетические предприятия.

Электроэнергетика Советского Союза развивалась более быстрыми темпами после войны. Уже в 1947 г. наша страна по общей установленной мощности электростанций и производству электроэнергии вышла на первое место в Европе и второе место в мире.

Большую роль в достижении таких результатов, безусловно, сыграли ленинские идеи электрификации, принципиальные положения о роли энергетики в развитии других отраслей промышленности, сформулированные в плане ГОЭЛРО. Эти идеи и принципы нашли свое отражение в Программе Коммунистической партии Советского Союза, провозгласившей энергетику стержнем строительства экономики коммунистического общества.

Заложенные в плане ГОЭЛРО основные положения претворялись в жизнь. Осуществлялись концентрации производства электроэнергии на крупных электростанциях с соответствующим увеличением единичной мощности агрегатов, централизация энергоснабжения на основе объединения электростанций в мощные энергосистемы. Непрерывно наращивался ввод новой мощности. Если в 1950 г. было введено в эксплуатацию 2,6 млн. *квт* энергетических мощностей, то в 1969 г. — 11,4 млн. *квт*. В 1970 г. мощность электростанций увеличится примерно на 12 млн. *квт*. Теперь в нашей стране ежегодно вводится в строй новых энергетических мощностей больше, чем в ФРГ, Англии, Франции и Японии вместе взятых. В 1950 г. мощность всех электростанций составляла 19,6 млн. *квт;* к началу 1970 г. она превысила 154 млн. *квт*. Производство электроэнергии возросло с 235,4 млрд. *квт·ч* в 1958 г. до 689 млрд. *квт·ч* в 1969 г. За последние 12 лет почти в 2,5 раза увеличилось производство электроэнергии на душу населения.

Примерно 80% производимой в стране электроэнергии вырабатывают тепловые электростанции. За последние годы в теплоэнергетике произошли крупные изменения.

На первых электростанциях, пущенных в соответствии с планом ГОЭЛРО, устанавливались турбины мощностью в 6—12 *Мвт*, котлы производительностью 30—50 *т* пара в час. Затем появились турбины по 25—50 *Мвт*, а накануне Великой Отечественной войны — 100 *Мвт*. Сейчас же у нас насчитывается большое количество тепловых электростанций, где эксплуатируются энергетические блоки мощностью 300 *Мвт* с закритическим давлением пара 240 *ат*.

Капитальные затраты на киловатт установленной мощности, при блоках 300 *Мвт* на ГРЭС 2 400 *Мвт*, почти на 30% снижаются по сравнению с тепловыми электростанциями мощностью 300—400 *Мвт* с турбинами 50—100 *Мвт*. Эксплуатация энергетических блоков большой мощности позволяет уменьшить расход топлива на каждый киловатт-час, а следовательно, снизить стоимость электроэнергии.

Сейчас насчитывается 30 ГРЭС, имеющих мощность более миллиона *квт* каждая. Достигли мощности 2 400 *Мвт* такие тепловые электростанции, как Приднепровская, Конаковская, Змиевская, Бурштынская. Строящаяся в настоящее время Углегорская ГРЭС будет иметь мощность 3 600 *Мвт*.

Чтобы технический прогресс в теплоэнергетике развивался и впредь, намечено широкое внедрение новых мощных высокоэкономичных энергетических блоков 500 и 800 *Мвт*, экспериментальные образцы которых работают на Назаровской и Славянской ГРЭС. Последующие блоки 800 *Мвт* будут более совершенными с одновальной турбиной и однокорпусным котлом.

Для повышения коэффициента использования оборудования тепловых электростанций предполагается совершенствование технологических схем производства электроэнергии с использованием газовых турбин в сочетании с паротурбинными установками. Кроме этого, создаются опытные установки, позволяющие повысить экономичность производства электроэнергии.

В настоящее время на Невинномысской ГРЭС сооружается опытно-промышленная парогазовая установка мощностью 200 *Мвт*.

Широкие возможности для производства дешевой электроэнергии, для экономии топлива открывает теплофикация. В нашей стране с плановым социалистическим хозяйством для развития теплофикации созданы самые благоприятные условия. И не случайно СССР по развитию теплофикации занимает первое место в мире.

Установленная мощность теплофикационных турбин на ТЭЦ составляет около 40 млн *квт*. В 1969 г. отпуск тепловой энергии от теплоэлектроцентралей Министерства энергетики и электрификации СССР составил более 480 млн. *Гкал*.

Развитие крупных теплоемких промышленных предприятий, строительство больших жилых массивов в городах создают возможности сооружения мощных ТЭЦ. Для этого серийно выпускаются теплофикационные турбины мощностью 50 и 100 *Мвт* с параметрами пара 130 *ат* и 565° С. Большим техническим достижением в теплофикации явится создание теплофикационной турбины мощностью 250 *Мвт*. Эта турбина по сравнению с двумя агрегатами по 100 *Мвт* обеспечивает экономию капиталовложений в размере 5 млн. *руб.* и топлива — порядка 40 тыс. *т* в год.

Большим вкладом в дело дальнейшего развития энергетики явилось строительство на Краснодарской ТЭЦ газотурбинной установки мощностью 100 *Мвт*, предназначенной для регулирования пико-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

вых нагрузок. Краснодарская газовая турбина по своей мощности пока единственная установка как в отечественной, так и в мировой практике газотурбостроения.

В 1970—1980 гг. будет осуществляться строительство крупных тепловых электростанций мощностью 3—4 млн. *квт* с блоками 500, 800 и 1 200 *Мвт*. Топливной базой для таких ГРЭС на Востоке страны будут служить богатейшие месторождения каменного угля — Итатское и Экибастузское. Надо полагать, что после 1980 г. общая мощность Итатских и Экибастузских электростанций достигнет нескольких десятков миллионов киловатт. Увеличение общей мощности ГРЭС позволит в течение ближайших 5 лет почти в 2,5 раза снизить при их сооружении массы строительных конструкций, добиться значительной экономии государственных средств.

В европейской части СССР будут сооружаться серийные блоки по 800 *Мвт*. Топливом для них будут служить мазут и отсевы газовых углей Донецкого бассейна. В конце 1975 г. на Костромской ГРЭС будет смонтирован газомазутный блок мощностью 1 200 *Мвт* с котлом паропроизводительностью 3 600 *т/ч*.

Намного увеличится мощность теплоэлектроцентралей и установленных на них турбин. Появятся ТЭЦ мощностью свыше миллиона киловатт. Такие теплоэлектроцентрали предусмотрено создать в Москве, Ленинграде, Киеве, Свердловске, Новосибирске и других крупных городах.

Составной частью тепловой энергетики являются атомные электростанции. Первая атомная электростанция мощностью 5 *Мвт*, вступившая в строй в июне 1954 г., разрабатывалась и сооружалась под руководством академика И. В. Курчатова; по его инициативе и при активном участии строилась Белоярская АЭС.

«По мере удешевления производства атомной энергии, — говорится в Программе КПСС, — развернется строительство атомных электростанций, особенно в районах с недостатком других источников энергии, расширится применение атомной энергии в мирных целях в народном хозяйстве, медицине, науке».

На наших глазах эта программа претворяется в жизнь. Построены и действуют Ново-Воронежская, Мелекесская атомные электростанции, на Урале сооружается крупная атомная электростанция с быстрым реактором мощностью 600 *Мвт*, закладываются АЭС под Ленинградом и Курском. Это также осуществление ленинских предначертаний по электрификации, прозорливо предсказывавших внедрение достижений современной физики в практику народнохозяйственного строительства.

В настоящее время мы находимся накануне бурного развития атомной энергетики. И это вполне понятно. Ведь сейчас полагают, что овладение энергией ядерного распада практически удваивает энергетические ресурсы мира. Большая работа по улучшению экономичности атомных энергетических установок в нашей стране принесла свои плоды. Разработанные проекты атомных электростанций с ядерными реакторами весьма большой мощности делают атомную энергетику конкурентоспособной в первую очередь для отдаленных районов и районов с дорогими энергетическими ресурсами.

Намечено сооружение АЭС единичной мощностью каждого реактора в 1 млн. *квт*. Есть все предпосылки к тому, что атомная энергетика будет развиваться в ближайшие годы более высокими темпами и давать все больший вклад в энергетический баланс страны.

Развитие гидроэнергетики в нашей стране идет по пути сооружения каскадов гидроэлектростанций и комплексного использования водных ресурсов как для производства электроэнергии, так и для улучшения условий судоходства, орошения земель в засушливых районах, для водоснабжения промышленности и населенных пунктов. Уже сейчас на базе гидроузлов и водохранилищ действующих гидроэлектростанций орошается около 1,2 млн. гектаров земель, эксплуатируется около 5 тыс. *км* водных путей. Интересные решения использования водных ресурсов найдены при создании каскадов ГЭС на Волге, Каме, Днепре, Ангаре и Енисее.

В юбилейный ленинский год и в год, когда исполняется 50 лет плану ГОЭЛРО, следует подчеркнуть, что по развитию гидроэнергетики Советский Союз занимает первое место в мире. Пройден большой и трудный героический путь создания от Волховской гидроэлектростанции мощностью 58 *Мвт* до Красноярской ГЭС мощностью 5 млн. *квт*. Этот гидроэнергетический исполин занимает сейчас по мощности первое место в мире. Пуск десятого агрегата 25 марта 1970 г. явился достойным подарком энергетиков к 100-летию со дня рождения В. И. Ленина.

Гидростроительство, как и строительство тепловых электростанций, характеризуется интенсивным ростом общей мощности ГЭС и увеличением единичной мощности агрегатов. Если мощность отдельного агрегата на Волжских ГЭС имени В. И. Ленина и имени XXII съезда КПСС равна 115, на Братской ГЭС имени 50-летия Великого Октября — 225, то на Красноярской ГЭС установлены агрегаты мощностью 500 *Мвт*.

Широко используются гидроэнергетические ресурсы в союзных республиках. Строятся крупные гидроэлектростанции: Нурекская на реке Вахш в Таджикской ССР мощностью 2,7 млн. *квт*, Токтогульская на реке Нарын в Киргизской ССР — 1,2 млн. *квт*, Ингурская в Грузинской ССР — 1,3 млн. *квт*.

Большое внимание будет уделено широкому освоению гидроресурсов Восточной Сибири и Средней Азии. Решено и впредь продолжать освоение энергетических ресурсов Енисея и Ангары. Сейчас на Ангаре строится Усть-Илимская ГЭС мощностью 4,3 млн. *квт*.

На Енисее сооружается Саяно-Шушенская ГЭС мощностью примерно 6,4 млн. *квт*. Недавно конструкторы Ленинградского металлического завода имени XXII съезда КПСС разработали для этой электростанции агрегаты мощностью 650 *Мвт* каждый. В ходе создания их в содружестве с учеными найдены пути полной защиты рабочих колес от кавитационных разрушений. Инженеры сумели повысить к. п. д. саяно-шушенских агрегатов по сравнению с красноярскими.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Многое сделано для выполнения ленинских предначертаний по централизации электроснабжения. Если в старой России электростанции не были объединены, то в настоящее время необъятные просторы нашей страны пересекают мощные линии электропередачи напряжением 220, 330, 500 *кв*. В конце прошлого года энергостроители досрочно сдали в эксплуатацию важнейший объект пятилетки — линию электропередачи Конаково—Череповец, протяженностью 400 *км* и напряжением 500 *кв*. От г. Волжского к Донбассу протянулась линия электропередачи постоянного тока напряжением 800 *кв*. Работает линия электропередачи переменного тока Конаково—Москва напряжением 750 *кв*. Протяженность линий электропередачи высокого напряжения (от 35 до 800 *кв*) составляет сейчас более 410 тыс. *км*.

Страна Советов занимает первое место в мире по протяженности ВЛ напряжением 400—750 *кв* и по протяженности ежегодно вводимых в эксплуатацию линий электропередачи (в целом в стране — до 30 тыс. *км* в год).

Объединение энергетических систем и создание Единой энергетической системы СССР — один из важнейших ленинских принципов электрификации страны. В настоящее время 53 энергосистемы европейской части СССР и Урала объединены в Единую энергетическую систему европейской части страны мощностью 100 млн. *квт*. Такой энергосистемы нет ни в одной стране мира.

Развитие и объединение крупных отечественных энергосистем требует широкого использования автоматики, поэтому все бóльшее применение в энергосистемах находят новые автоматические устройства.

Широко применяется система оптимизации режимов работы энергосистем. Так, благодаря внедрению программы оптимизации распределения активных мощностей в Единой энергетической системе европейской части СССР достигнуто значительное снижение расхода топлива, что позволило за несколько месяцев сэкономить свыше 1,5 млн. *руб*.

Учитывая преимущества электропередачи электроэнергии на большие расстояния постоянным током, в настоящее время обсуждаются возможности сооружения такой линии от Экибастуза до Центра протяженностью около 2 400 *км*, напряжением 1 500 *кв*, а также из Сибири в Центр.

Важнейшим результатом создания мощных энергосистем явился перевод сельскохозяйственного производства на централизованное электроснабжение от государственных сетей. К концу 1969 г. около 99,5% всех колхозов и совхозов были электрифицированы. Из них 95% — от государственных сетей. Потребление электроэнергии сельским хозяйством страны намечено довести в 1970 г. до 22 млрд *квт·ч*.

В свое время В. И. Ленин видел в электрификации сельского хозяйства средство технического переворота. Предвидение Ильича сбывается. В настоящее время во многих колхозах и совхозах имеется на животноводческих и птицеводческих фермах более чем по 100 электродвигателей.

Сложное техническое оборудование и большая мощность блоков и агрегатов, установленных на электростанциях, требуют от энергетиков умелого отношения к эксплуатации, высоких технических знаний, большого опыта и смекалки. Уровень автоматизации электростанций неустанно растет.

Наряду с автоматическим регулированием всех процессов все шире используется дистанционное управление. Принимаются меры для дальнейшего совершенствования системы автоматического управления с использованием вычислительных машин.

Интенсивно ведутся работы по автоматизации блоков с помощью новых, более совершенных средств кибернетической техники. На электростанциях Советского Союза имеются блоки, оборудованные электронными вычислительными машинами. Намечается широкое применение их для решения задач комплексной автоматизации в энергетике.

На мощных блоках в качестве основной системы автоматического управления сейчас принята система с информационными машинами. При этом система управления блоков включает объемную систему автоматического регулирования на электронных регуляторах, устройства дистанционного управления, полный объем средств технологической защиты.

Эта система автоматизации тепловых электростанций будет дополнена автоматическими устройствами, обеспечивающими пуск отдельных агрегатов (котла, турбины) по заданной программе.

Уделяется большое внимание повышению производительности труда обслуживающего персонала по эксплуатации гидроэлектростанций путем применения автоматизации процессов управления гидроагрегатами, их защиты и контроля. Сейчас на ГЭС автоматизированы, например, пуск и остановка гидроагрегата от одного импульса со щита управления ГЭС или диспетчерского пункта, регулирование мощности по заданному графику нагрузки и т. д.

Пневмогидравлическая аппаратура управления широко применяется на Киевской, Каховской, Кременчугской, Днепродзержинской, Павловской, Мингечаурской, Волжской ГЭС имени В. И. Ленина и других гидроэлектростанциях. Коллективы ГЭС умело используют запасы мощности, заложенные в гидротурбинах. К примеру, путем небольших затрат увеличена номинальная мощность гидрогенераторов на Волжских ГЭС имени В. И. Ленина и имени XXII съезда КПСС, Горьковской, Цимлянской, Канакерской ГЭС и др.

В своих высказываниях В. И. Ленин неоднократно напоминал, что электрификация наиболее успешно может развиваться по единому плану для всей страны и, возможно, ряда соседних стран. Эти слова претворяются в жизнь. В ГДР, Польше, Чехословакии, Венгрии, Румынии, Болгарии сооружаются многие электростанции с помощью советских специалистов-энергетиков.

В 25 развивающихся странах Африки и Азии нашими специалистами ведутся изыскательские и проектные работы, проводятся консультации и эксперименты. С помощью СССР ведется строительство Асуанской плотины в ОАР, гидроузла на реке Евфрат в Сирии, плотины и ГЭС в Тунисе, гидроэлектростанций во Вьетнаме, в Индии, Марокко и других странах.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

В настоящее время советские западные энергосистемы соединены с энергосистемами стран СЭВ. Создание объединения энергетических систем «Мир», главное диспетчерское управление которого находится в Праге, дает для каждой страны, входящей в объединение, значительные экономические выгоды. В скором времени объединенные энергосистемы «Мир» будут присоединены к Единой Европейской энергосистеме Советского Союза.

Для интенсивного развития электроэнергетики большое значение имеет решение ряда научно-технических задач, таких, как проблемы использования термоядерной реакции, использования магнитогидродинамического принципа для получения электрической энергии и др. Сейчас созданы и испытаны конкретные схемы и конструкции магнитогидродинамического генератора, работающего на газовом топливе по открытому циклу. Уже создана энергетическая установка полупромышленного типа с МГД-генератором мощностью 25 *Мвт*. Для использования магнитогидродинамического принципа преобразования энергии нашим ученым предстоит в течение ближайших лет решить весьма важные и трудные задачи, касающиеся длительности, надежности работы таких установок и их технико-экономических показателей.

Проектные и научно-исследовательские организации Министерства энергетики и электрификации СССР разрабатывают сейчас проект переброски части стока рек Печоры и Вычегды в бассейн Волги, что повысит выработку Волжских ГЭС, приостановит понижение уровня Каспийского моря, свяжет глубоководным путем водные магистрали страны с одним из богатейших районов европейской части СССР — Коми АССР. Вторым крупным проектом является использование стока сибирских рек для орошения и обводнения земель в Средней Азии.

Велико значение электрификации в развитии народного хозяйства нашей страны. В Программе КПСС сказано: «Электрификация, являющаяся стержнем строительства экономики коммунистического общества, играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства, в осуществлении всего современного технического прогресса. Поэтому необходимо обеспечить опережающие темпы производства электроэнергии».

Это свидетельствует о том, что предначертания Владимира Ильича Ленина по электрификации нашей страны, принципы, заложенные в плане ГОЭЛРО, сбываются изо дня в день.

◇ ◇ ◇

УДК 621.311.003.1(47)

Развитие энергетики и социальный прогресс в свете ленинских идей о значении электрификации

Доктор техн. наук В. А. ВЕНИКОВ

Москва

Энергетика — показатель общественного строя. Развитие промышленности, уровень культуры общественного строя и, наконец, социальные преобразования определенным образом увязываются с масштабами и способами получения и преобразования энергии. С развитием энергетики меняется содержание труда, в связи с необходимостью обеспечения более сложных трудовых процессов повышается культура труда; увеличение энерговооруженности физического, а в последнее время и умственного труда стимулирует повышение общей культуры трудящихся. В связи с этими возможностями энергетики темпы ее роста, количество использованной энергии возрастают очень быстро. Так, предполагают, что человечество за время своего существования использовало всего около 900 тыс. млрд. *квт·ч* энергии, а около двух третей этого количества пришлось на последние 30—40 лет [1]. Все большую долю в потреблении энергии стал составлять ее наиболее совершенный вид — электроэнергия. Она, как ожидают, составит к 2000 г. около 40% в общем балансе потребления энергии. Количественный рост и качественное совершенствование энергетики — это характерный показатель динамики экономического и культурного развития общества.

В. И. Ленин неоднократно подчеркивал значение качественного и количественного развития энергетики для создания нового человеческого общества, особенно ярко сделав это в своих крылатых словах: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

Еще раньше, на заре электротехники, основоположники научного коммунизма Маркс и Энгельс увидели в открывающихся перспективах электроэнергетики новый этап в экономическом, политическом и культурном развитии человечества. Так, вспоминая о своей беседе с Марксом, Либкнехт писал: «Вскоре у нас зашла речь о естествознании, и Маркс издевался над победоносной реакцией в Европе, которая воображает, что революция задушена, и не догадывается, что естествознание подготавливает новую революцию. Царствование его величества пара, перевернувшего мир в прошлом столетии, окончилось; на его место встанет неизмеримо более революционная сила — электрическая

[1] В настоящее время примерно 60% трудовых затрат в добывающей промышленности приходится на долю энергетики; примерно $^1/_3$ всех капиталовложений в промышленность и транспорт и $^1/_5$ всех годовых расходов страны (включая затраты труда населения и стоимость услуг) получает энергетика.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

искра... Теперь задача разрешена и последствия этого факта не поддаются учету. Необходимым следствием экономической революции будет революция политическая, так как вторая является лишь выражением первой» [2].

Говоря о перспективах электричества, Энгельс отмечал: «В конце концов оно станет мощным рычагом для устранения противоположности между городом и деревней. Совершенно ясно, что благодаря этому производительные силы настолько вырастут, что управление ими будет все более и более не под силу буржуазии» [3]. Синтезируя теоретические исследования производительных сил, связывая их органически с теоретическим изучением идей современной физики и учитывая условия практической их реализации, В. И. Ленин высказывает основные положения об электрификации как основном звене народного хозяйства.

В ряде своих работ он показывает, что в условиях капитализма электрификация не может развиваться планомерно, поскольку по своей природе она требует планово организованного хозяйства и должна быть связана с плановым развитием всей экономики. Этого нет, и в полной мере не может быть, в капиталистической системе, поскольку «Техника капитализма с каждым днем все более и более перерастает те общественные условия, которые осуждают трудящихся на наемное рабство» [4]. Отмечая непреодолимые противоречия между последовательно проводимой, направленной на благо народа электрификацией и капитализмом, В. И. Ленин определяет важнейшую роль электрификации в условиях социалистического общества. Он пишет, что Советская власть обеспечивает политическую сторону строительства социализма и коммунизма, и далее указывает, что «экономическая сторона может быть обеспечена только тогда, когда действительно в русском пролетарском государстве будут сосредоточены все нити крупной промышленной машины, построенной на основах современной техники, а это значит — электрификация» [5].

Не случайно, что после победы Октябрьской революции внимание молодой Социалистической Республики направляется на энергетику как основу для обеспечения решающих преобразований всей жизни страны. Октябрь и порожденный им план ГОЭЛРО оказываются неразрывно связаны. Первый дал власть в руки рабочего класса и трудящихся, а второй, явившись как бы экономическим продолжением Октября, показал те пути изменения экономики на научных началах, по которым пошли далее социалистические страны. Разумеется, что в эпоху научно-технической революции изменения в управлении промышленностью и в том числе энергетикой происходят не только в странах социализма, но и там, где господствующей осталась капиталистическая система. Буржуазии промышленно развитых стран, для того чтобы справиться с возрастающими производительными силами, приходится включать в свою систему несвойственные ей ранее элементы ведения и проводимого на капиталистической основе планирования хозяйства вообще и энергетики в частности. Капитализм, конечно, не меняет здесь своей сути, так как попрежнему только прибыль и конкуренция являются движущими силами. Однако развертывание производства и его базы — энергетики, огромная концентрация богатств в ведущих капиталистических странах создает возможность для социальных маневров буржуазии, позволяет ей временно приспособляться к новым, становящимся ей *не под силу,* условиям управления. Так, почти все развитые капиталистические страны были не только вынуждены провести национализацию энергетики, но, проводя планирование и прогнозирование ее развития, создавать общенациональные и международные объединения энергетических систем и даже все больше и больше обращаться к мысли о необходимости не только широкого объединения энергосистем различных стран, но и создания трансевропейской «межсистемной связи», связывающей восток и запад Европы.

На базе национализации энергетики — этой несвойственной «классической» капиталистической системе форме, многим капиталистическим странам удается создавать и успешно развивать общесистемную автоматику, обеспечивая высокий технический уровень решения задач энергетики [6]. Однако в ряде случаев свойства капиталистической системы проявляются и в виде неравномерности в использовании энергии (половина населения Земли получает менее 7% мирового потребления энергии) и в виде несовершенства в структуре энергетических систем. Так, например, в США, где не допускается национализация энергетики, последняя, будучи передовой в количественном отношении [7], имеет и серьезные слабые места, выявившиеся в ряде тяжелых аварий, в частности, большой аварии (ноябрь 1965 г.) и ряде других, происшедших в крупнейших энергетических системах этой страны.

ГОЭЛРО — первый в мире комплексный план научно обоснованного развития энергетики. Развитие энергетики в Советском Союзе происходило и происходит под влиянием тех идей, которые были заложены в плане ГОЭЛРО, рассматривавшем энергетику как важнейшую часть планомерно развивающейся экономической системы страны, включающей техническое перевооружение

---

[2] Воспоминания о Марксе и Энгельсе, Госполитиздат, 1956, стр. 91.

[3] К. Маркс и Ф. Энгельс, Соч., т. 27, стр. 289.

[4] В. И. Ленин, Соч., т. 19, стр. 42.

[5] В. И. Ленин, Соч., т. 31, стр. 392.

[6] Это, конечно, не означает, что научно-техническая революция в «индустриальном обществе» создает некую «общность законов развития», что утверждает, например, американский экономист Д. К. Гэлбрейт в книге «Новое индустриальное государство», Нью-Йорк, 1967. Это означает, что «современное капиталистическое общество, особенно в передовых странах, вполне созрело для перехода к социализму» (В. И. Ленин, т. 30, стр. 278) и показывает, что высокий уровень производительных сил, которого достиг капитализм в историческом конце своего жизненного пути, действительно становится ему «не под силу», требует адекватной этому уровню системы производственных отношений — социалистической. («Экономическая газета», январь 1970, № 3, стр. 18.)

[7] Установленная мощность всех станций мира 800 млн. *квт*, из них 300 млн. *квт* (37,5%) приходится на долю США, соответственно выработка энергии во всем мире 4 160 *терраватт-часов*, в США — 1 400.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

промышленности и сельского хозяйства, социальные преобразования и подъем культуры.

В соответствии с ленинскими принципами электрификации в этом плане предусматривалось районирование страны, проводимое с учетом природных сырьевых энергетических ресурсов и специфических национальных условий. При этом районы, имевшие источники энергии, вовсе не рассматривались только как ее поставщики: одновременно со строительством энергетических объектов там развивалась крупная промышленность, электрифицировалось сельское хозяйство, быт, проводилась механизация и автоматизация наиболее тяжелых, трудоемких работ, менялись условия труда и этим обеспечивался подъем культуры на окраинах страны.

За годы действия плана ГОЭЛРО различие в уровнях промышленного развития экономических районов СССР сократилось более чем в 20 раз [8]. Большие капиталовложения, реализованные на основе развития энергетики, получили, например, восточные районы страны, где за 1918—1968 гг. эти вложения составили 155,3% к среднесоюзному уровню. В целом производство промышленной продукции на востоке страны возросло в 106 раз, в 2 раза больше, чем в центральных областях [8].

При создании плана ГОЭЛРО и последующей реализации его идей соратник В. И. Ленина Г. М. Кржижановский и его научная школа закладывает основы современной энергетической науки [9], рассматривающей энергетику как большую систему и занимающейся комплексом взаимосвязей подсистем, к числу которых относится топливная промышленность, электро- и теплоснабжение народного хозяйства. В настоящее время существует ряд определений энергетики и энергетической науки. Энергетику определяют, например, как совокупность больших развивающихся искусственных систем, создаваемых человеком для получения, преобразования, распределения и потребления в народном хозяйстве природных энергетических ресурсов всех видов [10]. Энергетическая наука изучает закономерности энергетики, включая явления, процессы и сложные связи, появляющиеся при развитии и функционировании больших энергетических систем.

Понятия энергетики и энергетической науки отрабатываются, дополняются и развиваются в условиях современного научно-технического прогресса, но их основные, по существу, впервые сформулированные в плане ГОЭЛРО, положения остаются в силе.

Развитие и объединение энергетических систем, электрических сетей и создание объединенной энергетической системы также идет в соответствии с действующими по настоящее время идеями плана ГОЭЛРО, которые предусматривали:

использование различных видов топлива при совместной работе тепловых и гидравлических станций. Такой подход к объединению электрических станций, называвшемуся тогда «кустованием», по сути, опережал последующее (более быстрое в техническом отношении) развитие электрических систем на Западе и в США;

параллельную работу станций различных типов, благодаря чему удается обеспечить для них практически во всех условиях работы наивыгоднейшие режимы;

широкое использование местных топливных ресурсов на электростанциях;

использование водных энергетических ресурсов путем строительства мощных гидроэлектрических станций и создание электроэнергетической базы на основе использования водной энергии в районах, бедных топливом;

создание высоковольтных электрических сетей, объединяющих мощные станции для параллельной работы, и увеличение доли выработки электроэнергии на дешевых местных энергетических топливах;

строительство новых станций по возможности в удалении от крупных городов, с тем чтобы не увеличивать загрязненности воздуха и избегать необходимости подвоза топлива, вывоза шлака и т. д.;

увеличение надежности работы станций объединенной системы;

повышение производительности труда в объединениях станций и систем.

Исходя из ленинских идей о мирном сосуществовании стран различной политической системы, план ГОЭЛРО не исключал возможности международного сотрудничества в области энергетики, которое в условиях того времени выражалось, в частности, в закупках оборудования за рубежом, сдаче концессий на сооружение энергетических объектов. Но нежелание капиталистов сотрудничать с единственной тогда социалистической республикой привело к тому, что план ГОЭЛРО в основном, особенно на последующих его этапах, выполнялся за счет мобилизации внутренних ресурсов страны, быстрого развертывания отечественного электро- и машиностроения.

План ГОЭЛРО предусматривал, что одним из решающих факторов электрификации страны должно быть повышение производительности труда. Так, при увеличении числа рабочих на 20% и увеличении потребления топлива в промышленности на 40% предусматривалось возрастание энергетической мощности промышленности примерно на 70%.

В этих условиях все промышленное производство почти удваивалось по сравнению с довоенным уровнем. Повышение производительности труда, которому столько внимания уделялось ленинским планом ГОЭЛРО, актуально и в настоящее время, когда в ряде областей промышленности и в энергетике наша страна все еще отстает от передовых капиталистических стран по этому показателю.

---

[8] «Экономическая газета», январь, 1970, № 3, стр. 3.

[9] В. И. Попков, А. Г. Захарин, М. М. Лебедев, А. Б. Маркин. Г. М. Кржижановский и развитие ленинского учения об электрификации советской энергетической школой, Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1970, № 2.

[10] Л. А. Мелентьев, О некоторых вопросах возникновения и развития советской энергетической науки, Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1967, № 5.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Итоги плана ГОЭЛРО, уже давно выполненного и перевыполненного [11], имеют не только исторический интерес; его принципы и результаты находят свое отражение в современных задачах, связанных с созданием Единой энергетической системы Советского Союза, объединенной с системами социалистических государств. Основной итог плана ГОЭЛРО заключается в том, что на его основе в исторически короткие сроки была преодолена вековая отсталость царской России, превратившейся в высокоразвитое индустриальное государство. Так, если в 20-х годах страна занимала одно из последних мест по выработке энергии, то в конце 40-х годов она заняла первое место в Европе и второе в мире.

В настоящее время Советский Союз по многим важнейшим показателям занимает передовые места в мировой энергетике. Установленная мощность станций страны составляет 142 млн. *квт,* т. е. около 18% от всей мощности станций в мире, выработка энергии — 647 *терраватт-часов,* а выработка на душу населения — 2 487 *квт·ч* в год [12].

Электроэнергетика определила ряд характерных моментов развития промышленности — внедрение автоматизированного электропривода, электротехнологии повлияло на уровень концентрации и специализации производства [13], что, в свою очередь, стимулировало автоматизацию отдельных технологических процессов и комплексную автоматизацию производственных систем, все более и более заменяющих отдельные машины-автоматы. Переход от электромеханических средств автоматизации к электронным, форсируя применение электроэнергии в сфере промышленного потребления, усилил тенденции к появлению у энергетики в целом элементов кибернетической системы.

Идеи плана ГОЭЛРО привлекают внимание специалистов и в современных условиях быстрого и качественно иного развития энергетики, стимулированного общим прогрессом страны и происходящей научно-технической революции. Они остаются ведущими идеями не только для нашей страны, но и для других стран социализма. ГОЭЛРО как бы предварил многие «новые» идеи и уже много позднее получил определенное отражение в методах системного подхода, кибернетических методах, глобальном подходе и т. д. Эти особенности заключаются прежде всего в том, что здесь на основе марксистско-ленинского исследования соотношений в развитии производительных сил осуществляется тот научный подход, для которого, как и в других проблемах, характерно многоаспектное рассмотрение задач и который спустя много лет и зачастую при меньшем общеметодологическом обосновании будут называть «системным подходом».

В плане ГОЭЛРО, конечно, не следует искать полного соответствия современным проблемам — проблемам другого исторического и научно-технического уровня. Но это обстоятельство не может затушевать сегодняшнее значение плана ГОЭЛРО. Особенно важны при этом идеи этого плана, отражающие многовариантный (а не чисто директивный) подход к народнохозяйственному планированию, охватывающему и координирующему различные подсистемы, развитие которых как единого целого, обеспечивало создание всей материально-технической базы социализма: «никакого другого единого хозяйственного плана кроме выработанного уже ГОЭЛРО нет и быть не может» [14]. Первый план прогнозирования развития производительных сил на 30—40 лет вперед [15] четко выражал мысль, которая затем находила место во всех последующих планах развития страны о роли тяжелой промышленности и ее электрификации. «Только тогда, когда вся страна будет электрифицирована, когда под промышленность и сельское хозяйство будет подведена техническая база современной крупной промышленности, только тогда мы победим окончательно» [16].

Современные идеи Единой энергетической системы, как большой кибернетической системы, являющейся, в свою очередь, одной из подсистем еще более крупной — «глобальной» системы народного хозяйства страны и даже (учитывая международные энергоэкономические связи) частью международной экономической системы, при настоящем развитии техники и экономики, в период научно-технической революции, приобретают новое звучание. Однако по существу в них можно найти отражение идей, заложенных в первый план научно обоснованного развития энергетики, рассматриваемый как часть общей программы экономического, всестороннего политического и социального преобразования страны, а не только технических изменений в ее промышленности, в ее энергетике.

Эти же идеи системного подхода можно обнаружить в перечне задач в области научных исследований [17], определившем наиболее важные направления и пути экономического подъема страны. Этот документ был тесно связан по своей направленности с планом ГОЭЛРО, в котором «было намечено главное направление создания новых производительных сил на базе электрической энергии, комплексного использования природных богатств, внедрения передовой техники, технологии и организации производства» [18].

---

[11] Подробные данные о количественном выполнении плана ГОЭЛРО и дальнейшем развитии энергетики СССР имеются в статьях: Г. В. Алексенко, Состояние и перспективы развития электроэнергетики и электропромышленности, «Электричество», 1970, № 4; Е. А. Руссаковский, Развитие электрификации и энергетики СССР по ленинскому пути, Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1970, № 2; А. М. Некрасов, Электроэнергетика Советского Союза, Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1970, № 2.

[12] Бюллетень ООН, № 361 от 14 февраля 1969 г.

[13] Так, к 1967 г. 6,7% всего числа предприятий СССР, каждое из которых имело энергетическую мощность более 10 тыс. *квт,* производили 42% продукции, потребляя около 80% электроэнергии. (Доклад В. 26, МИРЭК, стр. 3.)

[14] В. И. Ленин, Соч., т. 32, стр. 120.

[15] А. А. Маркин, Ленинские идеи электрификации страны, «Коммунист», 1965, № 6.

[16] В. И. Ленин, Соч., т. 42, стр. 159.

[17] В. И. Ленин, Набросок плана научно-технических работ, Соч., т. 36.

[18] К столетию со дня рождения В. И. Ленина, Тезисы ЦК КПСС.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Задачи сегодняшнего дня и план ГОЭЛРО. Задачи прогнозирования, перспективного планирования и управления энергетикой приходится теперь решать с учетом того, что современные объединенные энергосистемы охватывают громадные территории (например, система Центр—Юг—Урал Европейской части СССР простирается почти на 2 000 *км* и в меридиональном, и в широтном направлениях) и продолжают увеличиваться. Перетоки энергии между отдельными системами составляют все более значительную часть от их собственной выработки, что делает особо актуальным проблему развития межсистемных связей и создание объединенной энергетической системы страны (ОЭС).

В ближайшие 10—15 лет, когда Единая энергосистема охватит районы от западных границ страны, где она соединена с энергосистемами Польши, ГДР, Чехословакии, Румынии и Болгарии до Центральной Сибири, т. е. захватит в широтном направлении более чем 6 тыс. *км,* задачи планирования управления осложняются еще сильнее. В этой системе должны появиться не только маневренные связи, но и магистральные. В проблемах, выдвигаемых функционированием ЕЭС, на одном из первых мест находится задача передачи энергии на большие расстояния и поиски новых путей создания сверхмощных электропередач.

Таким, по сегодняшним соображениям уникальным, передачам, которые, видимо, будут иметь напряжение 1 500—2 000 *кв* постоянного тока и 1 000—1 200 *кв* переменного придется передавать не менее 6—8 млн. *квт* на расстояние до 2 500 *км.*

В повышении пропускной способности электропередач переменного тока должны сыграть роль те капитальные усовершенствования, в направлении которых ведутся сейчас исследования, касающиеся изоляции и защиты от перенапряжений, новых схемных решений и, что очень существенно, автоматического управления.

Быстрое регулирование и изменение параметров передачи в функции режима (кибернетическое регулирование) позволяет ослабить ограничения по устойчивости, сближая в этом смысле свойства передач переменного и постоянного тока.

Планирование энергетического хозяйства сейчас (и тем более в будущем) потребует хорошо согласованного топливоснабжения удаленных, но взаимодействующих районов. Необходимым становится рассмотрение топливно-энергетического баланса как единого целого и учета общего потребления энергоресурсов всей страны. Появляется необходимость учета взаимосвязанности различных видов энергоресурсов и всего топливно-энергетического баланса объединенной энергетической системы страны.

В соответствии с принципами централизации плана ГОЭЛРО создаваемые теперь единые системы снабжения нефтью, природным газом практически охватывают всю территорию страны. Принципы ГОЭЛРО находят отражение в современной системе комбинированного производства электроэнергии и тепла (теплофикации). Обеспечивая централизованным теплоснабжением больше половины потребностей народного хозяйства в паре и горячей воде, советская энергетика выходит по этому показателю на первое место в мире [19].

Система централизованного снабжения электроэнергией, газом, нефтью и тепловой энергией и взаимодействующая с ней система железнодорожных перевозок топлива объединила топливно-энергетическое хозяйство в единую отрасль материального производства — единую большую систему. Планомерное развитие энергетики обеспечивается возможностями социалистической системы. При этом большое значение для развития ОЭС имеют методы транспортировки топлива.

Разумеется, что при прогнозировании на несколько десятков лет приходится учитывать возможность открытия новых месторождений энергоресурсов и разработки новых методов транспортировки топлива или электроэнергии и усовершенствования существующих. Все это может сказаться на структуре системы, меняя положение станций и направление электропередач. Весьма существенное влияние может также оказать изменение технико-экономических показателей атомных электростанций, менее связанных с местными условиями, мало зависящих от расстояния до мест добычи ядерного топлива. Все высказанные соображения показывают необходимость разработки и сопоставления многочисленных вариантов топливно-энергетического баланса. При этом приобретает особое значение разработка математических моделей и методов оптимизации электроэнергетики.

Энергетика, как большая сложная система, переходящая в кибернетическую систему, требует при своем развитии решения ряда задач: разработку методологии планирования поэтапного развития подсистем и смежных больших систем с учетом обратных связей между ними; планирование и проектирование развития больших энергетических систем должно учитывать задачи эксплуатации, анализа режимов, пути использования будущих сетей и установок (определение условий поддержания и распределения реактивной мощности, выявление средств оперативного управления и т. д.).

Особенно существенно подчеркнуть необходимость рассмотрения энергетических систем с учетом вероятностного характера и неполноты исходной информации, относящейся к нагрузкам, к определению ресурсов, а также к экономическим показателям.

Решение этих задач тем более важно, что дальнейший количественный рост энергетики будет сопровождаться и качественными изменениями в ней. Характерен, например, дальнейший рост централизации энергоснабжения, которая в перспективе должна неизменно возрастать; дальнейший рост атомной энергетики должен быть обеспечен ростом мощности агрегатов и станций, так как только этим путем возможно их существенное удешевление. Увеличение мощности требует резкого увеличения надежности оборудования. Это относится и к теплоэнергетическому, и к гидроэнергетическому оборудованию, ориентирующемуся на все возрастающие мощности

[19] Л. А. Мелентьев, Свет ГОЭЛРО, «Известия», 25 марта 1967 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

отдельных агрегатов и станций в целом. Например, для Саяно-Шушенской ГЭС создаются уникальные по своей конструкции турбины — 650 тыс. *квт*[20]. Роль гидростанций, обеспечивающих системы пиковой мощностью, не исчерпывается долей их участия в энергетическом балансе страны. Однако при нахождении оптимальных пропорций и соотношений гидроэнергетическое строительство должно рассматриваться только как часть общей проблемы развития водного хозяйства; гидроэнергетика должна осуществлять связи двух крупнейших народнохозяйственных подсистем: энергетической и водохозяйственной, с учетом весьма существенного влияния грандиозных водохранилищ ГЭС на биосферу, изменение баланса плодородных и занятых под технические нужды земель страны и т. д. Увеличение единичной мощности тепловых электростанций, изменения в их конструкции, местоположении должны производиться не только исходя из чисто энергетических и энергосистемных показателей, но в весьма значительной мере из таких соображений, как экономия земли, загрязнение воздуха, использование воды и т. д.[21]. Количественные и качественные изменения в энергетике требуют новых методических и практических приемов технико-экономического анализа, установления критериев оптимизации совершенствования ее способов.

Оптимизационные задачи, связанные с воздействием технических сооружений на биосферу, с влиянием на демографические и социальные факторы, возникающие во всех областях энергетики, проявляются в необходимости учета все большего количества глубоких обратных связей внутри ЕЭС и учета того, что сама ЕЭС, будучи большой системой, является одновременно и подсистемой глобальной системы, включающей как биосферу, так и народное хозяйство в целом.

Оптимизация энергетических систем, как работающих, так и планируемых, должна, следовательно, проводиться в духе основных принципов ГОЭЛРО, прежде всего требующих комплексного подхода.

Напомним, какое внимание такому подходу придавал В. И. Ленин, который еще в 1921 г., когда связь отдельных подсистем народного хозяйства была несравненно слабее, чем сейчас, писал председателю правления Азнефти: «Правильно ли ставится в Баку вопрос о нефти с точки зрения согласования разных сторон народного хозяйства? Ведь край богатейший: леса, плодородная (при орошении) земля и т. п. Качаем воду (с нефтью) и не употребляем эту воду на орошение, которое бы дало гигантские урожаи сена, риса, хлопка? Не используем «норда» для ветряных двигателей? Но главное, конечно, продовольствие, орошение. Можно ли развить нефтепромышленность, не развивая орошения и земледелия вокруг Баку? Думает ли кто и работает ли кто над этим как следует»[22]. В настоящее время уже сами масштабы энергетического строительства указывают на недопустимость частного подхода к планированию энергетики.

Достаточно хотя бы напомнить, что для того чтобы вводить в 1970—2000 гг. намеченные мощности, необходимы огромные строительные работы[23]; так за 30 лет придется перерабатывать примерно 35 млрд. *м*³ земли (220 Панамских каналов или 233 Куйбышевских ГЭС), 2 млрд. *т* бетона (в 330 раз больше, чем на Братской ГЭС), более 100 млн. *т* металла (почти весь объем стали, выплавленной в 1967 г. в СССР).

Правильность использования ресурсов, очередности сооружения энергетических объектов, сочетания развития по времени и размещения по территории страны тепловых, гидравлических, атомных станций — все это имеет большое значение для того, чтобы от той доли средств общего бюджета страны, которая может быть расходуема на энергетику, получить максимальный технико-экономический эффект. Для получения этого эффекта необходимо учитывать, что энергетическая система по своей природе, по характеру взаимосвязей элементов, технологическому процессу и целям управления относится к большим технико-экономическим развивающимся системам. Наличие цели управления, обратных связей и связей между подсистемами заставляет рассматривать эту систему как **кибернетическую**[24]. Энергетические системы имеют все признаки физико-технических и экономических систем; физико-технические и экономические свойства обнаруживаются и в действующей системе во время ее эксплуатации и при планировании ее развития. Поэтому нельзя жестко разделить их, хотя планирование и прогнозирование в большей мере лежит в сфере экономики[25].

Специфические трудности комплексной оптимизации связаны также с колоссальной протяженностью ЕЭС Советского Союза, ее многогранным влиянием на все стороны жизни и деятельности населения страны.

Проблемы оптимального управления режимами уже существующих систем оказываются все более острыми, поскольку при развитии систем все в большей мере выявляется, что обеспечение надежности электроснабжения потребителей, повышение эффективности использования имеющихся

---

[20] Агрегаты для Саяно-Шушенской ГЭС. «Правда», № 14, 14 января 1970 г.

[21] По некоторым подсчетам при сохранении в качестве типовых современных электростанций той же мощности потребовалось бы отвести под энергетические нужды территорию почти равную территории Бельгии. Необходимо резкое увеличение единичных мощностей. Потери тепла с охлаждающей конденсаторы водой, изменяющие микроклимат, и количество необходимой воды станут неприемлемыми, если не перейти к усовершенствованным градирням, и т. д. Настоящие примеры приводятся не для дискуссии абсолютных цифр, а только для иллюстрации значения комплексного подхода (см. работы: А. А. Маркин. Качественные сдвиги в энергетике до 2 000 г., Сборник АН СССР, 1969; А. А. Маркин, Проблемы энергетики коммунизма, «Экономика строительства», 1967, № 6).

[22] В. И. Ленин, Соч., т. 52, стр. 124.

[23] См. упомянутые выше работы А. А. Маркина по прогнозированию энергетики.

[24] В. А. Веников, Кибернетика энергетических систем, сб. «Кибернетика на службу коммунизма», Под ред. А. И. Берга, т. I, Изд. АН СССР, 1961.

[25] Л. А. Мелентьев, О формировании теории управления большими системами в энергетике, Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1960, № 4.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

энергетических ресурсов, т. е. оптимизация управления, оказывается равносильна выдаче потребителям некоторой дополнительной мощности. Оптимизация в какой-то мере отвечает также эффекту, получаемому при сооружении некоторых дополнительных энергетических установок.

Вопросы оптимизации развития систем и вопросы оптимизации режимов безусловно имеют свои особенности, но они имеют и много общего. Общее заключается прежде всего в том, что электроэнергетическая система всегда должна рассматриваться как сложная система с обратными связями и с взаимодействием большого количества факторов, влияние которых необходимо анализировать во всей их совокупности, реализуя кибернетический подход к задачам перспективного планирования, проектирования, текущего планирования, задачам оптимизации эксплуатационных режимов и, наконец, применения методов кибернетики к задачам собственно управления системой в ее нормальных и аварийных режимах. Такой же подход должен осуществляться при решении задач надежности.

Проблема надежности в связи с возрастающей ролью электроэнергетики в жизни страны становится все более и более актуальной. Появляются требования к надежности работы объединенных систем, к разработке методов анализа их работы, способов предотвращения аварий, и выясняется необходимость в создании надежных методов управления электроэнергетическими системами в нормальных режимах и при появлении аварийных ситуаций. В проблеме надежности имеется, по крайней мере, четыре аспекта, рассмотрение которых, несмотря на их существенные различия, может и должно проходить на общей методологической основе. Это рассмотрение надежности при

эксплуатации систем;

оценке результатов расчета и эксперимента;

оценке проектных разработок электросистем и их элементов;

прогнозировании и планировании развития систем.

Задачи надежности во всех аспектах имеют в своей основе неполную информацию и вероятностно-заданные параметры. Трудность получения полных законов распределения случайных событий, характеризующих надежность, приводит к необходимости ограничиваться некоторыми условно выбранными показателями.

Рассматривая надежность в аспекте эксплуатационных и проектных задач, следует различать: бесперебойность или непрерывность электроснабжения, понимая под этим обеспечение энергией, удовлетворительной по качеству в любой момент времени всех потребителей независимо от каких-либо случайных изменений в системе; живучесть энергосистемы, понимая под этим способность системы не допускать развития аварий и продолжать работу после повреждений, являющихся резкими возмущениями режима всей системы, выводящими из строя отдельные элементы системы.

Обеспечение запаса по статической устойчивости электрических систем является необходимым показателем бесперебойности, а обеспечение запаса по динамической устойчивости — необходимым показателем живучести энергосистемы.

Показатели устойчивости и соответствующие запасы, определяемые из общих технико-экономических условий работы систем, не являются, однако, единственными или в какой-либо мере исчерпывающими характеристиками бесперебойности, живучести и, тем более, надежности в целом.

Все показатели надежности тесно связаны не только с техническими показателями работы системы, но и с ее экономическими характеристиками, и проблема **надежности** является технико-экономической проблемой комплексного характера. Вопрос о характеристиках надежности подлежит исследованию и проработке с тем, чтобы установить действительно объективные показатели надежности, которые должны отвечать упомянутым выше четырем аспектам надежности и, имея общую методологическую основу, отражать конкретные особенности этих аспектов, удовлетворяя задачам практического использования получаемых критериев.

Особенности энергетики, как науки и специфической отрасли техники, не позволяют переносить на электрические системы понятия бесперебойности, живучести, качества работы (в установившихся и, тем более, переходных режимах), заимствованные из других отраслей технических наук. Вопросы надежности при эксплуатации систем и их проектировании не могут быть сведены к вероятному числу отключений элементов системы и отключению потребителей: понятие надежности включает и понятие качества, критерии которого применительно к электроэнергетической системе еще нуждаются в разработке и точном определении. Однако можно утверждать, что они должны во всех случаях носить интегральный характер. Так, система критериев надежности, подлежащая разработке, должна учитывать экономические факторы не только в виде стоимостных показателей, отраженных в более чем условно определяемых ущербах, но и в виде некоторых средневзвешенных показателей, отражаемых в конечном счете в виде нормативных коэффициентов, определенных на основе теоретического анализа и статистических данных.

Необходимость увеличения надежности работы энергосистем вытекает из возрастающего значения электрификации в отдельных областях общественного производства и быта. В решении этой задачи велика роль противоаварийной автоматики[26], получившей в наших энергосистемах, начиная с 40-х годов, большое развитие, причем именно создание объединенных систем с единым управлением и общими резервами обеспечивали ее развитие и успех, исключив тяжелые системные аварии (подобные упоминавшимся выше авариям в США).

Эффективность противоаварийной автоматики, как показал опыт систем СССР, очень высока. Так, еще в годы войны уральская энергосистема после внедрения противоаварийной автоматики снизила аварийность, связанную с нарушениями параллель-

[26] Е. Д. Зейлидзон и др., Противоаварийная автоматика в энергосистемах СССР, «Электричество», 1970, № 3.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ной работы электростанций со 152 случаев в год до трех. В дальнейшем установки системной автоматики резко увеличили надежность электроснабжения потребителей и способствовали повышению надежности работы объединенных энергосистем.

В энергосистемах Советского Союза установлено более 4 000 комплектов устройств автоматической разгрузки при снижении частоты и включения при восстановлении частоты, дающих не более 2% ошибочных действий. Примерно в 3 раза сократили число аварийных отключений 50 000 устройств автоматического повторного включения.

Автоматическое включение резерва, реализованное примерно в 30 000 установок, давало не более 4% случаев ложной работы. Большое значение имело также применение форсировки возбуждения регуляторов возбуждения, особенно сильного действия. Существенным для повышения надежности было использование кратковременных асинхронных режимов с последующей ресинхронизацией, результирующая устойчивость, прямой пуск и самозапуск асинхронных двигателей собственных нужд станций.

На электропередачах были установлены устройства, предотвращающие нарушения статической и динамической устойчивости, локализующие аварии.

Большое значение имело совершенствование методов и средств управления объединенными энергосистемами (в том числе централизованное диспетчерское управление), правильная организация планово-предупредительных ремонтов, профилактические испытания оборудования.

Значительную роль в повышении надежности энергосистем сыграло широкое внедрение быстродействующих релейных защит, специальных блокировок этих защит, предотвращающих их ошибки при качаниях и кратковременных перегрузках.

Идеи плана ГОЭЛРО и проблема дальнейшего оптимального развития ЕЭС. Развитие народного хозяйства будет происходить в условиях научно-технической революции при огромных масштабах будущего производства электрической энергии и тепла. Так, на 2000 г. называются цифры [27] от 7 000 до 10 000 млрд. *квт·ч* электрической энергии и до 10 млрд. *Гкал* — тепловой. При определении объема выработки энергии следует учитывать, что он является только частью общих показателей большой системы, куда энергетика входит как подсистема.

Вместе с тем современное прогнозирование развития, подобно плану ГОЭЛРО, должно иметь «некоторый оптимизм, из которого только и можно исходить для активной политики и государственного творчества» [28].

Проблема дальнейшего оптимального развития ЕЭС и топливно-энергетического хозяйства будет иметь еще большее значение для всех социалистических стран с плановой экономикой, но именно в этих странах возникают трудности, обусловленные, например, такими факторами, как система цен, которые в ряде случаев сильно отклоняются от цен оптимального плана, благодаря чему в расчеты стоимости, проводимые при планировании, закладываются неточные данные. Корректировка этих данных возможна на основе оптимального плана развития всего народного хозяйства и вытекающих из него цен. Существенно также, что все в большей мере будут проявляться факторы демографического характера, связи энергетической системы с биосферой [29], а также другими, неэнергетическими, подсистемами народного хозяйства.

Оптимизация планирования современной энергетической системы должна будет проводиться при учете всех этих особенностей и ее динамических свойств, проявляющихся, в частности, в том, что существующая структура энергетической системы влияет на структуру во всем рассматриваемом далее интервале времени.

Методические особенности рассматриваемых проблем проявятся в необходимости учета того, что основные функциональные связи и уравнения существенно нелинейны, а исходная информация в большинстве случаев имеет вероятностный характер.

Решение этих задач в настоящее время упрощается выделением этапов развития системы во времени и разделением ее в пространстве (например, раздельно проводится оптимизация для систем Центральной части Союза, Сибири, Юга и т. д.). Однако решение задачи по частям для будущих систем, все более становящихся системами кибернетического типа, является приближением, введение которого допустимо, если основные качества выделенных частей системы не изменяются существенно. Для этого в изучаемой системе необходимо найти наиболее слабые внутренние связи и разделять систему именно по ним.

При решении задач оптимизации будет возрастать значение математических моделей, выявляющих детерминированные и вероятностные факторы в развитии энергетических систем [30]. Исходная информация должна использоваться с учетом ее равноточности и влияния возможной погрешности на технико-экономические показатели характеристики. Модели [31] должны отражать особенности развития энергетической системы во времени и допускать исследование характера решений [32] (проверку другими методами), позволять апробацию принятых

---

[27] А. А. Маркин, Проблемы энергетики коммунизма, «Экономика строительства», 1967, № 6; Сб. «Перспективы энергетики СССР». Изд. АН СССР, 1969.

[28] Труды ГОЭЛРО. Материалы по электрификации отдельных районов, изд-во «Наука», 1964, стр. 72.

[29] Например, уже сейчас в США не хватает воды и приходится применять специальные меры для ее накопления и сохранения. Отдельные районы нашей страны уже сталкиваются с рядом аналогичных проблем.

[30] Ю. П. Сыров и Ш. С. Сурквавидзе, К оптимизации длительных режимов электроэнергетических систем, «Энергетика и транспорт», 1969, № 3; Попырин А. С., Вопросы точности постановки и решения задачи комплексной оптимизации параметров теплоэнергетических установок, «Энергетика и транспорт», 1969, № 4.

[31] В. А. Веников и Д. А. Арзамасцев, Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1970, № 2.

[32] Л. А. Мелентьев, О роли математических моделей и информации в управлении большими системами в энергетике, Изв, АН СССР «Энергетика и транспорт», 1969, № 5.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

программ и т. д. Модели развития энергетических систем должны правильно отражать динамику роста энергетических, тепловых и других нагрузок, учитывая характер их развития, а также динамику режима электропотребления. Должны быть учтены ограничения объемов используемых энергетических ресурсов, а также непостоянство параметров энергетических установок и изменение во времени их технико-экономических показателей [33].

Большое значение в рассматриваемых проблемах имеет эквивалентирование сложных систем по техническим или экономическим показателям, сохраняющее основные свойства и качества систем. При определении расчетных показателей планируемых энергосистем необходимо учитывать, что в социалистическом народном хозяйстве попрежнему будут сочетаться принципы необходимости и случайности.

Вопросы планирования и тем более прогнозирования энергетики в настоящее время несравненно в большей степени, чем во время составления плана ГОЭЛРО, связаны с тем, что энергетика, как большая система, не только детерминированна, но и во многом стохастична [34]. Так, развивающуюся систему можно считать частично детерминированной, поскольку ее развитие, связанное с производительными силами страны, запланировано. Однако на детерминированный процесс накладывается ряд случайных факторов, например, выявление новых природных энергетических ресурсов, факторы технического прогресса в народном хозяйстве, изменяющиеся геофизические процессы (речной сток, температура наружного воздуха и т. д.), социальные изменения (определяющие продолжительность рабочего дня, производительность и энергоемкость труда и т. д.). Может оказывать определенное влияние международная обстановка, иногда заставляющая изменять планы развития народного хозяйства, размещения производительных сил и т. д. Нельзя не считаться и с тем, что при решении задач энергетики приходится иметь дело и со случайными субъективными факторами, такими как погрешности планирования народного хозяйства в целом и в проектировании отдельных его объектов, в определении запасов топливных ресурсов. Поэтому употреблять термин «оптимизация» без уточнения тех параметров, по которым оптимизация происходит (без критерия оптимальности), не имеет смысла.

Вид функциональной зависимости реальных критериев оптимальности от ряда факторов существен при принятии решений по развитию системы [35]. То обстоятельство, что минимизирующий функционал вблизи его теоретического оптимума носит весьма пологий характер, а исходная информация имеет вероятностные свойства, позволяет определять только область оптимальных вариантов, но не единственный оптимальный вариант развития энергетической системы. Пологость минимума означает наличие области совокупности равновероятных и практически равноэкономических решений. Формальное нахождение оптимального варианта и соответственно формально оптимального — единственного плана — было бы неправильно. Практическая оптимизация должна на основе многофакторного анализа указывать оптимальную, по тем или иным установленным показателям, стратегию развития объединенной энергетической системы. Исследования должны указать наиболее экономичные последовательности развития основных энергетических объектов и темпы использования заданных энергетических ресурсов в разных изменяющихся условиях.

Все сказанное показывает, что идеи плана ГОЭЛРО о комплексном подходе к энергетике получают приложение к совокупности сложных развивающихся систем, какими становятся энергетические системы, связанные с топливным хозяйством, нефтеснабжающей, газоснабжающей, теплоснабжающей и другими подсистемами.

При технико-экономических расчетах становится явно необходимо более полно применять разработанные в последние годы приемы экономического анализа (расчеты нормативной отдачи основных фондов, учет дифференциальной ренты на природные условия месторождений ископаемого топлива, стоимость земли и др.).

Вопросы управления режимами системы в ближайшем и тем более несколько отдаленном будущем должны получить существенное развитие и принципиальные изменения. Так, новые мощные агрегаты электрических систем потребуют связанного многомерного регулирования по группам параметров (например, одновременное воздействие на характеристики регуляторов частоты и скорости, на систему возбуждения генератора и быстродействующие устройства, управляющие нагрузочными сопротивлениями, и т. д.). Задачи как управления текущими установившимися режимами, так и переходными должны решаться с учетом неопределенности исходных параметров и влияния вероятностных факторов. Это требует разработки такой методики анализа режимов и их ведения, которая давала бы не «оптимальную точку», а ту оптимальную стратегию, идеи которой в начальном виде фигурировали в плане ГОЭЛРО. В дальнейшем для определения структур систем управления и регулирования должны будут широко применяться методы синтеза, причем должны будут найти применение устройства с переменной (меняющейся в зависимости от состояния системы) структурой и коэффициентами усиления, пока еще не получившие сколько-нибудь широкого распространения в энергетике.

Для сложных систем должны будут применяться системы экстремального регулирования, построенные с учетом принципов взаимной корреляции. Задача анализа устойчивости таких систем, управление которыми все в большей степени будет ста-

---

[33] Методы математического моделирования в энергетике, Сборник под ред. Л. А. Мелентьева, АН СССР СибНИИ.

[34] В. А. Веников и Л. А. Мелентьев, О некоторых современных проблемах энергетики в свете Ленинских идей ГОЭЛРО, Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1969, № 6.

[35] Ю. Н. Астахов и др., Характеристика и взаимосвязь задач управления Единой энергетической системой СССР на различных временных и территориальных уровнях, Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1969, № 6.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

новиться кибернетическим, существенно изменится. Она будет сводиться не к тому, чтобы с наибольшей возможной точностью описать процессы, исходные параметры которых заданы, а к тому, чтобы управлять этими процессами, проводя корректировки управляющих устройств в функции изменений режима с тем, чтобы в результате поведение системы отвечало бы оптимальной области. Для управления сложной электрической системой необходимо иметь возможность предвидеть процесс, т. е. заранее знать, куда необходимо вести управляемую систему [36]. Поэтому постановка проблемы оптимизации «в динамике» установившихся и переходных процессов системы окажется далее особенно важной. До настоящего времени не существует законченной теории оптимального поведения электрической системы в условиях переходных процессов. Те показатели оптимизации, которые до настоящего времени предлагались, являются или частными, справедливыми для простой системы, или перенесенными в энергетическую систему по аналогии с другими системами (например, скорость затухания). Единственным правильным подходом к этой проблеме будет намечающаяся сейчас оптимизация, исходя из обеспечения **потребителя электроэнергией определенного качества при заданной бесперебойности и живучести энергосистемы.**

Сформулированная постановка вопроса об оптимизации установившихся и переходных процессов потребует разработки новых, адекватных физико-техническому содержанию задачи, математических методов анализа.

Роль упоминавшегося выше кибернетического подхода к управлению энергетической системой будет еще более возрастать в связи с появлением новых источников электрической энергии и новых методов передачи и распределения электроэнергии. Например, когда в будущем (достаточно, видимо, отдаленном, но уже не относящемся к фантастике) будет возможно получение энергии за счет синтеза легких элементов, **на первый план во всех энергетических проблемах выдвинется управление выработкой энергии.**

Таким образом, вопросы управления энергетической системой [37] приобретают глобальный характер, становясь центральным звеном в цепи энергетических проблем.

В заключение подчеркнем, что рассмотренный выше подход к проблемам настоящего и будущего развития энергетики оказался так созвучен принципам плана ГОЭЛРО потому, что в нем были воплощены диалектическая методология и ленинский многоаспектный подход к сложным проблемам. В связи с этим и на новом техническом и экономическом уровне современной и будущей энергетики идеи плана ГОЭЛРО остаются ведущими.

В настоящее время необходимо воплотить эти идеи в новом народнохозяйственном комплексном плане, подобном плану ГОЭЛРО, но учитывающем технический прогресс во всех в большей мере связанных в единую систему областях народного хозяйства. Такой план должен охватить дальнейшее развитие энергетики, как большой системы, от наших дней до начала 21-го столетия. Этот план будет достойным продолжением ленинского плана ГОЭЛРО.

[36] В. А. Веников, Применение кибернетики в электрических системах. В книге «Кибернетику на службу коммунизму», Сборник статей под ред. А. И. Берга, Госэнергоиздат, 1961.

[37] Ю. Н. Астахов и др., О проблеме управления Единой энергетической системой СССР, «Энергетика и транспорт», 1969, № 6.

✧ ✧ ✧

УДК 621.316.726:621.316.728

Цифровой регулятор частоты и перетоков активной мощности для объединенных энергосистем

В. Г. ДАВЫДОВ, В. Е. КУПРИЯНОВ, Р. П. СТРОГАНОВ, И. Л. ТУККЕЛЬ, Е. И. ЮРЕВИЧ
Ленинград
М. Д. КУЧКИН
Москва

В связи с созданием Единой энергосистемы Советского Союза (ЕЭС СССР), происходящем на базе мощных объединенных энергосистем (ОЭС), весьма актуальной становится разработка комплексной системы автоматического регулирования частоты, обменной мощности ОЭС и ограничения перетоков мощности по слабым и относительно сильным, но полностью загруженным внешним и внутренним связям ОЭС.

В настоящее время в ряде ОЭС системы автоматического регулирования частоты, обменной мощности и ограничения перетоков мощности по отдельным связям реализуются на базе аналоговых систем регулирования. Однако опыт проектирования и эксплуатации указанных систем регулирования показывает, что полноценное решение задач, стоящих перед системами регулирования частоты и мощности ОЭС и ЕЭС СССР в целом, приводит к алгоритмам управления, которые должны учитывать изменения характеристик регулирующего объекта, значение регулировочного резерва каждой ОЭС, значение резерва пропускной способности связей между частями ЕЭС и ОЭС, текущее отклонение регулируемых параметров и другие факторы.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Реализация такого рода алгоритмов практически возможна только на базе цифровых управляющих машин, работающих в реальном масштабе времени. Для использования цифровых управляющих машин в качестве центральных системных регуляторов ОЭС необходимо обеспечить их высокую надежность, удобство связи с объектом, с оператором и т. п. Эти задачи в полной мере могут быть решены лишь при условии накопления опыта проектирования и эксплуатации подобных регуляторов.

В ЛПИ им. М. И. Калинина был разработан и изготовлен цифровой регулятор частоты и активной мощности ЦР-2-ЛПИ, представляющий собой специализированную управляющую машину.

Функциональная схема и структура регулятора. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к автоматическому регулированию частоты и перетоков активной мощности [Л. 1], управляющий сигнал регулятора (в относительных единицах):

$$F = k_{\text{ч}}\Delta f + k_{\text{с}}\Delta P_{\text{с}} + \int_0^t (k_{\text{и.ч}}\Delta f + k_{\text{и.с}}\Delta P_{\text{с}})\,dt + \\ + \sum_{j=1}^{n} \varphi_j \left(k_{\text{п}j}\Delta P_{\text{п}j} + \int_0^t k_{\text{и.п}j}\Delta P_{\text{п}j}dt \right), \qquad (1)$$

где Δf — отклонение частоты сети от заданного значения; $\Delta P_{\text{с}}$ — отклонение суммы обменных мощностей от заданного значения; $\Delta P_{\text{п}\,j}$ — отклонение текущего значения перетока мощности по j-й линии $P_{\text{п}\,j}$ от заданного значения (уставки) ограничения $P_{\text{огр}\,j}$; j — индексы внешних и внутренних линий ОЭС, требующих ограничения передаваемой по ним мощности; $k_{\text{ч}}$, $k_{\text{с}}$, $k_{\text{п}}$ — коэффициенты передачи регулятора по отклонениям регулируемых величин — частоты, суммы обменных мощностей, перетока мощности; $k_{\text{и.ч}}$, $k_{\text{и.с}}$, $k_{\text{и.п}}$ — коэффициенты передачи регулятора по интегралам от отклонений регулируемых величин, $1/сек$ (в дальнейшем вместо этих коэффициентов будут употребляться обратные им коэффициенты: $T_{\text{и.ч}} = 1/k_{\text{и.ч}}$, $T_{\text{и.с}} = 1/k_{\text{и.с}}$, $T_{\text{и.п}} = 1/k_{\text{и.п}}$); φ_j — коэффициент, определяющий алгоритм работы при ограничении перетока мощности:

$$\varphi_j = \begin{cases} 0 \text{ при } |P_{\text{п}j}| < |P_{\text{огр}j}| \text{ и } \int_0^t \Delta P_{\text{п}j}dt = 0; \\ 1 \text{ при } |P_{\text{п}j}| \geqslant |P_{\text{огр}j}| \text{ или } \int_0^t \Delta P_{\text{п}j}dt \neq 0. \end{cases}$$

Управляющее воздействие F распределяется между регулирующими станциями согласно коэффициентам долевого участия γ_{ls}, изменяющимся от -1 до $+1$. В регуляторе предусмотрена возможность изменения в процессе непрерывной работы коэффициентов, уставок и зон нечувствительности в отдельных каналах. Функциональная схема регулятора приведена на рис. 1.

Блок A выявляет отклонение текущего значения частоты сети $f_{\text{с}}$ от заданного значения. Измерение осуществляется путем заполнения счетчика импульсами, стабилизированными кварцем генератора, в течение времени, кратного периоду частоты сети. Если предварительно в счетчик записать в дополнительном коде число

$$N_{\text{уст}} = \frac{m}{f_{\text{уст}}} f_{\text{з}},$$

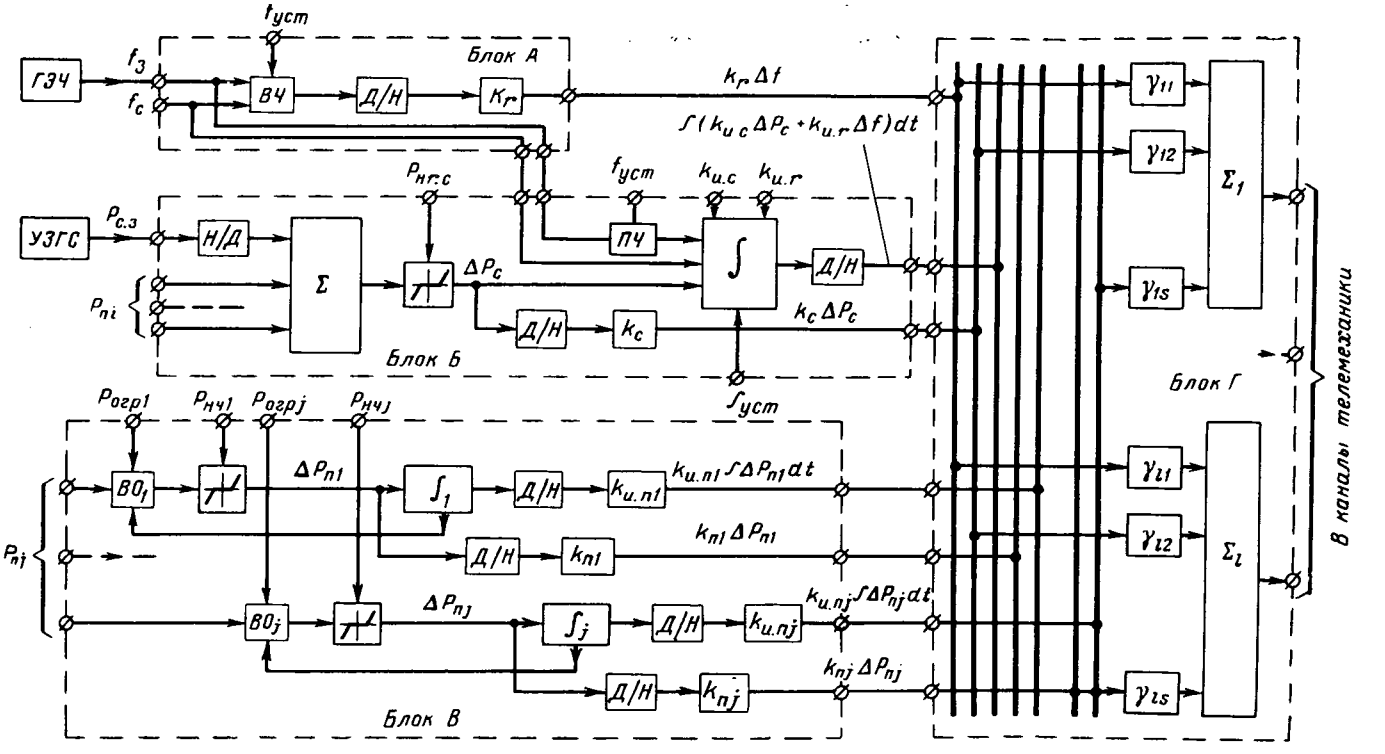


Рис. 1. Функциональная схема цифрового регулятора частоты и перетоков активной мощности.

ВЧ — выявитель частоты; Σ — сумматор; ∫ — интегратор; *ГЭЧ* — генератор эталонной частоты; *Д/Н* и *Н/Д* — преобразователи сигналов; *УЗГС* — устройство задания графика сальдо; $P_{\text{нч.с}}$ — уставка нечувствительности по обменной мощности; *ПЧ* — преобразователь частоты; $P_{\text{нч}}$ — уставка нечувствительности по ограничиваемому перетоку; *ВО* — выявитель отклонения перетока мощности.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где m — число периодов сетевой частоты, используемых при измерении; $f_{уст}$ — заданное значение частоты (эталонное); $f_з$ — частота импульсов заполнения, то по окончании периода измерения в счетчике окажется число

$$\Delta N = -\frac{m}{f_{уст}} f_г + \frac{m}{f_с} f_з = -mf_з \frac{\Delta f}{f_{уст}^2 + f_{уст}\Delta f},$$

где $\Delta f = f_с - f_{уст}$.

В обычных условиях при $\Delta f \ll f_{уст}$

$$\Delta N \approx -\frac{mf_з}{f_{уст}^2}\Delta f.$$

Блок *Б* предназначен для формирования второго и третьего слагаемых управляющего сигнала (1). Отклонение суммы обменной мощности (сальдо мощности) от заданного значения вычисляется путем суммирования кодов мощностей регулируемых линий, передаваемых цифровой системой телеизмерения, с дополнительным кодом заданного значения сальдо мощностей $P_{с.з}$. Заданное значение сальдо мощностей подается в виде напряжения постоянного тока с устройства задания графика сальдо (УЗГС) на регулятор, входной преобразователь (Н/Д) которого формирует дополнительный код, соответствующий этому напряжению. Затем с помощью специальной логической схемы вводится требуемое значение зоны нечувствительности по сальдо. В результате отклонение текущего значение сальдо мощностей от уставки $P_{с.з}$

$$\Delta P_с = \xi_с \left\{ \sum_{i=1}^{m} P_{пi} - P_{с.з} - P_{нч.с} \operatorname{sign}\left(\sum_{i=1}^{m} P_{пi} - P_{с.з} \right) \right\},$$

причем

$$\xi_с = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{при } \left| \sum_{i=1}^{m} P_{пi} - P_{с.з} \right| < P_{нч.с} \\ 1 & \text{при } \left| \sum_{i=1}^{m} P_{пi} - P_{с.з} \right| \geqslant P_{нч.с} \end{array} \right\},$$

где $P_{п\,i}$ — текущее значение перетока мощности по i-й внешней линии; i — индексы внешних линий ОЭС; $P_{нч.с}$ — установленное значение зоны нечувствительности по каналу сальдо мощностей.

Интегральная составляющая управляющего сигнала — третье слагаемое в (1) — формируется по методу прямоугольников, т. е. вычисление интеграла заменяется суммированием:

$$\int_0^t (k_{и.ч}\Delta f + k_{и.с}\Delta P_с)\,dt \approx \sum_{l=1}^{n} (k_{и.ч}\Delta f_l + k_{и.с}\Delta P_{сl})\,T_ц,$$

где $T_ц = 1/f_ц$, $f_ц$ — частота квантования сигнала по времени; Δf_l и $\Delta P_{с\,l}$ — отклонения частоты и суммы мощностей в l цикле вычислений. Умножение обеих подынтегральных составляющих Δf_l и $\Delta P_{с\,l}$ на соответствующие коэффициенты осуществляется путем последовательного суммирования частичных произведений.

Блок *В* состоит из набора одинаковых блоков ограничения перетоков мощности по внешним или внутренним связям. Отклонение текущего значения перетока мощности ограничиваемой линии от заданного значения $P_{огр}$:

$$\Delta P_{пj} = \xi_j \{P_{пj} - P_{огрj} - P_{нчj} \operatorname{sign}(P_{пj} - P_{огрj})\},$$

где

$$\xi_j = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{при } |P_{пj} - P_{огрj}| < P_{нчj} \\ 1 & \text{при } |P_{пj} - P_{огрj}| \geqslant P_{н.чj} \end{array} \right\};$$

$$P_{огрj} = \left\{ \begin{array}{ll} P_{огрj_1} & \text{при } P_{пj} \geqslant 0 \\ P_{огрj_2} & \text{при } P_{пj} < 0 \end{array} \right\};$$

$P_{нч\,j}$ — установленное значение зоны нечувствительности по каналу ограничения перетока мощности.

Для повышения среднего значения передаваемой по линии мощности требуется обеспечить максимальную скорость отработки возмущений. В связи с этим ограничитель перетока должен удовлетворять противоречивым требованиям максимального быстродействия при отработке скачкообразного возмущения и невмешательство при колебаниях с периодом одной минуты и менее. В отличие от скачкообразных возмущений амплитуда колебаний перетока мощности с периодом меньше одной минуты не превосходит (0,3—0,4) % от мощности меньшего из энергообъединений [Л. 1]. Как показано в [Л. 2], выполнение таких требований обеспечивает только регулятор перетока мощности с автоматическим изменением значений коэффициентов регулятора $k_{п\,j}$, $k_{и.п\,j}$ в зависимости от текущего значения $\Delta P_{п\,j}$. При больших отклонениях перетока мощности регулятор обеспечивает «сильное» воздействие, приводящее к максимально быстрой отработке возмущения. При уменьшении $\Delta P_{п\,j}$ под действием регулятора до 0,4% от мощности меньшего из энергообъединений специальная логическая схема производит переключение настроек регулятора на значения, при которых обеспечивается коррекция низкочастотной части возмущения, без вмешательства в колебания перетока мощности с периодом меньше одной минуты. В остальном алгоритм работы блока ограничения перетока совпадает с алгоритмом блока сальдо мощностей.

Блок *Г* предназначен для распределения управляющего воздействия между регулирующими электростанциями и согласования с существующей аналоговой аппаратурой телерегулирования. Из-за необходимости формирования выходного сигнала регулятора в виде напряжения постоянного тока, а также из-за простоты выполнения операции умножения в аналоговой форме все составляющие управляющего сигнала в этом блоке преобразуются из цифрового кода в напряжение постоянного тока. Умножение их на коэффициенты долевого участия $\gamma_{l\,s}$ осуществляется с помощью потенциометрических схем. Суммирование составляющих сигнала регулятора производится на усилителях постоянного тока.

Ниже приведены основные параметры цифрового регулятора ЦР-2-ЛПИ. Значения коэффициентов даны при воздействии регулятора на регулирующие станции, сумма мощностей которых составляет 10% от мощности регулируемого энергообъединения.

Диапазоны изменения коэффициентов: $k_ч = 0—5$; $k_с = 0—1{,}5$; $k_п = (-10)—(+10)$; $k_{и.ч} = (0—1{,}8)$ *сек*$^{-1}$;

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$k_{и.с}=(0—0{,}45)$ *сек*$^{-1}$; $k_{и.п}=(0—0{,}9)$ *сек*$^{-1}$; $\gamma_{l\,s}=$ $=(-1)-(+1)$.

Диапазон изменения уставок частоты сети, *гц*	50±0,5
Линейный участок измерения отклонения частоты, *гц*	±0,5
Погрешность измерения отклонения частоты к номинальной частоте, %	±0,02
Диапазон изменения зоны нечувствительности по сальдо мощностей и ограничиваемым перетоком, %*	от 0 до 100
Дискретность выходных сигналов по уровню, %*	не более 1,5
Время обработки сигналов регулятором, *сек*	0,1
Частота квантования по времени, *гц*	5
Диапазон изменения выходных сигналов, *в*	±5
Напряжение питания, *в*	220±20
Потребляемая мощность, *вт*	200

* В процентах к максимальным значениям соответствующих сигналов.

Цифровой регулятор ЦР-2-ЛПИ выполнен на феррит-диодных и феррит-транзисторных ячейках повышенной надежности. Специальная схема обеспечивает сохранение всей текущей информации при отключении питающего напряжения. При неисправностях в каналах телеизмерения в регуляторе сохраняются предыдущие значения входных и выходных величин.

Экспериментальная проверка регулятора. В 1968 г. регулятор был установлен на диспетчерском пункте Ленэнерго и, работая в режиме как регулирования частоты, так и ограничения перетока мощности по межсистемной связи Северо-Запад—Центр, показал высокие качества в реальных условиях эксплуатации. Предварительно регулятор ЦР-2-ЛПИ успешно прошел в течение года типовые стендовые испытания, работая в замкнутом контуре с математической моделью энергосистемы.

Ниже приводятся результаты испытаний. Испытания проводились как при изолированной работе ОЭС Северо-Запада, так и при ее параллельной работе с ОЭС Центра. При параллельной работе ОЭС имелась лишь одна межсистемная связь, однако, благодаря тому, что при вычислении суммы обменных мощностей перетоки мощности по остальным внешним связям ОЭС принимались равными нулю, алгоритм регулятора выполнялся полностью. Испытания удалось провести лишь в условиях относительной стабильности нагрузки в ОЭС Центра и Северо-Запада, так как мощность регулирующих станций была мала по сравнению с мощностью ОЭС. Схема испытаний представлена на рис. 2.

Регулирование перетока[1]. Была определена оптимальная настройка регулятора, дающая апериодическую отработку скачкообразного возмущения перетока: $T_{и.п}=40$ *сек*; $k_п=1{,}5$; $P_{нч}=0{,}3\%$ (в процентах мощности ОЭС Северо-Запада). Вид переходного процесса при такой настройке регулятора ЦР-2-ЛПИ показан на рис. 3. Скорость изменения мощности станций достигала максимально возможного значения, равного для участвовавших в регулировании ГЭС 3,5 *Мвт/сек*.

При значениях $T_{и.п}\leqslant 40$ *сек* и $P_{нч}=0$ переходный процесс проходит более интенсивно, но амплитуда колебаний перетока достигает 20 *Мвт*, а период — до 100 *сек*.

[1] В этом режиме регулирование частоты обеспечивалось станциями ОЭС Центра.

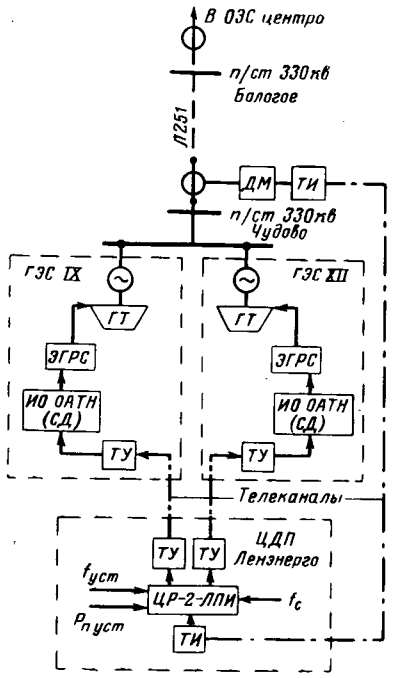


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического регулирования перетока мощности между ОЭС Северо-Запада и Центра.

ГТ — гидротурбина; *ЭГРС* — электрогидравлический регулятор скорости; *ИО ОАТН (СД)* — схема дифференцирования станционной части интегрального ограничителя перетоков; *ТУ*, *ТИ* — устройства телеуправления и телеизмерения; *ДМ* — датчик мощности; ЦР-2-ЛПИ — общесистемный цифровой регулятор частоты и перетоков активной мощности; $f_{уст}$ — уставка частоты; $P_{п.уст}$ — уставка перетока; $f_с$ — частота сети.

К уменьшению амплитуды колебаний (вплоть до апериодического переходного процесса) приводит увеличение параметра $T_{и.п}\geqslant 60$ *сек* или введение коррекции по первой производной от отклонения перетока или, наконец, введение зоны нечувствительности по перетоку мощности.

Выбор максимально допустимого значения $T_{и.п}$, равно как и зоны нечувствительности, определяется требованиями к системным регуляторам: подавлять колебания перетока с периодом 2—3 *мин* и более [Л. 1]. Амплитуда таких колебаний превышает (0,3—0,4) % от мощности меньшего объединения. Для связи между ОЭС Северо-Запада и Центра это составляет 16—20 *Мвт*.

Как показали испытания, подавление колебаний перетока мощности с периодом 2 *мин* и более происходило при настройке регулятора: $T_{и.п}=60$—80 *сек*; $k_п=1$; $P_{нч}=0$ или $T_{и.п}=40$ *сек*; $k_п=1{,}5$; $P_{нч}=0{,}3\%$.

Дальнейшее увеличение $T_{и.п}$ и $P_{нч}$ приводит к увеличению времени переходного процесса и уменьшению точности поддержания заданного значения перетока мощности.

Уменьшение параметра $T_{и.п}$, вызывая уменьшение длительности переходного процесса, увеличивает перерегулирование, что может быть устранено введением зоны нечувствительности. Оптимальная настройка, обеспечивающая апериодический переходный процесс длительности 40—45 *сек* определяется значениями: $T_{и.п}=30$—40 *сек*; $k_п=1{,}5$; $P_{нч}=0{,}3\%$.

Экспериментальная проверка схемы самонастройки контура ограничения перетока подтвердила результаты [Л. 2]. Изменение настройки в функции значения отклонения регулируемого перетока с $T_{и.п}=20$ *сек*; $k_п=3$ на $T_{и.п}=60$ *сек*; $k_п=1$ и обратно позволило как максимально быстро с допустимым перерегулированием (20%) отрабатывать скачкообразные возмущения перетока,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

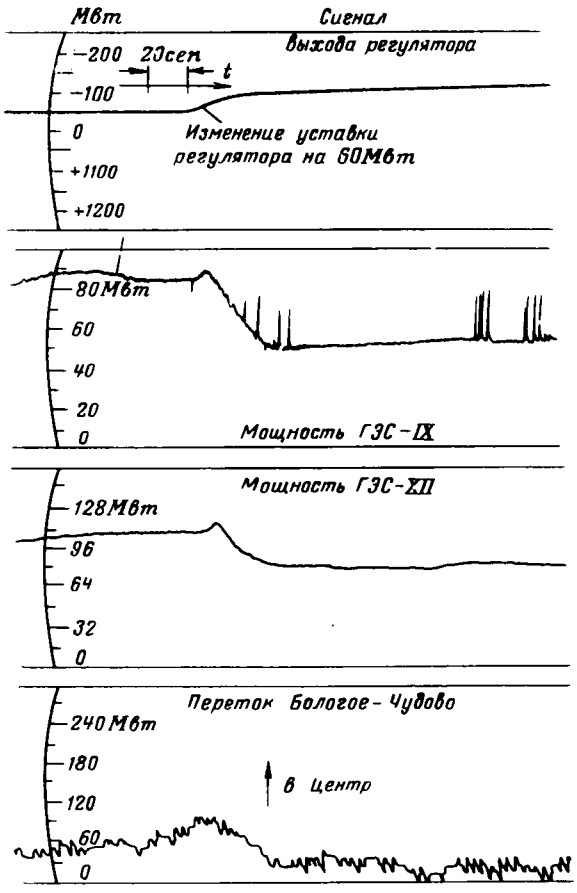


Рис. 3.

так и обеспечить требуемую точность (рис. 4). Время регулирования в этом случае составляло 30—35 *сек*, т. е. быстродействие превосходит максимальное из полученных при неадаптивном регулировании перетока (рис. 3).

Регулирование частоты и обменной мощности. Как показали испытания, при изолированной работе ОЭС Северо-Запада регулятор ЦР-2-ЛПИ обеспечивает астатическое регулирование частоты с требуемой точностью, обеспечивая невмешательство в колебания частоты с периодом 5 *мин* и менее [Л. 1]. При этом настройка $T_{и.ч}=10$ *сек*, $k_ч=0{,}1$ (статизм энергосистемы в этом режиме равнялся 10%) позволяет получить апериодический переходный процесс длительностью 90—100 *сек*. После определения оптимальных настроек контура регулирования частоты и контура регулирования перетока была проведена проверка работы регулятора в режиме совместного регулирования частоты и обменной мощности при параллельной работе ОЭС Северо-Запада и Центра. Связь между настройками регулятора по частоте и по обменной мощности в установившемся режиме определялась известным соотношением Гранера-Даррье [Л. 3]:

$$T_{и.с}=s_ω T_{и.ч}, \qquad (2)$$

где $s_ω$ — результирующий статизм системы, %.

Стремление получить переходный процесс оптимального качества приводит к несколько иному

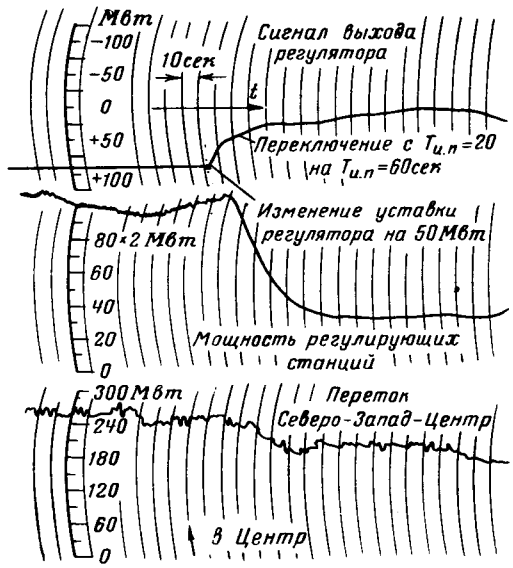


Рис. 4.

виду связи между настройками контуров регулирования [Л. 4 и 5]:

$$(1-3)T_{и.с}=s_ω T_{и.ч}.$$

В исследованном режиме $s_ω$ равен 8%. Тогда при $T_{и.ч}=10$ *сек*

$$(1-3)T_{и.с}=80 \text{ сек},$$

что соответствует определенной ранее оптимальной настройке контура перетока — $T_{и.п}=60$—80 *сек*. Таким образом, экспериментально подтверждается методика настройки подобных САР, заключающаяся в поочередной настройке каждого контура регулирования. Проведенные испытания подтвердили полную работоспособность цифрового регулятора в реальных условиях энергосистемы во всех режимах его работы, включая ограничение перетока, регулирование частоты, регулирование перетока и совместное регулирование частоты и обменной мощности. В течение всех испытаний (300 *ч*) не было ни одного отказа или отклонения параметров регулятора от исходных значений.

Выводы. 1. На базе алгоритмической и элементной структуры цифрового регулятора ЦР-2-ЛПИ возможна разработка промышленной серии общесистемных регуляторов частоты и активной мощности для крупных объединенных энергосистем.

2. Точность формирования управляющих сигналов в цифровом регуляторе превосходит точность подобных непрерывных регуляторов и ограничивается только выбранной разрядностью. Дискретный характер формирования управляющих сигналов при выбранных в цифровом регуляторе ЦР-2-ЛПИ значениях частоты квантования но времени и шага квантования по уровню не оказывает влияния на качество переходных процессов, что подтверждается также сравнением результатов с испытаниями подобных регуляторов непрерывного типа.

3. Экспериментально подтверждена и отработана предложенная методика настройки САР частоты

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

и обменной мощности как многосвязной системы. При этом зависимость качества регулирования перетока от величины параметра $T_{и.п}$ носит экстремальный характер.

4. Для обеспечения оптимального качества переходных процессов и требуемой точности поддержания перетока мощности во всем диапазоне изменения режима регулируемой линии в регуляторе введена самонастройка в функции от величины отклонения регулируемого перетока.

5. Формирование полного управляющего сигнала, содержащего пропорциональные и интегральные составляющие регулируемых величин, в дискретном виде позволит упростить станционную часть САР и повысить оперативность управления системой.

Литература

1. Кучкин М. Д. и Совалов С. А., Основные режимные требования к регулированию межсистемных перетоков и принципы регулирования, сб. «Автоматическое регулирование перетоков мощности по межсистемным связям», изд-во «Энергия», 1965.

2. Куприянов В. Е. и Туккель И. Л., Выбор структуры регулятора при возмущении, изменяющемся в широком диапазоне, сб. «Элементы и системы автоматического управления промышленными объектами», Труды ЛПИ, изд-во «Энергия», 1970.

3. Квервэн и Фрей, Методы регулирования частоты и перетоков мощности в объединенных энергетических системах, сб. «Автоматическое регулирование частоты и активной мощности в энергосистемах», вып. 2, Госэнергоиздат, 1960.

4. Туккель И. Л., Динамика совместного регулирования частоты, сальдо и перетоков активной мощности в объединенных энергосистемах, сб. «Элементы и системы автоматического управления промышленными объектами», Труды ЛПИ, изд-во «Энергия», 1970.

5. Шутилов Ю. К. и Юревич Е. И., Исследование динамики системы автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности в объединенных энергосистемах, сб. «Установившиеся режимы, устойчивость и перенапряжения в энергетических системах», Труды ЛПИ № 293, изд-во «Энергия», 1968.

6. Куприянов В. Е. и др., Цифровой регулятор частоты и перетоков активной мощности, сб. «Установившиеся режимы, устойчивость и перенапряжения в электрических системах», Труды ЛПИ № 293, изд-во «Энергия», 1968.

[3.3.1970]

✧ ✧ ✧

УДК 621.316.925.42:621.316.925.43

Способ построения быстродействующего реле с одной подведенной величиной

Инж. Е. В. ЛЫСЕНКО

Москва

Известные способы построения быстродействующих реле тока и напряжения на полупроводниковых приборах характерны тем, что для защиты элементов входной цепи, а в некоторых случаях для уменьшения времени возврата, используются устройства ограничения подведенной величины [Л. 1—3]. Однако это увеличивает потребление схемы при возрастании подведенной величины относительно уровня срабатывания и препятствует включению нескольких реле с различными уставками на один выпрямительный мост. Возможность же такого включения позволяет заметно упростить ряд устройств защиты.

В настоящей статье усовершенствован и развит принцип измерения времени превышения током заданного уровня [Л. 1]. Выполнение реле по структурной схеме, приведенной на рис. 1, позволяет исключить отмеченные выше недостатки. Первоначально работа схемы рассматривается в предположении, что диоды идеальны.

При отсутствии выпрямленного входного напряжения, или если его амплитуда ниже $U_{оп}$, диод $Д_1$ закрыт, а $Д_2$ открыт. По индикатору тока *ИТ* протекает ток $I_1—I_2$, а C_1 заряжен до напряжения, близкого к $U_{оп}$. При протекании через *ИТ* тока его выходной сигнал отсутствует и схема в целом не работает.

Когда мгновенное значение входного напряжения превышает опорное (рис. 2), диод $Д_1$ открывается, а диоды $Д_2$ и $Д_5$ запираются. Конденсатор C_1 начинает заряжаться (точка *а*) через R_2 до момента равенства мгновенного значения входного напряжения напряжению на C_1 (точка *б*). В этот момент диод $Д_1$ вновь запирается, а $Д_2$ открывается и конденсатор C_1 начинает разряжаться током $I_1—I_2$ до первоначального уровня, близкого к $U_{оп}$.

Все время, в течение которого напряжение на C_1 больше чем $U_{оп}$, диод $Д_5$ остается закрытым и ток через *ИТ* не протекает, а на его выходе имеется сигнал, который через схему задержки *В* подается на усилитель выхода *УВ*. Если суммарное время заряда (t_1) и разряда (t_2) конденсатора C_1 меньше

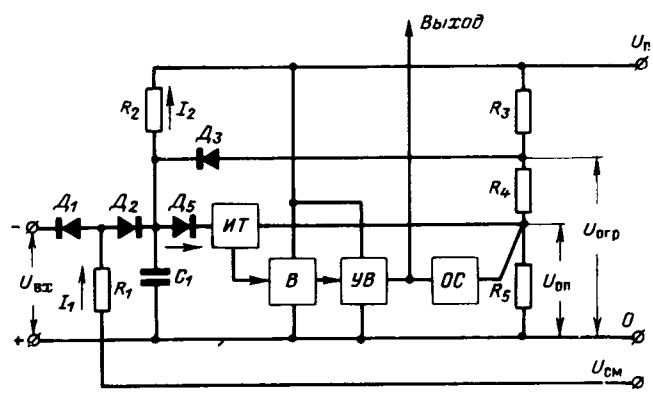


Рис. 1. Структурная схема быстродействующего реле.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

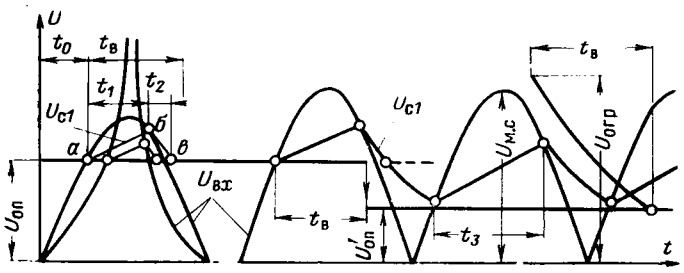


Рис. 2. К пояснению принципа действия реле.

задержки схемы $B(t_b)$, сигнал на ее выходе и на выходе реле не появляется.

Когда $t_1+t_2>t_b$ на выходе схемы задержки B появляется сигнал, который через усилитель выхода и цепь обратной связи OC воздействует на делитель опорного напряжения. Это приводит к снижению опорного напряжения до $U'_{оп}$ по абсолютному значению меньшего минимального напряжения на конденсаторе C_1, который заряжается и разряжается по пилообразной кривой. Этим обеспечивается непрерывность выходного сигнала реле.

При появлении входного импульса даже весьма большой амплитуды и несоблюдении условия $t_1+t_2\geqslant t_b$ реле не работает, что является преимуществом рассматриваемого способа построения реле.

Поскольку при $U_{вх}>U_{оп}$, $Д_2$ запирается и отделяет остальную схему реле от цепи входного напряжения, реле устойчиво при многократном возрастании $U_м$ относительно уровня срабатывания и его предельно допустимое значение определяется допустимой рассеиваемой мощностью на R_1 и допустимым обратным напряжением для $Д_2$.

Когда напряжение на C_1 превысит $U_{огр}$, открывается $Д_3$, ограничивая напряжение на C_1 этим уровнем. Максимальное время возврата равно времени разряда C_1 током I_1—I_2 от $U_{огр}$ до $U'_{оп}$.

Реализация рассмотренной структурной схемы приведена на рис. 3.

В качестве индикатора тока используется T_1 открытый током I_1—I_2, причем его коллекторным током открыт T_2, благодаря чему конденсатор C_2 разряжен. Задержка образуется за счет заряда C_2 через R_5 до напряжения на R_6.

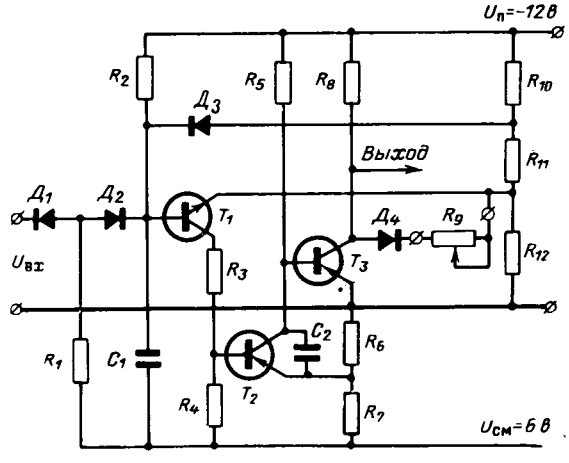


Рис. 3. Принципиальная схема реле.

При открытии выходного каскада реле—транзистора T_3 появляется выходной сигнал, который может сниматься либо с перехода коллектор—эмиттер, либо с резистора R_8. В первом варианте при срабатывании выходное напряжение снижается от $U_п$ до нуля, во втором варианте оно возрастает от нуля до $U_п$. Опорное напряжение уменьшается шунтированием резистора R_{12} регулируемым резистором R_9. Схема выполнена для сочетания ее с системой элементов $ЭТ$ [Л. 4], однако ее структура позволяет выполнить сочетание реле с какой-либо другой системой элементов или включить на выход схемы малогабаритный электромагнитный повторитель, например, с магнитоуправляемыми контактами (герконами).

Выбор типов диодов и транзисторов и расчет сопротивления резисторов производится из условия обеспечения необходимой чувствительности. При расчете учитываются неблагоприятные наложения результирующих изменений параметров деталей, вызванных технологическим разбросом, изменениями температуры и старением. На основании выбранных параметров деталей схемы производится определение основных параметров реле с учетом следующих допущений:

принимается, что диоды и переход база—эмиттер транзисторов имеют пороговую э. д. с. E_0, причем прямое падение равно E_0 вне зависимости от тока;

напряжения $U_{оп}$ и $U'_{оп}$ не изменяются при изменении тока эмиттера T_1.

Амплитудное значение входного напряжения срабатывания ($U_{м.с}$) определяется на основании основного уравнения срабатывания

$$t_1+t_2\geqslant t_в. \qquad (1)$$

Заряд конденсатора C_1 начинается через время t_0 от начала полупериода, которое следует из условия

$$u_{вх}=U_{м.с}\sin\omega t_0=U_{оп}-E_0,$$

откуда

$$t_0=\frac{1}{\omega}\arcsin\frac{U_{оп}-E_0}{U_{м.с}}. \qquad (2)$$

Отсчитывая напряжение от уровня нормального режима, а время от момента $a(t_0)$ изменение напряжения на конденсаторе C_1 определится из выражения

$$U_c=U_1\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right), \qquad (3)$$

где $U_1=U_п-U_{оп}+E_0$ — зарядное напряжение в этом режиме: $\tau_1=R_2C_1$.

За время t_1 напряжение на конденсаторе C_1 увеличится на

$$\Delta U_1=U_1\left(1-e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}\right). \qquad (4)$$

В момент окончания заряда C_1 (точка $б$)

$$U_{м.с}\sin\omega(t_0+t_1)=U_{оп}-E_0+U_1\left(1-e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}\right). \qquad (5)$$

В конце процесса разряда конденсатора C_1 (кривая $б$—$в$) изменение напряжения по абсолют-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ному значению

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = (U_2 + \Delta U_1)\left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau_2}}\right), \qquad (6)$$

где

$$U_2 = \frac{U_{см}R_2 - U_п R_1}{R_1 + R_2} + U_{оп} - E_0; \qquad \tau_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_1.$$

Подставляя в (6) значение ΔU_1 из (4) и имея в виду, что для условий срабатывания $t_2 = t_b - t_1$

$$U_1\left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}\right) = \left[U_2 + U_1\left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}\right)\right]\left(1 - e^{-\frac{t_b - t_1}{\tau_2}}\right). \qquad (7)$$

Решая последнее уравнение приближенными методами, получаем значение t_1 при различных t_b, τ_1 и τ_2. Подставляя значение t_1 в (5), получаем значение напряжения срабатывания. Однако рассмотренный порядок расчета $U_{м.с}$ требует большого объема вычислений при решении (7), поэтому представляется целесообразным получить решение в конечном виде с некоторыми допущениями, которые состоят в следующем.

Из рис. 2 следует, что при малых значениях t_b изменение напряжения на C_1 существенно ниже $U_{оп}$ и тем более мало по сравнению с U_2, что позволяет в (6) пренебречь значением ΔU_1 по сравнению со значением U_2.

Тогда выражение (6) приобретает вид:

$$U_1\left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}\right) = U_2\left(1 - e^{-\frac{t_b - t_1}{\tau_2}}\right). \qquad (8)$$

Поскольку значения U_1 и U_2 определяются такими параметрами как напряжение питания $U_{оп}$ и R_1 и R_2, можно выполнить схему так, чтобы $U_1 \approx U_2$.

Тогда из (8) следует:

$$t_1 = t_b \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}. \qquad (9)$$

Подставляя значение t_1 из (9) в (5), после преобразований получаем:

$$U_{м.с} = \sqrt{\left[\frac{(U_{оп} - E_0)\left(1 - \cos\omega t_b \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}\right)}{\sin\omega t_b \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}} + (U_п - U_{оп} + E_0)\left(1 - e^{-\frac{t_b}{\tau_1 + \tau_2}}\right)\right]^2 + (U_{оп} - E_0)^2}. \qquad (10)$$

Это выражение применимо при изменении t_b в границах $(0{,}05 \div 0{,}5)T_0$.

Из (10) вытекают следующие основные зависимости:

при $t_b \to \frac{T}{2}$ $U_{м.с}$ увеличивается нелинейно, приближаясь к своему максимальному значению при $t_b = \frac{T}{2}$. Из принципа действия следует, что дальнейшее увеличение t_b не приводит к росту $U_{м.с}$;

$U_{м.с}$ растет с увеличением частоты, причем тем больше, чем ближе t_b к $\frac{T}{2}$.

Ввиду принятых допущений количественные соотношения, полученные из (10), несколько отличаются от полученных экспериментально, причем наибольшее отклонение имеет место при $t_b \approx \frac{T}{2}$.

При получении расчетных выражений предполагалось, что за сколь угодно малую паузу между входными сигналами, схема задержки B (рис. 1) успевает подготовиться к действию с полной выдержкой времени, т. е. время повторной готовности схемы близко к нулю. В действительности, время повторной готовности схемы задержки, равное времени разряда C_2 коллекторным током T_2 от напряжения срабатывания до нуля, хотя и мало, но отлично от нуля. Поэтому срабатывание в действительности происходит при $t_1 + t_2 < t_b$.

Из принципа действия схема (рис. 2) следует, что при $t_b \approx 0$, $U_{м.с} = U_{оп} - E_0$, что подтверждается экспериментом. Теоретически, как это следует из условия срабатывания, при $t_b = \frac{T}{2}$ вблизи границы срабатывания $\frac{T}{2} > (t_1 + t_2) \approx \frac{T}{2}$, выходной сигнал и обратная связь отсутствуют, опорное напряжение сохраняет исходное значение $U_{оп}$. При любом значении $t_b < \frac{T}{2}$ вблизи границы возврата (рис. 2) $t_1 + t_2 = \frac{T}{2}$ имеется выходной сигнал и опорное напряжение благодаря действию обратной снижено до значения $U'_{оп}$.

Процессы изменения напряжения на C_1 на границе срабатывания и при условии $t_b = \frac{T}{2}$ аналогичны процессам, происходящим на границе возврата вне зависимости от значения $t_b < \frac{T}{2}$.

Тогда справедливо соотношение

$$a = \frac{U_{м.в}}{U'_{оп} - E_0} = \frac{U_{м.с(1)}}{U_{оп} - E_0}, \qquad (11)$$

где $U_{м.в}$ — амплитуда входного напряжения на границе возврата; $U_{м.с(1)}$ — значение, полученное из (10) при $t_b = \frac{T}{2}$ и для принятого значения $U_{оп}$.

Для обеспечения непрерывного выходного сигнала значение отношения $b = \frac{U'_{оп} - E_0}{U_{оп} - E_0}$ должно быть не более полученного из отношения

$$b = \frac{U_{м.с}}{U_{м.с(1)}}, \qquad (12)$$

где $U_{м.с}$ — значение амплитуды напряжения срабатывания, полученное из (10) для принятого зна-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

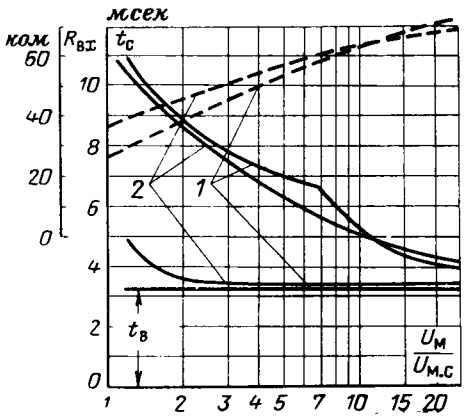


Рис. 4. Зависимость входного сопротивления реле (— — —) и времени срабатывания (———) от кратности входного напряжения. *1* — расчетная; *2* — экспериментальная.

чения t_b и того же значения $U_{оп}$, при котором определялось $U_{м.с\,(1)}$.

Из (11), в частности, следует, что при $t_b \to \frac{T}{2}$, $b \to 1$, т. е. тем меньшая степень обратной связи необходима для получения непрерывного выходного сигнала. При указанном максимальном значении b коэффициент возврата реле близок к единице и может быть снижен уменьшением значения b.

После срабатывания входной ток протекает в течение времени $t_з$ и отсутствует в остальную часть полупериода (рис. 2), причем его мгновенное значение

$$i_{вх} = \frac{U_{с.м} + U_м \sin \omega t}{R_1}, \qquad (13)$$

где

$$\frac{1}{\omega} \arcsin \frac{U'_{оп} - E}{U_м} < t < \left(\frac{1}{\omega} \arcsin \frac{U'_{оп} - E_0}{U_м} + t_з \right).$$

Поскольку напряжение на C_1 при возрастании входного напряжения ограничивается значением $U_{огр}$, можно с некоторой погрешностью считать, что среднее значение входного тока в первую и вторую часть полупериода одинаково

$$I_{вх} = \frac{4}{T} \int_{t'_0}^{\frac{T}{4}} i_{вх} dt = \frac{U_{см}}{R_1} \left(1 - \frac{4t'_0}{T} \right) + \frac{2U_м}{\pi R_1} \cos \omega t'_0, \qquad (14)$$

где

$$t'_0 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{U'_{оп} - E_0}{U_м}.$$

Входное сопротивление реле

$$R_{вх} = \frac{\frac{2}{\pi} U_м}{I_{вх}} = \frac{R_1}{\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{4t'_0}{T} \right) \frac{U_{см}}{U_м} + \cos \omega t'_0}. \qquad (15)$$

Выражения (13)—(15) справедливы при $U_м \geqslant U_{м.с}$, причем (15) определяет $R_{вх}$ уменьшенное относительно истинного значения. При увеличении входного напряжения $R_{вх}$ возрастает, стремясь к R_1.

Время срабатывания реле зависит от фазы появления входного напряжения.

Минимальное время срабатывания, равное t_b, не зависит от кратности, максимальное уменьшается с ее увеличением.

При $1 < \frac{U_м}{U_{м.с}} < 7$

$$t_{c\,max} = 2(t_b + t_0); \qquad (16)$$

при $\frac{U_м}{U_{м.с}} > 7$

$$t_{c\,max} = t_b + 2t_0 \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_2}. \qquad (17)$$

Время возврата реле зависит от кратности и фазы исчезновения входного напряжения и определяется временем разряда конденсатора C_1 до $U'_{оп}$. Учитывая ограничение напряжения на C_1, максимальное время возврата при большой кратности не превышает значения

$$t_{b\,max} = \tau_2 \ln \frac{U_0 + U_{огр}}{U_0 + U'_{оп} - E_0}, \qquad (18)$$

где

$$U_0 = \frac{U_{см} R_2 - U_п R_1}{R_1 + R_2},$$

т. е. чем ниже $U_{огр}$, тем меньше $t_{b\,max}$.

Экспериментальные исследования реле, выполненного по схеме рис. 3, выявили следующие результаты.

Изменение напряжения срабатывания при изменении температуры от +50 до —40° С не превышает ±5% относительно напряжения, измеренного при 20° С. Расчетная зависимость $U_{м.с} = f(t_b)$, полученная из (10), близко совпадает с экспериментальной, за исключением небольшого участка, где t_b близко к $\frac{T}{2}$.

Реле имеет большое входное сопротивление и изменение его при значительном увеличении кратности относительно невелико, а отклонение расчетной зависимости от экспериментальной можно считать допустимым (рис. 4). Указанное обеспечивает малую мощность срабатывания реле и позволяет включать несколько реле с различными уставками на один выпрямительный мост, причем при пятикратном изменении одного из реле уставка остальных изменяется не более чем на 2—3%.

Полученное реле весьма быстродействующее, причем результаты эксперимента довольно близко совпадают с расчетными (рис. 4). Максимальное время возврата при $\frac{U_м}{U_{м.с}} = 20$ не превышает 9 *мсек*.

При максимальной мощности рассеивания резистора R_1, равной одному ватту, допустимо стократное увеличение входного сигнала относительно уровня срабатывания.

Литература

1. Грейвулис Я. П. и Путниньш В. Я., Способ построения реле тока (напряжения) мгновенного действия, «Электричество», 1969, № 9.

2. Каринский Ю. И., Универсальное бесконтактное реле максимального и минимального переменного тока и напряжения, «Электромеханика», 1966, № 7.

3. Овласюк В. Я. и Быков В. А., Реле максимального тока и минимального напряжения на полупроводниковых приборах, ВНИИЖТ, вып. 276, Телеуправление и новые схемы автоматики, изд-во «Транспорт», 1964.

4. Гиршберг В. В. и Доманицкий И. П. и др., Единая серия полупроводниковых логических и функциональных элементов (ЭТ), изд-во «Энергия», 1968.

[21.5.1970]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.314.572

Анализ характеристик инвертора с встречно-параллельными вентилями и параллельной компенсацией реактивной мощности нагрузки

Доктор техн. наук, проф. А. Е. СЛУХОЦКИЙ и инж. В. В. ЦАРЕВСКИЙ
Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ленина (Ульянова)

В инверторах с встречно-параллельным включением вентилей выходное напряжение и напряжение на вентилях имеют прямоугольную форму и не зависят от нагрузки. Компенсация активно-индуктивной нагрузки осуществляется, как правило, последовательным включением конденсатора (рис. 1,*а*). В ряде случаев, например при передаче энергии от инвертора к нагрузке на значительные расстояния, целесообразна параллельная компенсация, которая в рассматриваемых инверторах не может быть применена без дополнительных устройств из-за резкого увеличения тока в компенсирующей емкости, возникающего при переключении вентилей. Для предотвращения этого увеличения тока параллельный нагрузочный контур дополняется либо последовательным контуром $L_к C_к$, настроенным на основную гармонику выходного напряжения [Л. 1], как это показано на рис. 1,*б*, либо демпфирующей индуктивностью L_d (рис. 1,*в*).

В статье рассмотрена схема с демпфирующей индуктивностью, которая, как это будет показано ниже, имеет меньшую установленную реактивную мощность по сравнению со схемой, изображенной на рис. 1,*б*.

При анализе сделаны допущения:

напряжение на фильтровой емкости $C_ф$ не изменяется и равно напряжению источника питания ($C_ф = \infty$);

потери в вентилях и демпфирующей индуктивности равны нулю;

коммутация токов в вентилях происходит мгновенно.

Кроме того, нагрузка инвертора представлена параллельным соединением активного и индуктивного сопротивлений, что позволило получить относительно простые выражения для токов и напряжений. Ток и напряжение в параллельном нагрузочном контуре близки по форме к синусоидальным, поэтому параллельная и последовательная схемы замещения нагрузки в стационарном режиме приблизительно эквивалентны [Л. 2].

Анализ проведен методом дискретных преобразований Лапласа [Л. 3].

Инвертор с прямоугольной формой выходного напряжения представлен в виде разомкнутой амплитудной импульсной системы с прямоугольными импульсами, в которой напряжение источника питания является входной величиной, а выходная цепь инвертора — непрерывной частью. Связь между входной и выходной величинами амплитудной импульсной системы относительно изображений в смысле дискретных преобразований Лапласа определяется выражением:

$$Z^*(q, \varepsilon) = K^*(q, \varepsilon) X^*(q), \qquad (1)$$

где $Z^*(q, \varepsilon)$ и $X^*(q)$ — изображение выходной и входной величин соответственно; q — комплексное число, называемое параметром дискретного преобразования; ε — вещественный параметр, характеризующий смещенную решетчатую функцию.

Если параметр ε непрерывно изменяющийся, то решетчатую функцию можно рассматривать как одну из форм записи непрерывной функции.

Выходное напряжение инвертора, являющееся входной величиной рассматриваемой системы, можно представить в виде гармонической решетчатой функции:

$$x[n] = E_d \cos \bar{\omega} n, \qquad (2)$$

где $\bar{\omega}$ — относительная частота переключения вентилей; $n = 1, 2, 3, \ldots$

Изображение входной переменной имеет вид:

$$X^*(q) = E_d \frac{e^q}{e^q - e^{j\bar{\omega}}}. \qquad (3)$$

Вид передаточной функции дискретного преобразования определяется полюсами обычной передаточной функции непрерывной части.

Обычная передаточная функция находится из дифференциальных уравнений для входной цепи инвертора, записанных в операторной форме при нулевых начальных условиях как частное от деления изображения искомой величины на изображение выходного напряжения инвертора.

Для выходного тока инвертора и напряжения на нагрузке обычные передаточные функции соответственно имеют вид:

$$K_{нT1}(p) = \frac{\frac{1}{L'_d}(p^2 + 2\alpha_1 p + \omega_0^2)}{p[p^2 + 2\alpha_1 p + \omega_0^2(1+\varkappa)]};$$

$$K_{нT2}(p) = \frac{\omega_0^2 \varkappa}{p^2 + 2\alpha_1 p + \omega_0^2(1+\varkappa)}$$

или в безразмерных величинах эти выражения можно записать в виде:

$$\tilde{K}_{н1}(q) = \frac{P_1(q)}{qQ_1(q)} = \frac{\frac{T}{2L'_d}(q^2 + 2\beta_1 q + \bar{\omega}_0^2)}{q[q^2 + 2\beta_1 q + \bar{\omega}_0^2(1+\varkappa)]}; \qquad (4)$$

$$\tilde{K}_{н2}(q) = \frac{P_2(q)}{Q_1(q)} = \frac{\bar{\omega}_0^2 \varkappa}{q^2 + 2\beta_1 q + \bar{\omega}_0^2(1+\varkappa)}, \qquad (5)$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega}$ — период задающей частоты; $q = \frac{T}{2} p$;

$$\bar{\omega}_0 = \frac{T}{2} \frac{1}{\sqrt{L'_н C_п}} = \pi k_0; \quad \beta_1 = \frac{T/2}{2RC_п} = \frac{\pi k_0^2}{2 \operatorname{tg} \varphi_н};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_н = \frac{R}{\omega L'_н}; \quad \varkappa = \frac{L'_н}{L_d}.$$

Полюсы передаточной функции (4) будут:

$$q_0 = 0; \quad q_{1,2} = -\beta_1 \pm j\sqrt{\bar{\omega}_0^2(1+\varkappa) - \beta_1^2}, \qquad (6)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

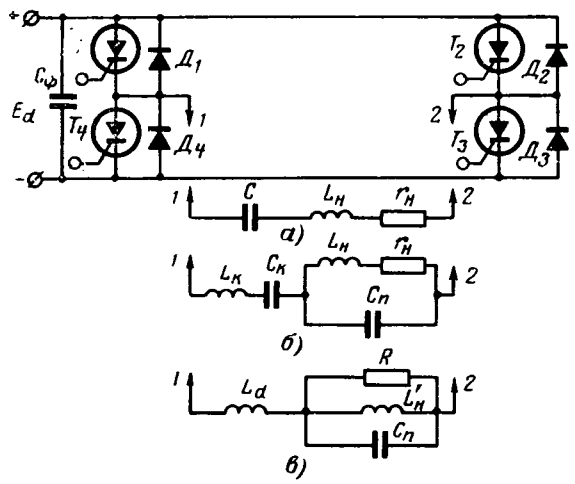


Рис. 1. Схемы инверторов с встречно-параллельными вентилями.
а — последовательная компенсация; *б* и *в* — параллельная компенсация.

а у передаточной функции (5) нулевой полюс отсутствует.

Переходя в (1) от изображений к оригиналам, получим выходную величину, которая в установившемся режиме имеет вид:

$$z[\infty, \varepsilon] = E_d K^*(q, \varepsilon). \qquad (7)$$

При определении выходного тока инвертора и напряжения на нагрузке по формулам, приведенным в [Л. 3] для рассматриваемого случая амплитудной импульсной ступени с прямоугольными импульсами, находим соответствующие передаточные функции $K^*(q, \varepsilon)$ и подставляем в (7), заменив предварительно q на $j\bar{\omega} = j\pi$.

В результате преобразования (7) получим выражения для выходного тока инвертора и напряжения на нагрузке и емкости $C_п$ в установившемся режиме:

$$i[\infty, \tau] = \frac{\varkappa}{1+\varkappa}\left[\frac{1}{(1+\varkappa)\operatorname{tg}\varphi_н} + \frac{\pi}{\varkappa}\left(\tau - \frac{1}{2}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{A}{k_1} e^{-\beta_1 \tau} \sin(\pi k_1 \tau - \psi_1 + 2\psi_3)\right]; \qquad (8)$$

$$u[\infty, \tau] = \frac{\varkappa}{1+\varkappa}\left[1 - \frac{A}{k_1} k_0 \sqrt{1+\varkappa}\, e^{-\beta_1 \tau} \sin(\pi k_1 \tau - \right.$$
$$\left. - \psi_1 + \psi_3)\right], \qquad (9)$$

где

$$k_1 = k_0 \sqrt{1+\varkappa} \sqrt{1 - \frac{k_0^2}{4(1+\varkappa)\operatorname{tg}^2\varphi_н}}; \qquad (10)$$

$$A = \frac{2}{\sqrt{1 + 2e^{-\beta_1}\cos\pi k_1 + e^{-2\beta_1}}}; \qquad (11)$$

$$\psi_1 = \operatorname{arctg}\frac{e^{-\beta_1}\sin\pi k_1}{1 + e^{-\beta_1}\cos\pi k_1}; \quad \psi_3 = \operatorname{arctg}\frac{\pi k_1}{\beta_1};$$

$$\tau = \varepsilon = \frac{2t}{T}.$$

В (8) и (9) ток и напряжение представлены в относительных единицах (напряжение отнесено к напряжению источника питания E_d, а ток — к $I_б = E_d/\omega L_d$).

Коэффициент k_0, равный отношению собственной частоты контура без потерь, состоящего из индуктивности нагрузки $L'_н$ и конденсатора $C_п$, к частоте переключения вентилей, характеризует реакцию нагрузочного контура. При $k_0 < 1$ контур имеет емкостную реакцию. Коэффициент k_1 равен отношению собственной частоты выходной цепи инвертора, определенной с учетом потерь, к задающей частоте. При $k_0 < 1$ и $k_1 > 1$ общая реакция выходной цепи на задающей частоте будет емкостной.

Выключение управляемых вентилей в рассматриваемой схеме происходит за счет колебательного характера выходного тока инвертора и емкостной реакции выходной цепи. После прохождения тока через нуль открытые до этого управляемые вентили запираются и находятся под небольшим обратным напряжением, равным падению напряжения в неуправляемых вентилях в проводящем состоянии. После подачи управляющих импульсов на очередные вентили к запертым вентилям прикладывается прямое напряжение, равное напряжению источника питания.

Восстановление запирающих свойств тиристоров в таких условиях происходит несколько медленнее, чем в схемах параллельного типа. Причиной тому является практически нулевое обратное напряжение и неограниченная скорость нарастания вновь прикладываемого прямого напряжения [Л. 4]. В практических разработках скорость нарастания вновь прикладываемого напряжения ограничивается включением RC-цепочки параллельно вентилям [Л. 5], а необходимое обратное напряжение на управляемых вентилях достигается подключением обратных вентилей к отпайкам выходного трансформатора. Эти дополнения не вносят принципиальных изменений в характер электромагнитных процессов, поэтому при исследовании настоящей схемы они не учитываются.

Что касается ионных вентилей, то отсутствие обратных напряжений не влияет на восстановление запирающих свойств сеток и в то же время благоприятно сказывается на долговечности вентилей. В выражении для выходного тока, кроме синусоидальной составляющей, имеются постоянная составляющая и линейно изменяющаяся составляющая. Последняя имеет отрицательное значение в начале полупериода, положительное — в конце и проходит через нуль в середине полупериода.

Наличие постоянной и линейно изменяющейся составляющих приводит к тому, что для обеспечения емкостной реакции выходного тока соотношения параметров должны быть такими, чтобы кроме условия $k_0 < 1$ и $k_1 > 1$ выполнялось еще одно условие:

$$i[\infty, 0] \geqslant 0. \qquad (12)$$

Минимальные реактивная энергия и потери в демпфирующей индуктивности будут при k_0, стремящемся к единице, и $\varkappa \gg 1$, а минимальная реактивная энергия, циркулирующая в контуре, состоящем из фильтровой емкости и выходной цепи инвертора, будет при $k_1 \longrightarrow 1$. Одновременно выполнить оба требования, как это видно из (10), невозможно, поэтому соотношения параметров выбираются такими, чтобы обеспечивалась надеж-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

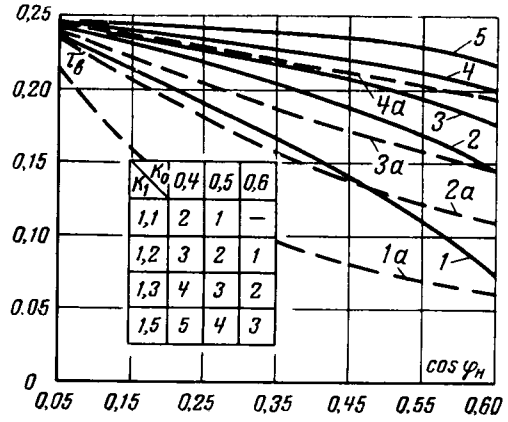


Рис. 2. Зависимость времени $\tau_в$, предоставляемого для запирания вентилей, от $\cos\varphi_н$ для схемы рис. 1,*в* (сплошные линии и таблицы) и для схемы рис. 1,*а* (штриховые).
1а — $k=1{,}1$; *2а* — $k=1{,}2$; *3а* — $k=1{,}3$; *4а* — $k=1{,}5$.

ная работа вентилей при минимальных потерях в демпфирующей индуктивности.

Основные характеристики, определяющие условия работы вентилей и других элементов схемы в установившемся режиме, получены из (8) и (9) для различных значений k_0 и k_1 в зависимости от коэффициента мощности нагрузки $\cos\varphi_н$, определенного на задающей частоте. Отношение $\varkappa$ определялось из приближенной формулы:

$$k_1 \approx k_0\sqrt{1+\varkappa}. \qquad (13$$

Расчеты проводились на ЦВМ для различных сочетаний $k_0<1$ и $k_1>1$, удовлетворяющих условию (12).

Ниже рассматриваются характеристики, определяющие режимы работы рассматриваемой схемы инвертора для нагрузки, параметры которой изменяются в пределах $0{,}05\leqslant\cos\varphi_н\leqslant 0{,}65$ и $1\leqslant\frac{L'_{н\,max}}{L'_{н\,min}}\leqslant 2$, характерных, например, для индукционных печей и кузнечных нагревателей.

Анализ результатов расчета показал, что при указанных выше параметрах нагрузки и при $k_1\geqslant 1{,}1$ максимально возможное значение k_0, обеспечивающее нормальную коммутацию вентилей, равно 0,6.

Время $\tau_в=\frac{t_в}{T}$, предоставляемое вентилям для восстановления запирающих свойств (рис. 2), было найдено для различных значений $\cos\varphi_н$ и коэффициентов k_0 и k_1 в результате решения уравнения:

$$i[\infty,\ \tau]=0.$$

С ростом k_0 при одних и тех же значениях $\cos\varphi_н$ и k_1 время уменьшается, потому что возрастает относительный коэффициент затухания β_1. Для сравнения на рис. 2 приведены кривые, характеризующие зависимости $\tau_в$ от $\cos\varphi_н$ для схемы с последовательным колебательным контуром (рис. 1,*а*) при различных

$$k=\frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{1}{L_нC}-\frac{r_н^2}{4L'^2_н}}, \qquad (14)$$

которые характеризуют отношение собственной частоты последовательного контура с учетом затухания к заданной частоте.

Сравнение кривых $\tau_в$ для схем рис. 1,*а*, *в* показывает, что k и k_1 не эквивалентны, поэтому анализ режимов работы рассматриваемой схемы по характеристикам схемы рис. 1,*а* не представляется возможным без предварительного сведения схемы рис. 1,*в* к схеме рис. 1,*а* путем пересчета по 1-й гармонике.

Ток источника питания I_d и средний ток $I_{у.ср}$ через управляемые вентили в зависимости от $\cos\varphi_н$ приведены на рис. 3. Средний ток через неуправляемые вентили можно определить по формуле:

$$I_{н.ср}=I_{у.ср}-0{,}5I_d. \qquad (15)$$

Как видно из рис. 3, средний ток через управляемые вентили мало зависит от $\cos\varphi_н$ и определяется в основном коэффициентами k_0 и k_1. При неизменных k_1 и L_d и возрастании k_0 ток I_d увеличивается за счет роста коэффициента β_1.

Для определения амплитуды напряжения на емкости продифференцируем выражение (9) по τ. Приравнивая производную нулю, найдем значение $\tau=\tau_m$, при котором напряжение достигает максимального значения:

$$\tau_m=\frac{\psi_1+\pi}{\pi k_1}. \qquad (16)$$

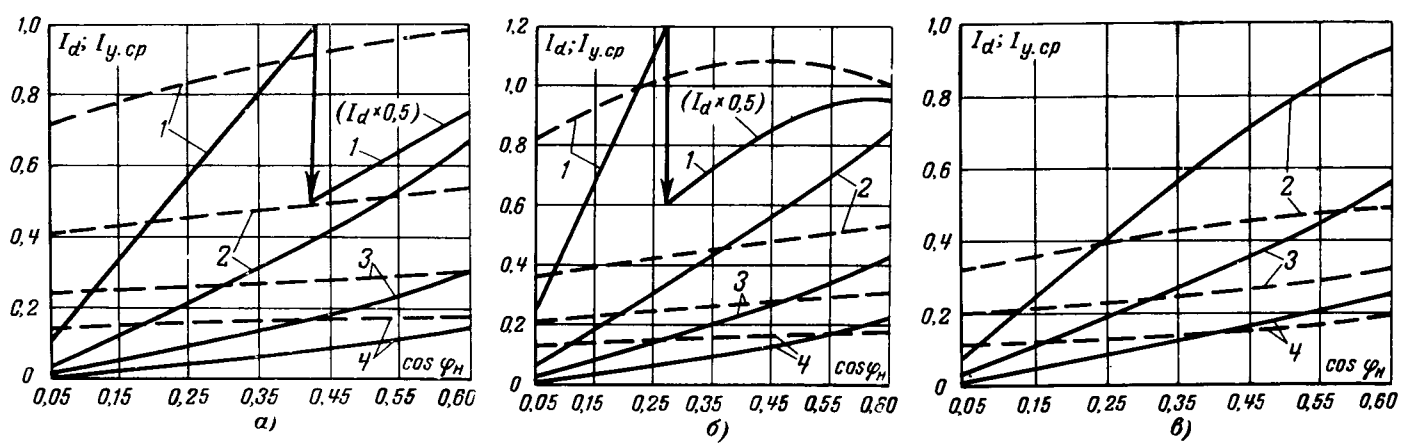


Рис. 3. Зависимость токов I_d (———) и $I_{у.ср}$ (— — —) от $\cos\varphi_н$ при различных значениях k_1.
а — для $k_0=0{,}4$; *б* — для $k_0=0{,}5$; *в* — для $k_0=0{,}6$ (кривые при $k_1=1{,}1$ не приведены).
1 — $k_1=1{,}1$; *2* — $k_1=1{,}2$; *3* — $k_1=1{,}3$; *4* — $k_1=1{,}5$.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Подставляя (16) в (9), получим:

$$U_m = \frac{\varkappa}{1+\varkappa}\left(1 + Ae^{-\beta_1 \tau_m}\right). \qquad (17)$$

Расчеты по (17) показали слабую зависимость U_m от $\cos\varphi_н$, поэтому, положив в (17) $\cos\varphi_н = 0$ и учитывая, что при этом

$$e^{-\beta_1} = e^{-\beta_1 \tau_m} = 1 \quad \text{и} \quad A = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1+\cos\pi k_1}},$$

получим приближенную формулу для U_m:

$$U_m \approx \frac{\varkappa}{1+\varkappa}\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1+\cos\pi k_1}}\right). \qquad (17а)$$

Расчеты амплитуды тока I_m через управляемые вентили с помощью (8) также показали слабую зависимость I_m от $\cos\varphi_н$.

Приближенная формула для тока I_m была найдена из (8) таким же способом, как и (17а):

$$I_m \approx \frac{\varkappa}{1+\varkappa}\left(\frac{\sqrt{2}}{k_1\sqrt{1+\cos\pi k_1}} - \frac{\pi}{2\varkappa}\right). \qquad (18)$$

В таблице приведены амплитудные значения U_m и I_m для $k_1 = 1{,}2$ и различных значений k_0 и $\cos\varphi_н$, вычисленные с помощью (8) и (17) и по приближенным формулам. Из сравнения результатов расчетов по точным и приближенным формулам видно, что для $\cos\varphi_н \leqslant 0{,}3$ ошибка при определении напряжения по приближенной формуле не превышает 5%, а при определении тока — 15%. Для $\cos\varphi_н = 0{,}3$ ошибка при определении напряжения возрастает до 18%, а при определении тока не увеличивается. Для других значений k_1 в пределах $1{,}1 \leqslant k_1 \leqslant 1{,}5$, как показали сравнительные расчеты, максимальные ошибки не превышают указанных выше. Приближенные формулы можно рекомендовать не только для качественного анализа схемы, но и при инженерных расчетах. Действующее значение тока и напряжения с достаточной точностью можно определить как $I = I_m/\sqrt{2}$ и $U = U_m/\sqrt{2}$.

k_0		0,4			0,5			0,6		
$\cos\varphi_н$		0,05	0,3	0,6	0,05	0,3	0,6	0,05	0,3	0,6
U_m	По (17)	3,77	3,74	3,61	3,45	3,39	3,15	3,17	3,05	2,65
	По (17а)	3,78	3,78	3,78	3,53	3,53	3,53	3,18	3,18	3,18
I_m	По (8)	2,27	2,35	2,40	1,99	2,10	2,13	1,74	1,89	1,85
	По (18)	2,22	2,22	2,22	1,97	1,97	1,97	1,63	1,63	1,63

Следует отметить, что токи, напряжения и время, предоставляемое для запирания вентилей, в схеме рис. 1,*в* по сравнению со схемой рис. 1,*а* в меньшей степени зависят от изменения параметров нагрузки. Последнее связано с тем, что коэффициент k_1 зависит от параметров нагрузки гораздо слабее, чем коэффициент k, в чем нетрудно убедиться с помощью (10) и (14).

Потери и реактивная мощность в индуктивности L_d пропорциональны ее значению, поэтому, сравнивая рассматриваемую схему со схемой рис. 1,*б*, необходимо прежде всего оценить соотношение между индуктивностями L_d и $L_к$. В схеме рис. 1,*б* реакция нагрузочного контура тоже должна быть емкостной, если дополнительный контур $L_к C_к$ настроен на задающую частоту ω. Заменив параллельный нагрузочный контур эквивалентным ему на частоте ω последовательным соединением $C_э$ и $r_э$, найдем собственные частоты выходных цепей соответственно для схем 1,*б*, *в*:

$$\omega_{1,б} \approx \frac{1}{\sqrt{L_к C_к}}\sqrt{1 + \frac{C_к}{C_э}}; \qquad (19)$$

$$\omega_{1,в} \approx \frac{1}{\sqrt{L_d C_э}}. \qquad (20)$$

Так как $\frac{1}{\sqrt{L_к C_к}} = \omega$, то отношения собственных частот к задающей получим в виде:

$$k_{1,б} = \sqrt{1 + \frac{C_к}{C_э}}; \qquad (21)$$

$$k_{1,в} = \sqrt{\frac{L_к}{L_d}}\sqrt{\frac{C_к}{C_э}}. \qquad (22)$$

Решая (21) и (22) относительно $\frac{L_к}{L_d}$ для случая $1{,}1 \leqslant k_{1,б} = k_{1,в} \leqslant 1{,}5$, найдем $1{,}8 \leqslant \frac{L_к}{L_d} \leqslant 5{,}7$.

Таким образом, приближенное сравнение схем рис. 1,*б*, *в* по величине дополнительных индуктивностей показывает, что схема с демпфирующей индуктивностью является предпочтительной по сравнению со схемой с дополнительным контуром.

Выводы. 1. В инверторах с прямоугольной формой выходного напряжения наиболее экономична последовательная компенсация реактивной энергии активно-индуктивной нагрузки. При необходимости параллельной компенсации более перспективной является схема с демпфирующей индуктивностью.

2. Напряжение на нагрузке, средний и амплитудный токи через управляемые вентили в схеме с демпфирующей индуктивностью в меньшей степени зависят от изменения параметров нагрузки, чем в схеме с последовательной компенсацией.

3. Рассмотренная схема, несмотря на наличие дополнительной индуктивности и связанное с этим увеличение потерь, может быть рекомендована для питания нагрузок с резко изменяющимися параметрами и расположенных на значительных расстояниях от источника питания — инвертора.

Литература

1. Смородинов В. В., Тиристорный преобразователь частоты для электроэнергии, «Электричество», 1967, № 4.
2. Ostendorff W., Archiv für Elektrotechnik, 1938, 32, 349.
3. Цыпкин Я. З., Теория линейных импульсных систем, Физматгиз, 1963.
4. Кремниевые вентили, под ред. С. Б. Юдицкого, изд-во «Энергия», 1968.
5. Кощеев Л. Г. и Третьяк Т. П., Мощные автономные инверторы напряжения, «Электричество», 1970, № 3.
6. Golde E., Lehmann G., AEG Mitteilungen, 1966, 56, 445.

[10.3.1970]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.314.6:62-83

Анализ электромагнитных процессов и расчет характеристик тиристорных широтно-импульсных преобразователей с последовательным гашением

Т. А. ГЛАЗЕНКО, С. Г. ГЕРМАН-ГАЛКИН и В. С. ТОМАСОВ

Ленинградский институт точной механики и оптики

Тиристорные широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения (ШИП) получают все более широкое распространение в регулируемых электроприводах станков, транспортных устройств, в силовых следящих системах и т. п. [Л. 1 и 2]. Для широкорегулируемых нереверсивных электроприводов с переменной нагрузкой и для реверсивных электроприводов наиболее перспективны схемы ШИП с последовательным гашением и независимым контуром заряда конденсатора [Л. 2].

Существует значительное число схем тиристорных ШИП этого типа, однако методика их расчета и проектирования разработана еще недостаточно. Работоспособность, экономичность, перегрузочная способность и диапазон регулирования выходного напряжения тиристорных ШИП в значительной степени определяются правильным выбором схемы и параметров коммутирующих устройств. В статье выполнен анализ коммутационных электромагнитных процессов, предложен аналитический способ расчета основных характеристик тиристорных ШИП с последовательным гашением и дана оценка различных способов ограничения эффекта накопления энергии в элементах гасящих цепей.

Схема и особенности работы тиристорных ШИП с последовательным гашением. Тиристорные ШИП могут быть выполнены с последовательным коммутирующим дросселем $L_д$ (рис. 1,*а*) или трансформатором *Тр* (рис. 1,*б*). Широтно-импульсное регулирование напряжения на нагрузке (якоря двигателя *Я*) осуществляется смещением фазы, импульсов, подаваемых на гасящий тиристор *1′*), относительно импульсов управления, отпирающих силовой тиристор *1* с частотой $f=1/T$.

Переключение тиристоров ШИП сопровождается возникновением коммутационных процессов. При этом следует различать быстропротекающие процессы, связанные с изменением параметров полупроводниковых приборов, и сравнительно медленные процессы, характер которых зависит от параметров коммутирующих цепей ($L_д$, $L_к$ и C).

Длительность процессов изменения параметров тиристоров при их включении или выключении на несколько порядков меньше полупериода колебаний в контуре разряда коммутирующего конденсатора ($L_д$, $r_д$, C, 1′). При включении силового тиристора начинается коммутация тока нагрузки с диода *3* на тиристор *1*. Скорость нарастания тока в силовом тиристоре ограничивается индуктивностью коммутирующего дросселя $L_д$. Для уменьшения потерь в процессе переключения и ограничения величины обратного тока последовательно с силовым тиристором [Л. 3 и 4] часто включают небольшой дроссель насыщения *Др* (рис. 1,*а*). При отпирании вспомогательного тиристора *1′* образуется контур запирания силового тиристора *С*, *U*, *3*, *1*, $L_п$, *1′*, скорость изменения тока в котором ограничивается величиной паразитной индуктивности контура $L_п$.

Процесс запирания силового тиристора в ШИП с последовательным гашением, где к запирающемуся тиристору прикладывается обратное напряжение $u_{обр}>U$, представлен на осциллограммах (рис. 2). В процессе запирания тиристор остается в проводящем состоянии в течение интервалов уменьшения прямого тока t_0 и протекания обратного тока в нем $t_{в.обр}=t_1+t_0$. Существование контура запирания, индуктивность которого достаточно мала ($L_п=5$—15 *мкгн*), вызывает некоторое уменьшение энергии в поле коммутирующего конденсатора. Это явление будет учтено ниже.

Таким образом, в ШИП с последовательным гашением можно считать тиристоры в процессе включения идеальными ключами, а в процессе запирания — ключами, имеющими время запаздывания $t_з=t_0+t_{в.обр}$.

Характеристики ШИП в основном определяются сравнительно медленными коммутационными процессами. Они протекают следующим образом.

В течение большей части периода конденсатор *С* заряжается от вспомогательного источника питания $U_к$ через зарядный дроссель $L_к$ и диод *4*. В момент гашения силового тиристора *1* включается вспомогательный тиристор *1′* и образуется колебательный контур разряда конденсатора *1*, *С*, $L_д$, $r_д$.

В обмотке дросселя $L_д$ индуктируется э. д. с. $e_{Lд}>U$, направление которой в первый коммутационный интервал противоположно полярности источника *U*. При этом в цепи *С*, *U*, *3*, *1*, $L_п$, *1′* возникает кратковременный импульс тока, вызывающий запирание силового тиристора. На тиристоре *1* сохраняется обратное напряжение в течение времени $t_{обр}$, пока напряжение на конденсаторе u_C уменьшается от величины $u_C[0]=U_{01}=$

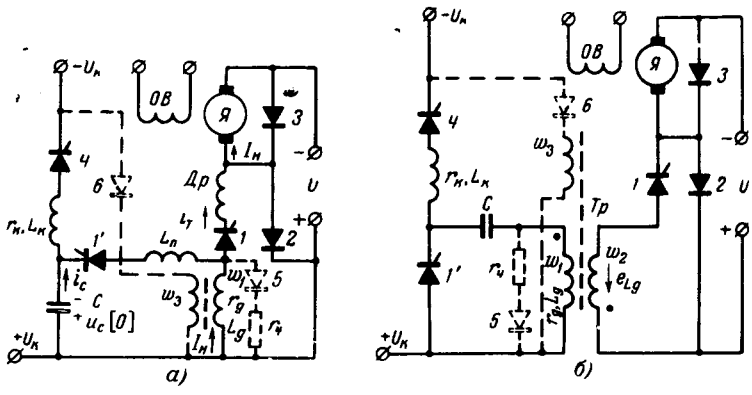


Рис. 1. Схемы ШИП с последовательным гашением.

а — с коммутирующим дросселем; *б* — с коммутирующим трансформатором.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

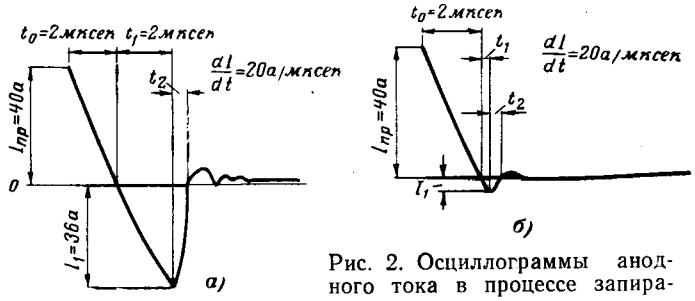


Рис. 2. Осциллограммы анодного тока в процессе запирания тиристора.

а — в ШИП без ограничивающего дросселя насыщения; *б* — в ШИП с дросселем насыщения.

$=U_{C_{к\,max}}$ до $u_C[t_{обр}]=U$. Время действия обратного напряжения должно быть несколько больше времени восстановления вентиля $\tau_в$:

$$t_{обр}=k_{зап}\tau_в, \qquad (1)$$

где $k_{зап}=1{,}15\div 1{,}25$.

Когда напряжение на конденсаторе уменьшится до величины $U_к$, смещается в прямом направлении диод *4*, и в преобразователе, кроме контура разряда C, $L_д$, $1'$, образуется еще контур, состоящий из источника $U_к$ и одного ($L_к$, рис. 1,*б*) или двух ($L_к$ и L, рис. 1,*а*) дросселей. В них ток нарастает сравнительно медленно, так как $L_к/L_д=20$—100. Исследование фазовых траекторий [Л. 5] показало, что небольшим током в зарядном дросселе $L_к$ к моменту окончания процесса разряда в контуре C, $L_д$, $1'$ можно пренебречь, и считать ток в конденсаторе и дросселях к моменту начала заряда конденсатора равным нулю.

$$i_C=i_{Lк}=i_{Lд}=0. \qquad (2)$$

В высокочастотных ШИП, где указанное соотношение между $L_к$ и $L_д$ выполнить трудно, диод *4* должен быть заменен тиристором (пунктир на рис. 1,*а, б*), который включается импульсами, смещенными во времени относительно гасящих импульсов управления на величину

$$\frac{T_{од}}{2}=\frac{\pi}{\omega_{од}}=\pi\sqrt{L_д C}.$$

В этом случае условие (2) также выполняется. Для устойчивой работы преобразователя необходимо, чтобы после подачи управляющего импульса на тиристор $1'$, включающий импульс на силовой тиристор *1*, не мог бы быть подан раньше, чем закончится разряд конденсатора в контуре C, $L_д$, $1'$. Это значит, что минимальное время паузы (тиристор *1* заперт) должно быть выбрано из условия

$$t_{11}=(1-\gamma_{max})T\geqslant\frac{T_{од}}{2}=\pi\sqrt{L_д C}. \qquad (3)$$

Поэтому максимальный коэффициент использования напряжения источника питания в ШИП с последовательным гашением ограничен:

$$k_{ис}=\frac{(U_{н.ср})_{max}}{U}=\gamma_{max}=1-\frac{T_{од}}{2T}. \qquad (4)$$

Для тиристорных ШИП с последовательным гашением характерен эффект накопления энергии в элементах гасящих цепей. Перезаряд конденсатора в них происходит по некоторому предельному циклу. Амплитуды напряжений на конденсаторе, обычно значительно превышающие напряжение $U_к$, зависят от добротности контуров, образующихся в схеме на коммутационных интервалах, и от величины тока нагрузки в момент коммутации. В высоковольтных преобразователях эффект накопления энергии, вызывающий увеличение напряжений и установленных мощностей вентилей и коммутирующего оборудования, целесообразно ограничить.

Для этого можно ухудшить добротность контура заряда, увеличив сопротивление в цепи дросселя $L_к$, $r_к$, включить резисторно-диодную цепь рассеяния (r_4, *5*) или трансформаторную обмотку возврата энергии в источник питания (пунктир на рис. 1,*а, б*).

Применение той или иной схемы ограничения эффекта накопления влияет на характер коммутационных электромагнитных процессов и существенно изменяет характеристики преобразователя.

Коммутационные электромагнитные процессы и фазовые траектории процесса перезаряда. Для общности анализа коммутационные процессы целесообразно исследовать в относительных единицах [Л. 2 и 5]:

$$x=\bar{u}_C=\frac{u_C}{U_к},\quad y=\bar{i}_C=\frac{i_C\rho_n}{U_к}=\frac{d\bar{u}_C}{d\bar{t}},\quad \bar{t}=\omega_{0n}t. \qquad (5)$$

Здесь: x, y — относительные напряжения и ток в конденсаторе; $\bar{t}$—относительное время (угол); $\rho_n=\sqrt{\frac{L_n}{C}}$, $\omega_{0n}=\frac{1}{\sqrt{L_n C}}$ — волновое сопротивление и угловая частота контура перезаряда конденсатора на n-м расчетном интервале.

Для рассматриваемых схем ШИП электромагнитные процессы в коммутирующих цепях на всех расчетных интервалах характеризуются дифференциальными уравнениями второго порядка, решения которых, выраженные через значения x и y на границах интервалов, приведены в таблице. На первом и последнем расчетных интервалах процессы во всех схемах описываются одними и теми же уравнениями, причем приведенные коэффициенты затухания $D_д$ и $D_к$ достаточно малы ($D_д$, $D_к<0{,}1$ и $\sqrt{1-D^2}\approx 1$). На этих интервалах фазовая траектория процессов разряда и заряда конденсатора достаточно точно аппроксимируется дугами окружностей радиусов R_1, R_3 или R'_3 с центрами на оси x, смещенными относительно фокусов на первом и третьем интервалах (т. *0* и 0_1 на рис. 3) на величины Δ_1 и Δ_3 (или Δ'_3):

$$R_1=\sqrt{(x_{01}-\Delta_1)^2+\bar{I}_н^2}=\frac{x_{01}-\Delta_1}{\cos\varphi_н}; \qquad (6)$$

$$\Delta_1<R_1\frac{1-e^{-\pi D_д}}{1+e^{-\pi D_д}}. \qquad (7)$$

На рис. 3 приведены фазовые траектории предельных циклов перезаряда конденсатора для ШИП без дополнительных цепей ограничения ($AB'BCD'E$), с резисторно-диодной цепью рассея-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Уравнения электромагнитных процессов в ШИП

Расчетный интервал и параметры контура	Дифференциальные уравнения и их решения	Способ ограничения эффекта накопления	Условия существования контура	Координаты фазовой траектории на границах интервала
Разряд конденсатора в контуре C, $L_д$, $r_д$, $1'$ $D_д = \frac{r_д}{2\rho_д} = \frac{r_д}{2}\sqrt{\frac{C}{L_д}}$ $\omega_{0д} = \frac{1}{\sqrt{L_д C}}$	$\frac{d^2x}{d\bar{t}^2} + 2D_д\frac{dx}{d\bar{t}} + x = 0$, $y = \bar{i}_C = \frac{i_C\rho_д}{U_к}$, $\bar{t} = \omega_{0д}t$ $x = e^{-D_д\bar{t}}\,[x_{01}\cos\bar{t} +$ $+ (y_{01} + D_д x_{01})\sin\bar{t}] \approx$ $\approx R_{01}e^{-D_д\bar{t}}\cos(\bar{t} + \beta)$ $y = e^{-D_д\bar{t}}\,[y_{01}\cos\bar{t} -$ $-(x_{01} + D_д y_{01})\sin\bar{t}] \approx$ $\approx R_{01}e^{-D_д\bar{t}}\sin(\bar{t} + \alpha)$ $R_{01} = x_{01}\sqrt{1 + \left(\frac{\bar{I}_н}{x_{01}}\right)^2 - 2D_д\frac{\bar{I}_н}{x_{01}}}$, $\operatorname{tg}\alpha = \frac{\bar{I}_н}{x_{01}\left(1 - D_д\frac{\bar{I}_н}{x_{01}}\right)}$ $\operatorname{tg}\beta = \frac{\bar{I}_н}{x_{01}} - D_д$	Без ограничения	$y \leqslant 0$	$x\,[0] = x_{01}$, $y\,[0] = y_{01} = -\bar{I}_н = -\frac{I_н\rho_д}{U_к}$ или $y\,[0] = -\bar{I}_н\frac{w_2}{w_1}$ $x\,[\bar{t}_1] = x_{д\max} \approx -R_{01}e^{-D_д(\pi-\alpha)}$
		Резисторно-диодная цепь r_4, 5	$x \geqslant 0$ $y < 0$	$x\,[0] = x_{01}$, $y\,[0] = y_{01} = -\bar{I}_н$ или $y\,[0] = -\bar{I}_н\frac{w_2}{w_1}$ $x\,[\bar{t}_1] = 0$, $y\,[\bar{t}_1] \approx -R_{01}e^{-D_д\bar{t}_1}$, $\bar{t}_1 = \frac{\pi}{2} - \beta$
		Трансформатор рекуперации	$x \geqslant -n_3 = \frac{w_1}{w_3}$	$x\,[0] = x_{01}$, $y\,[0] = -\bar{I}_н$ или $y\,[0] = -\bar{I}'_н$, $x\,[\bar{t}_1] = -n_3$, $y\,[\bar{t}_1] = y_1$
Разряд конденсатора при включенной цепи r_4, 5 $D'_д = D_д\left(1 + \frac{L_д}{r_д C r_4}\right)$	$\frac{d^2x}{d\bar{t}^2} + 2D'_д\frac{dx}{d\bar{t}} + x = 0$, $y = \bar{i}_C = \frac{i_C\rho_д}{U_c}$, $\bar{t} = \omega_{0д}t$ $x = \frac{y_{02}}{\sqrt{1 - D'^2_д}}e^{-D'_д\bar{t}}\sin\sqrt{1 - D'^2_д}\,\bar{t}$ $y = e^{-D'_д\bar{t}}y_{02}\left[\cos\sqrt{1 - D'^2_д}\,\bar{t} - \frac{D'_д}{\sqrt{1 - D'^2_д}}\sin\sqrt{1 - D'^2_д}\,\bar{t}\right]$	Цепь r_4, 5	$x \leqslant 0$ $y \leqslant 0$	$x\,[0] = 0$; $y\,[0] = y_{02} = y\,[\bar{t}_1] = -R_{01}e^{-D_д\bar{t}_1}$ $x\,[\bar{t}_2] = -R_{01}e^{-D_д\bar{t}_1}e^{-D'_д\bar{t}_2} = x_{д\max}$; $y\,[\bar{t}_2] = 0$ $\bar{t}_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - D'^2_д}}\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{1 - D'^2_д}}{D'_д}$
Разряд конденсатора при включенной цепи рекуперации w_3, 6 $D_{1-3} = \frac{r_1 + r'_3}{2\rho_д} = \frac{r_1 + r'_3}{2}\sqrt{\frac{C}{L_д}}$	$\frac{d^2x}{d\bar{t}^2} + \frac{1}{2D_{1-3}}\frac{dx}{d\bar{t}} + x = 0$, $y = \bar{i}_C = \frac{i_C\rho_д}{U_к}$, $\bar{t} = \omega_{0д}t$, $x \approx -n_3 = \text{const}$	Трансформатор рекуперации	$x \leqslant -n_3$ $y \leqslant 0$	$x\,[0] = x_{02} = -n_3$, $y\,[0] = y_1$ $x\,[\bar{t}_2] = x_{д\max} = -n_3$, $y\,[\bar{t}_2] \approx 0$
Заряд конденсатора по цепи $U_к$, 4, $L_к$, $r_к$, C (рис. 1,*а*) $D_к = \frac{r_к}{2\rho_к} = \frac{r_к}{2}\sqrt{\frac{C}{L_к}}$ $\omega_{0к} = \frac{1}{\sqrt{L_к C}}$ или по цепи $U_к$, 4, $L_к$, $r_к$, $L_д$, $r_д$, C (рис. 1,*б*) $D_к = \frac{r_к + r_д}{2}\sqrt{\frac{C}{L_к + L_д}}$, $\omega_{0к} = \frac{1}{\sqrt{C(L_к + L_д)}}$	$\frac{d^2x}{d\bar{t}^2} + D_к\frac{dx}{d\bar{t}} + x = 1$, $y = \bar{i}_C = \frac{i_C\rho_к}{U_к}$, $\bar{t} = \omega_{0к}t$ $x = 1 + e^{-D_к\bar{t}}\{(x_0 - 1)\cos\bar{t} +$ $+ [y_0 + D_к(x_0 - 1)]\sin\bar{t}\}$ $y = e^{-D_к\bar{t}}\{y_0\cos\bar{t} -$ $-[(x_0 - 1) + D_к y_0]\sin\bar{t}\}$	Для всех схем	$y \geqslant 0$	$x\,[0] = x_0 = x_{д\max}$, $y\,[0] = y_0 \approx 0$ $x\,[\bar{t}_3] = x\,[\pi] = 1 + e^{-\pi D_к}(1 - x_{д\max})$ $y\,[\bar{t}_3] = y\,[\pi] = 0$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

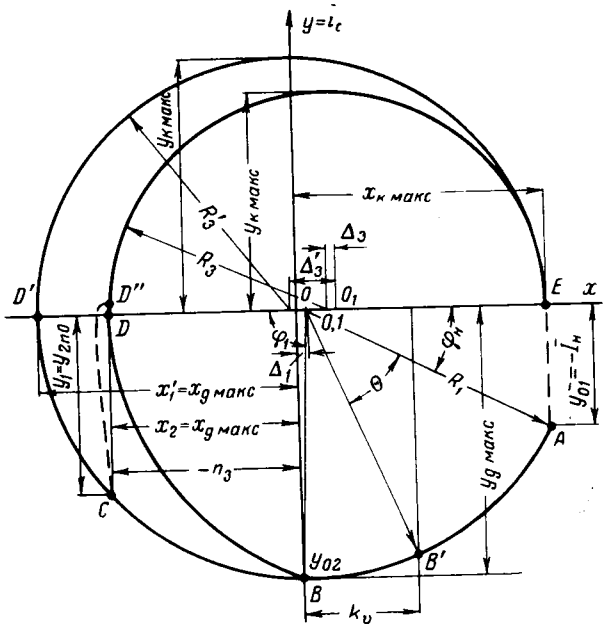


Рис. 3. Фазовые траектории предельных циклов перезаряда конденсатора.

ния ($AB'BDE$) и с трансформаторной цепью возврата ($AB'BCDE$).

Угол действия обратного напряжения на запирающемся тиристоре соответствует времени, в течение которого напряжение u_C изменяется от величины $U_{C\,к\max}=U_{01}$ до U, а $x=\bar{u}_C$ от $x_{к\min}=x_{01}$ до $k_U=U/U_к$. Он равен центральному углу, опирающемуся на дугу AB' аппроксимирующей окружности. Точка B' определяется как точка пересечения фазовой траектории с линией x.

На основании построений на рис. 3 имеем:

$$\cos(\theta+\varphi_н)=\frac{k_U-\Delta_1}{R_1}=\frac{(k_U-\Delta_1)\cos\varphi_н}{x_{к\max}-\Delta_1}\approx\frac{k_U\cos\varphi_н}{x_{к\max}},$$

$$\varphi_н=\operatorname{arctg}\frac{\bar{I}_н}{x_{к\max}-\Delta_1}\approx\operatorname{arctg}\frac{\bar{I}_н}{x_{к\max}}, \qquad (8)$$

откуда

$$\theta=\arccos\left(\frac{k_U-\Delta_1}{R_1}\right)-\varphi_н\approx\arccos\frac{k_U\cos\varphi_н}{x_{к\max}}-\varphi_н. \qquad (9)$$

Учитывая, что в реальных схемах аргумент $\alpha=\frac{k_U-\cos\varphi_н}{x_{к\max}}<0{,}7$, можно ограничиться первым членом ряда. Тогда

$$\theta=\left(\frac{\pi}{2}-\varphi_н\right)\left(1-\frac{k_U}{x_{к\max}}\frac{\cos\varphi_н}{\frac{\pi}{2}-\varphi_н}\right). \qquad (10)$$

Таким образом, независимо от используемого способа ограничения эффекта накопления, угол действия обратного напряжения определяется соотношением (8) или (10). Это позволяет для расчета всех схем ШИП с последовательным гашением пользоваться универсальными угловыми характеристиками, представляющими собой семейства зависимостей $\theta=f(x_{к\max})$ при $\bar{I}_н=\text{const}$, построенными для различных значений k_U.

Положение первой линии переключения, соответствующей моменту изменения структуры гасящих цепей, зависит от способа ограничения эффекта накопления (таблица).

Процесс разряда на интервале существования цепи рекуперации — апериодический, так как D_{1-3} обычно меньше 0,1, а $\frac{1}{D_{1-3}}>10$. На фазовой плоскости ему соответствует участок CD'' (пунктир на рис. 3). При расчете предельных циклов он может быть заменен прямой $CD\left(x=-n_з=-\frac{w_1}{w_з}=\text{const}\right)$. В интервал рекуперации энергия электромагнитного поля конденсатора почти не изменяется, и средняя рекуперируемая и рассеиваемая мощность на этом интервале

$$P_р=\frac{1}{2}fL_д\left(y_1\frac{U_к}{\rho_к}\right)^2=\frac{1}{2}fCU_к^2y_1^2,$$

$$\bar{P}_р=\frac{P_р}{UI_н}=\frac{f}{2k_U}\frac{y_1^2}{\omega_{0к}\bar{I}_н}. \qquad (11)$$

Расчет предельных циклов перезаряда конденсатора и характеристики ШИП. Рассчитать предельные циклы перезаряда конденсатора можно, воспользовавшись решениями уравнений на коммутационных интервалах (таблица), если учесть свойство замкнутости фазовых траекторий в квазиустановившемся режиме работы преобразователя. При этом

$$x[\pi]=x_{01}=x_{к\max}=1+e^{-\pi D_к}(1-x_{д\max}). \qquad (12)$$

Для схемы без дополнительных цепей ограничения

$$x_{01}=x_{к\max}=\frac{1+e^{-\pi D_к}}{1-e^{-\pi D_к}e^{-(\pi-\alpha)D_д}\sqrt{1+\left(\frac{\bar{I}_н}{x_{01}}\right)^2-2D_д\left(\frac{\bar{I}_н}{x_{01}}\right)}}=$$

$$=f(D_д,\ D_к,\ \bar{I}_н). \qquad (13)$$

В ШИП с резисторно-диодной цепью ограничения

$$x_{01}=x_{к\max}=$$

$$=\frac{1+e^{-\pi D_к}}{1-e^{-\pi D_к}e^{-D_д\bar{t}_1}e^{-D'_д\bar{t}_2}\sqrt{1+\left(\frac{\bar{I}_н}{x_{01}}\right)^2-2D_д\left(\frac{\bar{I}_н}{x_{01}}\right)}}=$$

$$=f(D_д,\ D'_д,\ D_к,\ \bar{I}_н), \qquad (14)$$

где

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{\bar{I}_н}{1-D_д\frac{\bar{I}_н}{x_{01}}},\quad \bar{t}_1=\frac{\pi}{2}-\operatorname{arctg}\left(\frac{\bar{I}_н}{x_{01}}-D_д\right),$$

$$\bar{t}_2=\frac{\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{1-D'^2_д}{D'_д}}}{\sqrt{1-D'_д}}.$$

В ШИП с трансформаторной цепью рекуперации максимальное относительное напряжение на конденсаторе не зависит от тока нагрузки:

$$x_{01}=x_{к\max}=1+e^{-\pi D_к}(n_з+1). \qquad (15)$$

Расчет параметров коммутирующих цепей ШИП удобно производить с помощью семейств универ-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

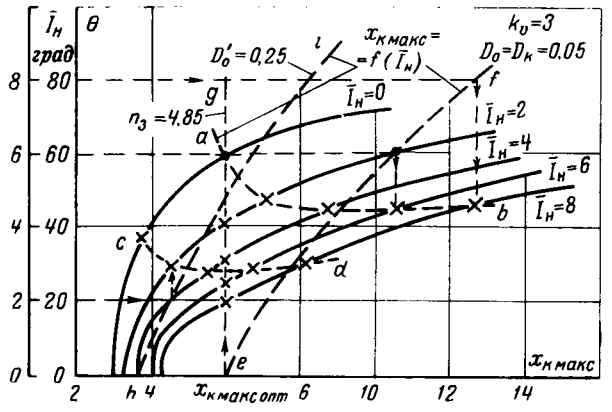


Рис. 4. Универсальные угловые характеристики и характеристики максимальных координат предельного цикла перезаряда конденсатора.

сальных угловых характеристик $\theta=f(x_{к\,max})$ при $\bar{I}_н=\text{const}$ (9) и (10), построенных для нескольких значений коэффициента k_U и дополненных зависимостями $x_{к\,max}=f(\bar{I}_н)$ для определенных схем (13)—(15). С помощью несложных построений, приведенных на рис. 4, на универсальных характеристиках определяются рабочие точки, через которые проводятся характеристики $\theta=f(x_{к\,max})$, соответствующие конкретным схемам ШИП. Пунктирные кривые *ab, cd, ge* на рис. 4 представляют собой соответственно зависимости $\theta=f(x_{к\,max})$ для схем ШИП без цепей ограничения, с резисторно-диодной цепью ограничения ($D'_д=0,25$) и с трансформаторной цепью рекуперации ($n_з=4,85$). Точки пересечения этих характеристик (пунктир на рис. 4) с универсальными соответствуют значениям относительных токов $\bar{I}_н$, указанным на универсальных характеристиках. Сравнивая кривые $\theta=f(x_{к\,max})$, можно заметить, что введение цепей ограничения всегда приводит к уменьшению угла θ. В ШИП с трансформатором рекуперации при $k_{св}=1$ характеристика $\theta=f(x_{к\,max})$ представляет собой прямую:

$$x=x_{к\,max}=1+e^{-\pi D_к}(n_з+1)=\text{const}.$$

При этом увеличение нагрузки преобразователя $I_н$ вызывает наибольшее изменение угла θ. Выбирая соответствующим образом коэффициент трансформации $n_з$, можно ограничить область относительных токов $\bar{I}_н$, в которой будет действовать цепь рекуперации.

Относительные коммутационные потери мощности. В ШИП с последовательным гашением и независимым контуром заряда конденсатора энергия, запасаемая в элементах гасящих цепей, не сообщается приемнику. Поэтому средняя мощность, потребляемая от источника $U_к$, расходуется только в контурах перезаряда конденсатора:

$$P_{к.ср}=U_к I_{к.ср}=P_{ком}.$$

Относительные коммутационные потери мощности, характеризующие к. п. д. преобразователя,

$$\bar{P}_{ком}=\frac{P_{ком}}{UI_н}=2f\tau_в k_{зап}\frac{y_{к\,max}}{k_U\theta\bar{I}_н}. \qquad (16)$$

Для сравнения схем тиристорных ШИП удобно пользоваться понятием относительных приведенных коммутационных потерь:

$$\bar{P}'_{ком}=\frac{\bar{P}_{ком}}{2f\tau_в k_{зап}}=\frac{y_{к\,max}}{k_U\theta\bar{I}_н}. \qquad (17)$$

Для схем с трансформатором рекуперации

$$\bar{P}'_{ком.р}=\frac{y_{к\,max}-(0,5y_1)^2}{k_U\theta\bar{I}_н}. \qquad (18)$$

Координаты предельных циклов перезаряда конденсатора в ШИП с последовательным гашением не зависят от коэффициента напряжения. Коммутационные потери мощности на основании (16), (17) и (10) можно представить как функцию коэффициента k_U:

$$\bar{P}'_{ком}=\frac{y_{к\,max}}{\bar{I}_н\left(\frac{\pi}{2}-\varphi_н\right)}\frac{1}{k_U\left(1-\frac{k_U}{x_{к\,max}k_{\varphi_н}}\right)}=$$

$$=\frac{y_{к\,max}}{\bar{I}_н\left(\frac{\pi}{2}-\varphi_н\right)}\frac{1}{F(k_U)} \qquad (19)$$

или

$$\bar{P}'_{ком.р}=\frac{y_{к\,max}-(0,5y_1)^2}{\bar{I}_н\left(\frac{\pi}{2}-\varphi_н\right)}, \qquad (20)$$

где

$$k_{\varphi_н}=\frac{\frac{\pi}{2}-\varphi_н}{\cos\varphi_н}.$$

Кривые зависимостей $\bar{P}'_{ком}=f(k_U)$, $\bar{I}_н=\text{const}$ имеют явно выраженный минимум (рис. 5), который соответствует выполнению условия

$$\frac{d\bar{P}'_{ком}}{dk_U}=0 \text{ или } \frac{d[F(k_U)]}{dk_U}=0.$$

Таким образом, оптимальное значение коэффициента напряжения питания

$$k_{U\,опт}=\frac{k_{\varphi_н}x_{к\,max}}{2}=\frac{x_{к\,max}}{2}\frac{\frac{\pi}{2}-\varphi_н}{\cos\varphi_н}. \qquad (21)$$

В рабочем диапазоне нагрузок $\bar{I}_н$ величина $k_{\varphi_н}$ изменяется в достаточно узких пределах (при изменении $\varphi_н$ от 0,3 до 1,0 радиана $k_{\varphi_н}=1,33\div1,11$). Следовательно, ШИП с последовательным гашением будут работать в режиме минимальных коммутационных потерь, если параметры гасящих цепей выбраны таким образом, что относительное максимальное напряжение на конденсаторе в конце интервала заряда

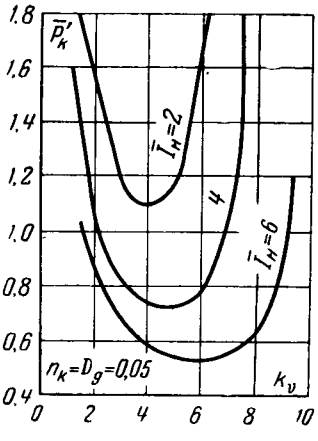


Рис. 5. Кривые зависимостей $\bar{P}'_{ком}=f(k_U)$ при $\bar{I}_н=\text{const}$.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$x_{01} = x_{\text{к max опт}} = \frac{2k_U}{k_{\varphi_\text{н}}} \approx (1{,}65 \div 2{,}0)\, k_U. \qquad (22)$$

Преобразователи с трансформаторами рекуперации во всем диапазоне нагрузок $\bar{I}_\text{н}$ могут работать в режиме минимальных потерь, так как $x_{\text{к max}} = \text{const}$. В ШИП без цепей ограничения или с резисторно-диодной цепью ограничения условия работы с минимальными потерями выполняются лишь при одном значении нагрузки преобразователя $\bar{I}_\text{н} = \bar{I}_{\text{н.ном}}$, для которого выбирается

$$(x_{\text{к max}})_{\bar{I}_{\text{н.ном}}} = x_{\text{к max опт}} \approx (1{,}65 \div 2{,}0)\, k_U.$$

Влияние быстропротекающих коммутационных процессов на характеристики ШИП. Для расчета быстропротекающих коммутационных процессов необходимо определить время запаздывания запирания силового тиристора $t_\text{з}$ (рис. 2). Длительность существования контура запирания C, U, 3, 1, $L_\text{п}$, 1′ зависит от величины тока нагрузки $I_\text{н}$ и времени обратного восстановления тиристора, в течение которого по нему может протекать обратный ток. Изменение напряжения на конденсаторе и тока i_C в интервал запирания (рис. 1,*а*) характеризуется уравнениями:

$$\frac{d^2\tilde{u}_C}{d\tilde{t}^2} + 2D_\text{п}\frac{d\tilde{u}_C}{d\tilde{t}} + \tilde{u}_C = 1;\ \tilde{u}_C = \frac{u_C}{U};\ \tilde{i}_C = \frac{i_C \rho_\text{п}}{U};$$

$$\tilde{t} = \omega_{0\text{п}} t;\ \tilde{i}_C = \frac{(i_\text{т} - I_\text{н})\,\rho_\text{п}}{U} = \frac{d\tilde{u}_C}{d\tilde{t}} \qquad (23)$$

с начальными условиями

$$\tilde{u}_C[0] = \frac{U_{C\text{к max}}}{U} = \frac{x_{\text{к max}}}{k_U},\ \tilde{i}_C[0] = 0.$$

Здесь $D_\text{п} = \frac{r_\text{п}}{2\rho_\text{п}} = \frac{r_\text{п}}{2}\sqrt{\frac{C}{L_\text{п}}}$, $\omega_{0\text{п}} = \frac{1}{\sqrt{L_\text{п} C}}$ — приведенный коэффициент затухания и угловая частота контура запирания.

Параметры контура запирания обычно таковы, что аргументы тригонометрических функций в пределах временного интервала $0-(t_0+t_1+t_2)$ не превышают значений 0,2—0,6. Это позволяет решения системы (23) записать в виде:

$$\tilde{u}_C = \frac{u_C}{U} = 1 + e^{-D_\text{п}\tilde{t}}(\tilde{U}_{01} - 1)\left[1 - 0{,}5\left(\sqrt{1 - D_\text{п}^2}\,\tilde{t}\right)^2 + D_\text{п}\tilde{t}\right], \qquad (24)$$

$$\tilde{i}_C = \frac{i_C \rho_\text{п}}{U} = -\frac{\tilde{U}_{01} - 1}{\sqrt{1 - D_\text{п}^2}}\, e^{-D_\text{п}\tilde{t}} D_\text{п}\tilde{t}, \qquad (25)$$

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{U\omega_{0\text{п}}}{\rho_\text{п}}\frac{di_C}{dt} =$$

$$= -\frac{U}{L_\text{п}}(\tilde{U}_{01} - 1)\, e^{-D_\text{п}\tilde{t}}\left[1 - \frac{(1 - D_\text{п}^2)\tilde{t}^2}{2} - D_\text{п}\tilde{t}\right]. \qquad (26)$$

Время коммутации тока нагрузки с силового тиристора на шунтирующий диод 3 (время спада тока $i_\text{т}$ до нуля) t_0 определяется из уравнения $\tilde{i}_C[\tilde{t}_0] = \frac{I_\text{н}\rho_\text{п}}{U}$.

$$\tilde{t}_0 = \omega_{0\text{п}} t_0 \approx \frac{1}{2D_\text{п}} - \sqrt{\left(\frac{1}{2D_\text{п}}\right)^2 - \frac{I_\text{н}\rho_\text{п}}{(U_{01} - U)\, D_\text{п}}}. \qquad (27)$$

Для определения времени восстановления тиристора $t_{\text{в.обр}}$, запираемого обратным напряжением, необходимо найти скорость изменения тока в тиристоре в момент $\tilde{t} = \tilde{t}_0$ $\frac{di_\text{т}}{dt}[\tilde{t}_0] = \frac{di_C}{dt}[\tilde{t}_0]$, пользуясь соотношениями (26) и (27).

Время изменения тока $i_\text{т} = I_\text{н} + i_C$ от нуля до максимального обратного тока I_1 (рис. 2) t_1 может быть найдено по экспериментально полученным зависимостям $I_1 = f\left(\frac{di_\text{т}}{dt}\right)$ [Л. 6] или выражено через значение остаточного заряда неосновных носителей в базе тиристора [Л. 7]:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2Q_\text{ост}}{\left(\frac{di_\text{т}}{dt}\right)_{t_0}}}.$$

Зоны разброса экспериментально полученных зависимостей $Q_\text{ост} = f\left(\frac{di_\text{т}}{dt}\right)$ для тиристоров УПВКЛ (рис. 6,*а*) показывают, что заряд неосновных носителей растет почти пропорционально скорости изменения тока. Время запаздывания запирания тиристора

$$t_\text{з} = t_0 + t_1 + t_2 = t_0 + t_{\text{в.обр}} \approx t_0 + (1{,}1 \div 1{,}2)\, t_1. \qquad (28)$$

Как показали расчеты, относительное время запаздывания $\tilde{t}_\text{з} = \omega_{0\text{п}} t_\text{з}$ тем больше, чем больше коэффициент затухания контура запирания $D_\text{п}$. В реальных схемах $D_\text{п} = 0{,}2 \div 0{,}7$, $t_\text{з} = 0{,}25 \div 0{,}7$, а время

$$t_\text{з} \approx (2 \div 10)\ \textit{мксек} \ll \frac{T_\text{од}}{2}.$$

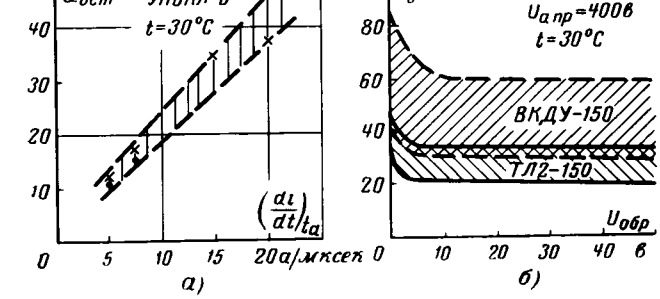


Рис. 6. Динамические параметры тиристора.

а — кривые зависимости $Q_\text{ост} = f\frac{di_\text{т}}{dt}$ для УПВКЛ; *б* — кривые зависимостей $\tau_\text{в} = f(U_\text{обр})$ при $t° = 25°$ С и $I_\text{н} = 100$ *а*.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Величина напряжения на конденсаторе к концу интервала запирания тиристора

$$u_C[t_3] = U'_{01} = U\{1 + e^{-D_п \tilde{t}_3}(\tilde{U}_{01} - 1)[1 - 0{,}5(1 - D_п^2)\tilde{t}_3^2 + D_п \tilde{t}_3]\}. \quad (29)$$

Кратность изменения напряжения на конденсаторе вследствие конечного времени запирания тиристора характеризуется коэффициентом

$$\alpha_к = \frac{U'_{01}}{U_{01}} = \frac{x'_{01}}{x_{01}} = \frac{x'_{к\,max}}{x_{к\,max}}. \quad (30)$$

Таким образом, запаздывание запирания тиристора приводит к уменьшению координат предельного цикла перезаряда конденсатора в $\alpha_к$ раз. Поэтому для учета коммутационного падения напряжения Δu_C при расчете времени (или угла) действия обратного напряжения в формулы (8) и (10) следует подставлять значение $x'_{к\,max} = \alpha_к = x_{к\,max}$. При пользовании угловыми характеристиками угол θ также определяется для значения $x'_{к\,max}$.

Расчеты и опытные исследования тиристорных ШИП показывают, что для рассматриваемых схем $\alpha_к = 0{,}98 \div 0{,}9$. Наибольшие значения коэффициента $\alpha_к$ соответствуют схемам с дросселями насыщения *Др* и схемам с малым значением $D_п$. Приближенно коммутационное падение напряжения можно учесть, вводя коэффициент запаса $k_{зап}$ в формулу (1). При расчете коммутирующих цепей необходимо учитывать, что время восстановления тиристоров $\tau_в$ зависит от ряда факторов: температуры, обратного напряжения $U_{обр}$, крутизны и величины повторно приложенного прямого напряжения ($U_{пр}$, $\frac{du_{пр}}{dt}$), величины и скорости уменьшения прямого тока в запирающемся тиристоре. Последний фактор влияет лишь на величину задержки запирания $t_з$ [Л. 6]. В схемах ШИП с последовательным гашением скорости изменения тока в запирающемся тиристоре высоки (10—30) *а/мксек*, и изменение времени $t_з$ слабо сказывается на общем значении времени восстановления тиристора $\tau_в$. Последнее в расчетных соотношениях должно соответствовать наибольшей температуре и максимально возможному току в силовом тиристоре.

Скорости нарастания восстанавливающегося прямого напряжения на силовом тиристоре ШИП с последовательным гашением невелики, так как они определяются частотой контура C, $L_д$ $\left(\frac{du_{пр}}{dt} < 5\ в/мксек\right)$. При этом $t_в$ почти не зависит от $\frac{du_{пр}}{dt}$ и $u_{пр}$. Время восстановления $\tau_в$ существенно зависит от величины обратного напряжения, прикладываемого к запирающемуся тиристору (рис. 6,*б*) *.

Из рис. 6,*б* следует, что при $U_{обр} > 20$ *в* зависимость $\tau_в$ от обратного напряжения становится весьма слабой и может не учитываться.

Выводы. 1. На основании приведенной методики и полученных соотношений можно рассчитать характеристики ШИП с последовательным гашением, служащие основой для проектирования коммутирующего устройства преобразователя.

2. Быстропротекающие коммутационные процессы, связанные с задержкой запирания силового тиристора, вызывают небольшое уменьшение максимальных координат предельного цикла перезаряда конденсатора, которое учитывается коэффициентом $\alpha_к$ или $k_{зап}$.

3. Применение резисторно-диодных и трансформаторных цепей, ограничивающих эффект накопления, всегда связано с уменьшением угла действия обратного напряжения, а следовательно, с увеличением емкости и индуктивности $L_д$. Однако, благодаря уменьшению максимальных напряжений на элементах коммутирующего устройства и силового каскада, установленная мощность их может быть уменьшена.

Литература

1. Шпиглер Л. А., Широтно-импульсные тиристорные преобразователи для регулируемого электропривода постоянного тока, сб. «Управляемые вентили в электроприводе и промышленной автоматике», ЛДНТП, 1966.

2. Глазенко Т. А., Тиристорные широтно-импульсные преобразователи для систем электропривода, ЛДНТП, 1968.

3. Скороваров В. Е., Работа вентилей в схемах автономных инверторов с повышенной частотой, «Электричество», 1965, № 3.

4. Morgan Ray. E., Basic magnetic functions in converters and inverters including new soft commutation, «IEEE Trans. Ind. and Gen. Applic», 1966, 2, № 1.

5. Глазенко Т. А., Применение метода фазовой плоскости для расчета электромагнитных процессов в инверторах с двухступенчатой емкостной коммутацией, «Электричество», 1967, № 9.

6. Rumberg, Über die dynamischen Eigenschaften von Thyristoren, «ETZ» Ausgabe A, 1965, Bd 136, 8, 3.

7. Гринштейн Б. И. и др., Расчет послекоммутационного периода в трехфазном мостовом полупроводниковом преобразователе при применении вентилей с лавинными характеристиками. «Электричество», 1970, № 2.

[14.5.1970]

* Кривые зависимостей $\tau_в = f(U_{обр})$ при $I_н = 100$ *а* были получены опытным путем В. В. Тогатовым.

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Тиристорные регуляторы постоянного тока с повышенной частотой коммутации

Канд. техн. наук Б. Н. ИВАНЧУК и инж. И. И. КОЛОСКОВ

Москва

Тиристорные регуляторы широко применяются не только в цепях переменного тока, но и в цепях постоянного тока, где для отключения тиристоров необходимо применять специальные коммутирующие устройства [Л. 1 и 2].

Основным элементом коммутирующего устройства является обычно предварительно заряженный конденсатор, запас энергии в котором должен быть достаточным для отключения включенного тиристора. При этом, поскольку после отключения конденсатор должен быть вновь заряжен до исходного состояния, схемное время коммутации T в тиристорных регуляторах постоянного тока всегда больше собственного времени отключения тиристора $t_{откл}$. Вследствие этого максимально возможная частота коммутации регулятора существенно уменьшается, так как повторное включение регулирующего тиристора может быть осуществлено только по истечении времени T.

В то же время в большинстве регуляторов постоянного тока для повышения их динамических свойств частота коммутации должна быть максимальной. Кроме того, регуляторы должны иметь жесткую нагрузочную характеристику (особенно в разомкнутых системах регулирования), широкий диапазон регулирования выходного напряжения, минимальные перенапряжения на элементах схемы, высокий к. п. д., минимальные габариты и вес регулятора и т. д.

Перечисленные требования легко удовлетворяются при относительно низкой частоте коммутации регулятора, когда временем T и коммутационными потерями можно пренебречь. Практически подобные регуляторы могут быть выполнены по любой из известных схем [Л. 2—4]. С увеличением частоты коммутации, когда коммутационные потери резко увеличиваются, а период коммутации приближается к схемному времени отключения, важное значение приобретает конструктивное построение схемы регулятора.

В настоящей статье проводится сравнительный анализ наиболее распространенных и простых схем регуляторов, в которых обеспечивается повышенная частота коммутации тиристора, однако результаты этого анализа могут быть использованы и при рассмотрении более сложных схем регуляторов, сходных по характеру коммутационных процессов. Анализ проводится на основе следующих допущений:

внутреннее сопротивление источника питания и активные потери в элементах схемы много меньше сопротивления и потерь мощности в нагрузке;

нагрузка имеет реактивный характер, причем ток ее в процессе коммутации не изменяется, так как период коммутации значительно меньше постоянной времени нагрузки.

Тиристорные регуляторы постоянного тока различают по способу подключения запирающего напряжения (с параллельной и последовательной коммутацией) и способу заряда коммутирующего конденсатора (с независимой цепью заряда и с зарядом по цепи нагрузки).

Рассмотрим работу тиристорного регулятора с последовательной коммутацией и независимой цепью заряда коммутирующего конденсатора, схема которого приведена на рис. 1 (схема *1*).

В исходном состоянии через нагрузку $L_нR_н$ протекает ток

$$I_н = E/R_н, \tag{1}$$

а напряжение на конденсаторе C превышает напряжение питания ($u_C > E$) за счет энергии, накапливаемой в индуктивности $L_д$.

В момент $t = t_0$ включается тиристор T_2, и через него и индуктивность L начинается разряд конденсатора C. При этом, учитывая, что $u_C > E$, тиристор T_1 запирается.

К моменту времени $t = t_1$ напряжение на конденсаторе C уменьшается до $u_C = E$, а значение напряжения на тиристоре T_1 становится равным нулю.

В интервале $t_0 < t < t_1$:

$$u_C = 2E(\cos\omega t - \sigma \sin\omega t); \tag{2}$$

$$i_C = -I_m(\sin\omega t + \sigma\cos\omega t), \tag{3}$$

а длительность этого интервала

$$\Delta t_{01} = \frac{1}{\omega}\arcsin\frac{\sqrt{4\sigma^2+3}-\sigma}{2(\sigma^2+1)}, \tag{4}$$

где $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ — частота собственных колебаний в контуре LC; $I_m = 2E\sqrt{\frac{C}{L}}$ — амплитуда тока в контуре; $\sigma = \frac{I_н}{I_m}$ — коэффициент отношения токов.

Параметры схемы должны быть выбраны таким образом, чтобы Δt_{01} было не менее времени отключения тиристоров $t_{откл}$, а коэффициент $\sigma = 0{,}25—0{,}5$.

С момента $t = t_1$ наряду с током, протекающим в контуре LC, появляется ток в контуре, образованном индуктивностями L и $L_д$, диодом $Д_1$ и источником E. При этом в интервале $t_1 < t < t_2$:

$$u_C = \frac{E(L_д\cos\alpha t + \alpha)}{L_д + L} - \frac{I_m}{C\alpha}\sin\alpha t; \tag{5}$$

$$i_C = -\frac{E}{\alpha L}\sin\alpha t - I_m\cos\alpha t; \tag{6}$$

$$i_{L_д} = \frac{E(\alpha t - \sin\alpha t)}{\alpha(L + L_д)} + \frac{I_m}{L_д C\alpha^2}(1 - \cos\alpha t), \tag{7}$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{L + L_д}{LL_д C}}$.

Из совместного решения (6) и (7) с учетом, что $i_C = i_д$, определим соотношение между значением индуктивности L и минимальным значением добавочной индуктивности $L_д$:

$$L_{д\,min} \approx 3{,}5L,$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

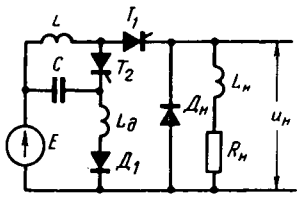


Рис. 1.

а также длительность рассматриваемого интервала

$$\Delta t_{12} \approx \frac{\pi}{\alpha}.$$

В момент $t=t_2$ ток разряда конденсатора становится равным току в индуктивности $L_д$, при этом тиристор T_2 отключается, а конденсатор C за счет энергии, накопленной в индуктивности $L_д$, и источника E перезаряжается до исходного состояния.

Строго говоря, без учета потерь в элементах схемы напряжение на конденсаторе C при последующих коммутациях должно непрерывно возрастать. Вследствие этого небольшие потери являются в данной схеме стабилизирующим фактором, под воздействием которого на конденсаторе устанавливается напряжение, обычно несколько превышающее $2E$. При приближенном анализе с достаточной степенью точности можно пренебречь потерями в элементах схемы, а установившееся значение напряжения на конденсаторе считать равным $2E$.

В этом случае при $L_д = L_{д\,min}$ конденсатор C в рассматриваемом интервале будет перезаряжаться от значения $U_{C2} \approx -0{,}6E$ до $U_{C3} \approx 2E$ за время $\Delta t_{23} \approx \approx 1{,}8\pi\sqrt{LC} = \pi\sqrt{L_д C}$. К моменту времени $t=t_3$ схема возвращается в исходное состояние.

В данном случае схемное время коммутации

$$T = \Delta t_{01} + \Delta t_{12} + \Delta t_{23}, \qquad (8)$$

а схемное время отключения, т. е. интервал времени между моментом включения коммутирующего тиристора и уменьшением выходного напряжения регулятора до нуля $T_0=0$.

Рассмотрим тиристорный регулятор постоянного тока с последовательной коммутацией и независимой цепью заряда коммутирующего конденсатора (рис. 2), отличительной особенностью которого является рекуперация энергии (схема *2*).

В момент $t=0$ включается основной тиристор T_1 и в интервале $0<t<t_1$ напряжение сети прикладывается к нагрузке, а напряжение на конденсаторе

$$u_C = E(1-\cos\omega t). \qquad (9)$$

При этом ток заряда конденсатора

$$i_C = I_m \sin\omega t. \qquad (10)$$

К концу интервала конденсатор C зарядится до напряжения $U_C=2E$. Длительность рассматриваемого интервала

$$\Delta t_{01} = \pi/\omega. \qquad (11)$$

Процесс отключения нагрузки начинается с момента $t=t_2$, когда включается вспомогательный тиристор T_2. При этом в интервале $t_2<t<t_3$ коммутирующий конденсатор разряжается по контуру $L—T_2—T_1(Д_1)—E$, а напряжение на нем

$$u_C = E(1+\cos\omega t). \qquad (12)$$

В момент $t=t_3$ разрядный ток конденсатора i_C становится равным току нагрузки и диод $Д_1$ закрывается.

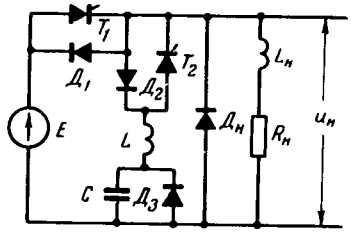


Рис. 2.

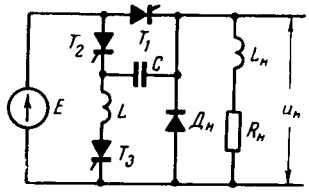


Рис. 3.

Длительность рассматриваемого интервала может быть определена из соотношения:

$$\Delta t_{23} = \frac{1}{\omega}(\pi - \arcsin\sigma),$$

причем в выражении для σ

$$I_m = E\sqrt{\frac{C}{L}}^{*}.$$

В этом же интервале происходит отключение тиристора T_1, а его время отключения должно удовлетворять соотношению:

$$t_{откл} \leqslant \frac{1}{\omega}(\pi - 2\arcsin\sigma). \qquad (13)$$

После запирания диода $Д_1$ разряд конденсатора C в интервале $t_3<t<t_4$ продолжается через цепь нагрузки, индуктивность L и тиристор T_2. Длительность этого интервала

$$\Delta t_{34} = \frac{EC}{I_н}(1-\sqrt{1-\sigma^2}). \qquad (14)$$

После разряда конденсатора C до нуля ток в индуктивности будет протекать через тиристор T_2 и диоды $Д_н$, $Д_3$ до полного затухания. Длительность этого процесса не оказывает существенного влияния на параметры схемы.

Схемное время коммутации

$$T = \Delta t_{01} + \Delta t_{23} + \Delta t_{34},$$

а схемное время отключения

$$T_0 = \Delta t_{23} + \Delta t_{34}.$$

На рис. 3 приведена схема регулятора с независимой цепью заряда конденсатора и параллельной коммутацией (схема *3*). В этой схеме заряд конденсатора C начинается в момент $t=0$ при одновременном включении основного тиристора T_1 и вспомогательного T_3, а оканчивается в момент $t=t_1$, когда ток перезаряда конденсатора C уменьшается до нуля. Напряжение на конденсаторе в интервале $0<t<t_1$

$$u_C = E(1-2\cos\omega t) \qquad (15)$$

при длительности данного интервала $\Delta t_{01} = \frac{\pi}{\omega}$.

Отключение нагрузки начинается с момента $t=t_2$, когда включается тиристор T_2 и происходит перезаряд конденсатора по контуру, образованному тиристором T_2, нагрузкой и источником E. Напряжение на конденсаторе в этом интервале

$$u_C = -3E + \frac{I_н}{C}t,$$

* Это же соотношение справедливо и для всех последующих схем регуляторов.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

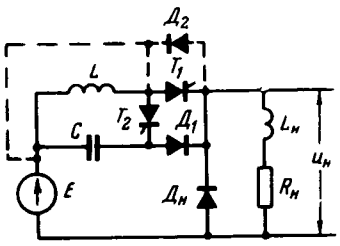


Рис. 4.

а длительность этого интервала

$$\Delta t_{23}=\frac{4EC}{I_н}. \quad (16)$$

Время отключения тиристора T_1

$$t_{откл}=\frac{3EC}{I_н}. \quad (17)$$

Схемное время коммутации

$$T=\Delta t_{01}+\Delta t_{23}, \quad (18)$$

а схемное время отключения

$$T_0=\Delta t_{23}. \quad (19)$$

Рассмотрим работу тиристорного регулятора с параллельной коммутацией и зарядом конденсатора через цепь нагрузки (схема *4*). Схема регулятора приведена на рис. 4. В исходном состоянии в интервале $0<t<t_1$ конденсатор C заряжен до напряжения E и через тиристор T_1 протекает ток нагрузки. Отключение T_1 осуществляется включением тиристора T_2 в момент $t=t_1$. При этом в интервале $t_1<t<t_2$ конденсатор C вначале заряжается по контуру L—T_2—C до обратной полярности, и при обратном разряде в момент, когда ток перезаряда достигает значения тока нагрузки, тиристор T_1 отключается. В этом интервале

$$u_C=E(\cos\omega t-\sigma\sin\omega t); \quad (20)$$

$$i_C=-I_m(\sin\omega t+\sigma\cos\omega t). \quad (21)$$

Начиная с момента $t=t_2$, когда тиристор T_2 закрывается, в интервале $t_2<t<t_3$ конденсатор перезаряжается по контуру, образованному диодом $Д_1$, нагрузкой и источником E. При этом

$$\left.\begin{aligned} u_C&=E+\frac{I_н}{C}t;\\ i_C&=I_н. \end{aligned}\right\} \quad (22)$$

Схемное время коммутации в данном случае совпадает со схемным временем отключения, т. е.

$$T_0=T=\frac{\pi}{\omega}+\frac{2EC}{I_н}, \quad (23)$$

а время отключения тиристора T_1

$$t_{откл}=\frac{EC}{I_н}. \quad (24)$$

Как следует из (23) и (24), коммутационные параметры данной схемы в значительной мере зависят от тока нагрузки. Эту зависимость можно существенно уменьшить, подключив параллельно тиристору T_1 обратный диод $Д_2$ (схема *5*).

Как и в исходной схеме, процесс коммутации будем рассматривать с момента времени t_1, когда открывается вспомогательный тиристор T_2, а конденсатор C вначале перезаряжается до обратной полярности по контуру L—T_2.

После этого начинается обратный перезаряд конденсатора до исходного состояния ($t=t_2$) через индуктивность L и диоды $Д_1$ и $Д_2$, в процессе которого через тиристоры ток не протекает и они отключаются.

В интервале $t_1<t<t_2$

$$u_C=E(\cos\omega t-\sigma\sin\omega t); \quad (25)$$

$$i_C=-I_m(\sin\omega t+\sigma\cos\omega t). \quad (26)$$

Длительность рассматриваемого интервала

$$T=T_0=\frac{2\pi}{\omega}-\frac{2}{\omega}\arcsin\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2+1}}, \quad (27)$$

а время отключения тиристора T_1

$$t_{откл}=\frac{\pi}{\omega}-\frac{2}{\omega}\arcsin\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2+1}}. \quad (28)$$

Во всех рассмотренных выше схемах дроссель, входящий в состав резонансного LC-контура, включен последовательно с регулирующим тиристором и нагрузкой регулятора. При таком включении существенно увеличиваются габариты дросселя, так как он должен быть рассчитан на сумму тока нагрузки и импульсного тока перезаряда коммутирующего конденсатора.

В регуляторе, схема которого приведена на рис. 5 (схема *6*), дроссель включен в цепь коммутирующего конденсатора и рассчитывается только на ток перезаряда последнего.

При открытии тиристора T_1 в момент $t=0$ к нагрузке приложено все напряжение сети, а конденсатор C, предварительно заряженный через тиристор T_2 и цепь нагрузки, в интервале $0<t<t_1$ перезаряжается до обратной полярности. При этом

$$u_C=E\cos\omega t; \quad (29)$$

$$i_C=-I_н\sin\omega t. \quad (30)$$

Длительность интервала

$$\Delta t_{01}=\pi/\omega. \quad (31)$$

В момент времени $t=t_2$, начиная с которого тиристор T_1 будет находиться в отключенном состоянии, включается тиристор T_2. В интервале $t_2<t<t_3$

$$u_C=-E+\frac{I_н}{C}t; \quad (32)$$

$$i_C=I_н. \quad (33)$$

Длительность этого интервала

$$\Delta t_{23}=\frac{2EC}{I_н}, \quad (34)$$

схемное время коммутации $T=\Delta t_{01}+\Delta t_{23}$, а время отключения тиристора T_1

$$t_{откл}=\frac{EC}{I_н}. \quad (35)$$

Регулятор, в котором через коммутирующий дроссель протекает только ток перезаряда коммутирующего конденсатора, может быть получен также из схемы, представленной на рис. 5, если положительный вывод источника E переключить

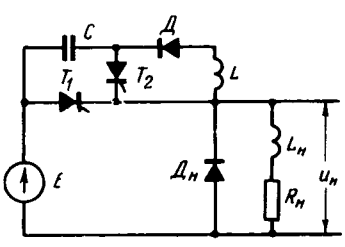


Рис. 5.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

на общую точку тиристоров T_1, T_2 и дросселя L (на рис. 4 показано пунктиром). В такой схеме регулятора (схема 7) в исходном состоянии конденсатор C заряжен до напряжения, несколько превышающего E, а напряжение на нагрузке появляется сразу после включения тиристора T_1. В момент времени $t=t_1$ включается тиристор T_2, и конденсатор C перезаряжается до обратной полярности, после чего T_2 запирается, а конденсатор начинает разряжаться по контуру, образованному элементами $Д_1$, T_1 и L.

После отключения тиристора T_1 разряд конденсатора продолжается по тому же контуру через диод $Д_2$. В интервале $t_1<t<t_2$

$$u_C = E(1+\sigma)\cos\omega t; \quad (36)$$

$$i_C = -I_m(1+\sigma)\sin\omega t, \quad (37)$$

а время отключения тиристора T_1

$$t_{откл} = \frac{1}{\omega}\left[\pi - 2\arcsin\frac{\sigma}{1+\sigma}\right]. \quad (38)$$

После прекращения протекания тока через диод $Д_2$ конденсатор дозаряжается до исходного состояния по контуру L—C—$Д_1$—$Д_н$—E (диод $Д_н$ открыт индуктивным током нагрузки), причем в данном интервале $t_2<t<t_3$

$$u_C = E(1+\sigma\sin\omega t); \quad (39)$$

$$i_C = I_н\cos\omega t. \quad (40)$$

Схемное же время коммутации в данном случае

$$T = \frac{1}{\omega}\left(2{,}5\pi - \arcsin\frac{\sigma}{1+\sigma}\right). \quad (41)$$

Во всех трех разновидностях схемы регулятора (рис. 4) тиристор T_2 может быть включен встречно-параллельно диоду $Д_1$. При таком включении несколько возрастают потери в тиристоре T_1, однако при выходе из строя тиристора T_2 регулятор продолжает функционировать с пониженным выходным напряжением, в то время как в исходной схеме выход из строя тиристора T_2 вызывает срыв коммутации.

Проведенный анализ схем тиристорных регуляторов позволяет сравнить их по основным параметрам и рекомендовать наиболее предпочтительную область применения.

Наиболее характерные расчетные параметры рассмотренных схем при $\sigma=0{,}25$ сведены в табл. 1. Принятое значение $\sigma=0{,}25$ обусловлено тем, что для большинства тиристоров допустимы перегрузки по току не выше пятикратных ($\sigma=0{,}2$), а минимальные габариты коммутирующих дросселя и конденсатора соответствуют значениям $\sigma\leqslant 0{,}4$.

Как следует из табл. 1, наименьшие габариты коммутирующих элементов, а также минимальное

Таблица 1

№ схемы	U_{T_1}max		U_{T_2}max		U_C max	$U_н$ max	$\frac{\sqrt{LC}}{t_{откл}}$	$\frac{T_0}{t_{откл}}$	ΔT_0, %	$\frac{T}{t_{откл}}$	$\varpi_{зар}$ C	
	прям.	обр.	прям.	обр							$\varpi_{зар}$	η
1	$3E$	E	$2E$	$0{,}6E$	$2E$	E	1,2	0	0	10,4	$2{,}8CE^2$	100
2	E	0	E	0	$2E$	E	0,38	1,1	+10	2,3	$2CE^2$	100
3	E	$2E$	$2E$	E	$2E$	$3E$	0,17	1,3	+100	1,9	$4{,}5CE^2$	100
4	E	E	E	E	$1{,}03E$	$2{,}03E$	0,25	2,8	+72	2,8	$2CE^2$	0
5	E	0	E	0	$1{,}03E$	$2{,}03E$	0,37	2,2	+5	2,2	0	0
6	E	E	E	E	E	$2E$	0,25	2	+100	2,8	$2CE^2$	0
7	$1{,}25E$	0	$1{,}25E$	0	$1{,}25E$	E	0.37	2,3	+2	2,8	0	0

Примечание. U_{T_1} max, U_{T_2} max, U_C max, $U_н$ max — амплитудные значения напряжений на тиристорах T_1, T_2, коммутирующем конденсаторе и обратном диоде $Д_н$ (нагрузке регулятора) соответственно; $\varpi_{зар}$ — энергия, потребляемая от сети на заряд коммутирующего конденсатора; η — потери $\varpi_{зар}$, %.

Таблица 2

№ схемы	Область применения				Дополнительные требования
	Источник питания	Частота коммутации	Нагрузка	Мощность нагрузки	
1	Низковольтный	Низкая	Переменная постоянная	Малая	—
2	Высоковольтный	Высокая	То же	Средняя	Возможность рекуперации тока в источник
3	Низковольтный	То же	Постоянная	Малая	Допустимы перенапряжения на нагрузке
4	Высоковольтный	» »	То же	Средняя	То же
5	То же	» »	Переменная постоянная	Большая	» »
6	» »	» »	Постоянная	Средняя	» »
7	» »	» »	Переменная постоянная	Большая	—

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

схемное время коммутации имеет схема с параллельной коммутацией и независимой цепью заряда коммутирующего конденсатора (схема *3*). Недостатками ее являются большие перенапряжения на элементах схемы, «мягкая» нагрузочная характеристика и большие потери мощности на заряд коммутирующего конденсатора.

Схемы *2, 4—7* имеют несколько большую длительность коммутационного процесса, но более высокие остальные параметры.

Схема с последовательной коммутацией и независимой цепью заряда коммутирующего конденсатора (схема *1*) имеет идеальную нагрузочную характеристику, но по всем остальным параметрам существенно уступает последующим.

Исходя из сравнительных характеристик рассмотренных схем тиристорных регуляторов постоянного тока, можно рекомендовать их области применения (табл. 2).

Как следует из табл. 2, схемы *2—7* могут быть использованы в регуляторах с относительно высокой частотой коммутации (порядка $20—50\ \frac{1}{t_{откл}}$). При широком диапазоне изменения нагрузки (10-кратном и более) и высоковольтном источнике питания ($E>200—300$ *в*) наиболее рациональными являются схемы *2, 5* и *7*, причем последняя может быть использована в достаточно мощных устройствах, с токами нагрузки, исчисляемыми десятками и более ампер.

Литература

1. Бунаков В. Л. и Гаспаров Р. Г., Полупроводниковые регуляторы напряжения и частоты электрических машин, изд-во «Энергия», 1966.

2. Крайцберг М. И. и Шикуть Э. В., Импульсные методы регулирования цепей постоянного тока с помощью тиристоров, изд-во «Энергия», 1969.

3. Кремниевые управляемые вентили — тиристоры. Технический справочник под ред. В. А. Лабунцова и А. Ф. Свиридова, изд-во «Энергия», 1964.

4. Джентри Ф. и др., Управляемые полупроводниковые вентили, изд-во «Мир», 1967.

[4.11.1969]

✧ ✧ ✧

УДК 621.3.078:621.771

Об инвариантных и автономных системах автоматического регулирования натяжений и скорости тонколистовой прокатки на реверсивном стане

М. Л. ПРУДКОВ

Днепропетровск

Получение качественного листового проката в значительной мере зависит от эффективности систем автоматизации прокатного производства. При холодной прокатке рулонной стали, и в частности на реверсивном стане, качество листа определяется, помимо прочего, точностью стабилизации таких технологических факторов как скорость и натяжение полосы. Создание в последние годы надежных датчиков и разработка на их основе систем прямого регулирования натяжений полосы на моталках (САРН) позволили повысить статическую точность поддержания натяжений. Однако различного рода возмущения, действующие в системе реверсивного стана, взаимное влияние технологических факторов и неустановившиеся режимы работы снижают точность САРН в динамике. По тем же причинам снижается и точность систем стабилизации скорости прокатки (САРС) и в результате ухудшается качество листа.

Поэтому актуальна задача построения автономных и инвариантных относительно возмущений САРН и САРС (особенно для тончайших лент), обеспечивающих требуемую точность стабилизации натяжений и скорости в любых режимах прокатки. Статья посвящена этому вопросу применительно к реверсивным станам.

Чтобы охарактеризовать реверсивный стан (рис. 1) как объект автоматизации, запишем уравнения взаимосвязи технологических факторов процесса тонколистовой холодной прокатки и параметров электропривода стана. При этом в основу положим вывод дифференциального уравнения натяжения прокатываемой полосы при намотке в рулон на моталке [Л. 1], зависимость между опережением металла и натяжениями полосы при прокатке, а также выражение для момента прокатки [Л. 2].

Введем следующие обозначения основных величин (для участка размотки обозначения имеют индекс 0, для участка намотки — 1):

ε, T — относительное упругое удлинение и соответствующее ему натяжение прокатываемой полосы;

ω, $\omega_в$, v, $v_в$, R, $R_в$ — угловые, окружные скорости и радиусы рулона и валков клети;

$v_п$ — линейная скорость при входе (выходе) металла в клеть (из клети);

s — опережение металла при прокатке без натяжения;

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

B, h, Q, E — ширина, толщина, сечение и модуль упругости прокатываемой полосы;

l — длина полосы между линией соприкосновения с рулоном и линией входа в валки (или выхода из валков) клети;

ψ — коэффициент пропорциональности при прокатке между опережением и удельным натяжением;

M, $M_в$ и J, $J_в$ — крутящий момент и результирующий момент инерции, приведенный к валу привода моталки и валков клети;

u, I, e, r, $\tau_э$, k_e, k_M — подводимое напряжение, ток, э. д. с., сопротивление, электромагнитная постоянная, коэффициенты э. д. с. и момента электродвигателя постоянного тока стана;

p — оператор преобразования Лапласа.

Если учесть зависимость между опережением металла и натяжениями полосы при прокатке [Л. 2], то упрощенное дифференциальное уравнение переднего натяжения [Л. 1] может быть представлено в виде:

$$l_1\frac{d\varepsilon_1}{dt}+bv_в(1+s)(\varepsilon_1-\varepsilon_0)=v_1-v_в(1+s), \qquad (1)$$

где $b=\psi\frac{E}{1+s}$.

После некоторых преобразований и перехода к натяжениям уравнение (1) при нулевых начальных условиях будет иметь вид:

$$T_1(p\tau_1+1)\frac{1}{k_т}=k_1v_1-k_{в1}v_в+\frac{h_1}{k_т h_0}T_0, \qquad (1a)$$

где

$$\tau_1=l_1k_т;\ k_т=\frac{1}{bv_в(1+s)};\ k_1=EQ_1;\ k_{в1}=k_1(1+s).$$

Для получения дифференциального уравнения заднего натяжения запишем следующее равенство:

$$v_0\Delta t(1+\varepsilon_0+\Delta\varepsilon_0)+\frac{l_0\Delta\varepsilon_0}{1+\varepsilon_0}=v_{п0}\Delta t. \qquad (2)$$

Первое слагаемое левой части (2) соответствует элементарному отрезку упругодеформированной полосы, поступающему из рулона на участок размотки за время Δt; второе слагаемое — перемещению конца полосы участка размотки вследствие увеличения в течение Δt относительного упругого удлинения на величину $\Delta\varepsilon_0$; правая часть — отрезку упругодеформированной полосы, задаваемому в валки клети за время Δt со скоростью $v_{п0}$. В равенстве (2) пренебрегается как величиной второго порядка малости дополнительным растяжением полосы в рулоне, вызванным появлением $\Delta\varepsilon_0$ [Л. 1]. Если воспользоваться уравнением сплошности металла:

$$B_0h_0v_{п0}=B_1h_1v_{п1}$$

и учесть неизменность ширины полосы при тонколистовой холодной прокатке, т. е. $B_0=B_1$, а также выражение для скорости выхода полосы из валков клети [Л. 1 и 2]:

$$v_{п1}=v_в(1+s)[1+b(\varepsilon_1-\varepsilon_0)](1+\varepsilon_1),$$

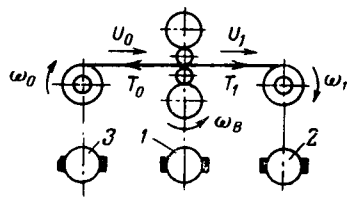


Рис. 1. Схема холодной прокатки рулонной стали на реверсивном стане.

1, 2, 3 — электроприводы соответственно клети, наматывающей и разматывающей моталок (для одного из проходов).

то (2) можно представить в виде:

$$v_0\Delta t(1+\varepsilon_0+\Delta\varepsilon_0)+\frac{l_0\Delta\varepsilon_0}{1+\varepsilon_0}=$$

$$=v_в(1+s)[1+b(\varepsilon_1-\varepsilon_0)](1+\varepsilon_1)\frac{h_1}{h_0}\Delta t. \qquad (2a)$$

Разделим обе части равенства (2а) на Δt и осуществив предельный переход, учитывая, что при $\Delta t\to 0$ и $\Delta\varepsilon_0\to 0$. В результате получаем дифференциальное уравнение натяжения полосы на участке размотки:

$$\frac{l_0}{1+\varepsilon_0}\frac{d\varepsilon_0}{dt}+v_0(1+\varepsilon_0)-v_в(1+s)\times$$

$$\times[1+b(\varepsilon_1-\varepsilon_0)](1+\varepsilon_1)\frac{h_1}{h_0}=0. \qquad (3)$$

После некоторых упрощений, пренебрежения членами, содержащими в качестве сомножителей величины ε_1^2 и $\varepsilon_0\varepsilon_1$, а также перехода к натяжениям уравнение (3) при нулевых начальных условиях может быть преобразовано к виду:

$$T_0(p\tau_0+1)\frac{1}{k_т}=k_{в0}v_в-k_0\frac{h_0}{h_1}v_0+\frac{h_0}{k_т h_1}T_1. \qquad (3a)$$

Здесь:

$$\tau_0\approx l_0k_т\frac{h_0}{h_1};\ k_0=EQ_0;\ k_{в0}=k_0(1+s),$$

поскольку $bv_в(1+s)\frac{h_1}{h_0}\gg v_0$ при $b\gg 1$ [Л. 1].

Сравнивая коэффициенты уравнений (1а) и (3а), отметим, что инерционность упругой связи через полосу, а также влияние на натяжение изменений скорости моталки и валков клети на участке размотки бóльшие, чем на участке намотки. Кроме того, больше и влияние переднего натяжения на заднее, чем заднего на переднее. Указанные различия растут с увеличением обжатия.

Полученные уравнения дополним уравнением моментов:

а) привода клети [Л. 2].

$$M_в=M_{св}-T_1R_в+T_0R_в\frac{h_1}{h_0}\pm J_вp\omega_в; \qquad (4)$$

б) привода наматывающей моталки

$$M_1=M_{п1}+T_1R_1\pm Jp\omega_1; \qquad (5)$$

в) привода разматывающей моталки

$$M_0=M_{п0}-T_0R_0\pm J_0p\omega_0, \qquad (6)$$

а также уравнениями двигателя постоянного тока:

$$u-k_e\omega=r(p\tau_э+1)I; \qquad (7)$$

$$M=k_MI. \qquad (8)$$

В уравнениях (4)—(6):

$M_{св}$ — момент привода валков клети при прокатке без натяжений, но с теми же обжатиями;

$M_п$ — момент потерь привода и механизма моталки.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Если приводы стана безредукторные и допустимо пренебрежение влиянием упругости механических передач от двигателей к механизмам стана, то по (1а), (3а), (4)—(8) может быть построена структурная схема, приведенная на рис. 2. В некоторых частных случаях, когда недопустимо пренебрегать упругостью передач, структурная схема должна быть дополнена соответствующими звеньями [Л. 1].

Из рис. 2 следует, что реверсивный стан с электроприводом является многомерным объектом связного регулирования скорости и натяжений полосы. Коэффициенты передаточных функций отдельных звеньев изменяются с изменением режима прокатки (обжатия, сечения и скорости полосы), а также в процессе прокатки с изменением радиусов наматываемого и разматываемого рулонов. Отметим, также важную роль опережения металла, взаимосвязывающего процессы регулирования переднего и заднего натяжений прокатываемой полосы и существенно влияющего на характеристики этих процессов.

Функции стабилизации и регулирования технологических факторов, как видно из рис. 2, целесообразно возложить на:

а) электроприводы разматывающей и наматывающей моталок для стабилизации и регулирования соответственно заднего и переднего натяжений;

б) электропривод валков клети для регулирования и стабилизации скорости прокатки.

Электропривод валков клети, как объект САРС, содержит последовательно включенные звенья, выходными координатами которых являются ток (момент) и скорость электропривода, а моталка с электроприводом, как объект САРН, содержит, кроме того, и звено, выход которого пропорционален натяжению полосы. Указанные объекты взаимосвязаны, и поэтому САР реверсивного стана могут быть описаны в общем виде следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} H_1(p)T_1(p)+H_{10}(p)T_0(p)+W_{1в}(p)v_в(p)&=\\ =R_1(p)T_{з1}(p)+S_1(p)M_{п1}(p);&\\ H_{01}(p)T_1(p)+H_0(p)T_0(p)+W_{0в}(p)v_в(p)&=\\ =R_0(p)T_{з0}(p)+S_0(p)M_{п0}(p);&\\ H_{в1}(p)T_1(p)+H_{в0}(p)T_0(p)+W_в(p)v_в(p)&=\\ =R_в(p)v_{зв}(p)+S_в(p)M_{св}(p).& \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

Здесь: $T_{з1}(p)$, $T_{з0}(p)$, $v_{зв}(p)$ — преобразования по Лапласу управляющих воздействий соответственно САРН намотки, размотки и САРС; $H(p)$, $W(p)$, $R(p)$, $S(p)$ — многочленные операторы, вид которых определяется структурой САРН и САРС.

Автономность систем обеспечивается [Л. 3]:

$$\left.\begin{aligned} H_{10}(p)=0;\ W_{1в}(p)=0;\\ H_{01}(p)=0;\ W_{0в}(p)=0;\\ H_{в1}(p)=0;\ H_{в0}(p)=0. \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Можно показать, что условия (10) одновременно удовлетворяют и условиям инвариантности по критерию Щипанова — Лузина:

T_1 относительно $T_{з0}$, $M_{п0}$, $v_{зв}$, $M_{св}$;

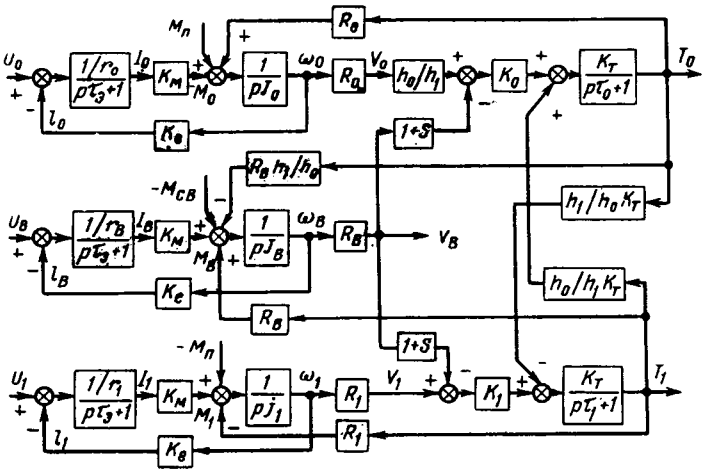


Рис. 2. Структурная схема реверсивного стана как объекта многосвязного регулирования натяжений и скорости прокатываемой полосы.

T_0 относительно $T_{з1}$, $M_{п1}$, $v_{зв}$, $M_{св}$;

$v_в$ относительно $T_{з1}$, $T_{з0}$, $M_{п1}$, $M_{п0}$.

В качестве промышленных САР электропривода в последние годы широко внедряют унифицированные аналоговые системы подчиненного регулирования с последовательной коррекцией (УБСР), обеспечивающие при заданном демпфировании быстродействие, близкое к предельному, и астатические законы регулирования [Л. 4].

При синтезе по принципам УБСР, САРС должна состоять из двух, а САРН — из трех контуров регулирования соответственно количеству регулируемых координат объекта. Поскольку параметры объектов существенно не постоянны, отдельные контуры регулирования САРС и САРН должны включать элементы самонастройки для поддержания неизменными динамических свойств САР в любых режимах. Кроме того, необходимо учитывать внутренние обратные связи объектов по э. д. с. двигателей и моментам от натяжений полосы, ухудшающих качество регулирования [Л. 5].

Структурные схемы САРС и САРН, синтезированных по принципам УБСР, приведены на рис. 3.

Если учесть особенности синтеза УБСР [Л. 4]:

а) последовательную оптимизацию отдельных контуров, начиная с внутреннего, из условия максимального быстродействия при заданном демпфировании и нулевой статической ошибки;

б) замену при оптимизации наружного контура ему подчиненного внутреннего звеном первого порядка с передаточной функцией

$$G(p)=\frac{\omega_c}{p+\omega_c},$$

где ω_c — частота среза логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) внутреннего контура в разомкнутом состоянии;

в) снижение в 2 раза частоты среза ЛАЧХ каждого наружного контура по сравнению с ему подчиненным внутренним;

г) применение для САРС двукратно интегрирующей системы с целью астатического регулирования скорости электропривода валков как по управ-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

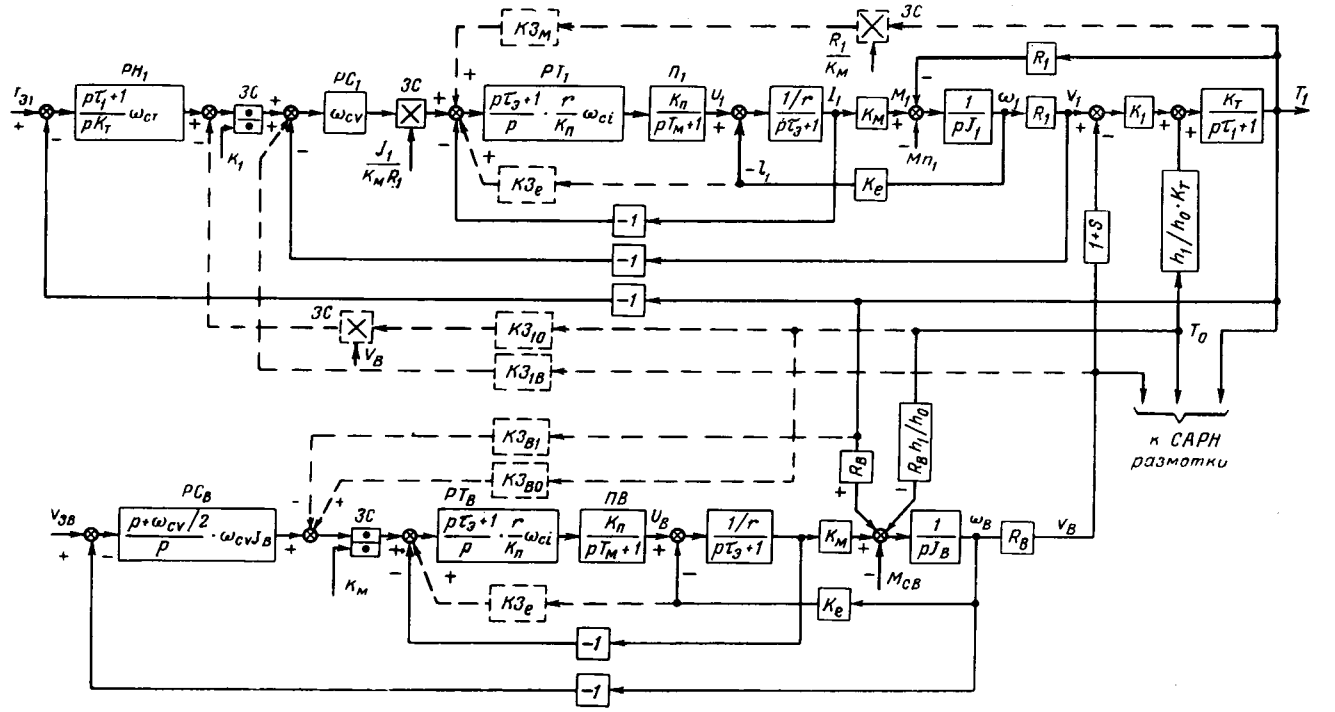


Рис. 3. Структурная схема САРН участка намотки и САРС подчиненного регулирования (с условно единичными главными обратными связями).

$РН_1$, $РС_1$, $РС_в$, $РТ_1$, $РТ_в$ — регуляторы натяжения, скорости и тока; $ЗС$ — звенья самонастройки; $П_1$, $П_в$ — силовой преобразователь электропривода моталки и валков клети; $КЗ$ — компаундирующие звенья; ω_{ci}, ω_{cT}, ω_{cT} — частоты среза ЛАЧХ разомкнутых контуров регулирования тока, скорости и натяжения; $k_п$, $T_м$ — передаточный коэффициент и некомпенсируемая постоянная времени силового преобразователя.

ляющему, так и по возмущающему воздействиям, то многочленные операторы $H(p)$, $W(p)$, $R(p)$ и $S(p)$ системы уравнений (9) будут иметь следующий вид (рис. 3):

$$H_1(p)=H_0(p)=p^2+2\omega_{cT}p+2\omega_{cT}^2;$$

$$H_{10}(p)=-\frac{h_1}{h_0}\frac{p(p+2\omega_{cT})}{p\tau_1+1};$$

$$H_{01}(p)=\frac{h_0}{h_1}\frac{p(p+2\omega_{cT})}{p\tau_0+1};$$

$$W_{1в}(p)=k_T k_{в1}\frac{p(p+2\omega_{cT})}{p\tau_1+1};$$

$$W_{0в}(p)=k_T k_{в0}\frac{p(p+2\omega_{cT})}{p\tau_0+1};$$

$$R_1(p)=R_0(p)=2\omega_{cT}^2;\quad R_в(p)=\omega_{cv}^3;$$

$$S_1(p)=-\frac{R_1}{J_1}\frac{k_T k_1}{4\omega_{cT}}\frac{p(p+4\omega_{cT})}{p\tau_1+1};$$

$$S_0(p)=\frac{h_0}{h_1}\frac{R_0}{J_0}\frac{k_T k_0}{4\omega_{cT}}\frac{p(p+4\omega_{cT})}{p\tau_0+1};$$

$$H_{в1}(p)=\frac{R_в^2}{J_в}p(p+2\omega_{cv});$$

$$H_{в0}(p)=-\frac{R_в^2}{J_в}\frac{h_1}{h_0}p(p+2\omega_{cv});$$

$$W_в(p)=p^3+2\omega_{cv}p^2+2\omega_{cv}^2p+\omega_{cv}^3;$$

$$S_в(p)=-\frac{R_в}{J_в}p(p+2\omega_{cv}).$$

В приложении произведена оценка отклонений стабилизируемых величин конкретного стана от заданных значений под действием взаимных связей САРС и САРН, синтезированных по принципам УБСР.

Цепи компаундирования со звеньями $КЗ_{10}$, $КЗ_{1в}$, $КЗ_{01}$, $КЗ_{0в}$, $КЗ_{в1}$, $КЗ_{в0}$ (рис. 3), обеспечивающие автономность и инвариантность САРН и САРС, должны иметь, как это легко показать, следующие передаточные функции соответственно (при отбрасывании производных высших порядков):

$$G_{10}^k(p)=\frac{h_1}{h_0}\frac{p+2\omega_{cT}}{2\omega_{cT}k_T k_t};$$

$$G_{1в}^k(p)=(1+s)\frac{p+2\omega_{cT}}{2\omega_{cT}};$$

$$G_{01}^k(p)=\frac{h_0}{h_1}\frac{p+2\omega_{cT}}{2\omega_{cT}k_T k_0};$$

$$G_{0в}^k(p)=\frac{h_1}{h_0}(1+s)\frac{p+2\omega_{cT}}{2\omega_{cT}};$$

$$G_{в1}^k(p)=\frac{R_в}{k_M}\frac{p+2\omega_{cv}}{2\omega_{cv}};$$

$$G_{в0}^k(p)=\frac{h_1}{h_0}\frac{R_в}{k_M}\frac{p+2\omega_{cv}}{2\omega_{cv}}.$$

Компенсация влияния внутренних обратных связей по э. д. с. двигателя и моментам от натяжений может быть осуществлена с помощью включаемых аналогичным образом цепей компаундирования $КЗ_e$, $КЗ_M$ (рис. 3) с передаточными функциями:

$$G_e^k(p)=\frac{p(p+2\omega_{ci})}{2\omega_{ci}^2r(p\tau_0+1)};\quad G_M^k(p)=\frac{R(p+\omega_{ci})}{k_M\omega_{ci}}.$$

Здесь предполагается, что $\omega_{ci}=1/2T_μ$ [Л. 4].

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Физически осуществимые цепи компаундирования имеют дополнительные инерционности, которые могут быть достаточно малыми. Кроме того, некоторые из этих цепей должны включать элементы самонастройки для изменения передаточных коэффициентов соответственно параметрам объекта. Изменение передаточных коэффициентов возможно либо от специальных измерителей параметров объекта (рис. 3), либо от корреляторов, отрабатывающих алгоритм — равенство нулю взаимнокорреляционной функции возмущения и выходной координаты САР [Л. 3].

В ряде случаев включение отдельных цепей компаундирования не имеет смысла из-за слабости соответствующих связей между САРС и САРН, либо незначительного влияния внутренних обратных связей на динамику САР.

Предложенные способы компаундирования хорошо сочетаются с технологией прокатки на реверсивном стане. Так, при заправочных операциях, при возможных обрывах полосы либо по окончании прокатки автоматически исключается компаундирование по натяжениям, а при технологических остановках стана — компаундирование по скорости и по э. д. с. двигателей.

Выводы. 1. Реверсивный стан холодной прокатки рулонной стали является многомерным объектом связного регулирования технологических факторов — натяжений и скорости полосы.

2. Взаимные связи могут существенно снижать точность стабилизации технологических факторов и соответственно качество продукции. Поэтому необходимо построение автономных и инвариантных САРН и САРС.

3. Автономность и инвариантность САРН и САРС могут быть обеспечены на основе принципа абсолютной инвариантности комбинированного регулирования с использованием компаундирующих звеньев. Передаточные функции этих звеньев определяются структурой САР.

4. В качестве САРС и САРН целесообразно применение систем подчиненного регулирования с последовательной коррекцией, обеспечивающих высокое быстродействие и астатическое регулирование технологических факторов.

5. Необходимость компенсации той или иной связи САРС и САРН определяется степенью этой связи и должна выясняться в каждом конкретном случае.

Приложение. Оценим величины отклонений от заданных значений натяжений и скорости прокатки тончайшей ленты на 20-тивалковом стане 400, снабженном многосвязными САРН и САРС подчиненного регулирования (рис. 3) для следующих режимов:

а) изменяется скорость прокатки; б) изменяется заднее натяжение (например, при регулировании толщины ленты).

Преобразование по Лапласу отклонения натяжения $\Delta T^0(p)$ (заднего или переднего в отношении к заданному) при изменении скорости $v_в$ с постоянным ускорением a_v будет иметь вид (для простоты примем скомпенсированными остальные связи между САРС и САРН):

$$\Delta T^0(p) = \frac{a_v E k_T (1+s)(p+2\omega_{cT})}{\sigma p (p\tau+1)(p^2+2\omega_{cT}p+2\omega_{cT}^2)},$$

где σ — удельное натяжение ленты.

Если учесть, что за время затухания свободной составляющей $\Delta T^0(t)$ величины k_T и τ существенных изменений не претерпевают, то с помощью предельной теоремы может быть найдена вынужденная составляющая:

$$\Delta T^0_\infty = \lim_{p\to 0} p\Delta T^0(p) = \frac{a_v E k_T (1+s)}{\sigma\omega_{cT}} 100\%.$$

При $a_v=1$ *м/сек*²; $E=2\cdot 10^5$ *н/мм*²; $\sigma=300$ *н/мм*²; $s=0{,}1$; $\omega_{cT}=10$ *1/сек*; $\psi=10^{-4}$ *мм*²*/н*; $v_в=5$ *м/сек*; $\Delta T^0_\infty \approx 75\%$, т. е. разгон или замедление стана вызывают отклонения натяжений на 75% заданного значения, что, безусловно, недопустимо.

Преобразование по Лапласу отклонения переднего натяжения $\Delta T_1^0(p)$ (в отношении к максимальной величине отклонения заднего натяжения) при изменении заднего натяжения с постоянным темпом a_T будет иметь вид (при условно скомпенсированных остальных связях):

$$\Delta T_1^0(p) = \frac{h_1}{h_0}\frac{a_T(p+2\omega_{cT})}{p(p\tau_1+1)(p^2+2\omega_{cT}p+2\omega_{cT}^2)}.$$

На основании предельной теоремы вынужденная составляющая:

$$\Delta T^0_{1\infty} = \frac{h_1}{h_0}\frac{a_T}{\omega_{cT}} 100\%.$$

Если обжатие $h_1/h_0=0{,}7$, темп изменения заднего натяжения в отношении к максимальной величине его отклонения $a_T=2$ *1/сек* и $\omega_{cT}=10$ *1/сек*, то $\Delta T^0_{1\infty}=14\%$, т. е. отклонение переднего натяжения составляет 14% отклонения заднего в процессе его изменения, что в ряде случаев допустимо.

Преобразование по Лапласу отклонения скорости $\Delta v^0_в(p)$ (по отношению к произведению относительной величины отклонения заднего натяжения на текущую величину скорости прокатки) при изменении заднего натяжения с постоянным темпом a_T будет иметь вид (при компенсации остальных связей):

$$\Delta v^0_в(p) = \frac{h_1}{h_0}\frac{R_в^2}{J_в}\frac{T_0}{v_в}\frac{a_T(p+2\omega_{cv})}{p(p^3+2\omega_{cv}p^2+2\omega_{cv}^2p+\omega_{cv}^3)},$$

а вынужденная составляющая

$$\Delta v^0_{в\infty} = \frac{2a_T}{\omega_{cv}^2}\frac{h_1}{h_0}\frac{R_в^2}{J_в}\frac{T_0}{v_в} 100\%.$$

Если $a_T=2$ *1/сек*; $\omega_{cv}=20$ *1/сек*; $h_1/h_0=0{,}7$; $R_в=0{,}01$ *м*; $J_в=30$ *нм·сек*²; $T_0=10$ *кн*; $v_в=5$ *м/сек*, то $\Delta v^0_{в\infty} = 4{,}6\cdot 10^{-3}\%$, т. е. относительное отклонение скорости составляет $4{,}6\cdot 10^{-3}\%$ относительного отклонения заднего натяжения в процессе его изменения, или практически скорость прокатки не изменяется.

Таким образом, у рассматриваемого стана наиболее тесно САРН связаны с САРС по скорости валков, менее тесные связи между САРН участков намотки и размотки по натяжениям и практически отсутствуют связи САРС с САРН по натяжениям.

Литература

1. Грушко В. Л. и Прудков М. Л., Структурные схемы моталки с электроприводом как объекта регулирования натяжения полосы при холодной прокатке, сб. «Электрификация и автоматизация горных и металлургических предприятий», изд-во «Проминь», Днепропетровск, 1969, № 1.

2. Дружинин Н. Н., Непрерывные станы как объект автоматизации, изд-во «Металлургия», 1967.

3. Кухтенко А. И., Проблема инвариантности в автоматике, Гостехиздат, УССР, 1963.

4. Лебедев Е. Д. и др., Унифицированные системы автоматического регулирования электропривода, Информстандартэлектро, 1967.

5. Шипилло В. П., Автоматизированный вентильный электропривод, изд-во «Энергия», 1969.

[23.12.1969]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.313.333:621.3.014.001.24

Анализ тока асинхронного двигателя при пульсирующей нагрузке

Доктор техн. наук, проф. И. Д. УРУСОВ и инж. В. И. СИМОНОВСКИЙ
ВНИИЭМ

При оценке качества электроэнергии в некоторых типах автономных энергосистем необходим расчет колебаний тока асинхронного двигателя с пульсирующей нагрузкой (типа компрессорной). Подобная задача рассматривалась в [Л. 4] без учета электромагнитных процессов в роторе по статическим характеристикам момента и тока от скольжения. Такой метод, как показано ниже, приводит в ряде случаев к значительному завышению расчетных значений колебаний тока и, следовательно, к необоснованным запасам в выборе установленной мощности двигателя.

В статье предлагается метод расчета, учитывающий электромагнитные процессы в роторе. Анализ статорного тока и момента проведен на основе использования метода эллиптических диаграмм [Л. 1]. В асинхронной машине учет указанных факторов приводит к тому, что характеристикой электромагнитного момента (и соответственно статорного тока) служит эллипс (рис. 2 и 3), центром которого является точка среднего скольжения, а размеры и наклон его осей зависят от частоты колебаний нагрузки ν, уменьшаясь с ее ростом. Последнее обстоятельство объясняется электромагнитной инерцией роторных контуров.

Будем исходить из уравнения движения ротора электропривода:

$$T_a \frac{ds}{dt} + m_э = -m_т, \qquad (1)$$

где T_a — инерционная постоянная агрегата, *сек*; $s = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s}$ — скольжение ротора относительно номинальной частоты сети ω_s [*рад/сек*]; $m_э$ — электромагнитный момент, отн. ед; $m_т$ — механический момент, отн. ед.

Пусть механическая нагрузка характеризуется некоторой постоянной составляющей и гармонической с частотой:

$$m_т = m_{т0} + \Delta m_т \sin(\nu t + \beta). \qquad (2)$$

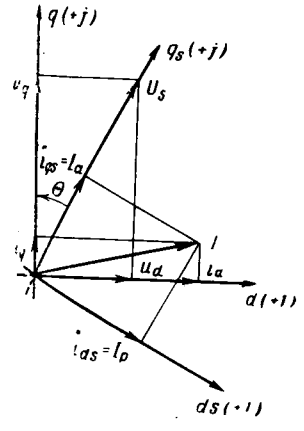


Рис. 1. К определению тока статора.

В этом случае допустимо предположить, что скольжение s и угол между осью ротора и синхронной осью изменяются периодически:

$$\left.\begin{aligned} \theta &= \omega_0 t + \Delta\theta_m \sin \nu t; \\ s &= s_0 + \Delta s_m \cos \nu t, \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где s_0 — постоянное скольжение при нагрузке $m_{т0}$; $\omega_0 = s\omega_s$; $\Delta s_m = \frac{\Delta\theta_m \nu}{\omega_s}$ — амплитуда колебания скольжения; $\Delta\theta_m$ — амплитуда колебания ротора относительно оси, вращающейся со скоростью $\omega = \omega_s(1 + s_0)$, *рад*.

Для решения поставленной задачи рассмотрим выражение тока статора, которое получается (с учетом электромагнитных процессов) в предположении установившегося движения ротора по формуле (3).

В комплексных осях, жестко связанных с осями d, q ротора, будем иметь (рис. 1):

$$\left.\begin{aligned} \dot U &= u_d + j u_q = u \sin\theta + j u \cos\theta = j u e^{-j\theta}; \\ \dot I &= i_d + j i_q. \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Учитывая, что при пренебрежении активным сопротивлением статора [Л. 1]

$$i_d = uA(p)\cos\theta,$$
$$i_q = -uA(p)\sin\theta,$$

представим в комплексной форме:

$$\dot I = -jA(p)\dot U = uA(p)e^{-j\theta}. \qquad (5)$$

Переходная проводимость $A(p)$ для асинхронного двигателя с одним роторным контуром запишется по аналогии с синхронной машиной в режиме асинхронного хода с двумя одинаковыми демпферными обмотками по продольной и поперечной осям без обмотки возбуждения в виде [Л. 1]:

$$A(p) = \frac{1 + T_r p}{x(1 + T'_r p)}, \qquad (6)$$

где x — индуктивное сопротивление статора, отн. ед.; T_r, T'_r — постоянные времени ротора соответственно при разомкнутой и замкнутой цепи статора, *сек*.

Выражения для $\sin\theta$ и $\cos\theta$ запишем, ограничившись ввиду малости $\Delta\theta_m$ 1-й гармоникой моделирующей частоты [Л. 2]:

$$\left.\begin{aligned} \sin\theta &= \sin(\omega_0 t + \Delta\theta_m \sin \nu t) \approx \sin\omega_0 t + \\ &\quad + \Delta\theta_m \cos\omega_0 t \sin \nu t; \\ \cos\theta &= \cos(\omega_0 t + \Delta\theta_m \sin \nu t) \approx \cos\omega_0 t - \\ &\quad - \Delta\theta_m \sin\omega_0 t \sin \nu t. \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Учитывая (7) и используя тригонометрические формулы, нетрудно убедиться, что

$$e^{-j\theta} = e^{-j\omega_0 t} + \frac{\Delta\theta_m}{2}(e^{-j\omega_2 t} - e^{-j\omega_1 t}), \qquad (8)$$

где $\omega_1 = \omega_0 - \nu$, $\omega_2 = \omega_0 + \nu$.

Подставляя (8) в (5) и заменяя p соответствующим коэффициентом при t в показателях степени e, получим:

$$\dot I = u\left\{A(-j\omega_0)e^{-j\omega_0 t} + \frac{\Delta\theta_m}{2}[A(-j\omega_2)e^{-j\omega_2 t} - A(-j\omega_1)e^{-j\omega_1 t}]\right\}. \qquad (9)$$

В комплексных осях d_s, q_s, жестко связанных с синхронной осью, комплекс тока статора запишется в виде (рис. 1):

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$\dot{I}_s = \dot{I}e^{j\theta} = u\left\{A(-j\omega_0)e^{-j\omega_0 t} + \right.$$
$$\left. + \frac{\Delta\theta_m}{2}\left[A(-j\omega_2)e^{-j\omega_2 t} - A(-j\omega_1)e^{-j\omega_1 t}\right]\right\} \times$$
$$\times\left[e^{j\omega_0 t} + \frac{\Delta\theta_m}{2}\left(e^{j\omega_2 t} - e^{j\omega_1 t}\right)\right] =$$
$$= uA(-j\omega_0) + u\frac{\Delta\theta_m}{2}\left[A(-j\omega_0)\left(e^{j\nu t} - e^{-j\nu t}\right) + \right.$$
$$\left. + A(-j\omega_2)e^{-j\nu t} - A(-j\omega_1)e^{j\nu t}\right] +$$
$$+ u\left(\frac{\Delta\theta_m}{2}\right)^2\left[A(-j\omega_2) + A(-j\omega_1) - \right.$$
$$\left. - A(-j\omega_2)e^{-2j\nu t} - A(-j\omega_1)e^{2j\nu t}\right]. \qquad (10)$$

Первое слагаемое соответствует комплексу тока в установившемся режиме асинхронного хода при скольжении s_0:

$$\dot{I}_{s_0} = uA(-j\omega_0) = u(g_0 - jb_0), \qquad (11)$$

где

$$\left.\begin{aligned} &A(j\omega) = g(\omega) + jb(\omega);\ g(\omega) = \frac{1 + T_r T'_r \omega^2}{x(1 + T'^2_r\omega^2)};\\ &b(\omega) = \frac{\omega(T_r - T'_r)}{x(1+\omega^2 T'^2_r)};\ g_0 = g(\omega_0);\ b_0 = b(\omega_0). \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

Активная и реактивная составляющие постоянной части тока статора

$$I_{s_0} = i_{qs_0} = -ub_0,\ I_{p_0} = i_{ds_0} = ug_0. \qquad (13)$$

В переменной части тока статора $\Delta\dot{I}_s$, соответствующей гармонической составляющей момента, будем учитывать лишь слагаемое с коэффициентом $\frac{\Delta\theta_m}{2}$, пренебрегая членом второго порядка малости с коэффициентом $\left(\frac{\Delta\theta_m}{2}\right)^2$:

$$\Delta\dot{I}_s = \frac{u\Delta\theta_m}{2}\left[A(-j\omega_0)\left(e^{j\nu t} - e^{-j\nu t}\right) + \right.$$
$$\left. + A(-j\omega_2)e^{-j\nu t} - A(-j\omega_1)e^{j\nu t}\right] =$$
$$= \frac{u\Delta\theta_m}{2}\left\{(2b_0 - b_2 - b_1)\sin\nu t + (g_2 - g_1)\cos\nu t + \right.$$
$$\left. + j\left[(2g_0 - g_2 - g_1)\sin\nu t + (b_1 - b_2)\cos\nu t\right]\right\}, \qquad (14)$$

где $g_1,\ b_1 = g(\omega_1),\ b(\omega_1);\ g_2,\ b_2 = g(\omega_2),\ b(\omega_2)$.

Преобразуем (14) к виду:

$$\Delta\dot{I}_s = \frac{u\Delta\theta_m}{2}\left[C\sin(\nu t + \alpha_1) + jB\sin(\nu t + \alpha_2)\right], \qquad (15)$$

где

$$\left.\begin{aligned} &C = \sqrt{(2b_0 - b_1 - b_2)^2 + (g_2 - g_1)^2};\\ &\alpha_1 = \operatorname{arctg}\frac{g_2 - g_1}{2b_0 - b_1 - b_2} + \begin{cases} 0 \text{ при } 2b_0 - b_1 - b_2 > 0,\\ \pi \text{ при } 2b_0 - b_1 - b_2 < 0 \end{cases}\\ &B = \sqrt{(2g_0 - g_1 - g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2};\\ &\alpha_2 = \operatorname{arctg}\frac{b_1 - b_2}{2g_0 - g_1 - g_2} + \begin{cases} 0 \text{ при } 2g_0 - g_1 - g_2 > 0\\ \pi \text{ при } 2g_0 - g_1 - g_2 < 0. \end{cases} \end{aligned}\right\} \qquad (16)$$

Зная амплитуду колебания угла $\Delta\theta_m$, можно построить в соответствии с (15) эллиптическую диаграмму тока статора [Л. 1], из которой определяются максимальное I_{max} и минимальное I_{min} значения тока при периодической нагрузке (рис. 2). Параметры эллипса (с центром в конце вектора $\dot{I}_{s0}$) определяются по соотношениям:

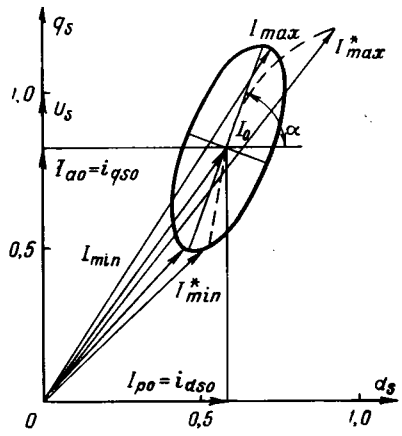


Рис. 2. Статическая характеристика и эллиптическая диаграмма тока.

большая ось

$$2a = \frac{u\Delta\theta_m}{2}\left(\sqrt{D_1 + D_2} + \sqrt{D_1 - D_2}\right);$$

малая ось

$$2b = \frac{u\Delta\theta_m}{2}\left(\sqrt{D_1 + D_2} - \sqrt{D_1 - D_2}\right); \qquad (17)$$

угол между большой осью и осью d

$$\alpha = \operatorname{arctg}\frac{D_3}{D_4 + \sqrt{D_4^2 + D_3^2}}.$$

В (17) обозначено:

$$D_1 = C^2 + B^2,\ D_2 = 2CB\sin(\alpha_2 - \alpha_1);$$
$$D_3 = 2CB\cos(\alpha_2 - \alpha_1),\ D_4 = C^2 - B^2.$$

Для определения $\Delta\theta_m$ необходимо знать выражение электромагнитного момента:

$$m_э = -\operatorname{Re}(\hat{U}_s\dot{I}_s). \qquad (18)$$

Учитывая, что

$$\dot{U}_s = \dot{U}e^{j\theta} = ju$$

и подставляя в (18) $\dot{I}_s = \dot{I}_{s0} + \Delta\dot{I}_s$ согласно (11) и (15), получим:

$$m_э = -\operatorname{Re}\left\{-ju^2\left[(g_0 - jb_0) + \frac{\Delta\theta_m}{2}\left(C\sin(\nu t + \alpha_1) + \right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left. + jB\sin(\nu t + \alpha_2)\right)\right]\right\} = u^2 b_0 -$$
$$- \frac{u^2\Delta\theta_m}{2}B\sin(\nu t + \alpha_2)^*. \qquad (19)$$

Подставим выражение (19), а также

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\Delta\theta_m\nu^2}{\omega_s}\sin\nu t$$

в уравнение движения (1).

* Выражение для электромагнитного момента при гармоническом колебании частоты вращения асинхронной машины было получено другим способом в [Л. 3].

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Так как $u^2b_0 = m_{T0}$, то получим:

$$-T_a \frac{\Delta\theta_m \nu^2}{\omega_s} \sin \nu t - \frac{u^2 \Delta\theta_m}{2} B \sin(\nu t + \alpha_2) = -\Delta m_T \sin(\nu t + \beta). \quad (20)$$

Равенство (20) справедливо при любом t, если коэффициенты при $\sin \nu t$ и $\cos \nu t$ равны справа и слева:

$$T_a \frac{\Delta\theta_m \nu^2}{\omega_s} + \frac{u^2 \Delta\theta_m}{2} B \cos\alpha_2 = \Delta m_T \cos\beta;$$

$$\frac{u^2 \Delta\theta_m}{2} B \sin\alpha_2 = \Delta m_T \sin\beta.$$

Отсюда непосредственно вытекает:

$$\left.\begin{aligned} \beta &= \operatorname{arctg} \frac{\sin\alpha_2}{\cos\alpha_2 + \frac{2T_a\nu^2}{u^2 B\omega_s}}; \\ \Delta\theta_m &= \frac{2\sin\beta}{u^2 B \sin\alpha_2} \Delta m_T. \end{aligned}\right\} \quad (21)$$

Таким образом, расчет колебаний тока статора при нагрузке, изменяющейся по гармоническому закону (2), сводится к определению амплитуды колебаний угла $\Delta\theta_m$ по (16) и (21) и построению затем эллиптической диаграммы (рис. 2) с параметрами эллипса, вычисленными согласно (17).

Аналогично строится эллиптическая диаграмма изменения электромагнитного момента в координатах $m_э$—s, поскольку соотношения (3) и (19) суть параметрическое уравнение эллипса с центром в точке $m_{э0} = u^2 b_0$, s_0. На рис. 3 показана диаграмма момента, построенная по данным приведенного ниже численного примера. Из рисунка видно, что амплитуда колебания момента Δm_ν в 1,7 раза меньше, чем амплитуда момента $\Delta m_{ст}$, вычисленная по статической характеристике при том же диапазоне изменения скольжения $2\Delta s_m$. Физически это объясняется тем, что вследствие электромагнитной инерции токи не успевают достигнуть тех значений, которые они принимают при достаточно медленных изменениях скольжения.

Интересно проследить изменение амплитуды Δm_ν электромагнитного момента $\Delta m_э$ при заданном Δs_m и изменении частоты ν от нуля до бесконечности. С этой целью выражение для электромагнитного момента представим в ином, но тождественном соотношению (19) виде:

$$\Delta m_э = \frac{u^2\omega_s}{2\nu} \Delta s_m [(g_1 + g_2 - 2g_0)\sin \nu t + (b_2 - b_1)\cos \nu t]. \quad (22)$$

При $\nu = 0$

$$\Delta m_э = \frac{u^2\omega_s}{2} \Delta s_m \lim_{\nu\to 0} \frac{b_2 - b_1}{\nu} = \frac{u^2\omega_s}{2} \Delta s_m \left[\frac{\partial(b_2 - b_1)}{\partial\nu}\right]_{\nu=0}.$$

Учитывая, что

$$\omega_s \left[\frac{\partial(b_2 - b_1)}{\partial\nu}\right]_{\nu=0} = 2\left[\frac{\partial b(s\omega_s)}{\partial s}\right]_{s=s_0} = \frac{2}{u^2}\left[\frac{\partial m(s)}{\partial s}\right]_{s=s_0},$$

получим:

$$\Delta m_э = \Delta s_m \left[\frac{\partial m(s)}{\partial s}\right]_{s=s_0}.$$

Следовательно, при очень малых ν амплитуду момента допустимо определить по статической характеристике (например, по кривой *1*, рис. 3). При $\nu \to \infty$ из (22) следует, что $\Delta m_э \to 0$. В промежуточных положениях момент изменяется по эллиптическим кривым (например, кривая *2*, рис. 3), причем амплитуда колебания Δm_ν убывает с ростом ν.

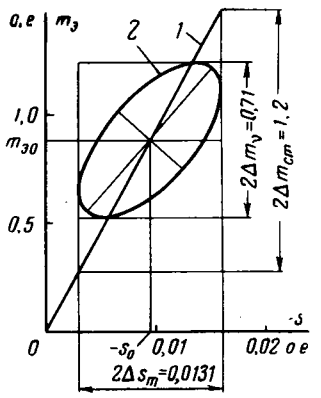


Рис. 3. Характеристики электромагнитного момента. *1* — статическая характеристика; *2* — эллиптическая диаграмма момента при изменении скольжения с частотой $\nu = 124$ *рад/сек*.

Определять колебания тока и момента по вышеприведенным соотношениям рекомендуется при периодических нагрузках, высшими гармониками которых можно пренебречь, что на практике, как правило, имеет место. В случае необходимости их учета расчет проводится в указанной выше последовательности отдельно для каждой гармоники, следуя принципу суперпозиции. Замкнутый годограф конца вектора $\Delta\dot{I}_s$ может быть определен в интервале времени:

$$0 < t < \frac{2\pi}{\nu}$$

путем непосредственного вычисления его проекций:

$$\Delta i_{sd} = \frac{u}{2} \sum_{i=1}^{n} \Delta\theta_{mi} C_i \sin(i\nu t + \alpha_{1i});$$

$$\Delta i_{sq} = \frac{u}{2} \sum_{i=1}^{n} \Delta\theta_{mi} B_i \sin(i\nu t + \alpha_{2i}).$$

Аналогично строится циклическая диаграмма изменения электромагнитного момента в координатах $m_э$—s.

Пример. Рассмотрим колебания тока статора асинхронного компрессорного двигателя с параметрами: $x = 2{,}2$ отн. ед.; $T_r = 0{,}098$ *сек*; $T'_r = 0{,}011$ *сек*; $T_a = 1{,}4$ *сек*; $f_s = 400$ *гц*; $\omega_s = 2\,512$ *рад/сек*; $s_0 = 0{,}0095$; $\omega_0 = -23{,}8$ *рад/сек*; $I_{a0} = i_{qs0} = -b_0 = 0{,}88$ отн. ед.; $I_{p0} = i_{ds0} = g_0 = 0{,}69$ отн. ед.; $m_{T0} = 0{,}88$ отн. ед.; $\Delta m_T = 0{,}9$ отн. ед.; $\nu = 124$ *рад/сек*; $\omega_1 = \omega_0 - \nu = -147{,}8$ *рад/сек*; $\omega_2 = \omega_0 + \nu = 100{,}2$ *рад/сек*.

Подставляя в (12) ω_1 и ω_2, получим:

$$g_1 = 3{,}08;\ b_1 = -1{,}61;\ g_2 = 2{,}43;\ b_2 = 1{,}78.$$

Далее по (16) и (21)

$$B = 5{,}35;\ \alpha_2 = 219°20';\ C = 2{,}04;\ \alpha_1 = 198°30';$$

$$\beta = -14°30';\ \Delta\theta_m = 0{,}132;\ \Delta s_m = 0{,}0065.$$

Параметры эллипса по (17) будут равны:

$$2a = 0{,}71;\ 2b = 0{,}27;\ \alpha = 70°.$$

На рис. 2 приведен эллипс (геометрическое место точек конца вектора тока статора $\dot{I}_s$ в течение одного цикла колебаний), построенный по расчетным данным. Согласно рисунку

$$I_{min} = 0{,}67;\ I_{max} = 1{,}35.$$

Сравним полученный результат с расчетом по методу, изложенному в [Л. 4] Согласно этому методу амплитуда сколь-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

жения определяется без учета электромагнитных процессов по спрямленной статической характеристике:

$$m_э = \frac{s}{s_н},$$

а колебания тока находятся по статической зависимости

$$|\dot{I}_s| = \sqrt{g^2(s\omega_s) + b^2(s\omega_s)}. \quad (23)$$

Согласно [Л. 4]

$$\Delta s^*_m = \frac{\Delta m s_н}{\sqrt{1 + (T_a \nu s_н)^2}} = 0{,}0044;$$

$\omega^*_1 = \omega_0 + \omega_s \Delta s^*_m = -12{,}7$; $\omega^*_2 = \omega_0 - \omega_s \Delta s^*_m = -34{,}9$;
$I^*_{p\,min} = g(\omega^*_1) = 0{,}53$; $I^*_{a\,min} = -b(\omega^*_1) = 0{,}49$; $I^*_{min} = 0{,}72$;
$I^*_{p\,max} = g(\omega^*_2) = 0{,}92$; $I^*_{a\,max} = -b(\omega^*_2) = 1{,}21$; $I^*_{max} = 1{,}52$.

Отрезок статической характеристики (23) и токи I^*_{min}, I^*_{max} приведены на рис. 2.

Из примера видно, что расчет по статическим характеристикам может дать значительное завышение амплитуды колебаний тока статора. Очевидно, погрешность будет возрастать с увеличением ν. В данном случае относительная погрешность расчета по [Л. 4] по сравнению с предлагаемым методом составляет

$$\frac{\Delta I - \Delta I^*}{\Delta I} 100\% = \frac{0{,}68 - 0{,}80}{0{,}68} 100\% = -17{,}7\%.$$

Литература

1. Урусов И. Д., Линейная теория колебаний синхронной машины, Изд. АН СССР, 1960.
2. Картьяну Г., Частотная модуляция, изд-во «Меридиане», Бухарест, 1964.
3. Ковач К. П. и Рац И., Переходные процессы в машинах переменного тока, Госэнергоиздат, 1963.
4. Гейлер Л. Б., Электропривод в тяжелом машиностроении, Машгиз, 1958.

[22.10.1969]

◇ ◇ ◇

УДК 621.313.13-181.4.001.24

Геометрия якоря с печатной обмоткой

Канд. техн. наук Б. К. КАРПЕНКО
Киев

Рациональная геометрия якоря с печатной обмоткой определялась многими авторами [Л. 1—6]. Необходимость вернуться к рассмотрению этого вопроса еще раз вызывается тем, что в большинстве случаев решение не было достаточно полным, так как определялись только некоторые из величин, требующиеся при построении печатной обмотки, кроме того, разные авторы подходили к этому вопросу с разных позиций.

Двигатели с печатной обмоткой якоря в основном предназначаются для работы в качестве исполнительных двигателей автоматизированных систем. Одним из наиболее важных показателей таких двигателей является быстродействие, под которым будем понимать величину, обратную электромеханической постоянной времени

$$T = \frac{Jr}{(c\Phi)^2}, \quad (1)$$

где r, J — сопротивление и момент инерции якоря; Φ — поток полюса; $c = \frac{p}{2\pi}\frac{N}{a}$; p, N, a — число пар полюсов, активных проводников и пар параллельных ветвей.

Сопоставим критерий минимума электромеханической постоянной времени с критерием максимальной электромагнитной мощности. Электромагнитная мощность

$$P = EI = c\Phi\omega I,$$

где ω — угловая частота вращения якоря.

Если считать, что допустимое значение электрических потерь в обмотке якоря $p_э$ является постоянной величиной, то

$$I = \sqrt{\frac{p_э}{r}},$$

а выражение для электромагнитной мощности запишется в виде:

$$P = \frac{c\Phi}{\sqrt{r}} \omega \sqrt{p_э} = au,$$

где

$$a = \omega\sqrt{p_э}; \quad u = \frac{c\Phi}{\sqrt{r}}.$$

Пусть наружный диаметр якоря определен. Тогда при вариации параметров, определяющих геометрию обмотки, изменяется u; величину a считаем постоянной. Электромеханическую постоянную можно представить:

$$T = \frac{J}{u^2}.$$

Переменная u, в свою очередь, является функцией нескольких переменных, определяющих геометрию обмотки:

$$u = \varphi(x_0, x_1, x_2, \ldots, x_n).$$

В точке экстремума

$$\frac{\partial P}{\partial x_0} = 0, \frac{\partial P}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial P}{\partial x_2} = 0, \ldots, \frac{\partial P}{\partial x_n} = 0,$$

а также

$$\frac{\partial T}{\partial x_0} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \cdots, \frac{\partial T}{\partial x_n} = 0.$$

Рассмотрим первые уравнения указанных систем:

$$\frac{\partial P}{\partial x_0} = \frac{\partial P}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial x_0} = a\frac{\partial u}{\partial x_0} = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_0} = \frac{\partial T}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial x_0} = -\frac{2J}{u^3}\frac{\partial u}{\partial x_0} = 0.$$

Точно такие же выражения можно написать и для остальных частных производных. Условия $a = 0$, $\frac{2J}{u^3} = 0$ смысла не имеют.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Следовательно, точка экстремума как для $P(x_0, x_1, x_2, \ldots, x_n)$, так и для $T(x_0, x_1, x_2, \ldots, x_n)$ определяется условиями:

$$\frac{\partial u}{\partial x_0}=0,\ \frac{\partial u}{\partial x_1}=0,\ldots,\ \frac{\partial u}{\partial x_n}=0.$$

Таким образом, критерии максимальной электромагнитной мощности и минимальной электромеханической постоянной времени адекватны. Указанное справедливо как для двигателей с печатной обмоткой, так и для обычных электродвигателей, поскольку исходные выражения имеют общий характер.

Печатные якоря двигателей постоянного тока выполняются цилиндрическими и дисковыми. Будем считать задачу решенной, если найдем функции, определяющие размеры проводников печатной обмотки якоря в трех измерениях в каждой точке пространства.

Рассмотрим цилиндрический якорь, часть развертки обмотки которого представлена на рис. 1. В соответствии с терминологией обычных электрических машин будем называть участки проводников между прямыми *ab* и *cd* активными, а остальные — лобовыми частями.

Ширина проводника активной части определяется по минимуму потерь в проводнике, которые равны сумме электрических потерь и потерь от вихревых токов:

электрические потери

$$p_{\text{п.э}}=I_{\text{п}}^2\frac{\rho l_{\text{а}}}{\Delta b_{\text{а}}},$$

потери от вихревых токов [Л. 7]

$$p_{\text{вх}}=\frac{4}{3\rho}(fk_{\Phi}B)^2\Delta l_{\text{а}}b_{\text{а}}^3,$$

где ρ — удельное сопротивление при заданной температуре; Δ, $l_{\text{а}}$, $b_{\text{а}}$ — толщина, длина и ширина проводника в активной части; $f=\frac{p\omega}{2\pi}$ — частота вихревых токов; k_{Φ} — коэффициент формы кривой распределения индукции вдоль зазора; $B=\frac{B_{\max}-B_{\min}}{2}$ — амплитуда переменной составляющей магнитной индукции.

Взяв производную $\frac{dp_{\text{п}}}{db_{\text{а}}}$ и приравняв ее нулю, находим ширину активной части проводника, соответствующую минимуму потерь,

$$b_{\text{а}}=\sqrt{\frac{I_{\text{п}}\rho}{2fk_{\Phi}B\Delta}} \qquad (2)$$

или, вводя в формулу значение плотности тока в активной части

$$j=\frac{I_{\text{п}}}{\Delta b_{\text{а}}}, \qquad (3)$$

получим:

$$b_{\text{а}}=\frac{j\rho}{2fk_{\Phi}B}. \qquad (4)$$

Полагая, что все величины, входящие в (3) и (4), известны (заданы или получены в ходе расчета), можно определить ширину проводника в активной части, а затем и толщину его

$$\Delta=\frac{I_{\text{п}}}{jb_{\text{а}}}. \qquad (5)$$

Проводниковое деление

$$t=b_{\text{а}}+b_{\text{из}}.$$

Минимально возможная ширина изоляционного промежутка $b_{\text{из}}$ одинакова в любом месте печатной схемы и определяется технологическим процессом. При изготовлении обмотки методом травления можно принять [Л. 9]:

$$b_{\text{из}}=0{,}05+2{,}3\Delta\ \text{мм}, \qquad (6)$$

причем минимальное значение $b_{\text{из}}\geqslant 0{,}23$ *мм*.

Ширина проводника лобовых соединений

$$b_{\text{л}}=t\cos\psi-b_{\text{из}}.$$

Обозначая $d=\frac{b_{\text{из}}}{t}$, получим:

$$r_{\text{л}}=\frac{\rho\tau}{\Delta t\sin\psi(\cos\psi-d)}.$$

Выясним, при каком угле наклона лобовых частей постоянная времени минимальна. Пренебрежем за малостью изменениями и магнитного потока, сцепленного с обмоткой, и момента инерции якоря при вариации угла ψ. Тогда условие минимума постоянной времени превращается в условие минимума сопротивления лобовой части.

Взяв производную $\frac{dr_{\text{л}}}{d\psi}$ и приравняв ее нулю, приходим к уравнению:

$$\cos^2\psi-\frac{d}{2}\cos\psi-\frac{1}{2}=0,$$

откуда

$$\psi=\arccos\left(\frac{d}{4}+\sqrt{\frac{d^2}{16}+\frac{1}{2}}\right). \qquad (7)$$

Знак минус перед корнем физического смысла не имеет. Формулами (4)—(7) описываются величины, определяющие геометрию цилиндрического печатного якоря.

Активная длина, отнесенная к диаметру, в двигателе с цилиндрическим печатным якорем с точки зрения максимального быстродействия должна быть возможно большей; предельное ее значение определяется конструктивными и технологическими факторами — в первую очередь, жесткостью якоря.

Для дискового якоря можно представить радиусы характерных окружностей (R_0, R_1, R_2, R_3) (рис. 2) как независимые переменные, а множители, входящие в формулу (1), в виде функций этих переменных: $c=\varphi_1(R_1)$; $r=\varphi_2(R_0, R_1, R_2, R_3)$; $\Phi=\varphi_3(R_1, R_2)$; $J=\varphi_4(R_3)$.

Тогда условие минимума электромеханической постоянной приводит к системе уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial T}{\partial R_0}=\frac{J}{(c\Phi)^2}\frac{\partial r}{\partial R_0}=0;\\
&\frac{\partial T}{\partial R_1}=\frac{J}{(c\Phi)^4}\left[\frac{\partial r}{\partial R_1}(c\Phi)^2-2c\Phi\left(\frac{\partial c}{\partial R_1}\Phi+\right.\right.\\
&\qquad\left.\left.+\frac{\partial\Phi}{\partial R_1}c\right)r\right]=0;\\
&\frac{\partial T}{\partial R_2}=\frac{J}{(c\Phi)^4}\left[\frac{\partial r}{\partial R_2}(c\Phi)^2-2c^2\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial R_2}r\right]=0;\\
&\frac{\partial T}{\partial R_3}=\frac{1}{(c\Phi)^2}\left(\frac{\partial J}{\partial R_3}r+J\frac{\partial r}{\partial R_3}\right)=0.
\end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

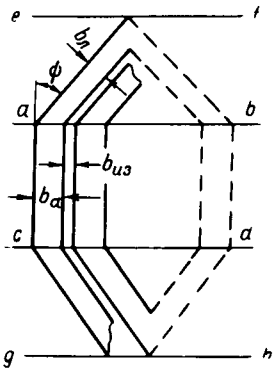


Рис. 1. Печатная обмотка цилиндрического якоря.

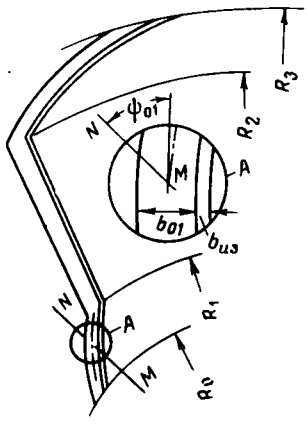


Рис. 2. Печатная обмотка на дисковом якоре.

Так как один из радиусов (при заданных отношениях k_{ij}) определяется мощностью двигателя, то одно из уравнений системы (8) может быть оставлено неиспользованным.

Введем обозначения $k_{ij}=\frac{R_i}{R_j}$, где $i=0, 1, 2, 3$; $j=0, 1, 2, 3$; $i\neq j$.

Задачу нахождения оптимальной геометрии дискового якоря можно считать решенной, если найдены все возможные значения k_{ij} и угол ψ в любой точке обмотки — между направлением проводника в данной точке и радиусом, проведенным из центра диска в эту точку. Что касается ширины активной части b_a, толщины фольги обмотки Δ, ширины изоляционного промежутка $b_{из}$, то они определяются точно так же, как и для цилиндрического якоря. Ширина проводника b_a, как это следует из (2), не изменяется по длине проводника, так как остаются неизменными все члены подкоренного выражения.

Будем отмечать величины, относящиеся к участкам обмотки, заключенным между окружностями радиусов R_i и R_j, индексами ij. Например, r_{12} — сопротивление части обмотки якоря между окружностями радиусов R_1 и R_2.

На границах участков обмотки, определяемых радиусами R_1, R_2, функции, описывающие величины, характеризующие обмотку, терпят разрыв. Так, для окружности радиуса $R=R_1$ со стороны внутренней лобовой части угол наклона проводника $\psi=\psi_{01}(R_1)$, а для этого же радиуса со стороны активной части $\psi=\psi_{12}(R_1)$. Обозначим $\psi_{01}(R_1)=\psi_{1-}$, а $\psi_{12}(R_1)=\psi_{1+}$. Аналогично для окружности радиуса R_j имеем $\psi_{ij}(R_j)=\psi_{i-}$ и $\psi_{ji}(R_i)=\psi_{i+}$, где $i<j$.

Найдем уравнение кривой, описывающей очертание лобовой части дискового якоря. Из первого уравнения системы (8) следует:

$$\frac{\partial r}{\partial R_0}=0.$$

Так как сопротивление активной части обмотки r_{12} и сопротивление внешней лобовой части r_{23} от радиуса R_0 не зависит, то производная от полного сопротивления $r=r_{01}+r_{12}+r_{23}$ может быть заменена:

$$\frac{\partial r}{\partial R_0}=\frac{\partial r_{01}}{\partial R_0}=0,$$

т. е. условия оптимальности для внутренних лобовых соединений сводятся к условию минимума сопротивления.

Заметим, что обмотку дискового якоря можно получить из соответствующей обмотки цилиндрического якоря методом конформного преобразования посредством функции комплексного переменного $f(z)=e^z$, где $z=x+jy$.

Пусть ось действительных чисел плоскости направлена вдоль прямой ac (рис. 1), тогда эта прямая и ей параллельные превратятся в радиальные прямые плоскости $w(R, \theta)$, а прямые ef, ab, cd, gh — соответственно в окружности радиусов R_0, R_1, R_2, R_3.

Исчерпывающих данных, характеризующих геометрию дискового якоря, получить с помощью конформного преобразования невозможно, так как неизвестна активная длина преобразуемой обмотки, а ее положение относительно осей x, jy неопределенно. Следовательно, получается неопределенным и положение преобразованной (дисковой) обмотки на плоскости $w(R, \theta)$. Если в цилиндрическом якоре для получения максимального быстродействия желательно стремиться к максимальной активной длине и минимальному диаметру якоря, то в дисковом якоре максимальное быстродействие получается при вполне определенной длине активной части проводника. Тем не менее, отмеченное обстоятельство позволяет воспользоваться принципом консерватизма углов и определить очертание лобовых частей.

Выделим на плоскости $w(R, \theta)$ бесконечно малый элемент в зоне внутренних лобовых частей дискового якоря (рис. 3) со сторонами dR и $Rd\varphi$. Если стороны элемента стремятся к нулю, то сам он стремится к прямоугольнику и становится подобным бесконечно малому элементу плоскости $z(x, jy)$. Поэтому проводник, соединяющий боковые стороны прямоугольника и обладающий минимальным сопротивлением, представляет собой прямую с углом наклона к этим сторонам ψ, определяемым формулой (7). Поскольку элемент R, $Rd\varphi$ выделен в произвольном месте плоскости w в области лобовых соединений, можно сказать, что указанный наклон проводника к радиусу сохраняется во всей области. Проводниковое деление

$$t=\frac{4\pi}{N}R.$$

С уменьшением радиуса значение $d=\frac{b_{из}}{t}$ увеличивается, что влечет за собой уменьшение ψ. При необходимости всегда можно учитывать изменения угла ψ вдоль радиуса. Однако эти изменения невелики и составляют обычно менее 5°. Если ими пренебречь, то можно считать, что кривая, описывающая форму внутренней лобовой части, совпадает в каждой точке с изоклиной к радиусу диска, проведенному через данную точку.

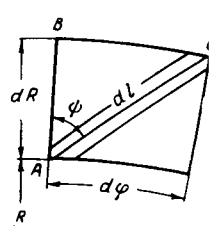


Рис. 3. К определению уравнения лобовой части

Из треугольника ABC (рис. 3)

$$Rd\varphi=dR\,\mathrm{tg}\,\psi,$$

откуда уравнение кривой, описывающей лобовую часть,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$\varphi = \operatorname{tg}\psi \ln \frac{R}{R_0}$$

или

$$\frac{R}{R_0} = e^{\varphi \operatorname{ctg}\psi}.$$

При изменении радиуса от R_0 до R_1 угол φ изменяется от нуля до $\varphi_л = \gamma \frac{\varphi_т}{2}$, где $\varphi_т = \frac{\pi}{p}$ — угловое полюсное деление; $\gamma = \frac{2\varphi_л}{\varphi_т}$ — угловой коэффициент укорочения лобовой части.

Печатные обмотки машин постоянного тока обычно выполняются волновыми, и укорочение лобовой части в основном происходит только за счет наклона активного проводника в пределах межполюсного промежутка [Л. 8]. В этом случае $\gamma = \alpha$, и коэффициент отношения радиусов внутренней лобовой части

$$k_{10} = \frac{R_1}{R_0} = e^{\beta \operatorname{ctg}\psi_{10}}, \qquad (9)$$

где

$$\beta = \frac{\gamma_{01}\pi}{2p} = \frac{\alpha\pi}{2p}.$$

Ширину проводника в любом сечении найдем из следующего выражения:

$$b = t\cos\psi - b_{из} = \frac{4\pi\cos\psi}{N} R - b_{из}.$$

Сопротивление внутренней лобовой части обмотки

$$r_{01} = \frac{N}{4a^2} r'_{01},$$

где r'_{01} — сопротивление внутренней лобовой части единичного проводника.

Сопротивление элементарного участка внутренней лобовой части длиной dl_{01}

$$dr'_{01} = \frac{\rho dl_{01}}{s_{01}} = \rho \frac{dR}{\Delta (mR - b_{из})\cos\psi_{01}},$$

где

$$m = \frac{4\pi\cos\psi_{01}}{N}.$$

Длина элементарного участка (рис. 3)

$$dl_{01} = \frac{dR}{\cos\psi_{01}},$$

тогда

$$r'_{01} = \frac{\rho}{\Delta}\int_{R_0}^{R_1} \frac{dR}{(mR - b_{из})\cos\psi_{01}} = \frac{\rho}{\Delta m\cos\psi_{01}} \ln \frac{mR_1 - b_{из}}{mR_0 - b_{из}}.$$

Определение k_{12} возможно из третьего уравнения системы (8). Выразим входящие в эту систему величины через соответствующие радиусы и углы наклона проводника:

$$c = \frac{p}{2\pi}\frac{N}{a} = gR_1,$$

где $g = \frac{2p}{at_1}$; $t_1 = \frac{b_а + b_{из}}{\cos\psi_{1+}}$ — проводниковое деление на окружности радиуса.

Ширина активного проводника и ширина изоляционного промежутка не зависят от радиуса, поэтому $t_1 = \text{const}$, $g = \text{const}$.

Сопротивление активной части обмотки

$$r_{12} = \frac{N}{4a^2} r'_{12} = \frac{N}{4a^2\Delta}\frac{\rho(R_2 - R_1)}{b_{12}\cos\psi_{1+}}.$$

Число проводников обмотки

$$N = \frac{4\pi R_1}{t_1} = fR_1.$$

Сопротивление участка внешних лобовых частей запишется аналогично участку внутренних лобовых частей:

$$r_{23} = \frac{\rho N}{4a^2\Delta}\frac{1}{m_1\cos\psi_{23}} \ln \frac{m_1R_3 - b_{из}}{m_1R_2 - b_{из}},$$

где

$$m_1 = \frac{4\pi}{N}\cos\psi_{23}.$$

Сопротивление обмотки якоря

$$r = \frac{\rho f R_1}{4a^2\Delta}\left[\frac{1}{m\cos\psi_{01}} \ln \frac{mR_1 - b_{из}}{mR_0 - b_{из}} + \frac{R_2 - R_1}{b_{12}\cos\psi_{1+}} + \frac{1}{m_1\cos\psi_{23}} \ln \frac{m_1R_3 - b_{из}}{m_1R_2 - b_{из}}\right].$$

Магнитный поток

$$\Phi = \frac{\pi\alpha B}{2p}(R_2^2 - R_1^2).$$

Момент инерции ротора

$$J = \frac{\pi\gamma\Delta}{2} R_3^4.$$

Представим $R_0 = k_{01}R_1$, $R_2 = k_{23}R_3$, $R_3 = k_{31}R_1$, где $k_{01} = \frac{1}{k_{10}}$ определен нами выше, значениями k_{23} и k_{31} необходимо задаться. В зависимости от числа полюсов и конструктивных данных обмотки k_{31}, k_{23} изменяются в пределах $k_{31} = 1{,}8—3{,}0$, $k_{23} = 0{,}8—0{,}9$. В дальнейшем мы определим их значения, причем если окажется, что они значительно отличаются от тех, которыми задавались, можно произвести уточнение. Сопротивление якоря выразим в виде:

$$r = \frac{\rho f}{16a^2\pi\Delta}\left[\frac{fR_1^2}{\cos^2\psi_{01}} \ln \frac{t_1\cos\psi_{01} - b_{из}}{t_1k_{01}\cos\psi_{01} - b_{из}} + \frac{4\pi R_1(R_2 - R_1)}{b_{12}\cos\psi_{1+}} + \frac{fR_1^2}{\cos^2\psi_{23}} \ln \frac{t_3\cos\psi_{23} - b_{из}}{t_3k_{23}\cos\psi_{23} - b_{из}}\right].$$

Подставив значение величин и их производных во второе уравнение системы (8), получим:

$$4LR_1^3 + 5FR_2R_1^2 - FR_2^3 = 0, \qquad (10)$$

где

$$L = D + H - F; \quad D = \frac{f}{\cos^2\psi_{01}} \ln \frac{t_1\cos\psi_{01} - b_{из}}{k_{01}t_1\cos\psi_{01} - b_{из}};$$

$$H = \frac{t}{\cos^2\psi_{23}} \ln \frac{t_3\cos\psi_{23} - b_{из}}{k_{23}t_3\cos\psi_{23} - b_{из}}; \quad F = \frac{4\pi}{b_{12}\cos\psi_{1+}}.$$

Если пренебречь сопротивлением лобовых частей ($D = 0$, $H = 0$), уравнение (10) приобретает вид:

$$4R_1^3 - 5R_2R_1^2 + R_2^3 = 0;$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

решение этого уравнения:

$$k_{21}=\frac{R_2}{R_1}=1{,}56,$$

Влияние лобовых частей существенно изменяет эту величину (см. приложение).

Определение k_{32} возможно из четвертого уравнения системы (8), откуда следует:

$$\frac{\partial J}{\partial R_3}r+J\frac{\partial r}{\partial R_3}=0. \qquad (11)$$

Поскольку радиус R_3 и угол ψ_{23} связаны функциональной зависимостью, удобно выразить значения величин, входящих в последнее уравнение через известные радиусы R_0, R_1, R_2, известные углы наклона ψ_{01}, ψ_{1+} и искомый угол ψ_{23}. Стремясь к минимальному сопротивлению наружной лобовой части, получим выражение, аналогичное формуле (9):

$$k_{32}=\frac{R_3}{R_2}=e^{\beta_1 \operatorname{ctg}\psi_{23}}, \qquad (12)$$

где $\beta_1=\frac{\gamma_{23}\pi}{2p}$; обычно $\beta_1=\beta=\frac{\alpha\pi}{2p}$.

Тогда

$$J=\frac{\pi\gamma\Delta}{2}R_2^4\,e^{4\beta\operatorname{ctg}\psi_{23}}.$$

Сопротивление якоря представим в виде:

$$r=\frac{Q}{\Delta}\left[F+\frac{1}{g\cos^2\psi_{23}}\ln\frac{gR_2\cos\psi_{23}e^{\beta\operatorname{ctg}\psi_{23}}-b_{из}}{gR_2\cos\psi_{23}-b_{из}}\right],$$

где

$$Q=\frac{N\rho}{4a^2},\quad g=\frac{4\pi}{N},\quad F=r_{01}+r_{12}.$$

Подставив найденные значения в дифференциальное уравнение (П) и произведя замену переменных, приходим к следующему уравнению:

$$\frac{4\beta}{\sin^2\psi_{23}}r-\frac{\partial r}{\partial\psi_{23}}=0.$$

После подстановки в него значения r, получаем:

$$4g\beta F\cos^2\psi_{23}+(4\beta-2\operatorname{tg}\psi_{23}\sin^2\psi_{23})\ln\frac{e^{\beta\operatorname{ctg}\psi_{23}}-\varkappa}{1-\varkappa}-$$
$$-\frac{\operatorname{tg}\psi_{23}(e^{\beta\operatorname{ctg}\psi_{23}}-1)\varkappa\sin^2\psi_{23}-\beta e^{\beta\operatorname{ctg}\psi_{23}}(1-\varkappa)}{(1-\varkappa)(e^{\beta\operatorname{ctg}\varphi_{23}}-\varkappa)}=0, \qquad (13)$$

где $\varkappa=\frac{b_{из}}{m_1R_2}$.

Определив из (13) ψ_{23}, найдем и k_{32}.

Если пренебречь изоляционным промежутком между проводниками, положив $b_{из}=0$, уравнение (13) упрощается и превращается в следующее:

$$4\beta gF\cos^2\psi_{23}+(4\beta-2\operatorname{tg}\psi_{23}\sin^2\psi_{23})\beta\operatorname{ctg}\psi_{23}+\beta=0. \qquad (14)$$

Анализ полученных формул показывает, что взаимное влияние частей обмотки друг на друга весьма существенно и пренебрегать им нельзя. Геометрия печатного якоря в значительной степени зависит от величины изоляционного промежутка между проводниками, числа активных проводников, коэффициента полюсного перекрытия и других величин, характеризующих основные размеры якоря и магнитной системы. Следовательно, геометрия печатного якоря, в том числе и соотношения между характерными радиусами (R_0, R_1, R_2, R_3) не являются раз и навсегда заданными и должны определяться исходя из конкретных условий.

Приложение. Рассмотрим дисковый печатный якорь двигателя постоянного тока со следующими данными: $p=4$; $B=0{,}55$ *тл*; $\alpha=0{,}8$; $\Delta=0{,}2$ *мм*; $j=13{,}4$ *а/мм²*; $k_\Phi=1{,}11$; $R_1=21$ *мм*; $\rho=2{,}8\cdot10^{-8}$ *ом·м* — удельное сопротивление обмотки при температуре 120° С.

Ширина изоляционного промежутка

$$b_{из}=0{,}05+2{,}3\Delta=0{,}51\ мм.$$

Частота вихревых токов

$$f=\frac{p\omega}{2\pi}=200\ гц.$$

Ширина активного проводника

$$b_{12}=\frac{j\rho}{2fk_\Phi B}=1{,}55\cdot10^{-3}\ м.$$

Проводниковое деление на окружности радиуса

$$t_1=b_{12}+b_{из}=2{,}06\ мм.$$

Относительное значение изоляционного промежутка

$$d=\frac{b_{из}}{t_1}=0{,}251.$$

Угол наклона внутренней лобовой части

$$\psi_{01}=\arccos\left(\frac{d}{4}+\sqrt{\frac{d^2}{16}+\frac{1}{2}}\right)=39°.$$

Коэффициент

$$k_{10}=e^{\frac{\alpha\pi}{2p}\operatorname{ctg}\psi_{01}}=1{,}48.$$

Начальный радиус обмотки

$$R_0=R_1k_{01}=14{,}2\ мм.$$

Коэффициент k_{12} найдем из уравнений (10).

Число проводников обмотки

$$N=\frac{4\pi R_1}{t_1}=129,$$

откуда

$$f=6{,}14\cdot10^3\ 1/м.$$

Пусть $k_{23}=0{,}9$; $k_{31}=2{,}85$; $\psi_{23}=71°$, тогда $R_3=k_{31}R_1=60$ *мм*; $D=6{,}72\cdot10^3$ *1/м*; $F=8{,}21\cdot10^3$ *1/м*; $H=8{,}55\cdot10^3$ *1/м*, где $m_1=3{,}16\cdot10^{-2}$; $L=7{,}06\cdot10^3$ *1/м*.

Уравнение (10) примет вид:

$$28{,}2R_1^3+41{,}0R_2R_1^2-8{,}21R_2^3=0.$$

Оно удовлетворяется при единственном положительном значении отношения

$$k_{21}=2{,}52,$$

откуда $R_2=52{,}8$.

Отношение k_{32} найдем после того, как из (18) определим угол ψ_{23}. Решая это уравнение после подстановки в него численных значений, получаем $\psi_{23}=71°$, тогда

$$k_{32}=\frac{R_3}{R_2}=1{,}12.$$

Следовательно, $R_3=59{,}2$, что практически совпадает с заданными значениями и уточнения не требует.

Если пренебречь изоляционным промежутком между проводниками ($b_{из}=0$), получим значения, существенно отличающиеся от приведенных выше. В самом деле, при этом

$$\psi_{01}=\frac{\pi}{4},\quad k_{10}=1{,}37.$$

Уравнение (10) принимает вид:

$$6{,}60R_1^3+41{,}0R_2R_1^2-8{,}21R_2^3=0$$

и решается при $k_{21}=2{,}31$.

Угол наклона внешних лобовых частей получаем из (18) ($\psi_{23}=77°$) и, следовательно,

$$k_{32}=1{,}07.$$

Литература

1. Таел В., О геометрии ротора с печатной обмоткой в электрических машинах, Изв. АН Эстонской ССР, 1961, № 3.

2. Ивоботенко Б. А., Основные соотношения при проектировани многополюсных печатных обмоток электрических машин торцового типа, Труды МЭИ, вып. XXXVIII, 1962.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.316.973:620.197

Повышение эффективности работы совместной противокоррозионной защиты подземных металлических сооружений

М. В. ТАРНИЖЕВСКИЙ

Московский энергетический институт

Под совместной защитой подземных металлических сооружений от почвенной коррозии и коррозии, вызываемой блуждающими токами, понимают защиту сооружений различного назначения общими защитными устройствами, а также согласованную работу устройств, осуществляющих защиту отдельных сооружений. При этом должно быть исключено вредное влияние катодной поляризации смежных сооружений.

В настоящей статье рассмотрены способы повышения эффективности действия системы совместной защиты, направленные на дальнейшее повышение надежности эксплуатации ответственных подземных сооружений.

Повышение эффективности действия совместной противокоррозионной защиты может быть осуществлено:

автоматизацией защитных устройств, обеспечивающей стабилизацию защитного потенциала на защищаемых сооружениях в зоне подключения к ним кабелей от защитных устройств [Л. 1]:

выбором рациональной трассы вновь прокладываемых сооружений с учетом их взаимного влияния при устройстве системы совместной защиты;

применением усовершенствованных видов катодной защиты;

поддержанием оптимального с точки зрения ограничения утечки тяговых токов режима работы рельсовой сети.

Автоматизация защитных устройств. Изучение режима работы неавтоматических усиленных дренажей и катодных станций показало, что изменения потенциалов защищаемых и смежных подземных сооружений могут быть весьма значительными. Средние значения отклонений потенциала защищаемого сооружения от установленного при наладке среднего значения могут достигать 0,5—2 *в*. В ряде случаев до 50% потребляемой защитной установкой электроэнергии идет на создание избыточного потенциала на подземном сооружении, что оказывает вредное воздействие на состояние изоляционного покрытия подземного сооружения и при применении катодной защиты приводит к преждевременному выходу из строя анодных заземлителей.

Технико-экономические преимущества усиленных дренажей и катодных станций, оборудованных устройством для автоматического поддержания защитного потенциала на подземном сооружении, по сравнению с защитными устройствами, работающими при неизменном значении выходного напряжения, заключаются прежде всего в возможности обеспечения защиты сооружения при меньшем дренажном токе. Если для обеспечения защитного потенциала на подземном сооружении неавтоматические дренажи и катодные станции приходится настраивать на максимальный защитный ток, необходимый для обеспечения защитного потенциала при «пиковой» нагрузке на рельсовой сети, то автоматический дренаж или катодная станция обеспечивает защитный потенциал при токе, который изменяется в зависимости от интенсивности тяговой нагрузки. В результате среднее значение дренажного тока при автоматическом поддержании защитного потенциала может быть значительно уменьшено.

Уменьшение дренажного тока при неизменной длине защитной зоны на подземном сооружении улучшает условия работы изоляционного покрытия, уменьшает опасность искрообразования на подземном сооружении, сокращает расход электроэнергии на защиту. Автоматизация усиленных дренажей также уменьшает ток утечки из рельсов не только по сравнению с обычным усиленным дренажем, но и с поляризованным дренажем. Это обстоятельство должно приниматься во внимание в случае, если существует опасность увеличения интенсивности коррозии рельсов и присоединяемых к ним опор контактной сети.

Эффект стабилизации потенциалов (уменьшение пульсаций потенциала защищаемого сооружения не только в точке дренирования, но и на некотором удалении от нее) позволяет при переходе к автоматическому режиму электрозащиты снизить значение защитного потенциала в точке подключения защитной установки, т. е. обеспечить защиту того же участка сооружения меньшим защитным током. В связи с этим переход от обычной защитной установки к автоматической обеспечивает защиту тех же самых участков при более благоприятном ре-

3. Сийтан У. Х., О зависимости электромагнитной мощности электродвигателя постоянного тока с дисковым якорем от геометрии элементов печатной обмотки якоря, «Электричество», 1965, № 7.

4. Партс Р. Р., О геометрии якоря с печатной обмоткой маломощных двигателей постоянного тока, Изв. вузов, «Электромеханика», 1963, № 5.

5. Основич Л. Д., Выбор оптимальных размеров диска в машинах постоянного тока с печатными обмотками, Изв. вузов, «Электромеханика», 1963, № 5.

6. Иванова И. Г. и др., Оптимальное число полюсов и геометрия якоря двигателя постоянного тока с печатной обмоткой, Электромашинные средства автоматики, Сб. трудов Института автоматики, Киев, 1966.

7. Рихтер Р., Электрические машины, т. 1, ОНТИ, 1935.

8. Карпенко Б. К. и др., Двигатели постоянного тока с печатной обмоткой якоря, «Энергетика и электротехническая промышленность», Киев, 1965, № 3.

9. Расчет и конструктивные данные двигателей с якорем, выполненным по принципу печатной схемы, Электротехническая промышленность за рубежом, РИ-260 VII, ЦИНТИ-электропром.

[23.6.1970]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

жиме распределения потенциалов вдоль защищаемых подземных сооружений и обусловливает существенное уменьшение вредного влияния на смежные незащищаемые сооружения. Широкое внедрение в практику совместной противокоррозионной защиты автоматических защитных устройств приведет к значительному технико-экономическому эффекту.

Выбор рациональных трасс новых подземных сооружений. При проектировании трасс трубопроводов и кабелей особое внимание должно обращаться на их расположение относительно рельсовых путей электрифицированного на постоянном токе транспорта. В значительной степени параметры устройств совместной защиты, надежность их работы зависят от схемы расположения подземных сооружений и рельсов. Вариант параллельной прокладки двух подземных сооружений вдоль рельсового пути был рассмотрен ранее [Л. 2].

Разработанная методика расчета позволяет на стадии проектирования оценить степень коррозионной опасности вновь прокладываемых сооружений, наметить такие трассы прокладки, при которых имеет место наименьшая вероятность возникновения коррозионных повреждений. При прокладке нового сооружения, параллельно уже проложенному, необходимо оценить степень взаимного влияния этих сооружений, определить значение тока совместной защиты. В частности, из практики известно, что при совместной защите двух параллельных трубопроводов с различным состоянием изоляции увеличивается ток, необходимый для защиты трубопровода с лучшим состоянием покрытия, т. е. с большим значением сопротивления изоляции $R_{из}$.

Для того чтобы объяснить это явление и определить степень влияния одного сооружения на другое, рассмотрим отдельно составляющие плотности тока утечки трубопровода. На рис. 1 показаны зависимости составляющих плотности тока утечки первого трубопровода от значения сопротивления изоляции второго трубопровода при совместной дренажной защите. Индекс s имеют составляющие (до защиты), рассчитанные для выбранного варианта схемы включения нагрузок на рельсах; индекс 1 — составляющие, вызванные защитным током, вытекающим из первого подземного трубопровода; верхний индекс 2 — составляющие, вызванные защитным током, вытекающим из второго трубопровода; верхний индекс 0 — составляющие, вызванные суммарным защитным током $I_д$, втекающим в рельсы.

Плотность тока утечки подземных трубопроводов до включения их в защиту j_1^s является существенно положительной величиной. Составляющая плотности тока утечки, вызванная суммарным защитным током $I_д$, втекающим в рельсы, j_1^0 является величиной отрицательной, причем влияние этой составляющей тем больше, чем хуже изоляционные свойства покрытия трубопровода. Составляющая плотности тока утечки, вызываемая током, подключаемым на самом подземном трубопроводе, j_1^1 является существенно отрицательной величиной. И, наконец, составляющая, вызываемая нагрузкой, включаемой на соседнем трубопроводе, j_1^2 — положительная величина. Количественный анализ трех

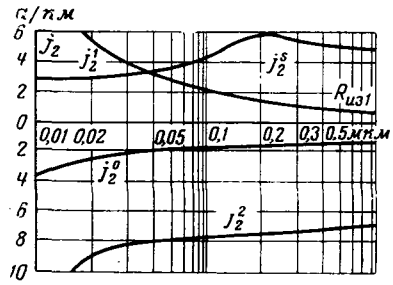


Рис. 1.

составляющих приводит к выводу, что увеличение тока, необходимого для защиты первого трубопровода в области малых значений сопротивления изоляции второго трубопровода, вызвано резким возрастанием составляющей j_1^2, т. е. большим влиянием дренажного тока, отводимого со второго, плохо изолированного от земли трубопровода. Значение j_1^2 можно уменьшить отнесением одного трубопровода от другого или увеличением $R_{из_2}$. График, показанный на рис. 1, рассчитан для $R_{из_1} = 0{,}5$ *ом·км*.

Таким образом, при малых значениях $R_{из2}$ величина тока, необходимого для его защиты, резко возрастает. Одновременно сильно увеличивается его влияние на первый трубопровод, проложенный параллельно на относительно небольшом расстоянии. Это влияние увеличивает опасность коррозионного разрушения первого трубопровода. И для компенсации этого вредного влияния, т. е. для обеспечения надежной защиты первого трубопровода требуется значительно больший дренажный ток. В результате возрастает вредное влияние защищаемых совместно сооружений на те смежные коммуникации, которые не включены в систему совместной защиты.

При проектировании совместной защиты нового трубопровода, трасса которого проходит в непосредственной близости от ранее проложенного трубопровода, следует учитывать возможное увеличение тока дренажа, обусловленное вредным влиянием трубопровода, качество изоляции которого за время эксплуатации может существенно ухудшиться. На практике часто встречаются случаи взаимного пересечения подземных трубопроводов и рельсов (рис. 2).

Запишем исходную систему уравнений для рассматриваемой схемы расположения рельсов и двух подземных сооружений:

$$I_1 R_1 - R_{из_1} \frac{d^2 I_1}{dx^2} = -\frac{\rho}{2\pi} \frac{d}{dx} \times$$

$$\times \left\{ \int_{-l_1}^{l_2} \frac{j_0(\xi)\, d\xi}{\sqrt{(x - \xi\cos\gamma)^2 + r_{01}^2(\xi)}} \right\} - \frac{\rho}{4\pi} \frac{d}{dx} \times$$

$$\times \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{j_1(\xi)\, d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_1^2}} + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{j_1(\xi)\, d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (2h_1)^2}} + \right.$$

$$\left. + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{j_2(\xi)\, d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_{12}^2}} + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{j_2(\xi)\, d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + R_{12}^2}} \right\}; \quad (1)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$I_2R_2 - R_{из2}\frac{d^2I_2}{dx^2} = -\frac{\rho}{2\pi}\frac{d}{dx}\times$$

$$\times\left\{\int_{-l_1}^{l_2}\frac{j_0'(\xi)\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi\cos\gamma)^2+r_{02}^2(\xi)}} - \frac{\rho}{4\pi}\frac{d}{dx}\times\right.$$

$$\times\int_{-\infty}^{\infty}\frac{j_2(\xi)\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+r_2^2}} + \int_{-\infty}^{\infty}\frac{j_2(\xi)\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+(2h_2)^2}} +$$

$$\left.+\int_{-\infty}^{\infty}\frac{j_1(\xi)\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+r_{12}^2}} + \int_{-\infty}^{\infty}\frac{j_1(\xi)\,d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2+R_{12}^2}}\right\}, \quad (2)$$

где (l_1+l_2) — длина участка рельсовой сети, *км*; R_1 и R_2 — продольное сопротивление подземных сооружений, *ом/км*; $R_{из1}$ и $R_{из2}$ — сопротивления изоляции покрытий подземных сооружений, *ом·км*; ρ — удельное сопротивление грунта, *ом·км*; γ — угол пересечения рельсами подземных сооружений; r_{12} — расстояние между подземными сооружениями, *км*; R_{12} — расстояние между одним подземным сооружением и зеркальным отображением второго сооружения, *км*; ξ — текущая координата вдоль рельсового пути; r_{01} и r_{02} — кратчайшие расстояния между точкой рельсового пути с координатой ξ и соответственно первым и вторым подземными сооружениями, *км*; $j_0(\xi)$ — распределение плотности тока утечки из рельсов (задано сочетанием нагрузок, приложенных к участку рельсовой сети), *а/км*.

Уравнения (1) и (2) решаются относительно искомых функций распределения токов $I_1(x)$ и $I_2(x)$ и плотностей токов утечки $j_1(x)$ и $j_2(x)$ методом преобразования Фурье.

В отличие от варианта с прокладкой подземных металлических сооружений параллельно участку рельсовой сети [Л. 2] в рассматриваемом варианте некоторые промежуточные интегралы выражаются через интегрально показательную функцию $E_i(x)$. При этом учитываем, что

$$\int_{U_1}^{U_2}\frac{e^{kt}}{t}\,dt = \int_{-\infty}^{U_2}\frac{e^{kt}}{t}\,dt - \int_{-\infty}^{U_1}\frac{e^{kt}}{t}\,dt = E_i(kU_2) - E_i(kU_1). \quad (3)$$

Формулы, которые получаются для рассматриваемого варианта, весьма громоздки и их практически невозможно применить для проведения инженерных расчетов. В связи с этим было проведено определение искомых зависимостей $j_1(x)$ и $j_2(x)$ с помощью ЦВМ М-220.

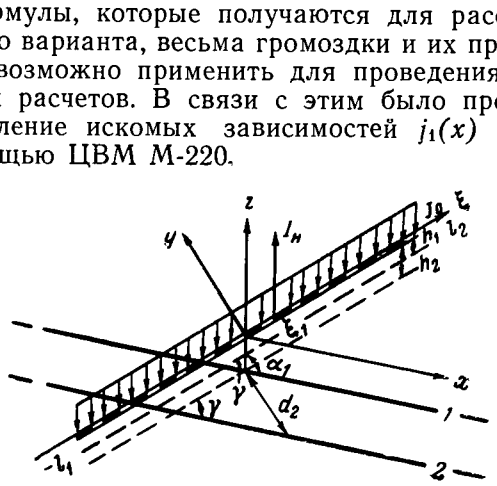


Рис. 2.

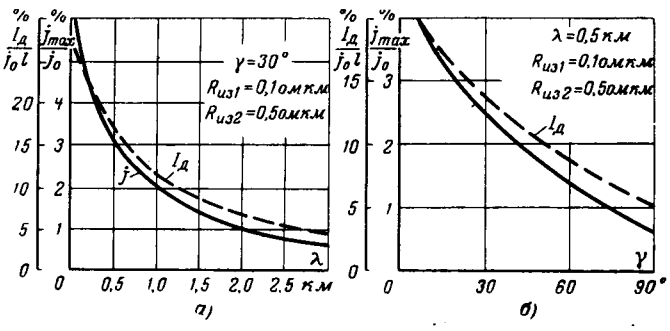


Рис. 3.

Был получен ряд зависимостей, характеризующих изменение плотности тока утечки и тока, необходимого для совместной защиты сооружений, от угла пересечения рельсов с сооружениями, а также от расстояния от места указанного пересечения до места подключения к рельсам отсасывающей линии тяговой подстанции (координата ξ_1 на рис. 2). Последнее расстояние обозначим через λ.

На рис. 3,*а* приведены зависимости отношения j_{max}/j_0 и значения тока, необходимого для совместной защиты сооружений, от λ при $\gamma=30°$. Из графиков следует, что увеличение расстояния λ до 400—500 *м* приводит к уменьшению значения j_{max} примерно на 50% и на 45% снижается значение необходимого для совместной защиты дренажного тока.

На рис. 3,*б* приведены зависимости тех же величин от угла пересечения γ при $\lambda=0{,}5$ *км*. Из этих зависимостей следует, что уменьшение угла пересечения γ вызывает существенное увеличение j_{max} и $I_д$.

Таким образом, при проектировании и строительстве вновь прокладываемых сооружений необходимо относить места их пересечения с рельсовыми путями до 800—1 000 *м* от отсасывающих пунктов, осуществлять взаимное пересечение сооружений с рельсами под углом, близким к 90°, а при необходимости уменьшения взаимного влияния одного сооружения на другое следует обеспечить расстояние между параллельно прокладываемыми сооружениями не менее 200—300 *м*.

Применение усовершенствованных схем катодной защиты. Определенный эффект совместной защите может дать применение модифицированных вариантов катодной защиты. В [Л. 2] изложена методика расчета совместной катодной защиты, состоящей из источника постоянного тока напряжением $E_к$, анодного заземлителя с сопротивлением растеканию R^3, кабеля, соединяющего источник тока с одним из подземных сооружений и анодным заземлителем, и перемычки между первым и вторым защищаемыми сооружениями. Такая типовая схема катодной защиты широко применяется на практике. Однако ей присущ существенный недостаток. При катодной защите протяженность защитной зоны часто приходится ограничивать, чтобы не допустить превышения максимального значения защитного потенциала в точке подключения дренажного кабеля. Обычно параметры катодной станции определяются исходя из условия обеспечения минимального защитного потенциала на концах защищаемой

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

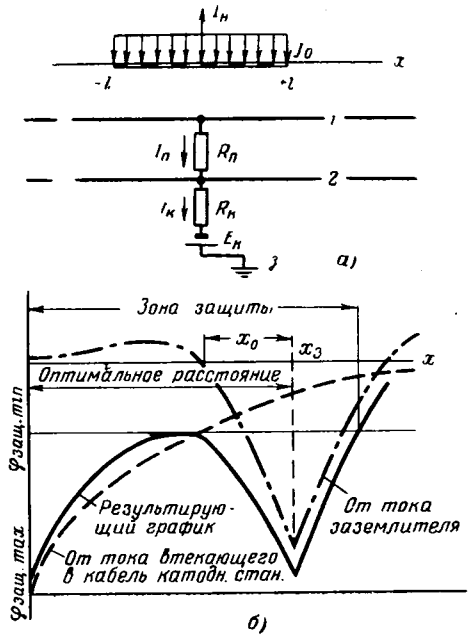


Рис. 4.

зоны. Однако во многих случаях при выполнении этого условия на защищаемых сооружениях в местах подключения к ним катодных станций создается чрезмерно большой потенциал относительно близких слоев земли.

В [Л. 3] высказывается мнение о целесообразности повышения потенциала сооружения в точках подключения катодной защиты. Однако до сих пор Правилами защиты возможность такого повышения не предусмотрена [Л. 4]. Поэтому необходимо каким-то образом модифицировать типовую схему катодной защиты с тем, чтобы, с одной стороны, обеспечить достаточную протяженность зоны действия катодной защиты, а с другой стороны, снизить разность потенциалов между сооружениями и землей в местах подключения к ним кабелей, идущих от катодной станции.

Рассмотрим две системы модифицированной катодной защиты — с выносом заземлителя вдоль защищаемых сооружений от места подключения к ним кабеля от катодной станции и катодную защиту с противопотенциалом.

Будем определять влияние перемещения анодного заземлителя на режим работы катодной защиты. Известно, что при применении катодной защиты ток, протекающий вдоль защищаемого сооружения к месту подключения кабеля катодной станции, создает на сооружении катодное приращение потенциала. С другой стороны, токи, стекающие с анодного заземлителя станции, в некотором радиусе натекают на подземные металлические сооружения, что также создает катодное приращение потенциала сооружений относительно близлежащих слоев земли. Как правило, анодный заземлитель катодной защиты располагают напротив точек подключения сооружений к катодной станции, в результате чего указанные выше катодные приращения потенциала складываются, и, если анодный заземлитель расположен вблизи сооружения, во избежание «перезащиты» в точке дренирования ток катодной станции должен быть уменьшен, что сокращает протяженность зон защиты станции. Тогда для увеличения протяженности защитных зон стремятся располагать анодный заземлитель возможно дальше от защищаемых подземных сооружений, отказываясь фактически от катодного влияния анодного заземлителя станции на подземные сооружения.

Решение задачи состоит в определении оптимального расстояния между точкой подключения к сооружению кабеля от катодной станции и точкой на сооружении, в которой действие анодного заземлителя максимально. Назовем оптимальным максимальное из возможных расстояний, на протяжении которого потенциалы сооружений относительно близлежащих слоев земли были бы не ниже минимального защитного потенциала.

В связи с тем, что рассматривается совместная катодная защита двух сооружений, необходимо определить оптимальное расстояние, на которое следует вынести анодный заземлитель станции катодной защиты вдоль защищаемых сооружений— для сооружения с худшими изоляционными свойствами. Предположим, что худшими изоляционными свойствами обладает, например, первое подземное сооружение.

Подземные сооружения находятся в поле блуждающих токов параллельно проложенного рельсового пути с суперпозицией, сосредоточенной в точке $x=0$ нагрузки $I_н$ и равномерно распределенной вдоль всей длины рельсового пути нагрузки интенсивностью j_0 (рис. 4,*а*). Первое подземное сооружение соединено со вторым перемычкой, второе же сооружение соединено дренажным кабелем со станцией катодной защиты, имеющей анодный заземлитель в точке с координатами ($x_э$, $y_э$ и $z_э$).

Проложенные вдоль рельсов параллельные сооружения будут, очевидно, иметь максимальный положительный потенциал относительно близлежащих слоев земли, т. е. наибольшую положительную плотность тока утечки в точке $x=0$ — напротив тяговой подстанции. Так как пункты подключения защит на сооружениях устанавливаются по возможности вблизи точек с максимальной положительной разностью потенциалов относительно «близкой земли», выберем их в той же точке $x=0$. Так что приведенная выше конкретизация задачи позволяет рассматривать сосредоточенные нагрузки, подключенные к подземным сооружениям при установке на них защиты в точке $x=0$.

Из трех координат, характеризующих расположение анодного заземлителя станции катодной защиты, две заданы, фиксированы, а третья, продольная координата расположения заземлителя, подлежит определению.

Приращение потенциала, создаваемое на первом подземном сооружении нагрузками $I_п$ и $(I_к—I_п)$, включенными на первом и втором сооружениях в точке $x=0$,

$$\Delta U_1^x(x) = R_{из1}[j_1^1(x) + j_1^2(x)] =$$

$$= \frac{I_к R_{из1}}{2\gamma_{21}}(K_1 e^{-\beta_1 x} - K_2 e^{-\beta_2 x}), \qquad (4)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где

$$K_1 = \beta_1 \{a_1 R_2 [R_{п1}(\beta_1) + R_{п12}(\beta_1)] - \beta_1^2\}; \quad (5)$$

$$K_2 = \beta_2 \{a_2 R_2 [R_{п1}(\beta_2) + R_{п12}(\beta_2)] - \beta_2^2\}, \quad (6)$$

β_1 и β_2 — приведенные коэффициенты утечки первого и второго подземных сооружений, 1/*км*; $R_{п1}$, $R_{п2}$ — переходное сопротивление первого сооружения и сопротивление связи между сооружениями, *ом · км*.

Из (4) следует, что функция $\Delta U_1^к(x)$—сумма двух монотонно убывающих экспоненциальных функций, асимптотически стремящихся к оси абсцисс снизу (рис. 4, *б*).

С другой стороны, приращение потенциала, создаваемое на первом подземном сооружении анодным заземлителем катодной станции,

$$\Delta U_1^3(x) = j_1^3(x) R_{из1} = \frac{I_к R_{из1}}{4\pi\gamma_{21}} \left[a_1 c_1 \varepsilon_1^{31}(x) + a_2 c_2 \varepsilon_2^{31}(x) - a_1 b_1 \varepsilon_1^{32}(x) - a_2 b_2 \varepsilon_2^{32}(x) - (a_1 c_1 - a_2 c_2) \sqrt{\frac{1}{\sqrt{(x-x_з)^2 + r_{з1}^2}}} + \frac{1}{\sqrt{(x-x_з)^2 + R_{з1}^2}} + (a_1 b_1 - a_2 b_2) \times \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x_з)^2 + r_{з2}^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-x_з)^2 + R_{з2}^2}} \right)\right], \quad (7)$$

где γ_{21}, a_1, a_2, c_1, c_2, b_1, b_2, $\varepsilon_1(x)$, $\varepsilon_2(x)$ — величины, характеризующие рассматриваемую систему [Л. 2].

Функция $\Delta U_1^3(x)$ — монотонная, пересекающая ось абсцисс в некоторой точке, зависящей от соотношения заданных параметров системы и асимптотически стремящаяся далее к оси абсцисс сверху (рис. 4,*б*).

В рассматриваемом интервале [0; $x_з$] суммарная функция $[\Delta U_1^к(x) + \Delta U_1^3(x)]$—приращение потенциала от включения защиты — имеет минимум, для которого справедливо условие:

$$\varphi_{защ\ min} = \Delta U^k_{1(x=x_{min})} + U^0_{1(x=x_{min})}. \quad (8)$$

где $U^0_{1(x=x_{min})}$ — потенциал относительно близлежащих слоев земли первого подземного сооружения до включения защиты в искомой точке, вызванный нагрузкой рельсовой сети.

Тогда для определения точки, в которой достигается минимум суммарной кривой в поле блуждающих токов $x = x_{min}$, необходимо решить графически уравнение:

$$K_1 e^{-\beta_1 x_{min}} - K_2 e^{-\beta_2 x_{min}} = \frac{2\gamma_{21}}{I_к R_{из1}} [\varphi_{защ\ min} - U^0_{1(x=x_{min})}]. \quad (9)$$

Координата x_0, в которой $\Delta U_1^3(x)$ пересекает ось абсцисс, определяется из выражения (7) при левой части, равной нулю.

Таким образом, в случае совместной катодной защиты двух параллельных подземных сооружений

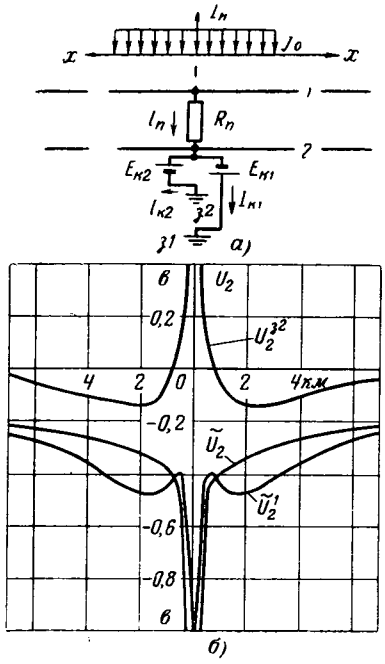


Рис. 5.

от коррозии блуждающими токами оптимальное расстояние, на которое следует отнести анодный заземлитель станции катодной защиты от точки дренирования вдоль защищаемых сооружений, может быть определено как сумма решений уравнений (9) и (7):

$$x_{опт} = x_{min} + x_0, \quad (10)$$

причем это расстояние определяется для подземного сооружения с худшими изоляционными свойствами.

Соотношение (10) дает максимальное из возможных расстояний по оси абсцисс между точкой дренирования и местом расположения анодного заземлителя катодной станции. Место расположения анодного заземлителя катодной станции может быть выбрано в каждом конкретном случае исходя из физических и технических соображений. Расстояние между точкой дренирования и местом расположения анодного заземлителя может не совпадать со значением, рассчитанным по (10), но должно быть не больше $x_{опт}$.

Рассмотрим принципиальную схему катодной защиты с противопотенциалом (рис. 5,*а*). Здесь катодная станция с выходным напряжением $E_{к1}$ является основной, а станция с напряжением $E_{к2}$ — дополнительной. Соответственно заземлитель $з_1(x_{з1}, y_{з1}, z_{з1})$ является основным, а $з_2(x_{з2}, y_{з2}, z_{з2})$ — дополнительным.

Основное назначение катодной защиты с противопотенциалом состоит в том, чтобы скомпенсировать высокий отрицательный потенциал сооружения в точке подключения защиты для увеличения зоны действия основной катодной установки.

Эксперименты показывают, что высокий отрицательный потенциал сооружения при применении катодной защиты имеет место лишь на небольшом протяжении сооружения вблизи точки подключения кабеля катодной станции. Поэтому зона действия второй вспомогательной катодной установки

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

является ограниченной, т. е. анодный заземлитель можно располагать в непосредственной близости от защищаемых сооружений.

Распределение плотностей тока утечки вдоль защищаемых сооружений определяется по выражениям:

$$\tilde{j}_1(x) = \tilde{j}'_1(x) + j_1^{32}(x); \quad (11)$$

$$\tilde{j}_2(x) = \tilde{j}'_2(x) + j_2^{32}(x), \quad (12)$$

где $\tilde{j}_1(x)$ и $\tilde{j}'_2(x)$ — плотность тока утечки, определенная для сооружения без включения дополнительной э. д. с. и заземлителя; $j_1^{32}(x)$, $j_2^{32}(x)$ — составляющая плотности тока утечки, обусловленная дополнительными э. д. с. и заземлителем.

Значения $\tilde{j}'_1(x)$ и $j_1^{32}(x)$ определяются по выражениям, приведенным в [Л. 2].

На рис. 5,*б* показаны кривые изменения потенциала на втором защищаемом сооружении ($R_{из1} = 0{,}12$ *ом·км*, $R_{из2} = 0{,}5$ *ом·км*). На нем показаны составляющие $\tilde{u}_2 : \tilde{u}'_2$ — график изменения разности потенциалов сооружение — «близкая» земля при обычной схеме катодной защиты (без противопотенциала); u_2^{32} — график изменения разности потенциалов сооружение — «близкая» земля от действия тока $I_{к2}$, натекающего на анодный заземлитель $з_2$.

Как видно из кривой суммарного значения $\tilde{u}_2$, применение дополнительной катодной станции с заземлителем существенно снижает значение $\tilde{u}_2$ в зоне подключения кабелей катодной защиты. В результате перераспределения потенциалов в ряде случаев вместо одного пика потенциала (как при обычной схеме катодной защиты) могут возникнуть два пика потенциала в точках, отстоящих на некотором расстоянии от места подключения к сооружению кабеля катодной станции.

Режим работы рельсовых сетей электрифицированного транспорта существенным образом сказывается на значении тока утечки из рельсов, а следовательно, и на значениях токов защитных противокоррозионных устройств. Известно, что применительно к рельсовым сетям трамвая обобщающим показателем, характеризующим утечку токов из рельсов в землю, является разность потенциалов между смежными отсасывающими пунктами. При эквипотенциальности указанных пунктов значение токов утечки из рельсов минимально.

В настоящее время разработаны автоматические устройства, обеспечивающие постоянное поддержание эквипотенциального режима работы отсасывающих пунктов [Л. 1]. Четыре тяговые подстанции трамвая в Москве оборудованы подобными устройствами, которые работают уже в течение двух лет. За истекший период накоплен значительный опыт эксплуатации этих устройств, который показал ряд преимуществ нового способа регулирования потенциалов по сравнению с ранее применяющимся реостатным методом. В частности, установлено, что защита сооружений при эквипотенциальном режиме работы рельсовой сети обеспечивается в большинстве случаев примерно вдвое меньшим дренажным током, чем при отсутствии регулирования потенциалов отсасывающих пунктов. Следовательно, при применении автоматических устройств, обеспечивающих поддержание эквипотенциальности отсасывающих пунктов рельсовой сети, совместная защита сооружений требует применения кабелей значительно меньшего сечения, что, в свою очередь, уменьшает капитальные затраты на сооружение противокоррозионной защиты. Одновременно существенно уменьшается влияние защищаемых сооружений на другие смежные коммуникации.

По итогам эксплуатационных испытаний новых устройств автоматического поддержания эквипотенциального режима работы отсасывающих пунктов трамвая можно сделать следующие выводы:

1. Работа установок обеспечивает равномерное распределение нагрузки по отсасывающим линиям различной длины.

2. Мощность, потребляемая установками, значительно меньше мощности потерь в регулировочных реостатах; так для условий подстанций трамвая Москвы потери электроэнергии на регулирование отсасывающей сети сокращаются в 3,3—4,2 раза.

3. Включение автоматических устройств снижает значение разности потенциалов между отсасывающей шиной подстанции и землей, что вызывается уменьшением падения напряжения в отсасывающих линиях. Соответственно повышается напряжение в контактной сети.

4. Упрощается сооружение совместной противокоррозионной защиты подземных металлических сооружений, проложенных в районах, примыкающим к тяговым подстанциям.

5. В районах питания тяговых подстанций, оборудованных новыми установками в 1,4—1,8 раза уменьшается площадь потенциальных диаграмм рельсовых сетей, в том же отношении уменьшается суммарное значение тока утечки.

Комплексное применение рассмотренных в статье технических решений обеспечит повышение эффективности работы устройств совместной противокоррозионной защиты и тем самым повысит надежность и увеличит долговечность эксплуатации сети подземных металлических сооружений.

Литература

1. Стрижевский И. В. и др., Методы борьбы с электрокоррозией городских трубопроводов, Стройиздат, 1968.

2. Тарнижевский М. В., Расчет совместной электрозащиты от блуждающих токов подземных металлических сооружений при параллельной прокладке, «Электричество», № 5, 1970.

3. Высоцкий В. Ф., Технико-экономический эффект повышения потенциала в точке дренажа, сб. «Коррозия и защита в нефтедобывающей промышленности», ВНИИОЭНГ, 1969, № 2.

4. Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии, СН 266—63, Госиздат по строительству и архитектуре М, 1963.

[17.2.1970]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 537.212.001.24

Методы расчета нелинейных электрических полей в ионизированном облучением газе

А. С. РОЗЕНКРАНЦ

Ивановский энергетический институт им. В. И. Ленина

Расчет электрического поля, искаженного объемными зарядами ионизированного газа, лежит в основе решения многих важных задач: определение электрической прочности облучаемых изоляционных промежутков, характеристик дозиметрической аппаратуры, радиоизотопных нейтрализаторов статического электричества, вычисление ионизационных погрешностей измерительных приборов, работающих под облучением, и. т. д.

Искажения рассматриваемых электрических полей объемными зарядами в первую очередь зависят от критерия подобия M, учитывающего мощность ионизирующего фактора, напряжение и линейный размер [Л. 1 и 5]:

$$M=\frac{q_0 N_0 a^4}{\varepsilon \varkappa_+ U^2}, \qquad (1)$$

где q_0 — заряд иона; N_0 — базисное значение числа пар ионов, возникающих в единице объема за единицу времени; a — базисный линейный размер; ε — диэлектрическая проницаемость газа; $\varkappa_+$ — подвижность положительных ионов; U — напряжение.

Малым значениям M соответствует режим глубокого насыщения, когда объемные заряды и вызванные ими искажения поля очень малы. С увеличением M, как это видно из кривых, приведенных в [Л. 2 и 3], увеличивается искажение поля: вблизи электродов его напряженность возрастает, а в средней зоне — убывает, но лишь до некоторого минимума, соответствующего граничному значению $M=M_{\text{гр}}$. При дальнейшем увеличении M искажения поля в средней зоне начинают сглаживаться, а в приэлектродном слое они продолжают расти. При $M \gg M_{\text{гр}}$ газ в средней части промежутка почти нейтрален: напряженность здесь лишь немного меньше электростатической. На поверхности электродов напряженность поля значительно больше электростатической, хотя, как показано ниже, предел ее возрастания конечен при $M \longrightarrow \infty$.

Сопоставление разных возможностей расчета полей в ионизированной среде показало перспективность следующего подхода: пространство, занятое рассматриваемым полем, разбивается на трубки тока, достаточно узкие, чтобы плотность тока считать постоянной в пределах поперечного сечения трубки, для которой составляются и решаются уравнения. Строго говоря, форма трубки заранее не известна; за первое приближение может быть принята конфигурация силовой трубки соответствующего лапласовского поля [1].

Такой подход имеет ряд преимуществ:

решение дифференциальных уравнений в частных производных заменяется решением обыкновенных дифференциальных уравнений;

иногда можно, не рассчитывая всего поля, приближенно узнать распределение напряженности и потенциала вдоль линий тока в наиболее важной для данной задачи области пространства, например, в зоне наиболее вероятных путей электрического разряда;

решение можно производить по этапам, останавливаясь каждый раз на желаемой степени точности.

Возможны различные пути осуществления указанного подхода. Так, в [Л. 6 и 8] за независимую переменную принят относительный объем трубки тока, и для случая, когда учитываются два вида заряженных частиц (ионы обоих знаков) и не учитывается диффузия, предложена система уравнений, позволившая решить ряд конкретных задач для значений $M<M_{\text{гр}}$ и прийти к результату о подобии полей, построенных для трубок тока разной конфигурации в функции относительного объема трубки при равномерном распределении в пространстве мощности ионизирующего фактора.

В предлагаемом ниже способе решения задачи за независимую переменную во всех случаях принята относительная линейная координата, измеренная вдоль линии тока, что представляется более удобным при использовании численных методов, а также облегчает учет различных видов ионизации, в том числе и ударной, так как ионизирующую способность частиц естественнее относить к единице длины пути.

Итак, пусть имеется некоторая узкая трубка тока произвольной формы, охватывающая расчетную линию тока, рассматриваемый участок которой начинается на аноде и заканчивается на катоде (в принципе, электродов может быть несколько — тогда анод и катод могут быть разными для разных линий тока). Положение точки на данной линии тока однозначно определится расстоянием x, отмеряемым вдоль этой линии от начальной точки, за которую можно принять анодный или катодный конец рассматриваемого участка или иную характерную точку (фокус, центр и т. д. — в зависимости от формы электродов). Базисной величиной линейного размера a может служить любой характерный линейный размер, в частности, длина расчетного участка линии тока.

Относительная линейная координата $\xi=x/a$ принимает на аноде и катоде соответственно значения ξ_a и $\xi_к$ так, что для расчетного участка линии тока $\xi_a \leqslant \xi \leqslant \xi_к$, если отсчет ведется от анодного конца.

Векторы электрической напряженности $\bar{E}$ и плотности тока $\bar{\delta}$ касательны к линии тока, и в пределах узкой трубки тока их можно считать зависящими только от одной координаты (x или ξ).

Плотность тока обратно пропорциональна сечению трубки s, зависящему от x или ξ. В относительных единицах эта зависимость имеет вид:

$$s^*(\xi)=\frac{s(x)}{a^2}. \qquad (2)$$

[1] По-видимому, возможно уточнение формы трубки тока ходе итеративного процесса, например путем, указанным [Л 7], но этот сложный алгоритм еще не проверен.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Как характеристику геометрии данной трубки примем величину, обратную функции $s^*(\xi)$:

$$G(\xi)=\frac{k}{s^*(\xi)}, \tag{3}$$

где k — безразмерный постоянный коэффициент.

Без нарушения общности можно считать $k=1$, но в конкретных задачах может быть и другое значение. Легко видеть, что для любого вектора $\bar{A}$, касательного к линии тока,

$$\operatorname{div}\bar{A}=G\frac{d}{d\xi}\left(\frac{A}{G}\right), \tag{4}$$

а лапласиан $\Delta\Psi$ любой скалярной функции $\Psi(\xi)$, не зависящей от других координат, имеет вид:

$$\Delta\Psi=G\frac{d}{d\xi}\left(\frac{1}{G}\frac{d\Psi}{d\xi}\right). \tag{5}$$

В общем случае x или ξ — не декартова координата, а одна из координат в криволинейной ортогональной системе ($g_1=\xi$; g_2; g_3). Соответственно коэффициенты Ламе: $h_1=1$; h_2; h_3. Отсюда для случая, когда поле зависит только от ξ, легко прийти к формулам (4) и (5) из известных соотношений векторного анализа. При такой трактовке надо положить $G(\xi)=c(h_2h_3)^{-1}$, где $c=\text{const}$.

Рассмотрим теперь сущность двух предлагаемых способов расчета.

Первый способ расчета. Этот способ применим в случае, когда учитываются только два вида электрически заряженных частиц и когда можно пренебречь диффузией. В этом случае уравнения, приведенные в [Л. 1], для постоянного поля примут вид:

$$N^*(\xi)-n^*_+n^*_--\frac{1}{\sqrt{M\alpha^*}}\operatorname{div}(n^*_+\bar{E}^*)=0; \tag{6}$$

$$N^*(\xi)-n^*_+n^*_-+\frac{1}{\zeta\sqrt{M\alpha^*}}\operatorname{div}(n^*_-\bar{E}^*)=0; \tag{7}$$

$$\operatorname{div}\bar{E}^*=\sqrt{\frac{M}{\alpha^*}}(n^*_+-n^*_-), \tag{8}$$

где $N^*=\frac{N_i}{N_0}$ — относительная мощность ионизирующего фактора в данной точке; $N_i=\frac{dN}{dV}$ — локальная мощность ионизирующего фактора (dN — число пар ионов, возникающих в единицу времени в элементарном объеме dV, окружающем данную точку); $n^*_+=\frac{n_+}{n_0}$ и $n^*_-=\frac{n_-}{n_0}$ — относительные концентрации ионов соответствующего знака; n_+ и n_- — абсолютные концентрации ионов; $n_0=\sqrt{\frac{N_0}{\alpha_p}}$ — базисная равновесная концентрация ионов; $\alpha^*=\frac{\alpha_p\varepsilon}{q_0\varkappa_+}$ — относительный коэффициент рекомбинации; α_p — коэффициент рекомбинации; $\zeta=\frac{\varkappa_+}{\varkappa_-}$ — отношение подвижностей ионов разных знаков; $\bar{E}^*=\frac{\bar{E}}{E_0}$ — относительная напряженность электрического поля; $E_0=\frac{U}{x_к-x_a}$ — средняя напряженность, принятая за базисную.

Систему уравнений (6)—(8) дополним выражением для плотности тока:

$$\bar{\delta}=q_0\bar{E}(\varkappa_+n_++\varkappa_-n_-). \tag{9}$$

Выражение (9) запишем в относительных единицах, приняв за базисную величину плотность тока насыщения в данной трубке, предполагая, что трубка при насыщении имеет ту же конфигурацию, что и в данном режиме, и вектор плотности тока насыщения $\bar{\delta}_0$ в каждой точке коллинеарен вектору плотности тока в других режимах при мощности ионизирующего фактора N_0:

$$\delta_0=\frac{q_0N_0V_0}{s}, \tag{10}$$

где V_0 — полный объем данной трубки тока:

$$V_0=\int_{x_a}^{x_к}s\,dx=a^3\int_{\xi_a}^{\xi_к}s^*d\xi. \tag{11}$$

Таким образом, с учетом (2) и (3), если выбрать $k=\int_{\xi_a}^{\xi_к}s^*d\xi$, получим:

$$\delta_0=q_0N_0aG. \tag{12}$$

Подставляя в (9) значения E, n_+ и n_-, выраженные в относительных единицах, с учетом (1) получим относительную плотность тока, равную относительному току трубки i^*:

$$\delta^*=\frac{\delta}{\delta_0}=i^*=\frac{i}{i_0}=$$
$$=\frac{1}{G\sqrt{M\alpha^*}}E^*\left(n^*_++\frac{1}{\zeta}n^*_-\right), \tag{13}$$

где i_0 — ток насыщения трубки.

Для определения значений E^* и i^* исключим из уравнений n^*_+ и n^*_-, выразив их из (13) и (8):

$$n^*_+=\frac{\zeta i^*G\sqrt{M\alpha^*}}{(1+\zeta)E^*}+\frac{1}{1+\zeta}\sqrt{\frac{\alpha^*}{M}}\operatorname{div}\bar{E}^*; \tag{14}$$

$$n^*_-=\frac{\zeta i^*G\sqrt{M\alpha^*}}{(1+\zeta)E^*}-\frac{\zeta}{1+\zeta}\sqrt{\frac{\alpha^*}{M}}\operatorname{div}\bar{E}^*. \tag{15}$$

Сложим почленно (6) и (7), подставляя вместо n^*_+ и n^*_- их значения по (14) и (15). Затем, заменяя выражение дивергенции согласно (4) и учитывая, что для трубки тока $i^*(\xi)=\text{const}$, получим:

$$2N^*(1+\zeta)MW-2\alpha^*\frac{\zeta^2}{1+\zeta}(Mi^*)^2-$$
$$-\alpha^*\frac{\zeta(1-\zeta)}{1+\zeta}Mi^*G\frac{dW}{d\xi}+\frac{1}{2}\alpha^*\frac{\zeta}{1+\zeta}G^2\left(\frac{dW}{d\xi}\right)^2-$$
$$-GW\frac{d}{d\xi}\left(G\frac{dW}{d\xi}\right)=0, \tag{16}$$

где $W(\xi)$ — вспомогательная функция:

$$W(\xi)=\left(\frac{E^*}{G}\right)^2. \tag{17}$$

В [Л. 2—4 и 9] использованы уравнения, являющиеся частными случаями (16). Решение всех уравнений такого вида обязательно включает в себя определение значения i^*, при котором выполняются граничные условия. Приведенные в указанных выше статьях частные случаи этих граничных условий запишем теперь в общем виде.

Как следует из [Л. 1], при неучете диффузии концентрация ионов, одноименных по знаку поверхностному заряду электрода, вблизи электродов равна нулю (на анодном конце трубки $n_+=0$, а на

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

катодном конце $n_-=0$). Отсюда, используя формулы (8) и (13) и учитывая (4), для анодного конца трубки, где $(n^*_+)_а=0$, получим:

$$-\sqrt{\frac{M}{\alpha^*}}(n^*_-)_а=(\operatorname{div}\bar{E}^*)_а=G_а\left[\frac{d}{d\xi}\left(\frac{E^*}{G}\right)\right]_а; \quad (18)$$

$$i^*=\frac{1}{\zeta G_а\sqrt{M\alpha^*}}E^*_а(n^*_-)_а. \quad (19)$$

Исключая $(n^*_-)_а$ из (18) и (19), с учетом (17) получим:

$$W'_а=\left(\frac{dW}{d\xi}\right)_а=-\frac{2\zeta M}{G_а}i^*. \quad (20)$$

Аналогично для катодного конца, где $(n^*_-)_к=0$, имеем:

$$W'_к=\left(\frac{dW}{d\xi}\right)_к=\frac{2M}{G_к}i^*. \quad (21)$$

Поэтому

$$\frac{W'_а}{W'_к}=-\zeta\frac{G_к}{G_а}. \quad (22)$$

Приведенные в [Л. 2—4 и 9] уравнения легко получаются из общего уравнения (16), а граничные условия — из формул (20)—(22) подстановкой соответствующей функции $G(\xi)$. Но уравнение (16) и граничные условия (20)—(22) позволяют вести расчет для трубки тока любой конфигурации даже в том случае, когда функции $G(\xi)$ и $N^*(\xi)$ не выражаются аналитически. Тогда эти функции могут быть введены в ЦВМ в виде конечной последовательности чисел с обычной интерполяцией (линейной или параболической) промежуточных значений в программе. Иногда такой прием оправдан даже в том случае, когда имеется сложное аналитическое выражение для функций $G(\xi)$ и $N^*(\xi)$, так как интерполяция обычно отнимает меньше машинного времени, чем вычисление таких функций на каждом шаге численного интегрирования.

Алгоритм решения уравнения вида (16), в принципе, не отличается от описанного в [Л. 3 и 4], так как изменение вида функций $G(\xi)$ и $N^*(\xi)$ требует замены лишь небольшого участка программы. Если нахождение значений этих функций производится интерполяцией последовательности чисел, то переход к другой конфигурации трубки или к другому распределению ионизирующего фактора сводится, по сути дела, только к замене числового массива в накопителе машины. Это обстоятельство позволяет разработать алгоритмы и программы, обладающие достаточной универсальностью.

Наибольшее практическое значение имеет расчет распределения напряженности поля по длине некоторых линий тока в пределах «центральной» трубки тока, прилегающей к оси или плоскости симметрии электродов. В этих случаях расчет особенно упрощается, так как средняя линия тока, совпадающая с осью или плоскостью симметрии, остается прямой в любых режимах (при симметричном пространственном распределении ионизирующего фактора). Начинать расчет при наличии такой линии следует именно с нее, даже если предполагается затем рассчитать все поле. За исходную геометрию трубки тока целесообразно принять конфигурацию силовой трубки лапласовского поля, хорошо известную для наиболее распространенных форм электродов. Для сложных форм электродов исходная геометрия может быть получена моделированием на проводящей бумаге, электролитической ванне или расчетом на ЦВМ.

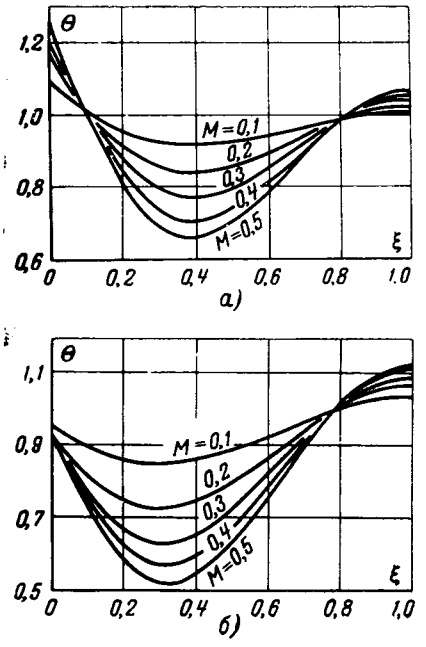


Рис. 1. Искажение электрического поля при равномерном γ-облучении на оси электродного промежутка игла—плоскость ($\alpha^*=0{,}6$; $\zeta=0{,}7$).
а — игла положительна; *б* — игла отрицательна.

В качестве примера на рис. 1 приведены семейства кривых, характеризующих искажение поля на оси вращения облучаемого промежутка игла — плоскость при γ-облучении. Один из двухполостных гиперболоидов вращения с углом между осью и асимптотой $\alpha=2°30'$ служит хорошей аппроксимацией иглы. Расстояние от плоскости до фокуса гиперболоида (практически равное здесь расстоянию от плоскости до кончика иглы — разница всего 0,1%) принято за базисный линейный размер *a*. Искажение поля, как и в теории короны, характеризуется величиной $\theta=E/E_л$, где E и $E_л$ — напряженности соответственно рассматриваемого и лапласовского поля той же системы электродов. Функция геометрии $G(\xi)$ для центральной трубки поля игла — плоскость имеет вид:

$$G(\xi)=\frac{3\cos\alpha-\cos^3\alpha}{3(1-\xi^2)^{\frac{1}{2}}}\approx\frac{2}{3}\frac{1}{1-\xi^2}, \quad (23)$$

где $\xi=0$ на плоскости и $\xi=1$ в фокусе гиперболоида; приближенное выражение в правой части (23) соответствует случаю малых значений α, что характерно для иглы.

Достижимая точность решения уравнений вида (16), в принципе, не ограничена, но решить такие уравнения пока удавалось только при $M<M_{гр}$. Величина $M_{гр}$ зависит от формы трубки тока и от пространственного распределения ионизирующего фактора. При M, стремящемся к бесконечности, поле в средней зоне промежутка (при однородном распределении ионизирующего фактора) должно стремиться к лапласовскому, т. е. в этой зоне θ стремится к единице, а концентрации ионов — к равновесным ($n^*_+\longrightarrow n^*_-\longrightarrow 1$). Используя эти соотношения и принимая во внимание, что на концах трубки тока $(n^*_+)_а=(n^*_-)_к=0$, из (13) получим соответственно пределы искажения поля на аноде и катоде, не зависящие от формы трубки тока:

$$\lim_{M\to\infty}\theta=1+\zeta; \quad (24)$$

$$\lim_{M\to\infty}\theta=1+\zeta^{-1}. \quad (25)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Если ионизирующий фактор распределен неоднородно, пределы определяются несколько сложнее, но они тоже конечны.

Кроме ионизированных газов, режим очень больших значений M свойствен также полю в электролитах.

Второй способ расчета. Этот способ позволяет распространить расчетную методику не только на случай $M>M_{гр}$, но и на те процессы, в которых участвуют заряженные частицы нескольких видов. Он позволяет также без заметного усложнения алгоритма учесть продольную диффузию [2].

Если рассматривать n видов заряженных частиц, то вместо (6) и (7) надо записать n кинетических уравнений.

Используя относительные единицы и критерии подобия аналогично тому, как это сделано в [Л. 1], получим для k-го вида частиц ($k=1; 2; \ldots; n$):

$$N^*_k(\xi) - \sum_{i=1}^{n} \alpha^*_{ki} n^*_k n^*_i - \frac{1}{\zeta_k \sqrt{M\alpha^*}} \times$$

$$\times [1_{\operatorname{sign} q_k} \operatorname{div}(n^*_k \bar{E}^*) - D^* \Delta n^*_k] = 0, \qquad (26)$$

где $N^*_k = \frac{N_k}{N_0}$; $N_к$ — отнесенное к единице объема число частиц данного вида, возникающих за единицу времени; α^*—относительный коэффициент рекомбинации положительных и отрицательных ионов, принятых за основные; $\zeta_k = \frac{\varkappa_+}{\varkappa_k}$; $\varkappa_k$— подвижность частиц вида k; $\alpha^*_{ki} = \frac{\alpha_{ki}}{\alpha_p}$; α_{ki} — коэффициент рекомбинации частиц вида k с частицами вида i, равный нулю в том случае, когда знаки зарядов этих частиц одинаковы; n^*_k, n^*_i — относительные концентрации частиц соответствующих видов; $1_{\operatorname{sign} q_k}$—единица со знаком заряда частицы вида k; D^* — относительный коэффициент диффузии.

Согласно [Л. 1] $D^* = \frac{0{,}025}{U}$, где U — характерное напряжение, $в$. Таким образом, если $U > 2{,}5$ $в$, $D^* < 0{,}01$.

В правой части (8) теперь необходимо учесть все виды заряженных частиц:

$$\operatorname{div} \bar{E}^* = \sqrt{\frac{M}{\alpha^*}} \sum_{i=1}^{n} 1_{\operatorname{sign} q_i} n^*_i, \qquad (27)$$

поэтому

$$\operatorname{div}(n^*_k \bar{E}^*) = \bar{E}^* \operatorname{grad} n^*_k + n^*_k \operatorname{div} \bar{E}^* =$$

$$= \bar{E}^* \frac{dn^*_k}{d\xi} + \sqrt{\frac{M}{\alpha^*}} n^*_k \sum_{i=1}^{n} 1_{\operatorname{sign} q_i} n^*_i. \qquad (28)$$

Подставляя правую часть (28) в (26) и заменяя Δn^*_k согласно (5), получим расчетные уравнения для относительных концентраций частиц:

$$\frac{dn^*_k}{d\xi} = \frac{1}{E^*} \left[1_{\operatorname{sign} q_k} \zeta_k \sqrt{M\alpha^*} \left(N^*_k - n^*_k \sum_{i=1}^{n} \alpha^*_{ki} n^*_i \right) - \right.$$

$$- n^*_k \sqrt{\frac{M}{\alpha^*}} \sum_{i=1}^{n} 1_{\operatorname{sign} q_i} n^*_i +$$

$$\left. + 1_{\operatorname{sign} q_k} D^* G \frac{d}{d\xi} \left(\frac{1}{G} \frac{dn^*_k}{d\xi} \right) \right]. \qquad (29)$$

Интересно отметить, что в случаях, когда не учитывается диффузия (почти всегда это допустимо), уравнения вида (29) не содержат в явном виде функции $G(\xi)$, и алгоритм их решения не зависит от геометрии трубки.

Из (27) с учетом (4) имеем:

$$E^* = \sqrt{\frac{M}{\alpha^*}} G \int_{\xi_a}^{\xi} \left(\frac{1}{G} \sum_{i=1}^{n} 1_{\operatorname{sign} q_i} n^*_i \right) d\xi + c_E G, \qquad (30)$$

где постоянная интегрирования c_E находится из условия:

$$\int_{\xi_a}^{\xi_к} E^* d\xi = 1. \qquad (31)$$

Система дифференциальных уравнений вида (29) и интегрального уравнения (30) решается методом итераций. Вначале алгоритм был проверен в работе для случая $n=2$ (учет ионов обоих знаков).

Задавалось нулевое приближение $E^*(\xi)$, $n^*_1(\xi) = n^*_+(\xi)$, $n^*_2(\xi) = n^*_-(\xi)$, после чего первое приближение для $n^*_1(\xi)$ находилось численным интегрированием уравнения вида (29), в правой части которого для $n^*_2(\xi)$ и $E^*(\xi)$ использовалось нулевое приближение, а для $n^*_1(\xi)$ — находимое в каждом шаге новое значение первого приближения.

Аналогично находилось первое приближение для $n^*_2(\xi)$, но теперь уже в правой части уравнения использовалось найденное раньше первое приближение для $n^*_1(\xi)$. Затем согласно (30) вычислялось первое приближение для $E^*(\xi)$ численным интегрированием по Симпсону. Вычислялась среднеквадратичная разница между новым и старым приближением функции $E^*(\xi)$, и, если она превышала заданную, производилась пересылка численного массива очередного приближения в ячейки предыдущего приближения, после чего описанный процесс повторялся до получения нужной точности. Алгоритм оказался достаточно быстро сходящимся, и легко достигалась любая точность в пределах разрядной сетки машины. Обычно задавалась точность порядка 0,1%, что для большинства задач более, чем достаточно, принимая во внимание ограниченную точность исходных данных.

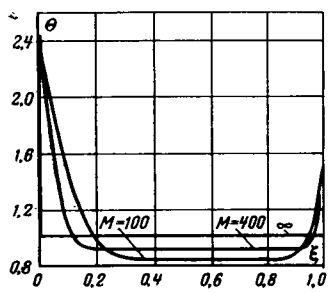


Рис. 2. Искажение электрического поля вдоль линии тока при $G=1$ и $N^*_k=1$ ($\alpha^*=0{,}6$; $\zeta=0{,}7$).

Для большего числа n алгоритм, естественно, усложняется, но строится по тому же принципу.

[2] Поперечная диффузия рассматривается в [Л. 7].

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

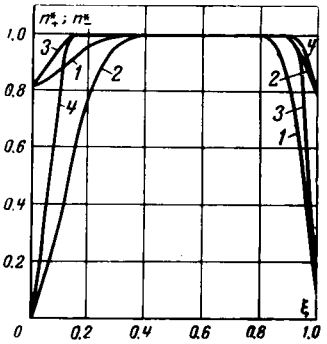


Рис. 3. Распределение относительных концентраций ионов обоего знака при тех же условиях, что и на рис. 2.

1 — $n^*_+(\xi)$ при $M=100$;
2 — $n^*_-(\xi)$ при $M=100$;
3 — $n^*_+(\xi)$ при $M=400$;
4 — $n^*_-(\xi)$ при $M=400$.

После определения значений $E^*(\xi)$ и всех $n^*_k(\xi)$ без учета диффузии для случая двух частиц относительный ток может быть найден по (13). Если же учесть n видов частиц и диффузию — это выражение примет вид:

$$\delta^* = i^* = \frac{1}{G\sqrt{M\alpha^*}} \times$$

$$\times \left[E^* \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{\zeta_k} n^*_k - D^* \sum_{k=1}^{n} \frac{1_{\mathrm{sign}q_k}}{\zeta_k} \frac{dn^*_k}{d\xi} \right], \qquad (32)$$

где второй член в скобках учитывает диффузионные токи.

Описанным способом удалось решить задачу для значений $M > M_{\text{гр}}$, подтвердив приведенные выше соображения о характере поля при больших M. Так, для $G=1$ и $N^*_k=1$ при $M_{\text{гр}} \approx 25$, теперь удалось выполнить расчеты для $M \geqslant 500$, хотя возможно и для этого способа существует верхняя граница значений M, за которой процесс итерации перестает сходиться.

Расчет производился с учетом диффузии для разных значений D^*, но выяснилось, что во всех рассматриваемых случаях влияние диффузии весьма мало, и оно проявляется лишь в незначительном изменении кривой $n^*_+(\xi)$ у анода и $n^*_-(\xi)$ у катода.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены результаты расчета, полученные вторым способом, для двух больших значений M. Предельная зависимость $\theta(\xi)$ показана на рис. 2 сплошной жирной ломаной линией (∞). Эта предельная кривая при $N^*_k(\xi)=\text{const}$ не зависит от формы электродов, поэтому зависимости $\theta(\xi)$ вблизи электродов при очень больших значениях M также мало зависят от формы трубки.

Более сложен учет трех видов заряженных частиц (ионов обоего знака и свободных электронов), влияние которых заметно при больших мощностях облучения [Л. 10]. Особенно это влияние сказывается при расчете поля в зоне ударной ионизации, где свободные электроны играют главную роль. В последнем случае выражения $N^*_k(\xi)$ для положительных ионов и электронов должны включить в себя член, учитывающий ударную ионизацию и зависящий от напряженности поля и концентрации свободных электронов. Соответствующая функция для отрицательных ионов будет пропорциональна концентрации свободных электронов и вероятности их прилипания к молекулам газа.

Литература

1. Розенкранц А. С., Критерии подобия нелинейного электрического поля в ионизированной облучением среде, Изв. вузов, «Энергетика», 1965, № 6.

2. Розенкранц А. С., Нелинейное электрическое поле в диэлектрике, ионизированном облучением, «Электричество», 1966, № 6.

3. Розенкранц А. С., Расчет нелинейного электрического поля в ионизированном облучением газе между коаксиальными цилиндрическими электродами, «Электричество», 1968, № 2.

4. Розенкранц А. С., Расчет на ЭЦВМ нелинейного электрического поля в ионизированном облучением газе при плоских электродах, Изв. вузов, «Энергетика», 1968, № 7.

5. Розенкранц А. С., Экспериментальная проверка законов подобия и результатов математического моделирования нелинейного электрического поля в ионизированном облучением газе, Доклады пятой межвузовской конференции по физическому и математическому моделированию, Применение цифрового моделирования, М., 1968.

6. Слышалов В. К., К теории математического моделирования нелинейных электрических полей в ионизированном облучением газе, Доклады пятой межвузовской конференции по физическому и математическому моделированию, Применение цифрового моделирования, М., 1968.

7. Розенкранц А. С., Метод безвихревого тока в применении к расчету электрических полей в ионизированных средах, сб. «Новые методы исследования в теоретической электротехнике и электрических измерениях», Иваново, 1968.

8. Слышалов В. К., Электроды провод — параллельная плоскость в ионизированном облучением газе расчет вольтамперной зависимости, сб. «Новые методы исследования в теоретической электротехнике и электрических измерениях», Иваново, 1968.

9. Слышалов В. К. и др., Расчет вольт-амперных-характеристик тритиевого нейтрализатора статического электричества, «Электричество», 1969, № 8.

10. Вольф Е. М. и Поликанов В. С., К теории электропроводности ионизированного внешним источником газа, Журнал технической физики, вып. 1, 1969, т. XXXIX.

[15.4.1970]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Методика оценки работоспособности линейной изоляции по влагоразрядным характеристикам

Канд. техн. наук А. С. МАЙКОПАР, инж. Э. С. ГЛЕБОВ
Москва
и инж. К. Д. ВОЛЬПОВ
Донбассэнерго

Введение. Оценка работоспособности линейной изоляции необходима как при проектировании намеченных к сооружению линий, так и при усовершенствовании изоляции эксплуатируемых линий с целью повышения надежности их работы.

В процессе работы на изоляцию линий воздействуют атмосферные и коммутационные перенапряжения, а также рабочее напряжение нормального режима.

При воздействии атмосферных перенапряжений в ряде случаев изоляция перекрывается, возникают короткие замыкания и отключения линий. Рядом грозозащитных мероприятий число грозовых отключений можно свести к разумному минимуму (0,2—2 отключения на 100 *км* в год).

При воздействии коммутационных перенапряжений согласно опыту эксплуатации перекрытия на линиях практически не наблюдаются ввиду весьма высоких уровней изоляции по отношению к коммутационным воздействиям, а также благодаря системам ограничения коммутационных перенапряжений.

В нормальных эксплуатационных режимах перекрытия изоляции возникают, если не обеспечен надлежащий уровень изоляции в неблагоприятных климатических и метеорологических условиях. Наибольшее снижение разрядных характеристик изоляции здесь происходит при увлажнении изоляторов росой, туманом, мелким моросящим дождем в сочетании с загрязнением изоляторов пылью, взвешенными в воздухе растворами солей, уносами промышленных предприятий и т. п. Перекрытия изоляции в таких условиях, именуемые влагоразрядными, особенно затрудняют эксплуатацию линий в промышленных районах, в зонах солончаковых пустынь и вблизи морских побережий, где для обеспечения безаварийной работы линий приходится использовать повышенные длины путей утечек гирлянд и проводить периодические трудоемкие чистки изоляции.

При отсутствии специфических загрязнений, когда трассы линий расположены в лесных массивах или проходят по открытым пространствам лугов и пахотной земли, влагоразрядные перекрытия изоляции представляют собой редкое явление, обусловленное либо локальными источниками загрязнения или большим числом дефектных изоляторов в отдельных гирляндах. Однако и здесь на поверхности изоляторов возникают пылевые загрязнения, интенсивность которых может колебаться при переходе от одного района к другому. Следовательно, даже в таких местностях приходится считаться с возможностью загрязнения изоляторов и изучать влагоразрядные характеристики.

При исследовании влагоразрядных характеристик изоляторов, загрязненных в естественных условиях, разрядные напряжения гирлянд большей частью получаются значительно больше уровней изоляции, требуемых для надежной по опыту эксплуатации работы линий, что не дает возможности проводить оценку работоспособности изоляции по непосредственным наблюдениям. Поэтому исследования влагоразрядных характеристик проводились преимущественно для сравнительных оценок различных типов изоляторов, например, в виде «рядов качества».

Требования к надежной работе изоляции до сих пор определяются опытом эксплуатации линий. В районах со значительными загрязнениями такой подход позволяет довольно быстро выявить требуемые уровни, поскольку даже при небольшой ошибке появляются влагоразрядные перекрытия и накапливается опыт эксплуатации, необходимый для правильных практических рекомендаций.

В районах со слабыми загрязнениями, где при существующих уровнях изоляции влагоразрядных перекрытий обычно не наблюдается, опыт эксплуатации не позволяет выявить действительно требуемых уровней.

В то же время основная масса линий электропередачи располагается в местностях со слабыми загрязнениями, что определяет интерес к исследованию изоляции в первую очередь именно для этих условий.

В статье, являющейся продолжением ряда статей, опубликованных в журнале «Электричество» по влагоразрядным характеристикам [Л. 1—3], на основе данных о состоянии загрязнения отдельных гирлянд, подвергнутых выборочному обследованию, оценивается работоспособность изоляции линий в нормальных эксплуатационных режимах.

Методы оценки степени загрязнения и влагоразрядных характеристик отдельных гирлянд. Одним из источников сведений о влагоразрядных характеристиках могут быть лабораторные испытания гирлянд, загрязненных в естественных условиях. Имитация перекрытий изоляции при ее увлажнении достигается в этом случае наложением на загрязненные изоляторы мелкокапельной влаги с последующим приложением неизменного напряжения толчком [Л. 4]. Однако этот способ имеет ограниченное значение из-за трудности извлечения гирлянд из действующей линии и доставки их в лаборатории без нарушения загрязняющего слоя на поверхности изоляторов.

Более целесообразными являются измерения отдельных параметров, непосредственно определяющих влагоразрядные характеристики изоляторов. В первую очередь к ним относятся замеры удельной поверхностной проводимости пленки загрязнения на поверхности изоляторов и регистрации токов утечки по гирляндам.

Первый из этих методов обладает тем преимуществом, что не требует наличия напряжения

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

в месте установки испытуемых гирлянд. Одним из недостатков метода являются трудности искусственного увлажнения гирлянд в полевых условиях, особенно при наличии ветра. Другим отрицательным фактором здесь является то, что рассматриваемым методом можно производить лишь измерения в определенные моменты времени, которые могут не совпадать с максимальным загрязнением, характерным для данного участка линии. Наконец, при неравномерных загрязнениях поверхностей изоляторов, что особенно часто бывает в районах пустынь и полупустынь [Л. 3], удельная поверхностная проводимость должна быть определена для верхней и нижней частей загрязненной поверхности, что сопряжено с дополнительными трудностями.

Второй метод регистрации токов утечки по поверхности изоляторов дает возможность получить сведения, относящиеся к любому желаемому отрезку времени и, следовательно, без специальных наблюдений позволяет выявить наиболее неблагоприятные условия, соответствующие максимальному зарегистрированному току утечки. К недостаткам второго метода в первую очередь следует отнести необходимость специального источника высокого напряжения или действующей линии электропередачи.

В последнем случае причиной дополнительной погрешности могут быть разные уровни эксплуатационного напряжения. Для современных сетей в энергосистемах имеется ряд линий со стабильными потоками мощностей и незначительными колебаниями напряжения, использование которых для регистрации токов утечки в значительной степени позволит избежать этого источника погрешностей.

Очевидно, сообразно местным условиям и поставленным задачам может быть использован как метод измерения удельной поверхностной проводимости, так и метод регистрации токов утечки, а также и непосредственное определение влагоразрядных характеристик. В последнем случае, как и при измерении удельной поверхностной проводимости, необходимы дополнительные данные по динамике загрязнения для выявления наиболее неблагоприятных условий.

Влагоразрядная характеристика (рис. 1), представляющая собой зависимость средней влагоразрядной напряженности вдоль пути утечки от тока утечки при приложении разрядного напряжения, получена измерением тока утечки в момент приложения напряжения на заранее загрязненные и увлажненные изоляторы. Этим было обеспечено отсутствие существенных искажений, обусловленных частичными разрядами на поверхности изоляторов, возникающих при подсушке локальных участков изоляционной поверхности. Благодаря такому подходу сопротивление изоляторов, соответствующее любой из точек кривой рис. 1, может сопоставляться с сопротивлением изоляторов, измеренным специальными приборами. При регистрации токов утечки на действующих линиях следует иметь в виду, что в опасных условиях может находиться лишь небольшое количество гирлянд, а основная масса изоляции характеризуется состоянием, далеким от разрядного.

Это обстоятельство, а также то, что броски токов утечки в эксплуатационных условиях кратковременны, позволяет считать, что и здесь искажения, обусловленные частичными разрядами на поверхности изоляторов не имеют существенного значения.

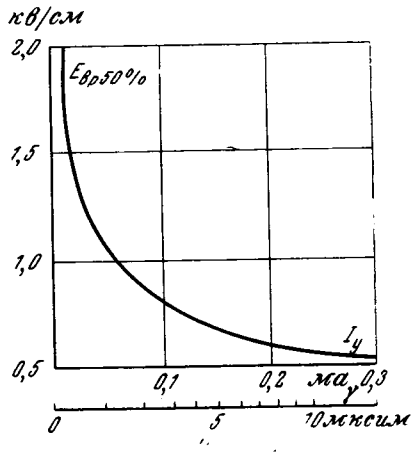


Рис. 1. Средняя влагоразрядная напряженность вдоль пути утечки тарельчатых изоляторов в функции тока утечки. (Дополнительная школа удельной поверхностной проводимости для изоляторов П-8,5.)

При известном значении сопротивления изолятора можно оценить влагоразрядное напряжение по рис. 1 или определить удельную поверхностную проводимость, если известен коэффициент формы изолятора. Обратная операция позволяет определить влагоразрядное напряжение по результатам измерений удельной поверхностной проводимости.

Вероятностная методика оценки степени загрязнения изоляции линий. Влагоразрядные напряжения, полученные при выборочных измерениях в естественных условиях, сами по себе еще не дают возможности судить об электрической прочности изоляции линии в целом и в первую очередь потому, что они относятся только к отдельным гирляндам изоляторов. Причем серия измерений, охватывающая ряд гирлянд, как правило, не выявляет наиболее загрязненные из них, в конечном счете определяющие электрическую прочность линии в целом.

Для оценки степени загрязнения гирлянд, находящихся в наиболее неблагоприятных условиях, по данным, относящимся к ограниченному количеству измерений, можно привлечь вероятностно-статистические методы, использование которых предусматривает допущение ряда предпосылок.

В первую очередь следует исходить из того, что все измерения относятся к одному и тому же району загрязнения и, следовательно, к одной и той же генеральной совокупности регистраций, присущей данной линии, группе линий или участку линии. Во-вторых, каждое измерение должно соответствовать наихудшим условиям за рассматриваемый период, т. е. представляет собой крайний член определенной выборки той же генеральной совокупности. В-третьих, предполагается, что статистические распределения в пределах каждой выборки подчиняются одному и тому же закону, причем этот закон не представляет специального интереса, поскольку все операции производятся лишь по крайним членам.

Такие допущения лишь весьма приближенно отвечают действительности, так как на самом деле близкие по времени значения рассматриваемых ве-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

личин зависимы между собой, а значения, разделенные большими промежутками времени, могут значительно отличаться друг от друга. Тем не менее к рассматриваемым здесь и им подобным задачам можно применять двойной экспоненциальный закон распределения крайних членов выборки в виде:

$$\varphi(y) = e^{-e^{-y}}, \qquad (1)$$

где $\varphi(y)$ — закон распределения крайних членов выборки; y — нормированное отклонение, связанное с исследуемыми максимумами или минимумами.

Согласно методике, предложенной Гумбелем [Л. 5], задача состоит в построении графика зависимости крайних членов выборки от нормированного отклонения y. Применительно к рассматриваемому вопросу нормированное отклонение y должно быть представлено как линейная функция влагоразрядной напряженности, тока утечки или удельной поверхностной проводимости в виде:

$$y = a + bx, \qquad (2)$$

где x — регистрируемая величина; a и b — постоянные коэффициенты.

Если число исследованных гирлянд равно N, то согласно [Л. 5] все измерения могут быть расположены в вариационный ряд с вероятностями, отвечающими номеру гирлянды согласно выражению:

$$\varphi(y) = \frac{k}{N+1}, \qquad (3)$$

где k — номер гирлянды в вариационном ряду.

Переход к совокупности гирлянд линии (или линий, находящихся в одинаковых условиях) получается в результате экстраполяции по выражению (2) соответственно заданному числу гирлянд. Это позволяет оценить состояние одной или нескольких наиболее загрязненных гирлянд линии, что практически неосуществимо путем прямых измерений, поскольку для этого пришлось бы проводить одновременную регистрацию на нескольких тысячах гирлянд.

Была обследована изоляция линий электропередач 110, 220 и 500 *кв*, трассы которых проходят по местности, расположенной в различных условиях. Линии 110 и 220 *кв* находятся в безлесных районах окраин Донбасса. Значительный по длине участок линий 500 *кв* расположен в лесных районах европейской территории СССР. Другой участок той же электропередачи проходит по открытым пространствам пахотной земли. Наконец, третий участок линии 500 *кв* длиной 20—40 *км* и линия 110 *кв* в Донбассе подвергаются запрязнению уносами промышленных предприятий.

Такое разнообразие условий позволяет охватить широкий диапазон загрязнений от трассы с весьма чистым атмосферным воздухом до локальных участков с промышленными загрязнениями.

Основные сведения об указанных линиях приведены в таблице.

Регистрация на линиях 110 и 220 *кв*, а также на электропередаче 500 *кв* I района, проходящего по лесистой местности, осуществлялись с помощью ферромагнитных регистраторов токов утечки системы ВЭИ, которые за период измерений фиксировали наибольшее значение тока утечки.

На II и III участках линий 500 *кв* (пахотная земля и источники промышленных загрязнений) производились измерения сопротивления увлажненных изоляторов с помощью мегомметра. Для этого изоляторы снимались с линии при соблюдении должных мер предосторожности, чтобы не нарушить слой загрязнений, а увлажнение изоляторов происходило либо естественно при внесении изоляторов в теплое помещение за счет конденсации вла-

Напряжение линии, *кв*	Территориальное расположение линии	Условия загрязнения	Длина линий, *км*	Длина пролета, *км*	Учтенная длительность эксплуатации в годах	Изоляция (основная масса)			Напряженность вдоль пути утечки, *кв/см* (макс.)	Число отключений из-за загрязнений без нулевых изоляторов	Данные регистрации параметров загрязнений и их обработки					
						Типы изоляторов	Число изоляторов в гирлянде	Коэффициент формы			Регистрируемая величина	Основной эксплуатационный уровень напряжения линий, *кв*	Число регистраций	Среднее значение удельной поверхностной проводимости $\overline{\gamma}$, *мксим*	Коэффициенты аппроксимации	
															a	*b*
110	Донбасс	Открытые пространства пахотной земли	75	0,25	8	ПС-4,5	8	0,56	0,49	0	Ток утечки	117	22	0,76	—1,72	2,95
220			150	0,35	17	П-4,5	14	0,76	0,52	0		235	22	0,85	—2,0	2,51
500 (I район)	Средняя полоса европейской территории СССР	Леса	1 600	0,4	10	П-8,5	22	0,8	0,54	0		525	30	0,19	—0,5	10,2
500 (II район)		Открытые пространства пахотной земли	500	0,4	10	П-7 П-8,5	22 20—22	0,76 0,8	0,64 0,59—0,54	0	Сопротивление изоляции	—	50	1,12	—2,7	2,92
500 (III район)		Уносы промышленных предприятий	20—40	0,4	10	П-8,5	20	0,8	0,59	1		—	29	2,14	—2,16	1,26
110	Донбасс		9	0,25	20	П-4,5 НС-2	8 10	0,76 1,16	0,47 0,23	2 0	Ток утечки	122	17	3,7	—2,1	0,55

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ги на их поверхностях, либо путем нанесения на изоляторы с помощью распылителей мелкокапельной влаги с проводимостью не менее 1 000 *ом·см*. Всего была получена 91 регистрация токов утечки и выполнено 79 измерений сопротивлений увлажненных изоляторов (см. таблицу).

Интервал времени, охватываемый регистрациями токов утечки, составлял в каждом случае около полугода, начиная с августа месяца 1968 г., а измерения сопротивления изоляторов выполнялись в первом квартале 1965 г. Выбор указанных интервалов позволил обеспечить наиболее тяжелые условия по загрязнению изоляторов в соответствующих районах как согласно систематическим производственным наблюдениям, так и по случаям перекрытий гирлянд с дефектными изоляторами, 90% которых имели место в периоды зимних оттепелей.

В настоящей работе все измерения были приведены к удельной поверхностной проводимости, хотя вообще можно было бы взять за основу ток утечки или влагоразрядное напряжение.

На рис. 2 нанесены в виде точек данные 29 измерений, относящиеся к III району линий 500 *кв* и расположенные в вариационный ряд по возрастающим значениям удельной поверхностной проводимости, причем дополнительная шкала связывает нормированные отклонения с вероятностной функцией $\varphi(y)$. Как следует из рис. 2 (прямая *5*), отдельные точки вариационного ряда образуют последовательность, удовлетворительно аппроксимируемую по [Л. 5] линейной зависимостью (2).

Аналогичные операции были выполнены и для регистраций на других линиях; эти результаты в виде аппроксимирующих прямых также представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что действительные условия загрязнения для всех линий различны. Наиболее чистой следует считать трассу линий 500 *кв* I района, характеризуемую наименьшей удельной поверхностной проводимостью. Далее идут линии 110 и 220 *кв* и участок линий 500 *кв* II района, имеющих близкие условия по загрязнению. Наконец, III участок электропередачи 500 *кв* и линия 110 *кв* резко отличаются от предыдущей группы и характеризуются наиболее сильными загрязнениями, соответствующими наибольшим удельным поверхностным проводимостям.

Прямые на рис. 2 представляют собой веер, расходящийся из одной области малых значений удельной поверхности проводимости. Это позволяет в первом приближении характеризовать степень загрязнения отдельных линий одним параметром; в качестве такового можно, например, взять среднее значение удельной поверхностной проводимости $\bar{\gamma}$. При таком подходе трасса линии 500 *кв* I района характеризуется $\bar{\gamma}$, равным 0,19 *мксим*, 110 *кв* — 0,76 *мксим*, 220 *кв* — 0,85 *мксим*, 500 *кв* II района — 1,12 *мксим*, 500 *кв* III района — 2,12 *мксим* и 110 *кв* — 3,7 *мксим* (см. таблицу).

Оценка работоспособности линейной изоляции. При экстраполяции зависимостей рис. 2 получаются соотношения, определяющие связь между удельными поверхностными проводимостями и соответствующими им вероятностями для бо́льших загрязнений, нежели те, которые были зафиксированы при ограниченном числе регистраций.

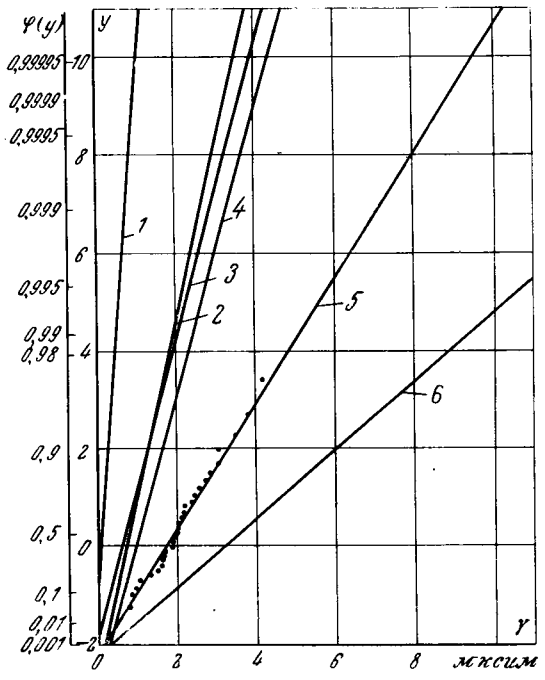


Рис. 2. Результаты обработки регистраций параметров загрязнений в форме крайних членов вариационного ряда.

1 — линии 500 *кв* I района; *2* — линии 110 *кв*; *3* — линии 220 *кв*; *4* — линия 500 *кв* II района; *5* — участок линии 500 *кв* III района; *6* — линия 110 *кв*.

При общем числе гирлянд m число перекрытий на одну гирлянду определяется суммой, обусловленной всеми гирляндами с учетом их влагоразрядных напряжений и статистического разброса:

$$n_1 = \frac{1}{m}\sum_1^m \varphi(y)\, F\left[\frac{E_p - E_{вр\,50\%}(\gamma)}{\sigma}\right], \qquad (4)$$

где n_1 — число перекрытий на одну гирлянду; m — общее число гирлянд; F — интегральная функция распределения влагоразрядных напряжений; E_p — рабочая напряженность вдоль пути утечки гирлянд; $E_{вр\,50\%}$ — 50%-ная влагоразрядная напряженность вдоль пути утечки каждой гирлянды; σ — стандарт распределения.

В силу исходных предпосылок об операциях с крайними членами выборки условия, определяемые выражением (4), за рассматриваемый период (один год) будут достигнуты для каждой из гирлянд только один раз. Судя по наблюдениям, такая предпосылка выполняется на практике, поскольку в эксплуатационных условиях не наблюдается случаев многократных перекрытий одних и тех же гирлянд, если только это не связано с особой спецификой источников загрязнений.

Если ориентироваться на гирлянду, для которой $E_{вр50\%} = E_p$, то с уменьшением степени загрязнения и влагоразрядной напряженности гирлянд соответственно функции $\varphi(y)$ будет уменьшаться и удельный вес каждой последующей гирлянды в общем числе перекрытий. Так как значение σ в (4) не превышает

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

3—5%, практически следует учитывать всего лишь несколько гирлянд с уменьшенной степенью загрязнения.

При увеличении степени загрязнения по сравнению с условием $E_{вр50\%} = E_р$, наоборот, вероятность перекрытия гирлянд быстро возрастает по сравнению с 50%-ной вероятностью. Это позволяет при достаточно большом общем числе гирлянд исходить из упрощенной предпосылки, что, начиная с гирлянды, для которой $E_{вр50\%} = E_р$, в сторону бо́льших загрязнений будут перекрыты все гирлянды, а в сторону меньших загрязнений перекрытий не будет. Тогда (4) преобразуется в приближенное соотношение:

$$n_1 = 1 - \varphi(y)_{E_{вр50\%}=E_р}, \qquad (5)$$

а выражение для удельного числа влагоразрядных отключений будет иметь вид:

$$n = m_{100}\,[1 - \varphi(y)_{E_{вр50\%}=E_р}], \qquad (6)$$

где n — удельное число влагоразрядных отключений на 100 *км* в год; m_{100} — число гирлянд на 100 *км* длины линии.

Вероятностная функция $\varphi(y)$ в (6) должна соответствовать условиям загрязнения по трассе линии (применительно к выполненным регистрациям — по рис. 2), а число гирлянд на 100 *км* длины линии определяется типом опор и средними длинами пролетов.

Если степень загрязнения изоляции характеризовать средним значением удельной поверхностной проводимости $\bar{\gamma}$, то согласно (6) можно найти зависимости рабочей напряженности вдоль пути утечки от γ при различных заданных удельных числах влагоразрядных отключений. Соответствующие кривые, приведенные на рис. 3, позволяют оценить работоспособность изоляции в различных условиях загрязнения.

Поскольку нормальная изоляция линий в незагрязненной местности работает с напряженностями не более 0,6 *кв/см*, то ее удовлетворительная работа при удельном числе влагоразрядных отключений около 0,01 на 100 *км* в год возможна до значений $\bar{\gamma} \approx 1{,}2$—$1{,}3$ *мксим*. Из обследованных линий электропередача 500 *кв* II района, а также линии 110 и 220 *кв* характеризуются значениями $\bar{\gamma} = 0{,}76$—$1{,}12$ *мксим* и не имеют влагоразрядных отключений, а переход к $\gamma = 2{,}14$ *мксим* (500 *кв* III района) привел к одному влагоразрядному отключению на небольшом участке (20—40 *км*), что соответствует при десятилетней эксплуатации 0,5—0,25 отключениям на 100 *км* в год.

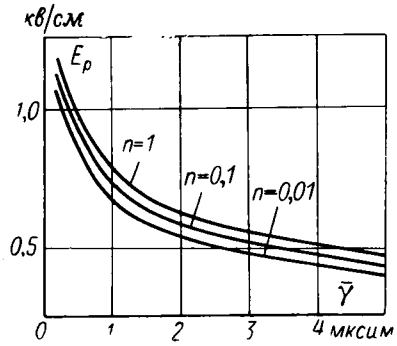


Рис. 3. Зависимость допустимой рабочей напряженности вдоль пути утечки изоляторов $E_р$ в функции среднего значения удельной поверхностной проводимости $\bar{\gamma}$ при различных заданных удельных числах влагоразрядных отключений на 100 *км* в год.

Для второй линии 110 *кв* со значением $\bar{\gamma} = 3{,}7$ *мксим* перекрытия были зафиксированы на гирляндах изоляторов 8×П-4,5 при рабочей напряженности 0,47 *кв/см*. Согласно рис. 3 при этом действительно возникает опасность влагоразрядных перекрытий.

Для линии 500 *кв* I района, характеризуемого $\bar{\gamma} = 0{,}19$ *мксим*, на первый взгляд было бы существенно увеличить рабочую напряженность вдоль пути утечки. В действительности, вряд ли целесообразно ориентироваться на весьма большие допустимые рабочие напряженности, имея в виду ряд дополнительных обстоятельств, не учтенных в проведенном анализе. Сюда в первую очередь следует отнести прогрессирующее загрязнение атмосферного воздуха из-за роста промышленности, а также возможность повышенных загрязнений отдельных гирлянд, не зафиксированных при выборочных регистрациях. В качестве местных загрязнений могут быть птичьи загрязнения, которые резко снижают влагоразрядные характеристики гирлянд до 0,75 *кв/см* [Л. 1], а также распыление самолетами удобрений в виде аммиачной селитры и калийных солей, которые могут привести к аналогичному снижению влагоразрядных напряженностей.

Вследствие этих причин даже в случае практически чистой трассы возможна опасность влагоразрядных отключений, несмотря на небольшое зарегистрированное значение $\bar{\gamma}$.

Поэтому для линий, трассы которых проходят по «незагрязняемой местности», следует ориентироваться в первую очередь на опыт эксплуатации линий 110—220 *кв*, которые в соответствии с требованиями ПУЭ работают при напряженности вдоль пути утечки не более 0,6 *кв/см* и при этом практически не имеют отключений, обусловленных увлажнениями изоляции. Лишь в тех случаях, когда имеется уверенность, что загрязненность по трассе линии, проходящей в особо чистых районах, в обозримый период не достигнет условий, характерных для обычной «незагрязняемой местности», можно пойти на увеличение рабочей напряженности вдоль пути утечки.

С другой стороны, когда загрязненность по трассе линии начинает превышать условия для «незагрязняемой местности» так, что становится невозможным обеспечить достаточно надежную работу линии (как, например, для III района линий 500 *кв*), следует после обследования трассы линии рассмотренным здесь методом рекомендовать использование усиленной изоляции, снижая рабочую напряженность вдоль пути утечки. Это снижение получается тем больше, чем интенсивнее загрязнение изоляторов.

Получаемое в этом случае требуемое значение рабочей напряженности не учитывает наличия запасных изоляторов, так как в нормальных условиях работы нулевые изоляторы появляются лишь в единичных гирляндах. С другой стороны, выполненный анализ показал, что в опасных по загрязнению условиях могут оказаться только отдельные

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

гирлянды линии. Сочетание опасных условий с наличием отдельных нулевых изоляторов в гирляндах представляется мало вероятным, если только общая отбраковка изоляторов не является чрезмерно большой или если число нулевых изоляторов в отдельных гирляндах велико.

Выводы. 1. Для оценки состояния изоляции линий или для прогноза, необходимого при проектировании, могут быть использованы выборочные регистрации максимальных значений токов утечки по гирляндам, измерения удельной поверхностной проводимости и данные по влагоразрядным напряжениям изоляторов, загрязненных в естественных условиях.

2. Целесообразным методом обработки результатов измерений является вероятностно-статистический анализ с помощью двойного экспоненциального закона, что позволяет для определенного района оценить работоспособность изоляции линий электропередачи в нормальных эксплуатационных режимах.

3. Регистрация токов утечки на линиях 110, 220 и 500 *кв*, а также измерения удельной поверхностной проводимости гирлянд, снятых с линий 500 *кв*, показали, что в «незагрязняемых» районах имеют место различные условия по требуемой рабочей напряженности вдоль пути утечки, однако в основном следует ориентироваться на рабочую напряженность не более 0,6 *кв/см*, т. е. значение, подтвержденное успешным опытом эксплуатации линий 110—220 *кв* в районах без специфических источников загрязнений.

4. Методика, изложенная в статье, может быть распространена на районы с любой степенью загрязнения атмосферного воздуха при наличии соответствующих регистраций степени загрязнения изоляции и при известных влагоразрядных характеристиках изоляторов, используемых в каждом конкретном случае.

Литература

1. Майкопар А. С., Открытая электрическая дуга весьма малого тока, «Электричество», 1965, № 2.
2. Кизеветтер В. Е. и Майкопар А. С., Влагоразрядные характеристики гирлянд линейных изоляторов, «Электричество», 1968, № 1.
3. Майкопар А. С. и Морозов К. П., Влагоразрядные характеристики изоляторов при неравномерном загрязнении, «Электричество», 1968, № 9.
4. Майкопар А. С., Нормирование влагоразрядных характеристик гирлянд линейных изоляторов, Труды ВНИИЭ, 1969, вып. XXXVI.
5. Гумбель Э., Статистика экстремальных значений, изд-во «Мир», 1965.

[6.7.1970]

◇ ◇ ◇

УДК 63:621.311

Прогнозирование электропотребления в сельском хозяйстве на основе закономерности его роста в различных странах

Инж. В. Г. ШЕРЕМЕТЕВ
Москва

Потребление электрической энергии в сельском хозяйстве всех стран непрерывно возрастает. Одновременно увеличивается ее доля в общем энергетическом балансе сельского хозяйства. Возможности использования электрической энергии постоянно расширяются. В последние годы помимо использования электроэнергии в силовых стационарных процессах ее начинают применять для отопления животноводческих помещений и жилых домов, сушки зерна, травы и в ряде других энергоемких процессах. Следует ожидать, что в отдаленной перспективе мобильная сельскохозяйственная техника будет использовать в качестве источника энергии электроэнергию.

На базе электрической энергии сельскохозяйственное производство превратится в высокопроизводительную отрасль народного хозяйства с высокой степенью автоматизации. Потребление электроэнергии в таких условиях составить огромную величину.

Значительную часть в общем энергетическом балансе сельского хозяйства составляет потребление на коммунально-бытовые нужды.

В статье исследуется динамика удельного электропотребления W в расчете на один гектар сельскохозяйственных угодий по целому ряду стран.

Этот показатель является одним из основных, характеризующих уровень электропотребления в сельском хозяйстве и включает в себя как производственное, так и коммунально-бытовое электропотребление.

Кроме того, удельное электропотребление — единственный показатель, который можно определить на основе публикуемых статистических данных по зарубежным странам. Безусловно, более правильным является раздельное исследование удельного электропотребления по производственному и коммунально-бытовому сектору.

Величина удельного электропотребления зависит от многих факторов, в том числе от степени электрификации процессов, структуры сельскохозяйственного производства, климатических условий, демографического фактора и др.

В соответствии с удельным электропотреблением в сельском хозяйстве все страны мира можно подразделить на две группы. К первой относятся страны с размером электропотребления свыше 150 *квт·ч* на 1 *га* сельскохозяйственных угодий (Швеция, Дания, Норвегия, Швейцария, ГДР, ФРГ, Англия, Чехословакия); электроэнергия в этих странах довольно широко используется в тепловых процессах.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

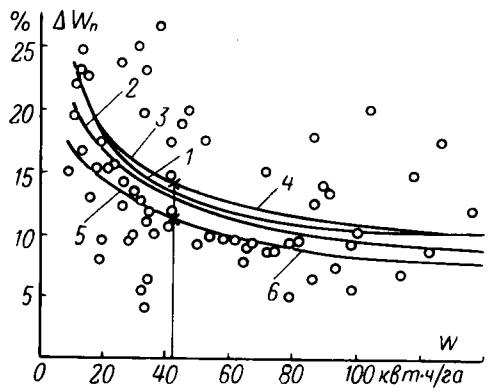


Рис. 1.

Вторая группа наиболее многочисленна. В нее входят страны (в том числе СССР и США) с удельным потреблением до 150 *квт·ч/га*. Самый высокий уровень удельного электропотребления в настоящее время достигнут в Норвегии — свыше 1 100 *квт·ч/га*, в Швеции и Швейцарии — порядка 350 *квт·ч/га*. Процент ежегодного прироста электропотребления зависит от большого числа факторов и колеблется из года в год.

Однако можно проследить определенную закономерность. При малых значениях электропотребления ежегодный процент прироста $\Delta W_{\text{п}}$ выше, чем при больших.

На рис. 1 показан ежегодный прирост электропотребления на 1 *га* сельскохозяйственных угодий по двадцати европейским странам и США за ряд лет. Графики составлены на основании статистического материала Европейской Комиссии по электрификации сельского хозяйства при ООН и национальных статистических сборников соответствующих стран.

В целях исключения случайных колебаний ежегодного процента прироста все значения выравнены по известному методу скользящих средних [Л. 1]. В нашем случае за период сглаживания взяты три года.

На рисунке представлена только часть данных в интервале 10—150 *квт·ч/га*. Интервал 150—400 *квт·ч/га* характеризуется небольшим количеством точек и отсутствием зависимости между ежегодным процентным приростом и размерами электропотребления. Точки имеют большой разброс вокруг линии среднего значения, параллельной оси абсцисс. На этом интервале, как будет показано ниже, значение ежегодного процента прироста изменяется незначительно и близко примерно к 10%.

Несмотря на разброс точек, наблюдается определенная зависимость между ежегодным процентом прироста $\Delta W_{\text{п}}$ и потреблением.

Анализ показал, что наиболее приемлемой функцией в интервале 10—400 *квт·ч/га* является (рис. 1, кривая *1*)

$$\Delta W_{\text{п}} = 9{,}4 + \frac{195}{W} - \frac{485}{W^2}. \qquad (1)$$

Из (1) следует, что в интервале электропотребления 10—150 *квт·ч/га* коэффициент ежегодного прироста меняется от 24 до 10,5%, а при изменении уровня от 150 до 400 *квт·ч/га* ежегодный прирост изменяется незначительно — от 10,5 до 9,9%.

Представляется целесообразным более детально исследовать закономерность электропотребления в интервале 10—150 *квт·ч/га*.

Используя этот интервал, мы получаем возможность более точно проследить закономерность из-за наличия большего количества точек. Методами регрессионного и корреляционного анализа установлено, что в интервале 10—150 *квт·ч/га* эта зависимость имеет вид:

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{40}{W^{0{,}31}}. \qquad (2)$$

При этом коэффициент корреляции равен 0,52.

Таким образом, выражение (2) описывает закономерность изменения ежегодного процента прироста удельного электропотребления в странах мира. График этой кривой показан на рис. 1 (кривая *2*).

В выражении (2) показатель степени 0,31 является коэффициентом регрессии соответствующего ему выражения в логарифмической форме вида:

$$\ln \Delta W_{\text{п}} = 3{,}688 - 0{,}31 \ln W. \qquad (3)$$

Кривая *2* является теоретической линией регрессии и отображает связь между ежегодным приростом удельного электропотребления и уровнем потребления. Истинная линия регрессии лежит в доверительной области с вероятностью *P*. Размер и, следовательно, границы доверительной области зависят от принятой вероятности и показателей корреляционной зависимости.

Определим для нашего случая ту доверительную область, где лежит кривая *2* с вероятностью 0,9. Пользуясь аппаратом математической статистики, находим эту область, т. е. уравнения кривых, ее ограничивающих [Л. 2]. Расчетным путем получены четыре таких кривых. Верхняя граница образуется кривыми, уравнения которых имеют вид:

в интервале 10 — 42 *квт·ч/га*

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{58{,}1}{W^{0{,}38}}; \qquad (4)$$

в интервале 42 — 150 *квт·ч/га*

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{34{,}6}{W^{0{,}24}}. \qquad (5)$$

Уравнения кривых, образующих нижнюю границу, следующие:

в интервале 10 — 42 *квт·ч/га*

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{29{,}5}{W^{0{,}24}}; \qquad (6)$$

в интервале 42 — 150 *квт·ч/га*

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{49{,}5}{W^{0{,}38}}. \qquad (7)$$

Доверительная область в интервале 10—150 *квт·ч/га* ограничивается кривыми *3, 4, 5, 6* (рис. 1). Таким образом, уравнение теоретической линии регрессии и уравнения кривых верхней и нижней границ достаточно полно описывают связь между ежегодным процентом прироста удельного электропотребления и его величиной. Интересно отметить, что кривая, соответствующая выражению (1), находится в этих же доверительных границах.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Используя полученные зависимости, можно перейти к оценке динамики роста показателя удельного электропотребления во времени. Действительно, ежегодный процент прироста $\Delta W_{\text{п}} = \frac{\Delta W 100}{\Delta t W}$, где ΔW — абсолютная величина прироста за промежуток времени $\Delta t = 1$ году; W — размер удельного электропотребления в рассматриваемый момент (среднегодовая величина). Подставляя значение $\Delta W_{\text{п}}$ в выражение (2), получим:

$$\frac{\Delta W 100}{\Delta t W} = \frac{40}{W^{0,31}} \qquad (8)$$

или

$$\frac{\Delta W}{W^{0,69}} = 0{,}4\,\Delta t.$$

С известными допущениями переходим от приращений к их дифференциалам

$$\frac{dW}{W^{0,69}} = 0{,}4\,dt.$$

Решив дифференциальное уравнение, получаем выражение

$$W^{0,31} = 0{,}124t + C$$

или

$$W = (0{,}124t + C)^{3,22}. \qquad (9)$$

Таким образом, выражение (9) описывает рост удельного электропотребления в расчете на один гектар сельскохозяйственных угодий в соответствии с теоретической линией регрессии в странах мира, где потребление в настоящее время составляет величину, меньшую 150 *квт·ч/га*. Аналогичные уравнения получим для кривых *5, 6, 7, 8:*

$$W = (0{,}072t + C)^{4,166}; \qquad (10)$$

$$W = (0{,}186t + C)^{2,631}; \qquad (11)$$

$$W = (0{,}083t + C)^{4,166}; \qquad (12)$$

$$W = (0{,}221t + C)^{2,631}. \qquad (13)$$

Полученные уравнения могут быть использованы в целях прогнозирования электропотребления в различных странах. Для этого необходимо определить коэффициент C по известным данным для какой-либо страны. Покажем это на примере СССР. Сначала введем следующие понятия: низкий, средний и высокий прогноз. Низкий прогноз будет определяться из выражений (10) и (11), соответствующих кривым нижней границы доверительной области; средний прогноз — исходя из теоретической линии регрессии, а высокий — по кривым верхней границы доверительной области.

Принимая во внимание более высокие темпы развития в социалистических странах, полагаем, что электропотребление в СССР будет развиваться в соответствии с кривой, определяющей высокий прогноз, т. е. по уравнению (12).

За год начала отсчета примем 1967 г. ($t = 0$), удельное электропотребление в этом году составляло 47,4 *квт·ч/га*. Подставив эти значения в уравнения, определим коэффициент C.

Окончательно выражение примет вид:

$$W^{0,24} = (0{,}083t + 2{,}52)$$

или

$$W = (0{,}083t + 2{,}52)^{4,166} \qquad (14)$$

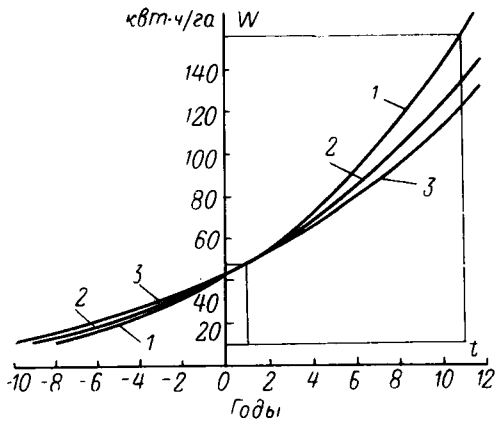


Рис. 2.

В качестве иллюстрации определим, например, величину удельного электропотребления через 10 лет ($t = 10$). Эта величина составит 154 *квт·ч/га*.

В соответствии с выражением (14) абсолютное значение потребления определится умножением удельной величины на площадь S сельскохозяйственных угодий:

$$W = (0{,}082t + 2{,}52)^{4,17} S. \qquad (15)$$

Кроме того, может быть предложен графический способ прогнозирования удельного электропотребления для ряда стран.

На основании выражений (9)—(13) строим графики возможных кривых роста электропотребления.

Для этого сначала задаемся условной точкой отсчета. Примем, что в год отсчета ($t = 0$) удельное электропотребление равнялось среднему значению $\overline{W}$ (т. е. 42 *квт·ч*). Подставив указанные величины в соответствующие выражения, найдем значения коэффициентов C. Далее на основе полученных выражений построим графики изменения удельного потребления (рис. 2). На рисунке показаны три кривые, соответствующие высокому, среднему и низкому прогнозу (кривые *1, 2, 3*).

В качестве примера найдем удельное электропотребление через десять лет ($t = 10$) для условий СССР. Отложим значение удельного электропотребления в размере 47,4 *квт·ч/га* (1967 г.) по оси ординат. Далее проведем линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с выбранной нами кривой (в данном случае с кривой *1*). Опустим перпендикуляр на ось абсцисс. Точка пересечения с осью абсцисс и будет нашей точкой отсчета, соответствующей 1967 г. Затем от этой точки вправо отложим отрезок, соответствующий в масштабе 10 годам, и восстановим перпендикуляр до пересечения с этой же кривой. Ордината этой точки определит значение удельного электропотребления примерно 154 *квт·ч/га*. Специально был рассмотрен вопрос о влиянии года начала отсчета, по электропотреблению в котором определяется коэффициент C, на вариацию прогнозируемой величины. Исследование в условиях СССР показало, что перебор начала отсчета с 1957 по 1967 г. при прогнозе на 10 лет от 1967 г. привел к расхождению результатов в пределах 3%.

Для прогнозирования электропотребления в интервале от 150 до 400 *квт·ч/га* можно использовать

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

выражение (1), хотя достоверность прогноза, безусловно, снижается. Для приблизительных расчетов в соответствии с выражением (1) можно условно полагать, что ежегодный процент прироста в интервале (150—400 *квт·ч/га*) постоянен и составляет примерно 10%. Тогда можно применить известную формулу сложных процентов:

$$W_t = W_0(1,1)^t. \qquad (16)$$

Следует отметить, что по мере уточнения и накопления исходных данных полученные зависимости могут быть скорректированы. Предлагаемый метод может быть использован для прогнозирования целого ряда других удельных показателей наравне с прочими известными методами.

В настоящее время при быстрых темпах технического перевооружения сельского хозяйства проблема перспективного прогнозирования электропотребления является актуальной.

Известен ряд методов, используемых для целей прогнозирования электропотребления в сельском хозяйстве [Л. 3 и 4], однако ни один из них не может дать достоверных результатов.

Только совместное использование всех известных методов с последующей их оценкой определит область возможных значений электропотребления.

Литература

1. Ланге О., Введение в эконометрику, изд-во «Прогресс», 1964.

2. Пустыльник Е. И., Статистические методы анализа и обработки наблюдений, изд-во «Наука», 1968.

3. Шуров С. В. и др., Прогнозирование потребления электрической энергии в сельском хозяйстве, «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», 1969, № 8.

4. Пирхавка П. Я., Зависимости между электровооруженностью, производительностью и фондовооруженностью в сельском хозяйстве, «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», 1969, № 8.

[7.5.1970]

✧ ✧ ✧

УДК 621.311

Влияние дополнительных электромагнитных моментов на движение ротора гидрогенератора при несимметричных коротких замыканиях

Канд. техн. наук А. А. РАГОЗИН и инж. С. В. СМОЛОВИК

Ленинградский ордена Ленина политехнический институт им. М. И. Калинина

При внезапном коротком замыкании электромагнитный момент гидрогенератора содержит следующие основные составляющие, влияющие на характер протекания электромеханического переходного процесса [Л. 1—3].

1. Знакопеременный момент, связанный с единовременным (в первую четверть периода переменного тока) уменьшением средней кинетической энергии ротора за счет перехода ее в дополнительную энергию магнитного поля [Л. 2].

2. Моменты потерь, обусловленные активными сопротивлениями статорной и роторных цепей.

В [Л. 1 и 3] приводятся достаточно точные аналитические выражения для указанных дополнительных моментов при трехфазном коротком замыкании.

Полные выражения для составляющих электромагнитного момента при несимметричных коротких замыканиях получены лишь при отсутствии связи с системой [Л. 2 и 4].

Ниже приводится практический метод определения дополнительных составляющих электромагнитного момента и средних скольжений, обусловленных ими, в процессе двухполюсного на землю короткого замыкания (расчетный вид аварии при проверке динамической устойчивости) при наличии связи гидрогенератора с системой.

С помощью найденных выражений проведен анализ дополнительных моментов на движение ротора гидрогенератора. Полученные результаты сопоставлены с результатами уточненного расчета движения роторов, выполненного на ЦВМ по полным уравнениям переходных процессов синхронной машины.

Как и в случае трехфазного короткого замыкания [Л. 1—3], рассмотрим раздельно составляющие электромагнитного момента.

Знакопеременная составляющая электромагнитного момента. Знакопеременный момент весьма быстро затухает. Однако, как показано в [Л. 2], это затухание сказывается лишь на уменьшении пульсации скольжения около среднего его значения и почти не отражается на величине последнего. Это подтверждалось и результатами выполненного авторами сравнительного расчета на ЦВМ величины среднего скольжения от знакопеременного момента при трехфазном коротком замыкании генератора для различных значений постоянных времени затухания апериодической составляющей тока статорной цепи. Поэтому в дальнейшем при вычислении среднего скольжения от знакопеременного момента пренебрежем активными сопротивлениями всех контуров машины. Кроме того, при анализе интересующего нас начального интервала переходного процесса пренебрежем сверхпереходной явнополюсностью машины, положив $\hat{x}''_d = \hat{x}''_q = \hat{x}_2$, и примем постоянство сверхпереходных э. д. с. E''_q и E''_d.

Решив совместно уравнения переходных процессов электропередачи рис. 1 при двухполюсном на землю коротком замыкании на шинах высшего напряжения относительно α, β — составляющих тока и потокосцепления генератора, и использовав формулы линейного преобразования координат, бы-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ли получены следующие соотношения (при выводе формул предполагалось, что обмотки трансформатора имеют соединение треугольник — звезда с нулем):

$$\Psi_{1\beta} = \Psi_{1\beta 0} = U_1 \sin(\theta_0 - \hat{\delta}_0), \quad (1)$$

$$i_\beta = \frac{\Psi_{1\beta 0} + E''_d \cos\gamma - E''_q \sin\gamma}{x_2}, \quad (2)$$

$$\Psi_{1\alpha} = \frac{E''_q \cos\gamma + E''_d \sin\gamma + \frac{x_2}{x_л}\cos(\gamma - \delta_0)}{X} x_л + C, \quad (3)$$

$$i_\alpha = \frac{-(E''_q \cos\gamma + E''_d \sin\gamma)\left(1 + 0{,}5\frac{x_л}{x_{0\Sigma}}\right) + U\cos(\gamma - \delta_0)}{X} + \frac{C}{x_2}, \quad (4)$$

где $\gamma = \theta_0 + \omega_s t$ — угол между продольной осью синхронного генератора и осью α, совмещенной с осью фазы a; θ_0 — угол, образуемый осью d с осью фазы a в момент возникновения короткого замыкания; δ_0, $\hat{\delta}_0$ — исходные значения углов между осью q генератора и векторами напряжений шин приемной системы и шин станции соответственно;

$$x_{0\Sigma} = \frac{x_т x_{0л}}{x_т + x_{0л}};$$

$$X = x_л + x_2\left(1 + 0{,}5\frac{x_л}{x_{0\Sigma}}\right);$$

$$C = \Psi_{1\alpha 0} - \frac{E''_q \cos\theta_0 + E''_d \sin\theta_0 + \frac{x_2}{x_л} U\cos(\theta_0 - \delta_0)}{X} x_л;$$

$$\Psi_{1\alpha 0} = U\cos(\theta_0 - \hat{\delta}_0).$$

После подстановки величин $\Psi_{1\beta}$, i_β, $\Psi_{1\alpha}$, i_α в формулу для электромагнитного момента

$$M_e = \Psi_{1\beta} i_\alpha - \Psi_{1\alpha} i_\beta$$

и несложных преобразований находим:

$$Me = \frac{U(E''_q \sin\delta - E''_d \cos\delta)}{2X} + \frac{U_1}{x_2}[E''_q \sin(\omega_s t + \hat{\delta}_0) - E''_d \cos(\omega_s t + \hat{\delta}_0)] - \frac{E''_q \sin\gamma - E''_d \cos\gamma}{x_2} \times$$

$$\times \frac{E''_q \cos\theta_0 + E''_d \sin\theta_0 + \frac{x_2}{x_л} U\cos(\theta_0 - \delta_0)}{X} x_л +$$

$$+ \frac{\sin 2\gamma\left[E'^2_q - E'^2_d + \frac{x_2}{x_л} U(E''_q \cos\delta_0 - E''_d \sin\delta_0)\right] - \cos 2\gamma\left[2E''_q E''_d + \frac{x_2}{x_л} U(E''_q \sin\delta_0 + E''_d \cos\delta_0)\right]}{2\frac{x_2}{x_л} X}. \quad (5)$$

Очевидно, за исключением первого члена все составляющие последнего выражения представляют знакопеременный момент. Интегрируя по времени выражение для знакопеременного момента и выделяя в полученном решении постоянную составляющую, нетрудно показать, что

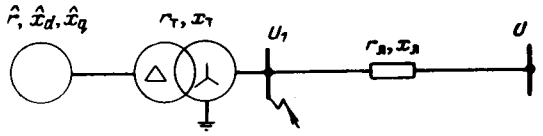


Рис. 1. Расчетная схема электропередачи.

$$\Delta S_{1ср} = -\frac{1}{\omega_s T_J}\left\{\frac{E''_q}{x_2} U\cos\hat{\delta}_0 + \frac{E''_d}{x_2} U\sin\hat{\delta}_0 - \frac{E'^2_q + E'^2_d + \frac{x_2}{x_л} U(E''_q \cos\delta_0 + E''_d \sin\delta_0)}{2\frac{x_2}{x_л} X} - \frac{\left[E'^2_q - E'^2_d + \frac{x_2}{x_л} U(E''_q \cos\delta_0 - E''_d \sin\delta_0)\right]\cos 2\theta_0 + \left[2E''_q E''_d + \frac{x_2}{x_л} U(E''_q \sin\delta_0 + E''_d \cos\delta_0)\right]\sin 2\theta_0}{4\frac{x_2}{x_л} X}\right\}. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что величина $\Delta S_{1ср}$ зависит от фазы θ_0, характеризующей момент возникновения короткого замыкания. Приравнивая нулю производную $\frac{d\Delta S_{1ср}}{d\theta_0}$, найдем значения θ_0, дающие экспериментальные величины $\Delta S_{1ср}$:

$$\left.\begin{aligned} \theta_{01} &= \frac{1}{2}\times \\ &\times \operatorname{arctg}\frac{2E''_q E''_d + \frac{x_2}{x_л} U(E''_q \sin\delta_0 + E''_d \cos\delta_0)}{E'^2_q - E'^2_d + \frac{x_2}{x_л} U(E''_q \cos\delta_0 - E''_d \sin\delta_0)}, \\ \theta_{02} &= \frac{1}{2}\times \\ &\times\left[\operatorname{arctg}\frac{2E''_q E''_d + \frac{x_2}{x_л} U(E''_q \sin\delta_0 + E''_d \cos\delta_0)}{E'^2_q - E'^2_d + \frac{x_2}{x_л} U(E''_q \cos\delta_0 - E''_d \sin\delta_0)} + \pi\right], \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Момент потерь, обусловленный апериодической составляющей тока статорной цепи. При определении моментов потерь, возникающих в случае несимметричных коротких замыканий, обычно пренебрегают влиянием всех составляющих токов статорной цепи за исключением основных и апериодических. Это вызвано затруднениями при анализе, но может быть вполне оправдано ввиду весьма небольших значений моментов потерь для гидрогенераторов от высших гармонических.

Апериодические составляющие создают момент потерь, обусловленный активными сопротивлениями в роторе; основные составляющие создают моменты потерь как в цепи статора, так и в роторе. Добавочный момент от активного сопротивления ротора, вызванный апериодической составляющей тока статорной цепи, в грубом приближении может быть найден из следующего соотношения:

$$M_{e3} = \frac{1}{2}(i^2_{dп} + i^2_{qп}) Re^{-2t/T_a^{(2)}}. \quad (8)$$

В уравнении (8) $i_{dп}$ и $i_{qп}$ являются периодическими составляющими основной частоты соответ-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ственно полных токов i_d и i_q; R представляет собой эффективное активное сопротивление ротора, отнесенное к статору. Эквивалентная постоянная времени $T_a^{(2)}$ в первом приближении может быть приравнена соответствующей постоянной времени при трехфазном коротком замыкании [1].

Периодические составляющие основной частоты $i_{d\text{п}}$, $i_{q\text{п}}$ можно получить с помощью формул преобразования координат от осей a, β к осям d, q из апериодических составляющих $i_{\alpha\,\text{ап}}$, $i_{\beta\text{ап}}$, которые нетрудно выделить из полных токов i_α и i_β (формулы 2, 4).

Возведя $i_{d\text{п}}$, $i_{q\text{п}}$ в квадрат и выделив постоянные слагаемые, будем иметь:

$$M_{e\text{з}} = \frac{1}{4} R (A^2 + B^2) e^{-2t/T_a^{(2)}}, \qquad (9)$$

где

$$A = \frac{U \cos \hat{\delta}}{x_2} - \frac{E''_q \cos^2 \theta_0 + \frac{E''_d}{2} \sin 2\theta_0 + \frac{U x_2}{x_\text{д}} \cos(\theta_0 - \delta_0) \cos \theta_0}{x_2 X} x_\text{д};$$

$$B = \frac{U \sin \hat{\delta}}{x_2} - \frac{E''_d \sin^2 \theta_0 + \frac{E''_q}{2} \sin 2\theta_0 + \frac{U x_2}{x_\text{д}} \cos(\theta_0 - \delta_0) \sin \theta_0}{x_2 X} x_\text{д}.$$

К рассмотренным моментам должен быть добавлен электромагнитный момент прямой последовательности, обусловленный составляющей основной частоты тока статорной цепи, и тормозной момент обратной последовательности, зависящий от активного сопротивления ротора при удвоенной нормальной частоте и от составляющей обратной последовательности тока.

Электромагнитный момент прямой последовательности можно определить с помощью схемы замещения для двухполюсного на землю короткого замыкания с учетом активных сопротивлений. Тормозной момент обратной последовательности может быть приближенно определен с помощью симметричных составляющих [Л. 5]:

$$M_{e4} = |I_2|^2 (r_2 - r), \qquad (10)$$

где I_2 — ток обратной последовательности; r_2 — активное сопротивление обратной последовательности.

Результаты расчетов средних электромагнитных моментов скольжений по аналитическим соотношениям и на ЦВМ. На основании предшествующего анализа и расчетов на ЦВМ подсчитаем общее изменение скорости при двухполюсном на землю коротком замыкании и сравним с результатом расчета по упрощенной методике, не учитывающей дополнительных моментов.

Расчеты выполняются применительно к схеме на рис. 1, отвечающей приближенно условиям работы капсульных агрегатов Череповецкой ГЭС. Капсульный гидрогенератор имеет следующие параметры:

$$\hat{x}_d = 1{,}764, \quad \hat{x}_q = 1{,}144, \quad \hat{x}_s = 0{,}263, \quad \hat{r} = 0{,}01845,$$

$$\hat{x}''_d = 0{,}401, \quad \hat{x}''_q = 0{,}449, \quad \hat{x}'_d = 0{,}523, \quad x_{fs} = 0{,}296,$$
$$x_{kd} = 0{,}314, \quad x_{kq} = 0{,}235, \quad R = 0{,}053,$$
$$r_2 = 0{,}05, \quad T_{d0} = 1{,}265 \text{ сек}.$$

Номинальная мощность генератора $P_\text{н} = 20$ *Мвт*. По данным расчетов и опытам сброса нагрузки инерционная постоянная агрегата принята равной $T_J = 1{,}8$ *сек*.

Индуктивное и активное сопротивления трансформатора: $x_\text{т} = 0{,}12$; $r_\text{т} = 0{,}01$. Сопротивления линии электропередачи: $x_\text{л} = 0{,}2$; $r_\text{л} = 0{,}04$. В исходном режиме электромагнитный момент генераторов составлял $M_{e0} = M_{\text{т}0} = 0{,}922 P_\text{н}$; э. д. с. возбуждения $E_{q0} = 1{,}95$; $\hat{\delta}_0 = 48$; $\delta_0 = 58°$. После подстановки указанных величин в (7) получим: $\theta_{01} = 40°$; $\theta_{02} = 130°$.

Среднее значение скольжения от знакопеременного момента при $\theta_{01} = 40°$ составит $\Delta s'_{1\text{ср}} = -0{,}00162$; при $\theta_{02} = 130°$ $\Delta s''_{1\text{ср}} = -0{,}0024$. Соответствующие им значения средних электромагнитных моментов, действующих в процессе короткого замыкания длительностью $t_{\text{к.з}} = 0{,}12$ *сек*, равны: $M'_{1\text{ср}} = 0{,}0243$; $M''_{1\text{ср}} = 0{,}036$. Относительно небольшая разница в величинах $\Delta s'_{1\text{ср}} (M'_{1\text{ср}})$ и $\Delta s''_{1\text{ср}} (M''_{1\text{ср}})$ вызвана достаточно жесткими присоединениями капсульных машин к энергосистемам.

При значениях $\theta_{02} = 130°$ и $\theta_{01} = 40°$, отвечающих соответственно максимальному и минимальному значениям среднего скольжения от знакопеременного момента, величины среднего момента потерь от апериодической составляющей тока статорной цепи и обусловленные этим моментом значения средних скольжений будут равны:

$M'_{e\text{з}} = 0{,}0228$; $\Delta s'_{\text{зср}} = -0{,}00149$, $M''_{e\text{з}} = 0{,}0115$, $\Delta s''_{\text{зср}} = -0{,}0008$ и практически одинаковы с их экстремальными величинами.

Последнее находится в соответствии и с физическими представлениями происхождения знакопеременного момента и момента потерь, вызванного апериодической составляющей тока статорной цепи и активными сопротивлениями ротора.

Электромагнитный момент прямой последовательности, обусловленный составляющей основной частоты тока статора, определялся с помощью схемы замещения для двухполюсного на землю короткого замыкания с учетом активных сопротивлений. Его среднее значение в процессе короткого замыкания составило $M_{e2} = 0{,}351$. Среднее скольжение к концу короткого замыкания ($t_{\text{к.з}} = 0{,}12$ *сек*), обусловленное ($M_{\text{т}0} - M_{e2}$), составило $s_{2\text{ср}} = 0{,}038$. Заметим, что при пренебрежении активными сопротивлениями в статорной цепи и подключении в точку короткого замыкания симметричного шунта, среднее значение электромагнитного момента прямой последовательности составило $M_{e2} = 0{,}294$ и соответственно скольжение $s_{2\text{ср}} = 0{,}0418$. И, наконец, вычисление дополнительного тормозного момента обратной последовательности по формуле (10) дало значение $M_{e4} = 0{,}0072$. Для соответствующей величины среднего скольжения при $t_{\text{к.з}} = 0{,}12$ *сек* имеем: $\Delta s_4 = -0{,}00048$.

Максимальное значение полного среднего электромагнитного момента в процессе короткого замыкания при $\theta_{02} = 130°$ составит:

$$M_{e\max} = 0{,}036 + 0{,}0228 + 0{,}351 + 0{,}0072 = 0{,}417.$$

Минимальное значение полного среднего электромагнитного момента ($\theta_{01} = 40°$):

$$M_{e\min} = 0{,}0243 + 0{,}0115 + 0{,}351 + 0{,}0072 = 0{,}394.$$

Соответствующие им средние величины скольжений за время $t_{\text{к.з}} = 0{,}12$ *сек* равны: $s_{\min} = 0{,}0336$; $s_{\max} = 0{,}0352$. Ниже приводятся результаты уточненного расчета электромагнитных моментов и средних скольжений, выполненного на цифровой вычислительной машине по программе составленной на кафедре «Электрические системы и сети» ЛПИ им. М. И. Калинина. Из анализа решений (рис. 2, 3), отвечающих приблизительно экстремальным величинам средних значений скольжений за время $t_{\text{к.з}} = 0{,}12$ *сек*, следует, что $s_{\min} = 0{,}033$, $s_{\max} = 0{,}035$.

Последние достаточно хорошо совпадают с вышеприведенными результатами расчетов по аналитическим соотношениям. Соответствующие им значения средних электромагнитных моментов, действующих в процессе короткого замыкания, равны: $M_{e\max} = 0{,}427$, $M_{e\min} = 0{,}397$.

Найденные на ЦВМ величины скольжений и углов к концу короткого замыкания позволили косвенно оценить степень влияния дополнительных моментов на предел динамической устойчивости капсульных гидрогенераторов в схеме рис. 1. Для этого в программу расчетов динамической устойчивости, составленную при пренебрежении знакопе-

[1] Это, в частности, следовало из рассмотрения осциллограмм переходного процесса при двухполюсном на землю и трехполюсном коротких замыканиях, полученных авторами на аналоговой и цифровой вычислительных машинах.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

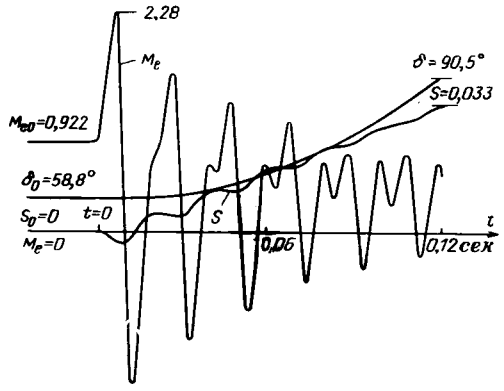


Рис. 2. Переходный процесс при двухполюсном на землю коротком замыкании за трансформатором для капсульного гидрогенератора Череповецкой ГЭС при $\theta_0 \approx 130°$.

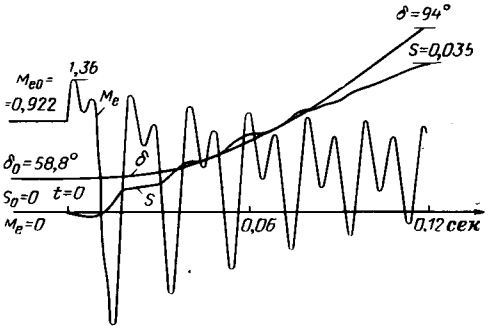


Рис. 3. Переходный процесс при двухполюсном на землю коротком замыкании за трансформатором для капсульного гидрогенератора Череповецкой ГЭС при $\theta_0 \approx 40°$.

ременным моментом и моментами потерь, вводились граничные значения средних скольжений и углов к концу короткого замыкания, полученные для разных режимов на основе программы расчетов аварийной стадии процесса с учетом дополнительных моментов. Анализ результатов расчетов устойчивости при $t_{к.з}=0,12$ *сек* показал, что пренебрежение дополнительными моментами приводило к снижению предела динамической устойчивости капсульных генераторов на величину, равную $\Delta P=(0,08—0,1)P_н$ (при расчетах варьировалась загрузка машин активной мощностью). При учете только активных сопротивлений статорных цепей погрешность в определении предела устойчивости составляла $\Delta P=(0,03—0,05)P_н$. Нижние и верхние значения указанных диапазонов относятся к моментам возникновения двухполюсного на землю короткого замыкания, когда в наименьшей и соответственно наибольшей мере проявляется действие знакопеременного момента и момента потерь от апериодической составляющей тока статорной цепи.

Результаты расчетов по представленным выше формулам и на ЦВМ показали, что моменты потерь капсульного генератора, несмотря на значительные активные сопротивления его статорной и роторной цепей, получились практически одинаковы с моментами потерь вертикального генератора, что вызвано повышенными индуктивными сопротивлениями капсульных машин.

Степень торможения ротора вертикального генератора (расчеты производились применительно к гидрогенератору Братской ГЭС) от знакопеременного момента вследствие большой протяженности линии электропередачи существенно зависела от фазы θ_0, характеризующей момент возникновения короткого замыкания. Так, максимальное торможение в процессе короткого замыкания для вертикального генератора вследствие относительно малых значений x''_d и x''_q превышало в 1,5 раза таковое для капсульного агрегата, тогда как минимальная величина тормозного момента $M_{1ср}$ при неблагоприятном с точки зрения устойчивости моменте возникновения короткого замыкания для вертикального генератора оказывалась ниже $M_{1ср}$ для капсульного агрегата. Последнее хорошо согласуется с физическими представлениями происхождения знакопеременного момента.

Производя сравнительную оценку, следует обратить внимание также и на следующее существенное обстоятельство. Для капсульных машин, имеющих малые величины маховых масс, решающее влияние на динамическую устойчивость имеет сама аварийная стадия процесса. Для вертикальных машин к концу короткого замыкания угол не успевает существенно измениться. Поэтому и пренебрежение названными факторами менее критично отразится на пределе их динамической устойчивости.

Выводы. 1. Разработан практический метод определения знакопеременного момента и момента потерь в роторных цепях и их экстремальных величин при несимметричных коротких замыканиях гидрогенераторов. Составлена программа для ЦВМ «Урал-2» расчета движения ротора гидрогенератора при несимметричных коротких замыканиях с учетом переходных процессов в статорных цепях и демпферных обмотках.

2. Основное влияние на движение ротора гидрогенератора в процессе короткого замыкания оказывают знакопеременный момент и момент потерь от активного сопротивления в статорной цепи. Степень торможения от знакопеременного момента при несимметричных коротких замыканиях зависит от момента (фазы) возникновения короткого замыкания, причем тем существеннее, чем больше протяженность линии электропередачи.

3. Предел динамической устойчивости капсульных генераторов (применительно к условиям работы Череповецкой ГЭС, а также сходными с рассмотренными условиями работы Киевской и Перепадных ГЭС) при двухполюсных на землю коротких замыканиях длительностью $t_{к.з}=0,12$ *сек* при пренебрежении дополнительными моментами снижается на $\Delta P=(0,08—0,1)P_н$. При учете только активных сопротивлений статорных цепей погрешность в определении предела устойчивости составляет: $\Delta P=(0,03—0,05)P_н$.

Литература

1. Веников В. А., Переходные электромеханические процессы в электрических системах, изд-во «Энергия», 1964.
2. Казовский Е. Я., Переходные процессы в электрических машинах переменного тока, Изд. АН СССР, 1962.
3. Ежков В. В., Влияние дополнительных моментов на динамическую устойчивость электропередачи с гидрогенераторами, «Электричество», 1961, № 11.
4. Копкордиа Ч., Синхронные машины, Переходные и установившиеся процессы, Госэнергоиздат, 1959.
5. Кимбарк Э., Синхронные машины и устойчивость электрических систем, Госэнергоиздат, 1960.

[2.2.1970]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Из опыта работы

УДК 621.316.718.5:62-83

Расчет корректирующих устройств вентильного электропривода с комбинированным регулированием

Кандидаты техн. наук В. Л. АНХИМЮК и О. П. ИЛЬИН

Минск

В связи с возрастающими требованиями к диапазону и стабильности регулирования частоты вращения электроприводов в настоящее время значительное развитие получили системы с комбинированным регулированием по возмущению и отклонению.

В статье рассматривается двухканальная система комбинированного регулирования с косвенным измерением возмущающего воздействия, в которой для улучшения динамических свойств применены корректирующие устройства. Такая система может быть применена, например, в электроприводах металлорежущих станков. Основными элементами структурной схемы (рис. 1) являются: электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения, состоящий из динамических звеньев $K_т$ и K_θ, силовой вентильный преобразователь с системой фазового управления $K_п$, дополнительный безынерционный усилитель K_1 и корректирующие устройства $K_с$ и $K_{с.о}$. Элементы, включенные в цепь AB, образуют силовой канал системы. Канал AC представляет собой моделирующую цепочку, состоящую из звеньев, передаточные функции которых равны соответствующим передаточным функциям силовых элементов. Преобразователь рассматривается как линеаризованный инерционный элемент с постоянной времени, равной сумме постоянной времени цепи управления и времени запаздывания.

При приложении возмущающего воздействия $F=I_cR_0$ в точке $Д$, где I_c — ток статической нагрузки и R_0 — сопротивление главной цепи на выходе узла сравнения C, получим сигнал, определяемый возмущающим воздействием, который через согласующий усилитель K_0 сравнивается с регулируемой величиной. Результирующий сигнал с помощью корректирующего устройства преобразуется в напряжение обратной связи $U_{о.с}$.

Введем обозначения:

$$K_D = 1/D;\ K_с = L/H;\ K_{с.о} = L_о/H_о,\ K_п = \beta_у/У;\ B = Tp+1;$$
$$D = \theta T p^2 + \theta p + 1;\ L = T_с p + 1;\ H = \tau_с p + 1;\ L_о = kT_о p;$$
$$H_о = T_о p + 1;\ У = T_у p + 1;\ K_1 = \beta_1;\ \beta = \beta_у \beta_1;$$
$$K_о = 1/\beta;\ \beta_у = \lambda\beta,$$

где θ — электромеханическая постоянная времени привода; T — электромагнитная постоянная времени главной цепи; $T_у$ — эквивалентная постоянная времени, учитывающая влияние запаздывания вентильного преобразователя; $T_с$, $\tau_с$ и $T_о$ — постоянные времени корректирующих устройств; $\beta_у$ — коэффициент усиления преобразователя; $K_{с.о}$ — корректирующее устройство; β_1 — коэффициент усиления дополнительного усилителя; β — полный коэффициент усиления разомкнутой системы.

Передаточная функция системы относительно возмущающего воздействия с учетом этих обозначений имеет вид:

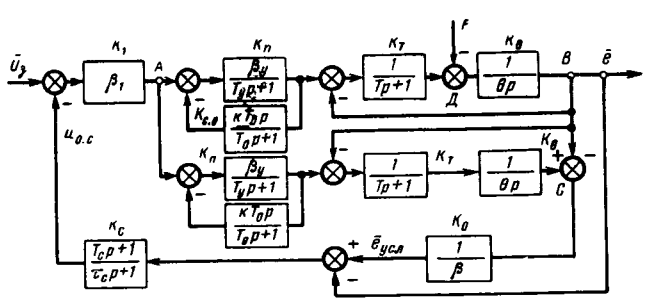


Рис. 1. Структурная схема регулируемого вентильного электропривода.

$$\Phi_в = \frac{\bar{e}}{-F} = \frac{B(DHH_оУ + \lambda\beta DHL_о - H_оL)}{D(DHH_оУ + \lambda\beta DHL_о + \beta H_оL)} = \frac{G(p)}{W(p)}. \quad (1)$$

Из [1] видно, что устойчивость системы определяется распределением корней уравнения:

$$DHH_оУ + \lambda\beta DHL_о + \beta H_оL = A_5p^5 + A_4p^4 + A_3p^3 + A_2p^2 + A_1p + A_о = 0. \quad (2)$$

Запас устойчивости будет тем больше, чем меньше параметр корректирующего устройства $\tau_с$. При достаточно малом значении $\tau_с$, например при $\tau_с < 0{,}01T_с$, можно положить $H=1$, а характеристическое уравнение представить в виде:

$$DH_оУ + \lambda\beta DL_о + \beta H_оL = (1+\beta)(a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1) = 0. \quad (3)$$

Значение оператора H, близкое к единице, может быть получено при применении активного корректирующего устройства с положительной обратной связью [рис. 2]. Его передаточная функция имеет вид:

$$K_с = \frac{\beta'_с(T_с p + 1)}{\tau_с p + 1}, \quad (4)$$

где

$$\tau_с = T_с \frac{\beta_о - \beta_с}{\beta_о\beta_с + \beta_о - \beta_с};\quad \beta'_с = \frac{\beta_о\beta_с}{\beta_о\beta_с + \beta_о - \beta_с}. \quad (5)$$

Если, например, $\beta_с = 5$, то выбрав $\beta_о < 1{,}052\beta_с$, получим $\tau_с < 0{,}01T_с$ и $\beta'_с \approx 1$.

В уравнении (3)

$$a_1 = \nu_с(\theta + T_у + T_о) + (1-\nu_с)[T_с + (1+\lambda k)T_о];$$
$$a_2 = \nu_с[\theta(T + T_у + T_о) + T_уT_о] + (1-\nu_с)T_о(\lambda k\theta + T_с);$$
$$a_3 = \nu_с\theta(T_уT_о + TT_у + TT_о) + (1-\nu_с)\lambda kT_о\theta T;$$
$$a_4 = \nu_с\theta TT_уT_о;\quad \nu_с = \frac{1}{1+\beta}.$$

В данном случае, в соответствии с теоремой Меерова [Л. 2], переходный процесс будет в основном определяться вырожденным уравнением, так как разность порядков действительного и вырожденного уравнений равна единице. Положив $\nu_с \to 0$, получим коэффициенты вырожденного характеристического уравнения:

$$a_1 = T_с + (1+\lambda k)T_о;\ a_2 = T_о(\lambda k\theta + T_с);\ a_3 = \lambda kT_о\theta T. \quad (6)$$

При $H=1$ числитель передаточной функции (1) может быть представлен в виде:

$$G(p) = B(b_4p^4 + b_3p^3 + b_2p + b_1p), \quad (7)$$

где

$$\left.\begin{aligned} b_1 &= \theta + T_у - T_с + \lambda\beta kT_о;\quad b_2 = T_о(\theta + T_у) + \\ &+ \theta(T + T_у) - T_оT_с + \lambda\beta k\theta T_о;\quad b_3 = \theta(T_оT + \\ &+ T_оT_у + TT_у) + \lambda\beta k\theta TT_о;\quad b_4 = T_о\theta TT_у. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

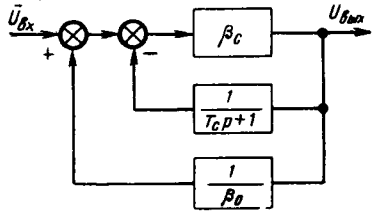


Рис. 2. Структурная схема корректирующего устройства.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Для вырожденной передаточной функции $\beta \to \infty$ и коэффициенты выражения (7) принимают вид:

$$b_1 = \lambda\beta k T_0; \quad b_2 = \lambda\beta k\theta T_0; \quad b_3 = \lambda\beta k\theta T T_0; \quad b_4 = 0. \qquad (9)$$

На основании (6) и (9) вырожденную передаточную функцию получим в виде:

$$\Phi_в = \frac{\nu_c b p (Tp + 1)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}; \qquad (10)$$

где

$$b = \lambda\beta k T_0.$$

Выбор параметров корректирующих устройств будем производить из условия квадратичной интегральной оценки вида [Л. 2]:

$$I_V = \int_0^\infty V dt = \int_0^\infty [e^2 + \gamma_1 (e')^2 + \gamma_2 (e'')^2]\, dt. \qquad (11)$$

Здесь e' и e'' — первая и вторая производные э. д. с. двигателя, которая при постоянстве магнитного потока пропорциональна его частоте вращения.

Для получения минимума I_V подынтегральная функция V должна удовлетворять уравнению Эйлера:

$$\frac{\partial V}{\partial e} - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial V}{\partial e'}\right) + \frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{\partial V}{\partial e''}\right) = 0. \qquad (12)$$

Переходный процесс $e = f(t)$, удовлетворяющий уравнению Эйлера, является экстремалью, которая в рассматриваемом случае выражается уравнением второго порядка. В зависимости от выбора весовых множителей γ_1 и γ_2 можно получить бесчисленное множество экстремалей.

Выберем экстремаль с кратными корнями, поскольку при этом может быть получен процесс с минимальным перерегулированием, близкий к техническому оптимуму [Л. 3]. Тогда передаточная функция, соответствующая экстремальному процессу, должна иметь вид:

$$\Phi_э = \frac{b_0 p}{(\tau p + 1)^2}, \qquad (13)$$

где

$$b_0 = \nu_c \beta \lambda k T_0 \approx \lambda k T_0.$$

Для этого необходимо, чтобы соблюдалось равенство:

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1 = (\tau p + 1)^2 (Tp + 1). \qquad (14)$$

Приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях p в (14), получим соотношения:

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= T_c + (1 + \lambda k) T_0 = 2\tau + T; \\ a_2 &= T_0 (\lambda k\theta + T_c) = \tau^2 + 2\tau T; \\ a_3 &= \lambda k T_0 \theta T = \tau^2 T. \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

Из (15) могут быть определены параметры корректирующих устройств:

$$T_c = \frac{T_\Sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{T_\Sigma^2}{4} - 2T\tau}; \quad T_0 = T_\Sigma - T_c; \quad \lambda k = \frac{\tau^2}{T_0 \theta}, \qquad (16)$$

где

$$T_\Sigma = 2\tau + T - \frac{\tau^2}{\theta}.$$

Экстремальный переходный процесс при единичном возмущающем воздействии на основании (13) характеризуется уравнением:

$$\nu = \frac{e}{I_c R_0} = \frac{b_0}{\tau^2}\, t e^{-\frac{t}{\tau}}. \qquad (17)$$

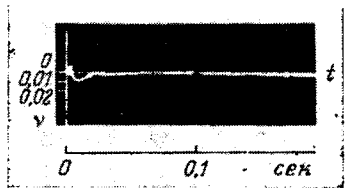


Рис. 3. Осциллограмма переходного процесса при набросе нагрузки.

Приравнивая нулю производную этого выражения, найдем, что максимальное значение ν будет при $t = \tau$. При этом

$$\nu_m = 0{,}368 \frac{b_0}{\tau} = 0{,}368 \frac{\lambda k T_0}{\tau} = 0{,}368 \frac{\lambda\tau}{\theta}. \qquad (18)$$

Задаваясь допустимым значением максимального отклонения регулируемой величины ν_m, найдем требуемое значение

$$\tau = \frac{\nu_m \theta}{0{,}368}, \qquad (19)$$

которое может быть использовано при определении параметров корректирующих устройств.

Пример. Пусть $\theta = 0{,}4$ *сек*; $T = 0{,}04$ *сек*; $T_у = 0{,}02$ *сек*, требуемый диапазон регулирования скорости $D = 1\,000$; номинальная частота вращения двигателя $n_н = 1\,000$ *об/мин*; естественное снижение частоты вращения при номинальной нагрузке $\Delta n_е = 100$ *об/мин*.

В соответствии с техническими условиями ЭНИМС [Л. 4], полагая, что при работе на низшем пределе диапазона регулирования при $D \geqslant 1\,000$ возможно допустить резкое снижение частоты вращения до нуля, получим допустимое значение динамического отклонения частоты вращения при набросе нагрузки в относительных единицах:

$$\nu_m = \frac{n_н}{D \Delta n_е} = 0{,}01.$$

По формуле (19) $\tau = 0{,}011$.

По (16) получим: $T_0 = 0{,}0224$; $T_c = 0{,}0393$; $\lambda k = 0{,}0135$. Примем $\lambda = 0{,}265$, тогда $k = 0{,}051$. Значение τ_c выберем равной 0,0005, т. е. меньше $0{,}01\, T_c$.

Расчеты, выполненные на моделирующей машине, показывают, что для обеспечения близкого совпадения действительного переходного процесса с экстремальным необходимо, чтобы коэффициент усиления системы был достаточно высоким. Примем $\beta = 535$. Тогда $\beta_у = \lambda\beta = 141{,}5$ и $\beta_1 = \frac{535}{144} = 3{,}78$. По полученным данным была выполнена модель электропривода. На рис. 3 приведена осциллограмма переходного процесса при набросе нагрузки, из которой видно, что относительное значение динамического выброса скорости не превышает 0,01.

Литература

1. Мееров М. В., Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности, Физматгиз, 1959.

2. Фельдбаум А. А., Электрические системы автоматического регулирования, Оборонгиз, 1957.

3. Слежановский О. В., Реверсивный электропривод постоянного тока, изд-во «Энергия», 1968.

4. Найдис В. А., Технические требования к электродвигателям и регулируемым электроприводам новых серий для металлорежущих станков, сб. работ ЭНИМС «Системы регулируемого электропривода металлорежущих станков», 1968.

[6.7.1970]

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.318.132.001.5

Характеристики потерь в горячекатаной электротехнической стали в сильных переменных магнитных полях

Инж. М. Н. ПОРОШИНА

Москва

Интерес к потерям в стали в области высоких индукций и напряженностей поля, в полях сложной формы (с подмагничиванием и наличием высших гармоник) связан с созданием электрических машин и новых ферромагнитных устройств.

Исследование потерь в области индукции насыщения и за насыщением в отечественных сталях не проводилось. Теория потерь в стали при сложном перемагничивании не разработана. Это в значительной степени объясняется тем, что известные методы измерения потерь в образцах стали оказывались непригодными при очень высоком насыщении и в условиях перемагничивания образца во времени и пространстве по сложному закону.

Для определения потерь в электротехнических сталях в сильных переменных магнитных полях в области насыщения и за ее пределами при значениях $B_{max}=2{,}5$ *тл* и $H_{max}=500$ *ка/м* и весьма значительных искажениях формы кривой индукции и напряженности поля разработана специальная методика, основанная на измерении температуры исследуемых образцов в процессе перемагничивания. Температура измеряется в неустановившемся тепловом режиме, т. е. в течение нескольких первых секунд с начала перемагничивания. Количество тепла, выделившегося за определенный промежуток времени при перемагничивании образца в определенном поле, сравнивается с количеством тепла, выделившегося в образце при его градуировке, при прохождении по нему тока соответствующей величины. Сравнение производится по величине приращения температуры, фиксируемой измерительными приборами. Теоретические основы этого метода изложены в работах [Л. 1 и 2]. При удельных потерях в образцах стали, равных, например, 1 *вт/кг*, подъем температуры за 1 *сек* составляет приблизительно 0,002° С.

Для измерения малых разностей температур применена установка, состоящая из дифференциальной медь-константановой термопары, фотокомпенсационного гальванометрического усилителя Ф118, воспринимающего и усиливающего сигнал термопары, и электронного самопишущего потенциометра ЭПП-09, записывающего величину приращения температуры. В качестве термостата «холодного» спая термопары служит немагнитная пластина, расположенная рядом с испытуемым образцом. Разработанное для этой схемы устройство компенсации погрешности позволяет измерять и записывать очень малые приращения температур с погрешностью 0,5%.

Цикл измерений начинается с режима градуировки. Измерительная система записывает приращение температуры «горячего» спая дифференциальной термопары, пропорциональное количеству тепла, выделившегося в градуируемом исследуемом образце при протекании по нему тока:

$$\delta \equiv Q = I^2rt, \qquad (1)$$

где δ — показание прибора; Q — количество тепла, выделившегося в образце; I — ток, установленный в цепи образца; r — сопротивление образца; t — время протекания тока по цепи.

Удельный нагрев образца или удельные потери равны:

$$p_{уд} = \frac{Q}{G} = \frac{I^2rt}{G}, \qquad (2)$$

где G — вес пластины.

Потери измеряются в режиме перемагничивания образца. Измерительная система записывает величину приращения температуры образца с момента начала перемагничивания в течение того же времени, которое устанавливалось при градуировке. По градуировочному графику нагрева определяются удельные потери $p_{уд}$ испытуемого образца.

Разработанная методика была использована для определения потерь в образцах пяти марок листовой горячекатаной электротехнической стали: Э12—0,5 *мм*, Э21—0,5 *мм*, Э31—0,35 *мм*, Э42 — 0,35 *мм* и Э43—0,35 *мм*, выпускаемой Верх-Исетским металлургическим заводом. Испытаниям подверглись десять образцов стали, по два образца каждой марки, вырезанных вдоль и поперек проката. Образцы выбирались из килограммовых проб, представленных заводом.

Характеристики этих образцов приведены в таблице. Она составлена по результатам измерений, проведенных заводом на килограммовых пробах, и дополнена нашими данными, относящимися к выбранным единичным образцам.

В графах 4—8 таблицы представлены соответственно: содержание кремния в данной марке стали, ρ — удельное сопротивление, $p_{10/50}$ и $p_{15/50}$ — удельные потери на перемагничивание при индукциях B_{max}, равных 1 и 1,5 *тл*, измеренные на килограммовой пробе, γ — удельный вес стали по ГОСТ 802-58 (в зависимости от покрытия).

В графах 9—14 таблицы приведены данные наших измерений: G — вес образца, $b \times l$ — ширина и длина образца, d — толщина образца, определенная по его весу, r — омическое сопротивление, измеренное на постоянном токе при $T=20°$ С.

Результаты измерения удельных потерь на перемагничивание исследованных образцов стали в диапазоне индукций $B_{max}=1$—2,5 *тл* представлены на графике в виде зависимостей $P_{sin}=f(B_{max})$, где P_{sin} — полные потери при синусоидальном изменении магнитной индукции (показаны средние значения потерь для двух пластин данной марки стали). Измерение потерь непосредственно в режиме синусоидальной

Данные Верх-Исетского завода								Данные наших измерений					
Марка стали	Покрытие	Направление проката	Содержание Si, %	ρ, *ом·мм*	$p_{10/50}$ / $p_{15/50}$ Измеренные на пробе 1 *кг*, *вт/кг*		γ по ГОСТ, *кг/м³*	G, 10^{-3} *кг*	$b \times l$, 10^{-3} *м*	d (по весу), 10^{-3} *м*	r (при $T=20°$ С), *ом*	B_s, *тл*	$B_{ср}$, *тл*
Э12—0,5	Окалина	Вдоль	1,60	0,31	3,01	6,69	7 750	28,39	29,6×250	0,50	0,00523	2,16	2,1
		Поперек	1,60	0,31	3,01	6,69	7 750	28,80	29,7×250	0,50	0,00534	2,04	
Э21—0,5		Вдоль	2,75	0,43	2,18	5,50	7 700	29,19	29,6×250	0,51	0,00729	2,0	1,96
		Поперек	2,75	0,43	2,18	5,50	7 700	29,05	29,4×250	0,51	0,00763	1,92	
Э31—0,35	Травление	Вдоль	3,70	0,55	1,54	3,26	7 650	19,49	29,5×250	0,35	0,01297	2,05	2,03
		Поперек	3,70	0,55	1,54	3,26	7 650	19,49	29,5×250	0,35	0,01297	2,05	
Э42—0,35		Вдоль	4,20	0,61	1,15	2,57	7 550	20,26	29,6×250	0,36	0,01398	1,90	1,89
		Поперек	4,20	0,61	1,15	2,57	7 550	18,76	29,3×250	0,34	0,01400	1,88	
Э43—0,35		Вдоль	4,30	0,62	0,98	2,36	7 550	18,85	29,6×250	0,34	0,01489	1,92	1,89
		Поперек	4,30	0,62	0,98	2,36	7 550	18,39	29,5×251	0,33	0,01537	1,86	

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

индукции производилось почти на всех образцах вплоть до индукции $B_{max}=1{,}9$ *тл*. Потери при $B_{max}>1{,}9$ *тл*, показанные на графике, — результат приведения к величине, соответствующей синусоидальному изменению магнитного потока в соответствии с ГОСТ 12119-66.

У четырех марок стали: Э12—0,5 *мм*, Э21—0,5 *мм*, Э31—0,35 *мм* и Э42—0,35 *мм* потери для образцов, вырезанных вдоль и поперек проката, были различны при одинаковых значениях индукции B_{max}, причем у образцов сталей Э12—0,5 *мм*, Э31—0,35 *мм* и Э42—0,35 *мм*, вырезанных вдоль проката, потери оказались больше на 7—10%, чем у образцов, вырезанных поперек проката. У образцов стали Э43—0,35 *мм*, вырезанных вдоль и поперек проката, величина потерь совпала во всем диапазоне индукций в пределах погрешности измерений. Для сравнения на графике отмечены точками потери, измеренные на Верх-Исетском заводе на килограммовых пробах каждой марки стали при индукциях $B_{max}=1$ и 1,5 *тл*.

Наибольшее расхождение контрольных точек и среднего значения потерь по нашим измерениям (17%) наблюдается у стали Э12—0,5, при индукции $B_{max}=1{,}5$ *тл*, наименьшее (4%) для сталей Э31—0,35 и Э43—0,35.

На рисунке показаны также значения индукции насыщения B_s, измеренные на каждом исследованном образце и осредненные для двух образцов данной марки стали.

Наименьшие потери на всех значениях индукции B_{max} у стали Э43—0,35, причем на высоких индукциях потери этой стали меньше на 15%, чем у ранее исследованной холоднокатаной стали Э320—0,35 [Л. 3]. Вероятная относительная погрешность измерения потерь рассмотренным методом при использовании указанной аппаратуры равна 2,5% в области индукций, меньших индукции насыщения, и 3,5% в области индукций за насыщением. Следует отметить, что погрешностью 3,5% оцениваются потери, измеренные в области индукций за насыщением при определенном коэффициенте формы кривой индукции.

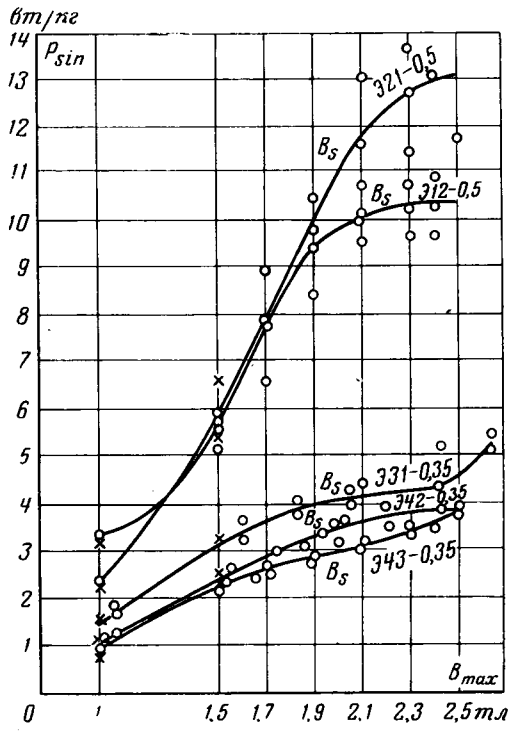
При приведении потерь к синусоидальной форме кривой индукции в соответствии с ГОСТ 12119-66 синусоидальные потери определяются при двух коэффициентах формы кривой индукции по следующей формуле:

$$P_{sin}=P_1-P_{в1}\left(1-\frac{1{,}232}{k_{ф1}^2}\right)=P_1-$$

$$-\left[\frac{k_{ф1}^2(P_2-P_1)}{k_{ф2}^2-k_{ф1}^2}\right]\left(1-\frac{1{,}232}{k_{ф1}^2}\right), \qquad (3)$$

где P_1 и P_2 — удельные потери при коэффициентах формы кривой индукции $k_{ф1}$ и $k_{ф2}$ соответственно; $P_{в1}$ — потери от вихревых токов при $k_{ф1}$.

Таким образом, P_{sin} является функцией шести измеренных величин $\left(k_ф=\frac{U_{эф}}{U_{ср}}\right)$. Вероятная погрешность P_{sin} в этом случае определяется следующим образом:



Полные потери при синусоидальном изменении магнитной индукции в зависимости от индукции.

× — потери, измеренные на Верх-Исетском металлургическом заводе на килограммовых пробах стали; О — потери, измеренные на единичных пластинах (вдоль и поперек проката).

Погрешности, подсчитанные по формулам (4) и (5), для образца стали Э43—0,35 при индукциях $B_{max}=2{,}3$ и 2,5 *тл* равны соответственно 15 и 30%, а для образца стали Э12—0,5 при индукциях $B_{max}=2{,}1$ и 2,4 *тл* — 25 и 60%.

На основании произведенного расчета можно сделать вывод, что применение формулы (3), рекомендованной ГОСТ 12119-66 для определения полных синусоидальных потерь при двух коэффициентах формы, следует ограничить определенными характеристиками намагничивающего поля, так как в условиях насыщения стали в области индукций, превышающих индукцию насыщения, при сильно искаженных формах кривой индукции и напряженности поля погрешности определения P_{sin} по указанной формуле могут достигать очень больших значений.

$$\sigma_{P_{в1}}\%=\sqrt{\left(\frac{k_{ф1}^2}{k_{ф2}^2-k_{ф1}^2}\Delta P_1\right)^2+\left(\frac{k_{ф1}^2}{k_{ф2}^2-k_{ф1}^2}\Delta P_2\right)^2+\left[\frac{2k_{ф1}k_{ф2}^2(P_2-P_1)}{(k_{ф2}^2-k_{ф1}^2)^2}\Delta k_{ф1}\right]^2+\frac{2k_{ф2}k_{ф1}^2(P_2-P_1)}{(k_{ф2}^2-k_{ф1}^2)^2}\Delta k_{ф2}}; \qquad (4)$$

$$\sigma_{P_{sin}}\%=\sqrt{\Delta P_1^2+\left[\left(1+\frac{1{,}232}{k_{ф1}^2}\right)\Delta P_{в1}\right]^2+\left(\frac{2{,}464P_{в1}}{k_{ф1}^3}\Delta k_{ф1}\right)^2}. \qquad (5)$$

Литература

1. Порошина М. Н., Измерение потерь в электротехнических сталях в неустановившемся тепловом режиме, «Измерительная техника», 1968, № 8.

2. Порошина М. Н., Способ измерения потерь в листовых электротехнических сталях в сложных магнитных полях, Авторское свидетельство № 249484, «Бюлл. изобр.», 1969, № 25.

3. Порошина М. Н., Измерение потерь в электротехнической стали в сильных переменных магнитных полях, «Измерительная техника», 1969, № 11.

[27.7.1970]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.318.132.001.5

Полистная неоднородность магнитных свойств холоднокатаной текстурованной электротехнической стали

Инженеры И. А. ШЕСТАКОВ, И. Д. ЗАЙДМАН, А. М. СЕРЕБРЕННИКОВ и Т. Н. ШТОВБАНЬКО

Запорожье

Холоднокатаная текстурованная электротехническая сталь часто обладает весьма значительной неоднородностью магнитных свойств. Выяснение основных причин этой неоднородности и ее уменьшение способствовало бы более правильной оценке качества листов и лучшему использованию их у потребителей. Между тем в довольно многочисленных работах, посвященных этому вопросу, неоднородность магнитных свойств рассматривается либо вообще вне связи с вызвавшими ее причинами [Л. 1 и 2], либо указываются такие причины (неоднородность обезуглероживания полос при промежуточных термообработках [Л. 3—5], неоднородное распределение температур в стопе при окончательном отжиге листов [Л. 6]), которые, как правило, покрывают лишь небольшую часть наблюдаемой неоднородности магнитных свойств.

В работе [Л. 7] показано, что магнитные свойства готовых листов значительно улучшаются с повышением температуры нагрева слябов перед горячей прокаткой (сляб — прямоугольная листовая заготовка, в нашем случае имеет размеры $130 \times 810 \times 4\,200$ *мм* и прокатывается на полосу $2{,}2 \times \times 800$ *мм*). Из-за конструктивного несовершенства используемых для нагрева методических печей (наличие направляющих водоохлаждаемых глиссажных труб, проложенных вдоль оси печи, по которым скользят слябы при их проталкивании через печь) наблюдается значительная неоднородность распределения температуры по длине слябов — в местах соприкосновения их с глиссажными трубами температура металла существенно понижена. Соответственно можно ожидать ухудшения магнитных свойств листов, полученных из этих участков слябов. Проверке этого предположения и посвящена настоящая работа.

Исследование провели на четырех слябах одной плавки с содержанием 3% Si, 0,04% C и обычным содержанием остальных примесей. Слябы нагревали под прокатку в методических печах по различным режимам: сляб *А* нагревали при температуре 1290—1310° С; слябы *Б*, *В* и *Г*—при 1200—1240° С. Сляб *Г* перед этим был подвергнут предварительной обработке — нагрет при 1290—1310° С и замедленно охлажден в интервале 1200—350° С и, следовательно, отличался от слябов *А*, *Б* и *В* перед нагревом под прокатку более крупными размерами неметаллических включений.

Степень нагретости и распределение температуры по длине слябов оценивали по показаниям оптического пирометра, фиксирующего температуру поверхности полос за черновой группой непрерывного стана, на котором прокатывали слябы.

Передел горячекатаных полос на лист толщиной 0,35 *мм* проводили по принятой технологии.

При порезке каждой из четырех холоднокатаных полос на листы через каждые 75 *м* длины полосы, что соответствует 200 *мм* длины сляба, отбирали по одному листу. Отобранные листы отожгли в вакумной печи по принятому режиму: 1140° С — 2 *ч*, 1080—1100° С — 17 *ч*.

Из отожженных листов вырезали 1 *кг* пробы, на которых в аппарате Эпштейна абсолютным методом (при шихтовке образцов внахлестку) измеряли величину магнитной индукции $B_{0,03}$; $B_{0,05}$; $B_{0,1}$; B_1; B_{10}; B_{25} и удельных потерь $p_{10/50}$; $p_{15/50}$; $p_{17/50}$.

Полученные значения магнитных свойств (среднее из трех измерений) и распределение температуры по длине полос (слябов), а также положение глиссажных труб по ширине печи представлены на рисунке. В таблице приведены средние

Среднее значение магнитных свойств (числители) и их неоднородность в пределах прокатной полосы (знаменатели)

Характеристика		Условное обозначение полосы (сляба)			
		А	*Б*	*В*	*Г*
Температура полосы T_1, °С		1080—1120	1015—1045	995—1015	1000—1050
Магнитная индукция, *тл*/%	B_{25}	1,918 / 0,8	1,894 / 2,5	1,886 / 3,7	1,778 / 14,3
	B_{10}	1,820 / 1,1	1,785 / 3,8	1,750 / 4,0	1,655 / 16,2
	B_1	1,515 / 2,1	1,465 / 6,8	1,409 / 8,9	1,310 / 24,7
	$B_{0,1}$	0,389 / 17,8	0,336 / 61,2	0,285 / 63,6	0,207 / 206,5
	$B_{0,05}$	0,074 / 22,8	0,062 / 50,4	0,055 / 42,9	0,044 / 126,1
	$B_{0,03}$	0,027 / 21,5	0,023 / 45,8	0,021 / 35,0	0,018 / 95,9
Удельные потери, $\frac{вт/кг}{\%}$	$p_{10/50}$	0,545 / 8,5	0,585 / 18,5	0,574 / 13,9	0,650 / 29,8
	$p_{15/50}$	1,295 / 7,2	1,385 / 11,9	1,385 / 10,7	1,660 / 31,9
	$p_{17/50}$	1,800 / 5,7	1,905 / 14,4	1,915 / 11,7	2,240 / 26,1

значения характеристик для каждой полосы, а также показатели их неоднородности, которые вычисляли по формуле:

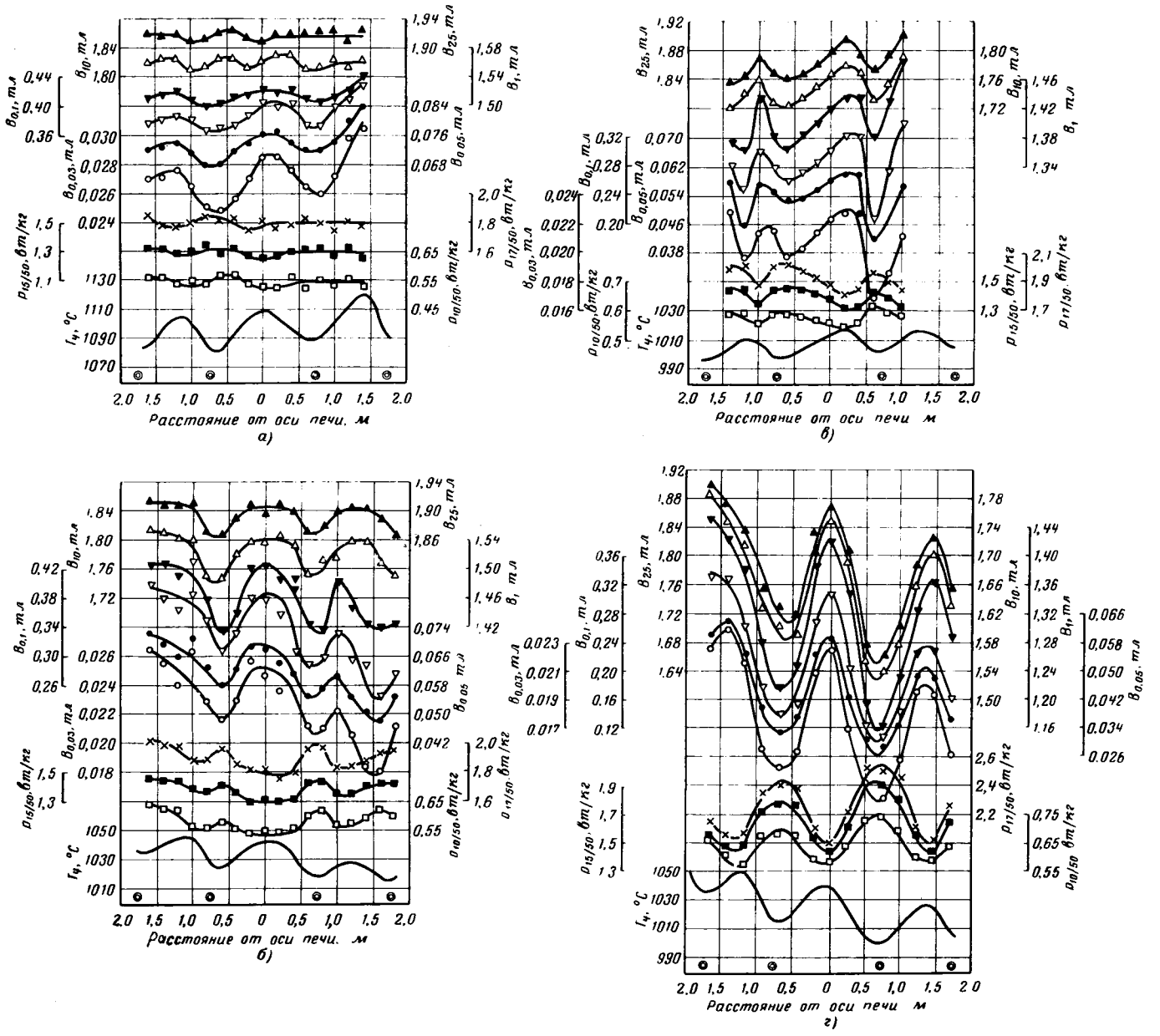
$$\frac{B_{max} - B_{min}}{B_{min}} 100\%,$$

где B_{max} и B_{min} — соответственно максимальное и минимальное значения данной характеристики в пределах полосы.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что существует закономерная, определяемая неоднородностью нагрева металла перед горячей прокаткой неоднородность магнитных свойств холоднокатаной текстурованной электротехнической стали в пределах одной полосы и плавки.

Из них видно также, что повышение температурного

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru



Распределения температуры T_4 и магнитных свойств по длине полосы.

а — полоса *А*; *б* — полоса *Б*; *в* — полоса *В*; *г* — полоса *Г*.

Обозначения: ▲ — B_{25}; △ — B_{10}; ▼ — $B_{0,1}$; ● — $B_{0,05}$; ○ — $B_{0,003}$; × — $p_{17/50}$; ■ — $p_{15/50}$; □ — $p_{10/50}$.

интервала нагрева слябов способствует не только повышению общего уровня магнитных свойств, но и уменьшению степени их неоднородности: для полосы *А*, температура нагрева которой была наиболее высокой, разброс значений различных характеристик в 2—4 раза меньше, чем для полос В и Б; в частности, значение магнитной индукции в сильных полях (B_{25} и B_{10}) для полосы *А* можно считать практически постоянными, а колебания величины потерь хотя и заметны, но носят скорее случайный характер (отчасти они связаны с колебаниями толщины листов). Следует отметить, что максимальную чувствительность к температуре нагрева слябов проявляют значения магнитной индукции в средних полях—$B_{0,1}$ и $B_{0,05}$, которые в наибольшей степени зависят от степени совершенства текстуры листов.

Для получения совершенной текстуры, формирующейся в процессе вторичной рекристаллизации при высокотемпературном отжиге листов холоднокатаной текстурованной электротехнической стали, необходимо затормозить рост зерен в металле до температуры начала вторичной рекристаллизации (~900° С); это условие обеспечивается лишь в том случае, когда в металле содержится достаточное количество дисперсных неметаллических включений (на заключительном этапе отжига эти включения в основном удаляются). В работе [Л. 7] было показано, что повышение температуры нагрева слябов перед прокаткой способствует увеличению степени дисперсности включений и тем самым улучшению текстуры и магнитных свойств готовых листов. Результаты настоящей работы в целом и особенно данные, полученные на полосе (слябе) *Г*, подтверждают этот вывод. Замедленное охлаждение сляба *Г* после первого нагрева привело к укрупнению неметаллических включений, а температура повторного нагрева, особенно на участках, прилегающих к глиссажным трубам, была недостаточной для растворения включений, что необходимо для последующего их выделения в дисперсной форме при прокатке. Это и послужило причиной получения катастрофически низких и очень неоднородных магнитных свойств в листах из этого сляба.

Становится понятным также, почему для холоднокатаной текстурованной электротехнической стали характерна значительно бо́льшая неоднородность магнитных свойств, чем для горячекатаной [Л. 2]: поскольку в последней текстура всегда выражена слабо, колебание температуры нагрева ее перед го-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

рячей прокаткой не оказывает столь решающего влияния на свойства, как в холоднокатаной стали.

Таким образом установлено, что одной из основных причин неоднородности магнитных свойств холоднокатаной текстурованной электротехнической стали является неоднородность нагрева металла перед горячей прокаткой, что во многом связано с особенностями конструкции нагревательных печей — наличием в них водоохлаждаемых глиссажных труб. При проектировании новых цехов для производства электротехнической стали следует предусматривать установку печей другой конструкции, например с шагающим подом [Л. 8]. В существующих производствах повышение однородности, как и общего уровня магнитных свойств может быть достигнуто повышением температуры нагрева металла.

Литература

1. Вдовин Ю. А. и Корзунин Г. С., К неоднородности магнитных свойств электротехнической стали в слабых полях, Труды Института физики металлов АН СССР, вып. 24, 1965.

2. Корзунин Г. С. и Фельдблюм Я. М., Полистная неоднородность магнитной индукции электротехнической стали в слабых полях, «Электротехника», 1968, № 6.

3. Беляков А. И. и др., Зависимость свойств холоднокатаной трансформаторной стали от положения использованной зоны слитка или горячекатаного рулона, «Сталь», 1959, № 11.

4. Лапотышкин Н. М. и др., Структура холоднокатаной трансформаторной стали, «Металловедение и термическая обработка металлов», 1962, № 12.

5. Беляков А. И. и др., Влияние растяжения полос при термической обработке в проходной печи на магнитные свойства трансформаторной стали, «Сталь», 1967, № 5.

6. Ершова Л. П. и Корсунская А. И., Неоднородность магнитных свойств в стопе листов трансформаторной стали, «Сталь», 1961, № 6.

7. Зайдман И. Д. и др., Влияние режима нагрева слябов на магнитные свойства холоднокатаной трансформаторной стали, «Сталь», 1969, № 10.

8. Грудев П. И., Развитие листопрокатного производства в капиталистических странах, «Сталь», 1967, № 7.

[3.8.1970]

◇ ◇ ◇

УДК 621.316.923.001.24

К расчету энергии, выделяющейся в предохранителе при отключении тока короткого замыкания

Г. А. КРЫМСКИЙ

Уфа

При расчете предельной отключающей способности плавких предохранителей на переменном токе, а также при пересчете ее по имеющимся экспериментальным данным, необходимо знать максимальное значение энергии, выделяющейся в дуге $W_д$ при отключении тока короткого замыкания. Эта энергия, так же как и ток в момент появления дуги $I_д$ для предохранителей с токоограничением, зависит от начальной фазы ψ тока короткого замыкания. Таким образом, для определения максимального значения энергии $W_{дm}$ необходимо найти условия получения максимального значения тока $I_{дm}$.

Выражение для тока короткого замыкания на низкой стороне трансформатора в сети бесконечно большой мощности имеет вид:

$$i = I_m \sin(\omega t - \psi) + I_m \sin\psi e^{-t/\tau}, \qquad (1)$$

откуда значение тока в момент появления дуги $I_д$ получим в виде

$$I_д = I_m \sin(\omega t_н - \psi) + I_m \sin\psi e^{-t_н/\tau}. \qquad (2)$$

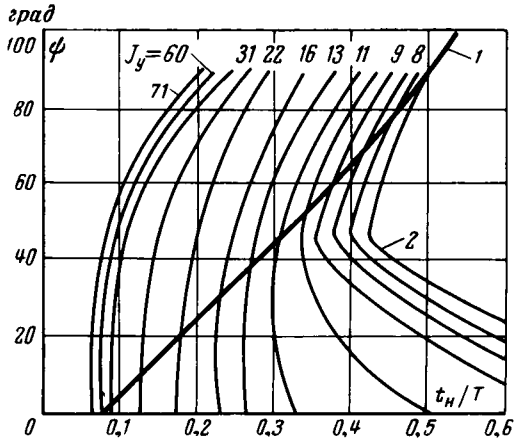


Рис. 1.

Здесь $t_н$ — время, прошедшее от начала короткого замыкания до момента появления дуги (длительность плавления вставки); τ — постоянная времени отключаемой цепи.

Значение угла ψ_m, при котором $I_д$ достигает максимума, получится из условия

$$\frac{dI_д}{d\psi} = 0.$$

Из этого условия с учетом (2) и после преобразований имеем:

$$\operatorname{tg}\psi_m = \frac{e^{-t_н/\tau} - \cos\omega t_н}{\sin\omega t_н}. \qquad (3)$$

Из (3) можно определить значение начальной фазы ψ_m, при котором получаются наиболее тяжелые условия отключения, если время плавления вставки весьма мало. После подстановки в (3) значения $t_н = 0$ и раскрытия неопределенности получим:

$$\operatorname{tg}\psi_m = -\frac{1}{\omega\tau}. \qquad (4)$$

Из (4) следует, что для случая, когда коэффициент мощности отключаемой цепи $\cos\varphi = 0$, начальная фаза $\psi_m = 0$, т. е. наиболее тяжелым является случай включения в нуль тока. Для случая $\cos\varphi = 1$ имеем $\psi_m = 90°$; таким образом, в этом случае наиболее тяжелые условия отключения будут при включении в максимум периодической составляющей тока короткого замыкания.

Задаваясь значениями $t_н/T$, где T — период переменного тока, можно вычислить по (3) значения углов ψ_m для данного $\cos\varphi$ или τ. На рис. 1 (кривая *1*) приведена зависимость $\psi = f\left(\frac{t_н}{T}\right)$, построенная для $\cos\varphi = 0{,}208$ или $\tau = 0{,}015$ *сек* (для промышленных сетей такое значение τ является практически максимальным).

Зависимость $\psi_m = f\left(\frac{t_н}{T}\right)$ является первым условием, необходимым для решения задачи. Второе условие может быть

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

получено из уравнения адиабатического нагрева плавкой вставки током короткого замыкания:

$$\int_0^{t_н} i^2 dt = Aq^2, \qquad (5)$$

где A — инерционность материала вставки [Л. 1], $а^2сек/мм^4$; q — площадь сечения перешейка вставки, $мм^2$.

Введем величину условной плотности тока в перешейке вставки:

$$J_у = \frac{I}{q\sqrt{A}}, \qquad (6)$$

где I — действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания.

Тогда уравнение (5) может быть записано в виде:

$$\int_0^{t_н} \left(\frac{i}{I}\right)^2 dt = \frac{1}{J_у^2}. \qquad (7)$$

Если в (7) подставить значение i из (1), то после интегрирования получим выражение для $J_у = f\left(\frac{t_н}{T}, \psi\right)$. Задаваясь значениями $t_н/T$ при фиксированных значениях ψ, получим кривые $J_у = f\left(\frac{t_н}{T}\right)$ для данного значения $\cos\varphi$, с помощью которых могут быть построены кривые $\psi = f\left(\frac{t_н}{T}\right)$ для разных значений $J_у$, представленные на рис. 1 (кривые *2*). Точки пересечения кривых *2* с кривой *1* и определяют, очевидно, искомую зависимость $\psi_m = f(J_у)$. На рис. 2 приведены кривые $\psi_m = f(J_у)$, построенные указанным способом для значений $\cos\varphi = 0{,}208$ (кривая *1*) и $\cos\varphi = 0{,}392$ (кривая *2*).

Пример. 1. Определить значение ψ_m для испытания предохранителя типа ПР-2 на 100 *а*, 220 *в* с цинковой вставкой 100 *а* и током $I = 10\,000$ *а* в цепи с $\cos\varphi = 0{,}392$. Для этой вставки $q = 2{,}52$ $мм^2$, $A = 10\,000$. В соответствии с (6) условная плотность тока $J_у = 40$; по кривым рис. 2 для $\cos\varphi = 0{,}392$ находим $\psi_m = -5°$.

Кривая максимума энергии, выделяющейся в дуге $W_{дm}$, может быть построена в соответствии с зависимостью [Л. 2]:

$$W_{дm} = k_{vm} W_{мm}. \qquad (8)$$

Здесь $W_{мm}$ — максимальное значение энергии магнитного поля цепи в момент появления дуги; k_{vm} — коэффициент, определяемый формулой:

$$k_{vm} = \frac{3}{2} + \frac{3}{\omega t_д \sin\varphi\left[\sin(\omega t_н - \psi_m) + \sin\psi_m \exp\left(-\frac{t_н}{\tau}\right)\right]} \times$$

$$\times\left[\sqrt{1 + (\omega t_д)^2}\sin(\omega t_н + \varphi - \psi_m + \gamma) - \right.$$

$$\left. - \sin(\omega t_д + \varphi - \psi_m)\right] - \frac{\omega t_д}{\operatorname{tg}\varphi}, \qquad (9)$$

где $t_д$ — время гашения дуги; $\gamma = \operatorname{arctg}\omega t_д$.

Формулы (8) и (9) могут быть получены из выражения

$$W_д = \frac{3}{2}\left[\int_{t_н}^{t_н + t_д} (ei - Ri^2)\, dt + \frac{LI_д^2}{2}\right]$$

после подстановки в него значения

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi - \psi)$$

и с учетом линейного изменения тока в дуге:

$$i = I_д\left(1 - \frac{t - t_н}{t_д}\right).$$

Значение коэффициента k_{vm} должно быть вычислено также в функции $J_у$. Для этого, задаваясь значениями $J_у$, находим по кривым рис. 2 соответствующие значения ψ_m и затем по кривой *1* рис. 1 значения $t_н/T$, которые подставляем в (9) для среднего времени гашения дуги $t_д = 3{,}3$ *мсек*.

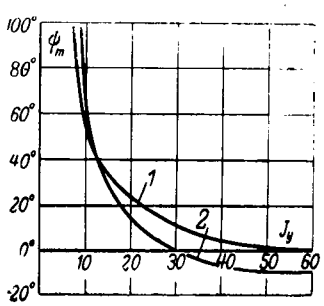


Рис. 2.

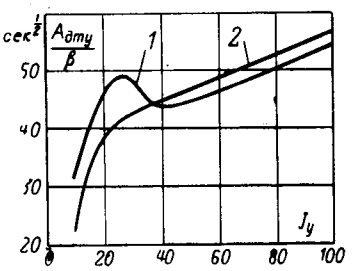


Рис. 3.

Энергия $W_{мm}$ может быть вычислена следующим образом. В соответствии с определением энергии магнитного поля имеем:

$$W_{мm} = \frac{LI_{дm}^2}{2}, \qquad (10)$$

где

$$I_{дm} = I_m\left[\sin(\omega t_н - \psi_m) + \sin\psi_m e^{-\frac{t_н}{\tau}}\right]; \qquad (11)$$

$$L = \frac{U_ф \sin\varphi}{\omega I} \qquad (12)$$

Если обозначить

$$\frac{U_ф \sin\varphi}{\omega} = \beta, \qquad (13)$$

то после подстановки в (10) выражения (11) с учетом (6) получим:

$$\frac{W_{мmу}}{\beta} = J_у\left[\sin(\omega t_н - \psi_m) + \sin\psi_m e^{-\frac{t_н}{\tau}}\right]^2. \qquad (14)$$

Здесь значение $W_{мmу}$ определится из соотношения

$$W_{мmу} = \frac{W_{мm}}{q\sqrt{A}}. \qquad (15)$$

Перемножая ординаты кривых k_{vm} и $\frac{W_{мmу}}{\beta}$, получим в соответствии с зависимостью (8) кривую $\frac{W_{дmу}}{\beta} = f(J_у)$, где аналогично (15)

$$W_{дmу} = \frac{W_{дm}}{q\sqrt{A}}. \qquad (16)$$

На рис. 3 представлены кривые $\frac{W_{дmу}}{\beta} = f(J_у)$, построенные для значений $\cos\varphi = 0{,}208$ (кривая *1*) и $\cos\varphi = 0{,}392$ (кривая *2*). Как видно из этих кривых, энергия, выделяющаяся в дуге, с увеличением тока короткого замыкания возрастает. При некоторых значениях $J_у$ и $\cos\varphi$ возможно незначительное ее уменьшение ($J_у = 40$, $\cos\varphi = 0{,}208$), что облегчает условия отключения тока для предохранителей, работающих в этой области (например, предохранители типа ПР-2 на 100 *а*, 220 *в*).

Кривые рис. 3 носят универсальный характер в отличие от кривых Бакстера [Л. 3], вычисленных для конкретных случаев, так как они построены в относительных координатах и могут быть использованы при расчете плавких предохранителей любой конструкции для разных условий испытаний на предельную отключающую способность при трехфазных коротких замыканиях.

Пример 2. Определить значение энергии, выделившейся в патроне ПР-2, 100 *а*, 220 *в* при условиях, указанных в примере 1 ($\beta = 0{,}37$). Для $J_у = 40$ по кривой рис. 3 находим $\frac{W_{дmу}}{\beta} = 45$; отсюда определяем в соответствии с (16):

$W_{дm} = 45 \cdot 0{,}37 \cdot 2{,}52 \cdot 100 = 4200$ *дж*.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Вольт-амперные характеристики униполярного коронного разряда

Х. Ф. ТАММЕТ

Таллин

Поле униполярного коронного разряда описывается уравнениями вида [Л. 1 и 2]:

$$\left.\begin{aligned} &\vec{j} = k\vec{E}\rho; \\ &\operatorname{div} \varepsilon E = \rho; \\ &\operatorname{div} \vec{j} = 0, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где $\vec{j}$ — плотность тока; k — подвижность ионов; $\vec{E}$ — напряженность электрического поля; ρ — плотность заряда; ε — абсолютная электрическая проницаемость.

Краевые условия задают потенциалы электродов и напряженность над коронирующей поверхностью.

Вольт-амперные характеристики не имеют явного выражения в элементарных функциях, а вычисление силы тока короны итерационным способом по трансцендентным уравнениям неудобно и не дает необходимого на практике наглядного представления о вольт-амперных характеристиках.

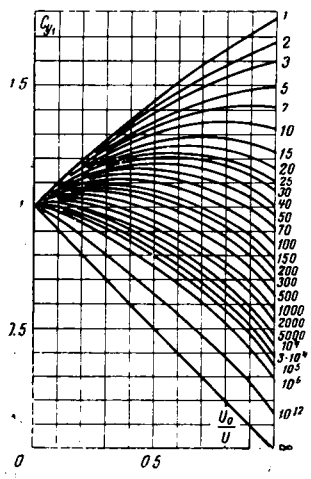


Рис. 1.

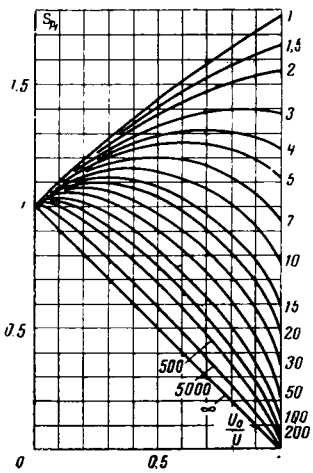


Рис. 2.

В статье приведены практические формулы, которые в рамках обычных допущений представляют собой вольт-амперные характеристики коронного разряда между коаксиальными цилиндрами и концентрическими сферами в явной форме.

Решения уравнений (1) имеют простой вид в некоторых предельных случаях [Л. 3]. Если отношение начального напряжения разряда к напряжению между электродами U_0/U стремится к нулю, а отношение радиусов электродов R/r — к бесконечности, то получим:

$$I = \frac{2\pi\varepsilon k U^2}{R^2}; \qquad (2)$$

$$I = \frac{3\pi\varepsilon k U^2}{2R}, \qquad (3)$$

где J — сила тока с единицы длины электрода при цилиндрической геометрии, а I — сила тока при сферической геометрии.

В общем случае вольт-амперные характеристики можно записать следующим образом:

$$J = C_y\left(\frac{R}{r}, \frac{U_0}{U}\right)\frac{2\pi\varepsilon k U (U - U_0)}{R^2}; \qquad (4)$$

$$I = S_p\left(\frac{R}{r}, \frac{U_0}{U}\right)\frac{3\pi\varepsilon k U (U - U_0)}{2R}, \qquad (5)$$

где C_y и S_p — специальные функции двух переменных, определенные так, чтобы (4) и (5) точно удовлетворяли уравнениям (1).

В частном случае ($U_0 = 0$) имеем:

$$C_y\left(\frac{R}{r}, 0\right) = C_{y_0}\left(\frac{R}{r}\right) = \left(\sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} - \frac{r}{R}\arccos\frac{r}{R}\right)^{-2}. \qquad (6)$$

$$S_p\left(\frac{R}{r}, 0\right) = S_{p_0}\left(\frac{R}{r}\right) = 4\frac{R}{r}\left(\int_1^{R/r}\sqrt{t^{-1} + t^{-4}}\,dt\right)^{-2} \qquad (7)$$

В общем случае функции C_y и S_p целесообразно расщепить на два сомножителя:

$$C_y\left(\frac{R}{r}, \frac{U_0}{U}\right) = C_{y_0}\left(\frac{R}{r}\right) C_{y_1}\left(\frac{R}{r}, \frac{U_0}{U}\right); \qquad (8)$$

$$S_p\left(\frac{R}{r}, \frac{U_0}{U}\right) = S_{p_0}\left(\frac{R}{r}\right) S_{p_1}\left(\frac{R}{r}, \frac{U_0}{U}\right). \qquad (9)$$

Графики функций C_{y_1} и S_{p_1} изображены на рис. 1 и 2, где цифры при кривых обозначают отношение R/r. Функция

$$Pl\left(\frac{U_0}{U}\right) = C_{y_1}\left(1, \frac{U_0}{U}\right) = S_{p_1}\left(1, \frac{U_0}{U}\right) = \frac{9 - 12\left(\frac{U_0}{U}\right)^2 + \sqrt{81 - 216\left(\frac{U_0}{U}\right)^2 + 192\left(\frac{U_0}{U}\right)^3 - 48\left(\frac{U_0}{U}\right)^4}}{18\left(1 - \frac{U_0}{U}\right)} \qquad (10)$$

Пример 3. Определить предельную отключающую способность этого же предохранителя при напряжении 380 *в* ($\beta = 0{,}64$). Так как значение $W_{дт}$ при изменении напряжения должно сохраниться, то в соответствии с данными примера 1 получим:

$$4\,200 = Y 0{,}64 \cdot 2{,}52 \cdot 100,$$

где Y—искомая ордината кривой $\frac{W_{дту}}{\beta}$ при $\beta = 0{,}64$. Находим $Y = 26{,}1$ и по кривой рис. 3 $I_y = 11$, откуда в соответствии с (6) определяем $I \approx 2\,800$ *а*.

Литература

1. Кузнецов Р. С., Аппараты распределительных устройств низкого напряжения, Госэнергоиздат, 1962.

2. Крымский Г. А., Об эквивалентности испытаний предохранителей на переменном и постоянном токе, «Вестник электропромышленности», 1959, № 3.

3. Baxter H. W., Calculated Curves of Inductive Energy of Start of Arcing in Fuses, London, 1950.

[11.9.1970]

✧ ✧ ✧

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

может быть использована для вычисления плотности тока униполярной короны между плоскопараллельными электродами:

$$j = Pl\left(\frac{U_0}{U}\right)\frac{9\varepsilon k U (U-U_0)}{8h^3}, \qquad (11)$$

где h — расстояние между электродами.

В некоторых случаях могут быть использованы приближенные формулы:

$$C_{y_0}\left(\frac{R}{r}\right)\approx\left(1+\frac{1{,}04}{\frac{R}{r}-1}\right)^3; \qquad (12)$$

$$S_{p_0}\left(\frac{R}{r}\right)\approx$$

$$\approx\begin{cases}3\left(\frac{R}{R-r}\right)^3-1{,}45\left(\frac{R}{r}-1\right)^{-1{,}71}-2 \text{ при } \frac{R}{r}\leqslant 2;\\ \left[1-1{,}12\sqrt{\frac{r}{R}}+0{,}1\left(\frac{r}{R}\right)^3\right]^{-2} \text{ при } \frac{R}{r}\geqslant 2;\end{cases} \qquad (13)$$

$$C_y\left(\frac{R}{r},\ \frac{U_0}{U}\right)\approx a^3\left[1+(b-1)\frac{U_0}{U}+\right.$$

$$\left.+0{,}9b(1{,}85-b)\frac{U_0}{U}\left(1-\frac{U_0}{U}\right)\right], \qquad (14)$$

где $a=1+1{,}04\Big/\left(\frac{R}{r}-1\right)$; $b=4/\ln\left(\frac{R}{r}+9\right)$.

Ошибка при использовании формулы (12) не превышает 0,5% (в области $R\geqslant 21\ r-0{,}1\%$), а при использовании формулы (13) не превышает 0,15% (в области $R\geqslant 2\ r-0{,}1\%$). Поправки в процентах к формуле (14) указаны в таблице. В этой же таблице показаны поправки в процентах к приближенным формулам Тиходеева [Л. 2] и Таунсенда, которые соответственно равносильны выражениям:

$$C_y\left(\frac{R}{r},\ \frac{U_0}{U}\right)\approx\left(1-\frac{U_0}{U}\right)[1+c+c(1+c)\ln(1+1/c)], \qquad (15)$$

где

$$c=\frac{2U_0}{(U-U_0)\ln\frac{R}{r}};$$

$$C_y\left(\frac{R}{r},\ \frac{U_0}{U}\right)\approx\frac{4}{\ln\frac{R}{r}}. \qquad (16)$$

Расчетная формула	U_0/U	Поправки к расчетным формулам, %					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
(14)	$R/r=1$	0,0	1,1	1,5	1,8	2,1	2,3
	10	0,2	—0,6	—1,7	—2,2	—2,2	—2,4
	10^2	0,0	0,3	—1,4	—1,9	—1,0	—1,2
	10^3	0,0	0,8	—0,6	—0,7	0,9	—0,2
	10^4	0,0	0,9	0,0	0,4	2,3	0,0
	10^6	0,0	1,0	0,9	2,0	4,6	0,0
	∞	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(15)	$R/r=1$	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	10	39,1	20,5	17,3	15,0	11,7	5,9
	10^2	3,2	1,8	3,2	4,5	4,7	0,1
	10^3	0,3	0,8	2,1	3,6	4,7	0,0
	10^4	0,0	0,6	1,6	3,1	4,5	0,0
	10^6	0,0	0,3	1,1	2,3	4,1	0,0
	∞	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(16)	$R/r=1$	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	10	—19,9	—7,2	1,1	6,2	8,1	5,9
	10^2	18,8	30,2	31,7	27,6	18,1	0,1
	10^3	73,2	78,5	70,6	55,9	34,3	0,0
	10^4	130,3	126,7	108,8	83,4	49,8	0,0
	10^6	245,4	222,1	183,5	136,4	79,5	0,0
	∞	∞	∞	∞	∞	∞	—

Подробный вывод представленных формул можно найти в [Л. 3], где дополнительно рассмотрены все предельные режимы и представлены четырехзначные таблицы функции C_y и S_p. В этой работе формула Тиходеева ошибочно приписана Дюпюи, который фактически лишь цитировал результат Н. Н. Тиходеева [Л. 2].

Литература

1. Попков В. И., К теории униполярной короны постоянного тока, «Электричество», 1949, № 1.

2. Тиходеев Н. Н., Дифференциальное уравнение униполярной короны и его интегрирование в простейших случаях, «Журнал технической физики», 1955, т. 25, № 8.

3. Таммет Х. Ф., Вольт-амперные характеристики идеальной униполярной квазикороны, Ученые записки Тартуского государственного университета, вып. 239, 1969.

[3.7.1970]

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ЭНЕРГИЯ»

Теоретические основы электротехники. Под ред. Г. И. Атабекова. В 3-х ч. Ч. I. **Атабеков Г. И.** Линейные электрические цепи. Учебник для вузов. Изд. 4-е. 1970. 592 с. 1 р. 29 к. В перепл.

Теоретические основы электротехники. Под ред. Г. И. Атабекова. В 3-х ч. Ч. 2. **Атабеков Г. И., Тимофеев А. Б., Хухриков С. С.,** Нелинейные цепи. Учебник для вузов. Изд. 3-е, испр. 1970. 232 с. 64 к. В перепл.

Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. 1970. 432 с. 1 р. 58 к. В перепл.

Виноградов Н. В. Производство электрических машин. Учебное пособие для студентов специальности «Электрические машины и аппараты» высших учебных заведений. 1970. 288 с. 1 р. 50 к. В перепл.

Дусавицкий Ю. Я. Магнитные стабилизаторы постоянного напряжения. 1970. 88 с. (Б-ка по автоматике. Вып. 403). 31 к.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Хроника

Борис Алексеевич КОНСТАНТИНОВ

(К 70-летию со дня рождения)

20 сентября 1970 г. исполнилось 70 лет со дня рождения и 50 лет производственной и научно-педагогической деятельности доктора технических наук, профессора Ленинградского инженерно-экономического института имени Пальмиро Тольятти Бориса Алексеевича Константинова, крупного специалиста в области электроэнергетики.

В 1925 г. Б. А. Константинов окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) и был направлен на работу на завод «Красный путиловец» (ныне Кировский завод), где проработал 12 лет заместителем начальника электроцеха и заведующим электроустановками.

В 1937 г. он перешел в Ленэнерго на должность начальника технического отдела Энергосбыта. В 1942 г. Б. А. Константинов работал начальником электробюро на машиностроительном заводе в Казани, а в начале 1943 г. был направлен на работу в Госплан СССР (Москва), где в течение 6 лет занимал должность начальника сектора производства и распределения электроэнергии.

В 1949 г. Борис Алексеевич был откомандирован на прежнюю работу в Ленинград. Как и в предвоенные годы, наряду с производственной работой он вел педагогическую в Электротехническом и Политехническом институтах, где читал специальный курс по эксплуатации электрооборудования промышленных предприятий.

В 1953 г. Б. А. Константинов защитил кандидатскую диссертацию, а в 1954 г. ему было присвоено ученое звание доцента. С этого времени он работает в Ленинградском инженерно-экономическом институте.

В 1963 г. он успешно защитил докторскую диссертацию, а в 1964 г. ему были присвоены ученая степень доктора технических наук и ученое звание профессора.

Основное направление научной деятельности Б. А. Константинова — повышение эффективности электрического хозяйства и улучшение эксплуатации электрооборудования в промышленности, рациональное использование электроэнергии, повышение надежности электроснабжения, комплексное решение вопросов компенсации реактивной мощности и нормализации качества электрической энергии. Эти вопросы отражены в 125 научных трудах Б. А. Константинова, изданных в виде монографий, брошюр и статей. Им подготовлено большое количество инженерно-экономических работников по энергетической специальности, под его руководством выполнен ряд кандидатских диссертаций на актуальные темы.

В течение 40 лет Б. А. Константинов ведет большую работу в научно-техническом обществе энергетики и электротехнической промышленности, является заместителем председателя секции электроснабжения промышленных предприятий.

V съезд научно-технического общества в 1968 г. присвоил ему звание почетного члена. Он является членом ученых советов ЛИЭИ и СЗПИ, научно-методического совета по электроснабжению промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства Министерства высшего и среднего специального образования СССР, заместителем председателя секции по промышленной энергетике Научного совета «Энергетика и электрификация» Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике.

За плодотворную производственную, научную, педагогическую и общественную деятельность Б. А. Константинов награжден орденом Красной Звезды, двумя орденами «Знак Почета» и медалями.

Желаем Борису Алексеевичу дальнейших успехов в его плодотворной научной и педагогической работе на благо нашей Родины.

Группа товарищей

Игорь Александрович БУДЗКО

(К 60-летию со дня рождения)

В декабре 1970 г. исполняется шестьдесят лет со дня рождения доктора технических наук, профессора, академика ВАСХНИЛ Игоря Александровича Будзко — крупнейшего советского ученого в области электрификации сельского хозяйства.

И. А. Будзко окончил в 1930 г. Московский электротехникум, а в 1933 г. без отрыва от производства — Московский институт механизации и электрификации сельского хозяйства.

В 1930 г. Игорь Александрович начинает свою трудовую деятельность во Всесоюзном научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства, где работает младшим и старшим научным сотрудником, руководителем лаборатории, директором института.

И. А. Будзко разработал основы теории и расчета сельских электрических сетей, провел основополагающие исследования по автоматизации сельских электроустановок, на базе которых созданы многочисленные устройства автоматики и релейной защиты. Совместно с А. Г. Захариным разработал смешанную трехфазно-однофазную систему распределения электроэнергии в сельском хозяйстве.

В 1937 г. И. А. Будзко защитил кандидатскую, а в 1949 г. докторскую диссертацию. Результаты работ, проведенных под руководством и при участии Игоря Александровича, обобщены в монографиях «Сельские электрические сети» (1963 г.), «Теоретические основы электроснабжения в сельском хозяйстве» (1964 г.), «Новые элементы автоматики в сельском хозяйстве» (в печати). Им опубликовано более 200 научных трудов.

С 1948 г. И. А. Будзко ведет педагогическую работу в Московском институте механизации и электрификации сельского хозяйства (Московском институте инженеров сельскохозяйственного производства) в качестве доцента, профессора, заместителя директора по учебной и научной работе. В настоящее время Игорь Александрович возглавляет кафедру основ автоматики и электроснабжения сельского хозяйства этого института. Результатом его педагогической деятельности является создание курса

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

сельских электрических сетей и первого учебника (совместно с В. Н. Степановым) по электрическим сетям сельскохозяйственного назначения.

И. А. Будзко постоянно заботится о росте научных кадров — под его руководством подготовлено более 20 кандидатов и докторов технических наук.

В 1956 г. И. А. Будзко был избран действительным членом Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина (ВАСХНИЛ); в 1960 г. он избирается академиком-секретарем отделения механизации и электрификации, а в 1961 г. — вице-президентом ВАСХНИЛ и занимает эти должности до 1965 г.

И. А. Будзко — член пленума ВАК, член президиума общества «Знание» РСФСР, член Центрального правления и председатель секции электрификации сельского хозяйства НТО энергетики и электропромышленности, председатель рабочей группы по сельской электрификации Европейской экономической комиссии ООН.

Многолетняя плодотворная научная и педагогическая деятельность И. А. Будзко отмечена орденами Трудового Красного Знамени, «Знак почета» и многими медалями.

Обширные знания, большая эрудиция и трудолюбие, разносторонняя деятельность, которую с неослабевающей энергией проводит Игорь Александрович, создали ему заслуженный авторитет и снискали глубокое уважение среди всех специалистов сельской электрификации.

Группа товарищей

О. В. СЛЕЖАНОВСКИЙ

(К 50-летию со дня рождения)

Ольгерд Владиславович Слежановский известен научно-технической общественности как талантливый инженер и ученый в области автоматизированного электропривода.

О. В. Слежановский родился 7 июля 1920 г. в Витебске. После окончания Московского энергетического института в 1945 г. он начал свою инженерную и научную деятельность в институте ЦНИИЧермет, где им была успешно подготовлена диссертация. В 1951 г. О. В. Слежановскому была присуждена ученая степень кандидата технических наук.

В 1959 г. О. В. Слежановский был приглашен на работу во ВНИИЭлектропривод Министерства электротехнической промышленности. На протяжении ряда лет он занимался исследованием и разработкой новых систем управления электроприводами прокатных станов. С его участием были созданы и внедрены системы управления электроприводами блюмингов, слябингов и листовых станов горячей прокатки на Кузнецком и Магнитогорском металлургических комбинатах, Коммунарском и других металлургических заводах СССР и стран социалистического содружества.

В 60-е годы под руководством и при непосредственном участии О. В. Слежановского впервые в СССР создана и внедрена серия унифицированных полупроводниковых блоков и устройств аналогового и дискретного действия для систем управления электроприводами различных отраслей народного хозяйства.

В 1969 г. О. В. Слежановский успешно защитил диссертацию на ученую степень доктора технических наук.

О. В. Слежановский является автором 40 опубликованных научных работ и 8 изобретений. Его монография «Электропривод реверсивных прокатных станов» и «Реверсивный электропривод постоянного тока» широко известны инженерной и научной общественности в Советском Союзе и за рубежом.

В настоящее время О. В. Слежановский, заместитель директора ВНИИЭлектропривод по научной работе, возглавляет такие важные направления развития электропривода, как создание мощных тиристорных электроприводов, развитие унифицированных средств и систем управления и применение вычислительных машин в автоматизированном электроприводе.

Поздравляем Ольгерда Владиславовича с 50-летним юбилеем, желаем ему здоровья и дальнейших творческих успехов.

Группа товарищей

ДВАДЦАТЬ ПЯТЬ ЛЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЭИ

В декабре 1970 г. исполнилось 25 лет динамической модели электрических систем Московского энергетического института, которая в настоящее время является крупной научно-исследовательской лабораторией. За 25 лет на динамической модели были изучены такие проблемы, как выбор комплекса автоматического регулирования возбуждения генераторов для электропередачи 500 *кв* Куйбышев — Москва, выбор мероприятий по повышению статической и динамической устойчивости электрических систем, отработка различных типов релейных защит для электропередач сверхвысокого напряжения.

Основное научное направление лаборатории связано с кибернетическим подходом и исследованием, сочетающим методы физического и математического моделирования с использованием современных средств вычислительной техники.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УКАЗАТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ, ПОМЕЩЕННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» в 1970 г.

I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА		
Лурье С. И. — О точности измерений градиентов двойными зондами при математическом моделировании полей	2	52
Городский Д. А. — К расчету переходных процессов в электрических цепях при несовместных начальных условиях	2	81
Майергойз И. Д. — Расчет поверхностного эффекта в ферромагнитных телах, покрытых проводящим слоем	2	83
Костицына К. В. — Графический способ расчета магнитной цепи с постоянным магнитом при последовательно-параллельном соединении ее участков	3	81
Бодяшкин А. И. — Магнитная система без стали для создания приближенно равномерного магнитного поля	4	79
Гурницкий В. И., Бычков Л. П. — Расчет магнитных цепей электромагнитов постоянного тока методом относительных единиц	4	82
Кузнецов И. Ф., Цицикян Г. Н. — Электромагнитные силы, действующие в экранах пофазно-экранированного трехфазного токопровода	5	64
Кузнецов И. Ф., Цицикян Г. Н. — Электромагнитные силы в токопроводе с общим экраном кольцевого сечения при трехфазном коротком замыкании	6	58
Ионкин П. А., Мельников И. А. — О некоторых терминах и обозначениях, применяемых в теории электрических цепей	6	61
Иванков Б. Ф., Панченко Б. Я. — Построение моделей электромеханических систем с помощью сигнальных графов	6	70
Тумаиьян Г. Т. — К расчету электрических цепей с полупроводниковыми термочувствительными сопротивлениями	6	81
Бурдиашвили М. Ш., Прудковский Г. П. — О влиянии конечных размеров токоведущих проводников на магнитное поле высокочастотного индуктора	6	82
Каркер Я. И., Коган М. Г. — Распределение плотности тока при индукционном нагреве тел вращения	9	59
Болдырев Е. А., Воротникова Л. И., Епифанова Г. С. — Физическое и математическое моделирование процесса восстановления обратного напряжения на последовательно соединенных вентилях	9	66
Коген-Далин В. В. — Электрическое моделирование систем с постоянными магнитами	10	72
2. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА		
Беляков Н. Н., Волкова О. В., Рашкес В. С., Фотин В. П. — Исследование внутренних перенапряжений при работе электрооборудования опытно-промышленной электропередачи 750 *кв*	1	8
Иванов В. А., Каленик В. А. — Динамическая устойчивость межсистемной электропередачи, регулируемой мощными паротурбинными блоками	1	16
Вепиков В. А., Анисимова Н. Д., Круг Н. К. — К вопросу об определении собственных и взаимных проводимостей при вариации параметров части схемы замещения системы или объединения двух систем в одну	1	19
Камша М. М., Климков А. К. — Модель сложной электрической системы для исследования электромагнитных переходных процессов	1	21
Кучумов Л. А., Черновец А. К., Ярвик Я. Я. — Математическое моделирование управляемых реакторов большой мощности	1	26
Михайлов В. В., Эдельман В. И. — Надежность сложных систем электроснабжения промышленных предприятий	1	31
Коструба С. И. — Новый способ выравнивания электрических потенциалов в зоне заземления электроустановки	1	77
Арвелидзе Р. Д., Червоненкис Я. М. — Нормы и режимы внутриквартирного потребления электроэнергии на бытовые нужды в условиях Закавказья	1	80
Адонц Г. Т. — Алгоритм расчета установившегося режима энергосистемы с учетом нелинейных характеристик генераторов и нагрузок	2	10
Злотник С. Г. — Применение метода множителей Лагранжа для определения состава агрегатов работающих электростанций	2	14
Анненков В. З. — Расчет импульсного сопротивления противовесов	2	19
Гамм А. З. — О нумерации узлов при расчетах установившихся режимов электрических систем методом Ньютона — Рафсона	2	59
Зейлидзон Е. Д., Лугинский Я. Н., Мамиконянц Л. Г., Портной М. Г., Совалов С. А., Хачатуров А. А. — Противоаварийная автоматика в энергосистемах СССР	3	1
Тевосян Т. А. — В. И. Ленин и электрификация сельского хозяйства	3	8
Бургсдорф В. В., Овсеенко В. В., Рашкес В. С. — Применение деревянных опор на линиях электропередачи	3	14
Межалс Л. В., Орехов Л. А., Фабрикант В. Л., Смирнова Т. В. — Универсальная продольная дифференциальная защита коротких ВЛ	3	22
Иванов А. В., Ларионов В. П. — Распределение заряда в зоне ионизации при поверхностном разряде	3	71
Константинов Б. А., Багиев Г. Л. — Об ущербе при понижении качества напряжения	3	77
Баркан Я. Д. — Несимметрия в сетях низкого напряжения	3	78
Алексенко Г. В. — Состояние и перспективы развития электроэнергетики и электропромышленности	4	1
Вепиков В. А., Головицын Б. И., Ковалев В. Д., Рокотян И. С., Федоров Д. А. — Анализ погрешности при решении с помощью ЦВМ задач оптимального распределения нагрузок	4	29
Каринский Ю. И. — Статистический расчет торможения токовых дифференциальных защит многоконцевых электроустановок	4	36
Лазебник А. И. — Определение затрат на топливо с учетом пуска и останова агрегатов	5	1
Безруких П. П., Веселов А. Д., Морозова Ю. А. — Исследование на АВМ режимов комбинированной вентильной системы возбуждения	5	9
Ильиничнин В. В. — Методы расчета передаточных функций сложных электрических цепей	5	12
Либкинд М. С., Маневич А. С., Сорокин В. М — Длинная линия передачи с управляемыми реакторами на приемном конце	5	78
Белоусов И. В. — Автоматизированная аналоговая модель статического компенсатора реактивной мощности	5	81
Ермаков Г. В. — Этапы строительства атомных электростанций в Советском Союзе	6	1
Азарьев Д. И., Белоусов И. В. — Пропускная способность дальних электропередач со статическими компенсаторами	6	4
Берлянд Э. Г., Гурарий М. И., Ершевич В. В., Лапицкий Ю. С., Окин А. А., Портной М. Г., Хачатуров А. А. — Режимы работы, устойчивость и автоматика электропередачи 750 *кв* Донбасс—Днепр — Винница — Львов	6	7

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
Ирлахман М. Я., Китушин В. Г. — О возможности увеличения длины нетранспонированных воздушных линий электропередачи	6	13
Вилесов Д. В., Целемецкий В. А. — Вероятностная оценка величин ударных токов короткого замыкания в автономных электроэнергетических системах	6	16
Веретенников Л. П., Целемецкий В. А. — Общий алгоритм исследования несимметричных режимов в автономных энергетических системах	6	20
Меллер К. Ю. — Статистический расчет времени релейной защиты	6	27
Поляков В. Е., Шарнин Ю. К. — Логический синтез групповых телезащит подстанций без выключателей высшего напряжения	6	69
Матевосян П. А., Аветикова Е. Г., Согомонян С. С. — Об одном методе моделирования электрической сети при построении дискретно-моделирующего устройства многомашинной электрической системы	6	73
Шабуров М. А. — О расчетном режиме для промежуточных опор линий электропередачи	6	75
Константинов Б. А., Лосев Э. А. — Надежность электроснабжения потребителей	6	75
Левшунов Р. Т., Вишняков Р. Д., Новиков А. А. — Грязеразрядные характеристики изоляторов при комбинированном воздействии напряжения 50 *гц* и коммутационных перенапряжений	6	76
Соколов Н. И., Миронов В. Г., Щедрин В. А. — Искусственные индуктивности для расчетных моделей переменного тока	6	78
Михневич Г. В., Раздин А. Е., Фиалков В. М., Курочкин А. Н. — Повышение устойчивости сверхмощных турбогенераторов с помощью управляемых реакторов	7	51
Литкенс И. В. — Разделение плоскости настроечных параметров АРВ сильного действия синхронной машины	7	56
Кузьмин Я. Ф., Ванаг А. А. — Расчет сложных замкнутых электрических сетей 330—750 *кв* методом узловых проводимостей	7	62
Маркович И. М., Лазебник А. И. — Использование метода ветвей и границ в некоторых энергетических оптимизационных задачах	7	65
Гук Ю. В., Рудакова Р. М. — Определение математического ожидания числа аварийных отключений систем электроснабжения	7	71
Джуварлы Ч. М., Миронов Г. А. — Феррорезонансные перенапряжения при кратковременных неполнофазных режимах	7	80
Фигурнов Е. П. — Реле сопротивления с составными характеристиками	7	83
Веников В. А., Шиель Р. В. — Моделирование и автоматизация процесса проектирования электроэнергетических объектов	8	1
Бережной А. В., Поспелов Г. Е. — О технико-экономической методике предварительного выбора номинального напряжения электропередачи с учетом ее надежности	8	6
Поляков В. Е., Скутельников В. И., Федотов В. П. — Комбинированные устройства трехфазного и однофазного автоматического повторного включения	8	9
Разевиг Д. В. — Начальные напряжения газового разряда в электрических полях различной конфигурации	8	14
Якобс А. И. — Приведение многослойной электрической структуры земли к эквивалентной двухслойной при расчете сложных заземлителей	8	19
Урии В. Д., Тотладзе З. Д., Злотник С. Г. — Уточнение методики оптимизации режима энергосистемы	8	84
Берлянд Э. Г., Гурарий М. И. — Влияние промежуточной нагрузки на изменение токов и мощности межсистемной связи при асинхронном режиме	8	86
Максименко Н. Н., Асеев Г. Г. — Расчет скважинных заземлителей	9	44
Разевиг Д. В., Соколова М. В. — Первый коэффициент ионизации простейших газов и газовых смесей	9	48
Каменева В. В. — Определение местоположения главных понизительных или распределительных подстанций промышленных предприятий	9	85
Коструба С. И. — Математическое моделирование систем обеспечения электробезопасности	9	87
Грек Г. Т., Петров С. Я. — Дифференциальная защита шин с торможением	10	42
Поляков В. Е., Жуков С. Ф. — Тестовый контроль устройств релейной защиты	10	48
Воронина А. А., Мишкин В. М., Рябкова Е. Я., Якобс А. И. — Сопротивление искусственных заземлителей опор линий электропередачи в неоднородной земле	10	58
Головкин П. И. — Прогнозирование полезного отпуска электроэнергии по энергосистеме	10	76
Вартанов Г. Л., Понкратов Б. К. — Определение расчетных групповых нагрузок лифтовых установок методами вероятностного моделирования	10	88
Страхов С. В., Великовский В. А., Григорович Я. И. — Динамика автономной системы электроснабжения с пневмомеханическим приводом постоянной скорости	11	31
Рашкес В. С., Гальперина М. О., Попов С. М., Кошталюк Р., Ивановский А., Кмечь А. — Перенапряжения на реакторе и трансформаторе 500 *кв* при коммутациях реактора выключателем ВВ-500	11	44
Караев Р. И., Шенкман Л. З. — Классический метод расчета колебаний токов и напряжений при отключении длинной линии	11	50
Гумановский Б. Я., Плесков В. И., Воропаев С. И., Поскробко А. А. — Тиристорный источник реактивной мощности	11	55
Разевиг Д. В., Соколова М. В. — Начальные напряжения зажигания разряда в простейших газах и их смесях	11	66
Джуварлы Ч. М., Дмитриев Е. В., Джафаров Э. М. — Исследование перенапряжений на переключательном пункте при включении линии 500 *кв* с учетом поверхностного эффекта в земле	11	72
Вайнер А. Л. — Стекание тока с железобетонных подножников в плохопроводящих грунтах	11	74
Константинов Б. А., Зайцев Г. З., Пиковский А. А. — Графо-аналитический метод оценки эффективности систем электроснабжения по режиму напряжения	11	80
Непорожний П. С. — Осуществление ленинского плана электрификации	12	1
Веников В. А. — Развитие энергетики и социальный прогресс в свете ленинских идей о значении электрификации	12	5
Давыдов В. Г., Куприянов В. Е., Строганов Р. П., Туккель И. Л., Юревич Е. И. — Цифровой регулятор частоты и перетоков активной мощности для объединенных энергосистем	12	14
Лысенко Е. В. — Способ построения быстродействующего реле с одной подведенной величиной	12	19
Майкопар А. С., Глебов Э. С., Вольпов К. Д. — Методика оценки работоспособности линейной изоляции по влагоразрядным характеристикам	12	62
Шереметьев В. Г. — Прогнозирование электропотребления в сельском хозяйстве на основе закономерностей его роста в различных странах	12	67
Таммет Х. Ф. — Вольт-амперные характеристики униполярного коронного разряда	12	82

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
Музыка Н. А., Музыка Ю. А. — К расчету электрических параметров гистерезисного электродвигателя, работающего при несимметричном питании	1	34

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
Алексеев А. Е., Гнедин Л. П., Ипатов П. М., Костенко М. П., Лютер Р. А. — Развитие турбо- и гидрогенераторостроения в СССР	2	1
Копылов И. П., Ильинский Н. Ф., Кузнецов Н. Л. — О применении методов планирования эксперимента к задачам анализа и синтеза электрических машин	2	24
Юхов В. В. — Полупроводниковый импульсный регулятор возбуждения мощных синхронных двигателей	2	28
Рабинович И. Н., Шубов И. Г., Эйбшиц А. Г. — О предельной мощности быстроходных синхронных турбогенераторов повышенной частоты	2	69
Вольдек А. И., Янес Х. И. — Некоторые основные вопросы теории индукционных магнитогидродинамических машин с жидкометаллическим рабочим телом	3	32
Партс Р. Р. — Об определении эквивалентных сопротивлений индукционных машин со сплошной вторичной системой	3	39
Дартау А. А. — Общая методика составления схем многофазных двухскоростных обмоток	3	43
Здрок А. Г., Салютин А. А., Мохов В. В. — Электромагнитные процессы в системе самовозбуждения генераторов с магнитными усилителями	3	47
Лоханин А. К. — Расчет перенапряжений внутри катушки в обмотке трансформатора	3	53
Зборовский И. А., Накрохин В. Г. — О регулировании возбуждения крупных синхронных двигателей	4	40
Бабис Р. С., Хубларов Н. Н. — Проектная оптимизация трансформаторов на ЦВМ	4	43
Талалов И. И., Мишуков В. К., Горшков А. П., Щелыкалов Ю. Я. — Уточненный расчет частотных и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин	4	47
Орлов Е. Г., Булин-Соколов И. В. — Установившиеся процессы в импульсной системе регулирования электрических машин	4	54
Крайз А. Г., Хубларов Н. И., Якуб Ю. А. — Оптимальные исполнения силовых двухобмоточных трансформаторов и схемы крупных понижающих подстанций 110 *кв*	5	4
Черемисов И. Я., Теиетко Н. И., Корнилов В. И. — Расчет поля магнитной индукции и характеристики намагничивания спинки статора электрической машины	5	28
Кирюхин В. П. — Аналитическое определение электромагнитных параметров тонкостенных немагнитных экранов индукционных электрических машин	5	32
Лангеи А. М. — О влиянии нелинейности магнитного сопротивления ротора на характеристики гистерезисного двигателя	5	37
Фильц Р. В., Глухивский Л. И. — Основные положения магнитно-нелинейной теории явнополюсной синхронной машины	6	30
Колесов Ю. А., Левкович М. И., Свечарник Д. В. — Особенности проектирования бесконтактных сельсинов	6	50
Васильевский С. П., Манн Э. Г., Шулаков Н. В., Земсдорф Г. К. — Каскадные системы пуска асинхронных короткозамкнутых электродвигателей	8	23
Игнатов В. Е., Ковальков Г. А. — Исследование форсировки гашения поля для турбогенераторов с бесщеточным возбуждением	8	27
Прудков М. Л. — О динамике систем зависимого регулирования поля двигателей постоянного тока	8	31
Попов Д. А. — Электромагнитный момент синхронного реактивного двигателя с катящимся ротором и вращающимся магнитным полем	8	35
Булин — Соколов И. В., Миронов С. М. — Исследование дискретных систем автоматического регулирования частоты вращения микродвигателей постоянного тока	8	40
Ратиер Н. И. — Метод средних потерь для электродвигателей со случайным режимом работы	8	77
Логинов С. И., Любомирова Г. Б. — Исследование пусковых режимов синхронных бесщеточных двигателей	8	79
Куликов А. А. — Приближенный метод расчета рабочих характеристик магнето	8	88
Карпов Г. В. — Метод экспериментального исследования синхронной машины в двух осях магнитной симметрии	9	1
Пластун А. Т., Сиунов Н. С. — Бесщеточная система возбуждения синхронных машин с каскадным асинхронно-синхронным возбуждением	9	8
Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А. — К проектированию асинхронных исполнительных двигателей с минимальной электромеханической постоянной времени	9	13
Ефименко Е. И. — Метод анализа и расчета характеристик многофазной асинхронной машины с пространственной несимметрией обмоток	9	18
Лоханин А. К. — Расчет перенапряжений в обмотках трансформаторов с вводом или нейтралью в середине высоты	10	56
Глебов И. А., Логинов С. И., Любомирова Г. Б. — Исследование перенапряжений на вентилях мощных турбогенераторов в асинхронном режиме и при самосинхронизации	10	85
Файнберг М. Ю. — Компенсационный способ уменьшения пульсаций напряжения тахогенератора	10	86
Абрамович Б. И., Бирюков Ю. А., Вадатурский В. М., Лагутин В. И., Глебов И. А. — Система возбуждения синхронных машин с использованием преобразователей с двусторонней проводимостью	11	1
Березовский А. А., Кравченко А. Н., Нижник Л. П. — Расчет электромагнитного поля и добавочных потерь в концевых частях турбогенераторов	11	6
Неделку В. Н. — Особенности преобразования энергии в реактивных синхронных двигателях	11	11
Шаров В. С., Нестерин В. А. — Годографы токов и напряжений индукторного двигателя в переходном режиме	11	15
Толкачев Э. А. — Схемы замещения синхронных машин	11	19
Вольдек А. И., Лазаренко Л. Ф. — Продольные краевые эффекты в линейных индукционных магнитогидродинамических машинах	11	26
Каганов З. Г., Самойлов Е. М. — Приближенные методы расчета волнового напряжения в нагруженной обмотке электрической машины	11	83
Урусов И. Д., Симоновский В. И. — Анализ тока асинхронного двигателя при пульсирующей нагрузке	12	43
Карпенко Б. К. — Геометрия якоря с печатной обмоткой	12	46
Рагозин А. А., Смоловик С. В. — Влияние дополнительных электромагнитных моментов на движение ротора гидрогенератора при несимметричных коротких замыканиях	12	70

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, КАБЕЛИ, ПРОВОДА

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
Белкин Г. С. — Влияние теплофизических свойств материала контактов на величину электрической эрозии	2	56
Сапожников А. В. — Уровни изоляции электрооборудования на напряжение 750 *кв* переменного тока	2	61
Ренне В. Т., Дарбинян Ш. А. — Влияние электризации синтетической пленки при изготовлении намотанных конденсаторов	2	74
Стрельцов Б. Н., Радовицкий В. Т. — Частотные характеристики волокон	2	78
Месенжник Я. З., Попов В. А. — О корреляции электрофизических, физикомеханических и других свойств полимерных диэлектриков при воздействии высоких давлений	2	86

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
Рывкин А. М. — Расчет нагрева торцевого контакта короткой дугой при отключении переменного тока	3	65
Ренне В. Т., Чатинян Ю. С., Акопян В. А., Мовсесов Ф. А. — Исследование основных свойств металлобумажных конденсаторов для люминесцентных светильников	3	68
Стрельцова А. П., Соя Г. П., Тольский Г. А. — Электрическая прочность трансформаторного электрокартона	3	75
Афанасьев В. В., Грейнер Л. К. — Новые направления в развитии аппаратов высокого напряжения	4	22
Рывкин А. М. — Искрение главных контактов коммутационных аппаратов	4	67
Мантров М. И. — Расчет напряжения теплового пробоя твердого диэлектрика	4	74
Реймерс А. В., Цветкова А. А., Иванов Ю. П., Жильцов В. П. — Коммутация цепи индуктивного накопителя энергии с помощью вакуумного выключателя	4	84
Новелла Н. В., Зотов Б. И. — Устойчивость релейно-контактной аппаратуры к воздействию ударов и вибраций	5	17
Сомов В. А. — Дугогасящая катушка с самонасыщением	5	20
Пястолов В. И., Петров О. А., Панова Е. Д. — Метод расчета дугогасящих катушек с продольным подмагничиванием	5	24
Левитов В. И., Ляпин А. Г., Семенов Ю. Н., Тилик В. Г. — Электрическая прочность водорода в однородном поле при высоком давлении	5	68
Тареев Б. М., Лернер М. М., Лернер Т. И. — К расчету тепловых потерь в электрическом конденсаторе при воздействии несинусоидального напряжения	5	72
Залесский А. М., Полтев А. И., Виленчук А. Л. — Электрическая прочность элегаза в поле коаксиальных электродов	5	83
Карцев В. Л. — Реле сопротивления с эллиптической характеристикой срабатывания	5	86
Бажов В. Ф., Дмитревский В. С. — Исследование отказов полиэтиленовой изоляции при импульсном напряжении	5	88
Варшавский Д. С. — Перегрузочная способность конденсаторов повышенной частоты	5	90
Буткевич Г. В., Дегтярь В. Г. — Об эффективности использования активных материалов в нагрузочных реостатах	6	43
Витохин А. Д., Вольф Е. М. — Тепловой пробой твердых диэлектриков при воздействии непрерывного ядерного излучения	6	55
Левиуш А. И., Сапир Е. Д. — Быстродействующее пусковое реле сопротивления	6	66
Афанасьев В. В., Крастина А. Д. — Новые методы измерения напряжения в высоковольтных цепях	7	5
Болотин И. Б. — Измерение напряжения при коммутационных испытаниях высоковольтного аппарата с помощью трансформатора напряжения	7	12
Афанасьев В. В., Зубков В. П., Крастина А. Д. — Оптико-электронные трансформаторы тока	7	18
Добрянская Н. А. — О восстанавливающейся прочности между контактами электрических аппаратов	7	24
Каплан В. В., Нашатырь В. М., Янчус Э. И. — Синтетические испытания выключателей на напряжение 110 *кв* и выше при токах отключения до 63 *ка*	7	26
Крижанский С. М. — Влияние электродов на характеристики дугового разряда	7	30
Бронштейн А. М., Янбухтина С. Д. — Влияние шунтирующих дуговой промежуток емкостей и сопротивлений на отключающую способность	7	32
Кукеков Г. А., Каплан Г. С., Ветюкова Л. С. — Влияние торможения потока газа в выхлопной части дутьевой системы дугогасителя на параметры дуги	7	35
Жаворонков М. А., Марек Б. А. — Дугостойкость металлокерамических контактных материалов	7	37
Залесский А. М., Полтев А. И., Чанкветадзе Д. А. — Электрическая прочность дугового промежутка при электромагнитном гашении дуги в элегазе	7	38
Бронштейн А. М., Иоффе Ю. И. — Исследование макета вентильно-механического отключающего устройства высокого напряжения	7	41
Заруди М. Е. — Характеристики ствола дуги в щелевом канале	7	46
Ильиничнин В. В. — Переходные режимы работы трансформаторов тока при смешанной нагрузке	7	75
Соколов В. И., Горбенко В. Л. — Бесконтактный индуктивный датчик малых перемещений	7	86
Дроздов А. Д., Гармаш В. А. — Улучшение работы трансформаторов тока в переходном режиме	7	87
Журавлев В. С., Блинов А. А., Корнев А. Е., Джаниашвили Д. А. — Контактное сопротивление электропроводных резин	7	90
Левинтов С. Д., Борисов А. М., Стасяк В. И. — Знакочувствительный магнитоупругий измеритель момента	8	90
Фабрикант В. Л. — Выбор уставок второй ступени дистанционных органов, выполненных на базе КРС-121	8	91
Варшавский Д. С. — О факторах, влияющих на срок службы бумажных конденсаторов при переменном напряжении	9	54
Таршис А. С. — Применение индуктивных накопителей энергии для повышения включающей способности выключателей высокого напряжения	9	76
Колесов С. Н. — Зависимость электрической прочности полимерных пленок от размера сферолитной структуры	9	84
Бертинов А. И., Гончаров М. В. — Уравнение зарядной кривой для конденсатора, питаемого выпрямленным напряжением	10	37
Базелян Э. М., Садыхова Е. А. — Ориентировка длинной искры	10	63
Стогний Б. С., Рогоза В. В., Черненко В. А. — Условия подобия и физическое моделирование трансформаторов тока в установившемся и переходном режимах	10	68
Кузнецов М. В. — Схема замещения импульсной нагрузки и расчет стационарного процесса в цепи зарядного источника	11	60
Желтов К. А. — К теории импульсного трансформатора напряжения с сильной связью и незамкнутым ферромагнитным сердечником	11	63
Виленчук А. Л. — Влияние материалов и чистоты поверхности коаксиальных электродов на электрическую прочность элегаза	11	70
Пеккер И. И., Самсонов Б. Б. — Расчет втяжных электромагнитов без магнитопровода методом интегрирования по источникам поля	11	84
Шахтахтинский Т. И. — Разряд в неоднородном электрическом поле вдоль поверхности твердого диэлектрика в гелии при воздействии импульсного напряжения	11	86
Розенкранц А. С. — Методы расчета нелинейных электрических полей в ионизированном облучением газе	12	57
Порошина М. Н. — Характеристики потерь в различных марках горячекатаной электротехнической стали в сильных переменных магнитных полях	12	76
Шестаков И. А., Зайдман И. Д., Серебрянников А. М., Штовбанько Т. Н. — Полистная неоднородность магнитных свойств холоднокатаной, текстурованной электротехнической стали	12	78
Крымский Г. А. — К расчету энергии, выделяющейся в предохранителе при отключении тока короткого замыкания	12	80

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.

5. ЭЛЕКТРОПРИВОД

Морозов К. С. — О предельной динамической ошибке в системах стабилизации скорости двигателей постоянного тока	1	37
Певзнер Е. М., Яуре А. Г., Шукалов В. Ф. — Некоторые вопросы разработки частотно-регулируемого электропривода судовых грузоподъемных механизмов	1	44
Шубенко В. А., Кулесский Р. А. — Статистический критерий качества работы электропривода постоянного тока	1	48
Назаров Г. И., Быстрицкий Д. Н., Златковская М. А. — Расчет статических характеристик регулируемых электроприводов переменного тока с непрерывными обратными связями	1	52
Неймарк В. Е., Пистрак М. Я. — О предельном быстродействии систем регулирования вентильного электропривода	1	55
Ломакин В. П. — Синтез оптимального управления экскаваторной электромеханической системы	2	37
Киклевич Н. А. — Электропривод угольных комбайнов в современных условиях	2	64
Тулин В. С. — По поводу статьи Н. А. Киклевича «Электропривод угольных комбайнов в современных условиях»	2	67
Дикушин В. И., Зусман В. Г., Найдис В. А. — Электрификация и автоматизация в станкостроении за годы Советской власти	4	15
Чернышев А. Н., Грушко В. Л., Прудков М. Л. — О демпфировании упругих колебаний автоматизированного электропривода постоянного тока	4	61
Климов В. П. — Электромеханические характеристики систем тиристорный преобразователь — двигатель постоянного тока последовательного возбуждения	5	43
Герцов С. М., Ивоботенко Б. А., Цаценкин В. К. — Динамические характеристики привода с магнитными экранированными муфтами	5	43
Винокуров В. К., Борисов К. Н. — Управление электроприводом постоянного тока со сложным характером нагрузки	8	55
Шубенко В. А., Шрейнер Р. Т., Мищенко В. А. — Оптимизация частотно-управляемого асинхронного электропривода по минимуму тока	8	23
Чиликин М. Г., Аракелян А. К., Афанасьев А. А. — Переходные процессы синхронной машины, работающей совместно с зависимым преобразователем частоты	10	7
Петров Л. П. — Учет насыщения и несимметрии статорных цепей при исследовании динамики асинхронных электроприводов	10	11
Лакс Б. М. — Расчет запаса напряжения в двукратноинтегрирующей системе регулирования скорости с учетом внутренней обратной связи по э. д. с. двигателя	10	16
Токарева В. Д. — Динамическая точность релейной следящей системы с быстродействующими электромагнитными муфтами	10	21
Морозов Е. Ф. — О синхронном электроприводе конусных дробилок 2200 вторичного дробления	10	80
Бычков В. П., Вега К. М. — Компенсация внутренней обратной связи двигателя постоянного тока в системах электропривода с подчиненным регулированием	11	36
Прудков М. Л. — Об инвариантных и автономных системах автоматического регулирования натяжений и скорости тонколистовой прокатки на реверсивном стане	12	38
Анхимюк В. Л., Ильин О. П. — Расчет корректирующих устройств вентильного электропривода с комбинированным регулированием	12	74

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ и др.

Альтгаузен А. П., Пережогин М. И., Свенчанский А. Д. — Современное состояние и пути развития электропечестроения в СССР	1	1
Степанов А. Д., Погарский Н. А., Регирер Л. Е., Аксенов М. И., Разин Н. В. — Дизель-электрическая трансмиссия с мотор-колесами	1	40
Дмитриев В. А., Ефремов И. С., Иванов И. И., Исаев И. П., Никифоров Б. Д. — Осуществление ленинской программы электрификации железнодорожного транспорта СССР	2	5
Чередниченко В. С. — Индукционные нагреватели с электромагнитными экранами	2	40
Буре И. Г., Шевченко В. В. — Входные фильтры статических преобразователей электрического подвижного состава постоянного тока	5	47
Тарнижевский М. В. — Расчет совместной электрозащиты от блуждающих токов подземных металлических сооружений при параллельной прокладке	5	57
Ефремов И. С., Лаптева Т. И. — Методика расчета надежности кремниевых выпрямительных агрегатов тяговых подстанций городского электрического транспорта	6	35
Куренный Э. Г. — Основы расчета электрической нагрузки группы дуговых электропечей	6	45
Майбога Б. А. — Анализ электромагнитных процессов в импульсном преобразователе постоянного тока	9	35
Беркович Е. И., Григорьев Ю. П., Донской А. В., Смородинов В. В. — Особенности работы тиристорных преобразователей частоты, предназначенных для питания электротермических установок	9	79
Феоктистов В. П. — Улучшение тяговых свойств электроподвижного состава при плавном автоматическом пуске	10	24
Ефремов И. С., Остренко В. С., Ольяк В. Д., Приходько Г. Н., Безруков Г. И. — Расчет нестационарного температурного поля силовых тиристоров	10	34
Кереселидзе А. Е., Барбахадзе М. М., Джаши Д. Р. — Об оценке качества работы фазопреобразовательных схем	10	83
Слухоцкий А. Е., Царевский В. В. — Анализ характеристик инвертора с встречно-параллельными вентилями и параллельной компенсацией реактивной мощности нагрузки	12	23
Тарнижевский М. В. — Повышение эффективности работы совместной противокоррозионной защиты подземных металлических сооружений	12	51

7. АВТОМАТИКА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Александров Ф. И., Сиваков А. Р. — Динамические характеристики стабилизаторов постоянного напряжения с широтно-импульсным регулированием	1	60
Марьяновский Д. И., Иванова М. И., Ленда Г. А. — Исследование автономных однофазных инверторов тока	1	66
Быков Ю. М., Вулис М. Л., Фурман В. Б. — Исследование загрузки вентилей преобразователей частоты без звена постоянного тока	1	72
Венедиктов Ю. П., Леонтьев Н. И., Репин О. М., Саймуков В. Н. — Транзисторный преобразователь для автоматического заряда серебряно-кадмиевых аккумуляторных батарей	1	82
Гринштейн Б. И., Жмуров В. П., Скороваров В. Е., Степанова В. Г., Толстов Ю. Г. — Расчет послекоммутационного периода в трехфазном мостовом полупроводниковом преобразователе при применении вентилей с лавинными характеристиками	2	32

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
Кадымов Я. Б., Кулиев З. Я. — О расчете переходных процессов в системе с распределенными параметрами и нелинейным элементом	2	44
Борцов Ю. А. — Структурные схемы нелинейных инерционных элементов с обобщенными параметрами	2	47
Ройзен С. С., Степе Ф. Ю., Панченко В. А., Саенко В. М. — Статические источники питания повышенной частоты на магнитных элементах	2	72
Лысенко Е. В. — Реагирующие элементы для измерительных органов релейной защиты и автоматики	3	26
Зборовский И. А. — Анализ динамики вентильных схем методом линеаризации разностных уравнений	3	57
Кощеев Л. Г., Третьяк Т. П. — Мощные автономные инверторы напряжения	3	61
Поляков В. Е., Скутельников В. И. — Фазочувствительный орган на магниторезисторах	3	80
Кулик В. Д. — Выбор емкости фильтра тиристорного инвертора	3	83
Березин С. Я. — Графо-аналитический метод построения амплитудно-фазовых характеристик систем автоматического управления и стабилизации	4	57
Попов Д. А. — Сравнительная оценка статических преобразователей постоянного тока в трехфазный переменный на транзисторах, работающих в ключевом режиме	4	69
Шнеерсон Э. М. — Анализ устройств с кольцевыми фазочувствительными схемами	4	77
Саврухин А. П. — Прибор для измерения времени выключения тиристоров	4	80
Мерабишвили П. Ф. — Операторный метод расчета переходных процессов в однофазных автономных инверторах	5	52
Васильев Д. В., Зубарев Ю. А., Мельцер М. И., Сабинин О. Ю. — Анализ нелинейных систем автоматического управления со случайными параметрами на основе асимптотических оценок	8	46
Аптер Э. М. — Исследование индуктивных схем выравнивания токов с учетом неодновременности включения тиристоров	8	59
Мелешкин В. Н., Завьялов М. П. — Частотные характеристики тиристорной схемы с емкостной коммутацией	8	63
Кутузов В. К. — Формирование управляющей части оптимальных по быстродействию замкнутых систем второго порядка с комплексными корнями	8	68
Жемеров Г. Г. — Метод анализа кривой выходного напряжения преобразователей частоты с непосредственной связью	8	71
Бурцев Э. Ф., Грехов И. В., Крюкова Н. Н. — Определение температуры *pnpn*-структуры тиристора во время прохождения импульса тока перегрузки	8	81
Куракин К. И. — Точный метод анализа систем автоматического регулирования на несущей переменного тока	9	27
Сакалас А. П., Жилинскас П. — Ю. П. — Транзисторный импульсный стабилизатор повышенного выходного напряжения	9	41
Лабунцов В. А., Нопираковский И., Булатов О. Г. — Системы управления вентильными преобразователями с одноканальным сдвигом противофазных импульсов	9	62
Синев В. С. — Трехэлементный взаимоиндуктивный преобразователь однофазной системы в симметричную трехфазную	9	72
Злобин Ю. П., Кессель Е. Л. — О возникновении помех в усилителях с отрицательной обратной связью по току	9	75
Калинкин Г. И. — Расчет коэффициента стабилизации транзисторных стабилизаторов напряжения	9	81
Загрядцкий В. И., Кобыляцкий Н. И. — Статический трехфазный утроитель частоты с вращающимся магнитным полем	9	82
Найдис В. А., Поляков Л. М., Шкловский Б. И. — Анализ силовых схем тиристорных преобразователей	10	29
Высочанский В. С. — Взаимокомпенсация энергии электромагнитных полей многофазной нагрузки	11	39
Тупиков А. Н., Турубинер А. Л., Зинченко В. М., Лагин Г. И., Савин А. И. — Тиристорный релейный элемент следящей системы	11	78
Никулин В. Б. — Автоматический контроль нарушения прочности подшипников качения центробежных насосов	11	79
Глазенко Т. А., Герман-Галкин С. Г., Томасов В. С. — Анализ электромагнитных процессов и расчет характеристик тиристорных широтноимпульсных преобразователей с последовательным гашением	12	27
Иванчук Б. Н., Колосков И. И. — Тиристорные регуляторы постоянного тока с повышенной частотой коммутации	12	34
8. ДИСКУССИИ		
Долбня В. Т. — В защиту метода графов	1	84
Волков Ю. А., Королев В. А., Никитаев В. Г., Рублев В. М. — О расчете цепей с помощью графов	1	86
Дарманчев А. А., Прудников И. И., Симоновский С. Ф. — Загруженность трансформаторов сельских потребительских подстанций	2	89
Кунин Р. З. — Ответ автора	2	90
Ионкин П. А., Соколов А. А., Миронов В. Г. — О критике современных методов анализа электрических цепей	2	91
Мешель Б. С., Денисов В. И., Гусев В. И., Окороков В. Р., Лисочкина Т. В. — Об оценке величины потерь в электрических сетях	3	85
Вадачкория Г. В. — К вопросу об определении коэффициента потерь электрической энергии	3	88
Волобринский С. Д. — Ответ автора	3	89
Воробьев С. Ф. — О расчете электрических цепей с помощью ненаправленных графов	4	86
Богатырев О. М. — Ответ автора	4	88
Белоусов Ю. Ф., Гусейнов А. К., Клевицкий В. А. — К вопросу определения области применения деревянных опор	9	90
Глазков И. И., Ольшевский О. В., Самородов Г. И., Лысков Ю. И. — «Ударные коэффициенты при включении холостой линии», «О прогнозировании статических характеристик коммутационных перенапряжений»	11	88
9. ХРОНИКА		
Загайнов Н. А. — Всесоюзная конференция по применению силовых полупроводников на городском электрическом транспорте	1	89
Попов И. Н., Шестопалов В. Н. — Совещание по системам и устройствам циркулярного телеуправления	1	90
Ковалев Н. Н., Михайлов А. С. — О деятельности научно-технического общества энергетики и электротехнической промышленности	4	92
Зеленцов В. А. — В павильоне «Электрификация СССР» ВДНХ	6	85
Бортник И. М. — Заседания секции Научного совета по теоретическим и электрофизическим проблемам электроэнергетики ОФТПЭ АН СССР	6	87
Заседание Научного совета по теоретическим и электрофизическим проблемам электроэнергии АН СССР	10	92
Михайлов Ю. А., Халилов Ф. Х. — Заседание IV секции Научного совета по теоретическим и электрофизическим проблемам энергетики АН СССР	11	91

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Автор и название статьи	Номер журн.	Стр.
10. ЮБИЛЕИ		
Академик **М. П. Костенко**	1	92
Профессор **Б. И. Тихменев**	2	93
Профессор **Николай Александрович Мельников**	5	92
А. А. Янко-Триницкий	5	92
Даниил Всеволодович Разевиг	5	93
Профессор **В. В. Бургсдорф**	6	90
Доктор технических наук **Алексей Алексеевич Булгаков**	7	93
Виталий Васильевич Хрущев	10	93
Борис Алексеевич Константинов	12	84
Игорь Александрович Будзко	12	84
О. В. Слежановский	12	85
11. НЕКРОЛОГИ		
Профессор **Б. Ф. Вашура**	3	92
А. И. Сиротинский (сообщение о смерти)	3	92
В. С. Кулебакин (сообщение о смерти)	3	92
Профессор **Лев Давидович Белькинд**	3	93
12. ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА		
Русин Ю. С. — К определению нормальной составляющей напряженности поля на поверхности цилиндра	4	90
Найфельд М. Р., Куприянович Ю. М. — Письмо в редакцию	4	91
Садовский И. М. — Письмо в редакцию	6	84
Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. — Об определении пробивного напряжения диэлектрика статистическим методом	10	91
Найфельд М. Р. — Об упрощенном расчете заземляющих сеток	11	87
13. БИБЛИОГРАФИЯ		
Петров И. И., Дружинин Н. Н., Синайский М. М. — Книга **М. М. Соколова** «Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов»	6	91
Орурк И. А., Сабинин Ю. А. — Книга Д. В. Васильева и В. Г. Чуича «Система автоматического управления (примеры расчета)»	6	92
Сиунов Н. С., Резин М. Г., Гаврилов Б. К., Павлинин В. М., Милайкин И. Ф., Антипов М. Ф., Кузнецов Б. А. — Книга П. С. Сергеева, Н. В. Виноградова и **Ф. А. Горяинова** «Проектирование электрических машин»	9	92
Колечицкий Е. С. — Книга Г. Принца «Высоковольтные электрические поля»	9	93
14. РАЗНЫЕ СТАТЬИ И ИНФОРМАЦИИ		
Бирюков В. Г. — В. И. Ленин и электротехническая наука	4	10
Крайз А. Г. — Миллионный трансформатор	6	93
Журналу «Электричество» — 90 лет	7	1
Бузинова — Дыбовская В. М. — Первые женские политехнические курсы	7	91
Эфендизаде А. А. — Электрификация и автоматизация нефтяной промышленности Азербайджана	10	1

II. АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абрамович Б. Н. 11, 1
Аветикова Е. Г. 6, 73
Адонц Г. Т. 2, 10
Азарьев Д. И. 6, 4
Акопян В. А. 3, 68
Аксенов М. И. 1, 40
Александров Ф. И. 1, 60
Алексеев А. Е. 2, 1
Алексенко Г. В. 4, 1
Альтгаузен А. П. 1, 1
Анисимова Н. Д. 1, 19
Анненков В. З. 2, 19
Антипов М. Ф. 9, 92
Анхимюк В. Л. 12, 74
Аптер Э. М. 8, 59
Аракелян А. К. 10, 7
Арвеладзе Р. Д. 1, 80
Асеев Г. Г. 9, 44
Афанасьев А. А. 10, 7
Афанасьев В. В. 4, 22; 7, 5; 7, 18

Б

Бабис Р. С. 4, 43
Багиев Г. Л. 3, 77
Базелян Э. М. 10, 63
Барбахадзе М. М. 10, 83
Баркан Я. Д. 3, 78
Безруких П. П. 5, 9
Безруков Г. И. 10, 34
Белкин Г. С. 2, 56
Белоусов И. В. 5, 81; 6, 4
Белоусов Ю. Ф. 9, 90
Беляков Н. Н. 1, 8
Бережной А. В. 8, 6
Березин С. Я. 4, 57
Березовский А. А. 11, 6
Беркович Е. И. 9, 79
Берлянд Э. Г. 6, 7; 8, 86
Бертинов А. И. 10, 37
Бирюков В. Г. 4, 10
Бирюков Ю. А. 11, 1
Блинов А. А. 7, 90
Богатырев О. М. 4, 88
Бодякшин А. И. 4, 79
Болдырев Е. А. 9, 66
Болотин И. Б. 7, 12
Борисов А. М. 8, 90
Борисов К. И. 8, 55
Бортник И. М. 6, 87
Борцов Ю. А. 2, 47
Бронштейн А. М. 7, 32; 7, 41
Бузинова-Дыбовская В. М. 7, 91
Булатов О. Г. 9, 62
Булин-Соколов И. В. 4, 54; 8, 40
Бургсдорф В. В. 3, 14
Бурдиашвили М. Ш. 6, 82
Буре И. Г. 5, 47
Бурцев Э. Ф. 8, 81
Бутвевич Г. В. 6, 43
Быков Ю. М. 1, 72
Быстрицкий Д. Н. 1, 52
Бычков В. П. 11, 36
Бычков Л. П. 4, 82

В

Вадатурский В. М. 11, 1
Вадачкория Г. В. 3, 88
Важов В. Ф. 5, 88
Вайнер А. Л. 11, 74
Ванаг А. А. 7, 62
Вартанов Г. Л. 10, 88
Варшавский Д. С. 5, 90; 9, 54
Васильев Д. В. 8, 46
Васильевский С. П. 8, 23
Вега К. М. 11, 36
Великовский В. А. 11, 31
Венедиктов Ю. П. 1, 82
Веников В. А. 1, 19; 4, 29; 8, 1; 12, 5
Веретенников Л. П. 6, 16
Веселов А. Д. 5, 9
Ветюкова Л. С. 7, 35
Виленчук А. Л. 5, 83; 11, 70
Вилесов Д. В. 6, 16
Винокуров В. К. 8, 55
Витохин А. Д. 6, 55
Вишняков Р. Д. 6, 76
Волков Ю. А. 1, 86
Волкова О. В. 1, 8
Волобринский С. Д. 3, 89
Вольдек А. И. 3, 32; 11, 26
Вольпов К. Д. 12, 62
Воробьев С. Ф. 4, 86
Вольф Е. М. 6, 55
Воронина А. А. 10, 58
Воропаев С. И. 11, 55
Воротникова Л. И. 9, 66
Вулис М. Л. 1, 72
Высочанский В. С. 11, 39

Г

Гаврилов Б. К. 9, 92
Гальперина М. О. 11, 44
Гамм А. З. 2, 59
Гармаш В. А. 7, 87
Герман-Галкин С. Г. 12, 27
Герцов С. М. 8, 51
Глазенко Т. А. 12, 27
Глазков И. Н. 11, 88
Глебов И. А. 10, 85; 11, 1
Глебов Э. С. 12, 62
Глухивский Л. И. 6, 30
Гнедин Л. П. 2, 1
Головицын Б. И. 4, 29
Головкин П. И. 10, 76
Гончаров М. В. 10, 37
Горбенко В. Л. 7, 86
Городский Д. А. 2, 81
Горшков А. П. 4, 47
Грейнер Л. К. 4, 22
Грек Г. Т. 10, 42
Грехов И. В. 8, 81; 10, 91
Григорович Я. И. 11, 31
Григорьев Ю. П. 9, 79
Гринштейн Б. И. 2, 32
Грушко В. Л. 4, 61
Гук Ю. Б. 7, 71
Гумановский Б. Я. 11, 55

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Гурарий М. И. 6, 7; 8, 86
Гурницкий В. Н. 4, 82
Гусев В. Н. 3, 86
Гусейнов А. К. 9, 91

Д

Давыдов В. Г. 12, 14
Дарбинян Ш. А. 2, 74
Дарманчев А. А. 2, 89
Дартау А. А. 3, 43
Дегтярь В. Г. 6, 43
Денисов В. И. 3, 86
Джаниашвили Д. А. 7, 90
Джафаров Э. М. 11, 72
Джаши Д. Р. 10, 83
Джуварлы Ч. М. 7, 80; 11, 72
Дикушин В. И. 4, 15
Дмитриев В. А. 2, 5
Дмитриев Е. В. 11, 72
Дмитриевский В. С. 5, 88
Добрянская Н. А. 7, 24
Долбня В. Т. 1, 84
Донской А. В. 9, 79
Дроздов А. Д. 7, 87
Дружинин Н. Н. 6, 91

Е

Епифанова Г. С. 9, 66
Ермаков Г. В. 6, 1
Ершевич В. В. 6, 7
Ефименко Е. И. 9, 18
Ефремов И. С. 2, 5; 6, 35; 10, 34

Ж

Жаворонков М. А. 7, 37
Желтов К. А. 11, 63
Жемеров Г. Г. 8, 71
Жилинскас П.—Ю. П. 9, 41
Жильцов В. П. 4, 84
Жмуров В. П. 2, 32
Жуков С. Ф. 10, 48
Журавлев В. С. 7, 90

З

Завьялов М. П. 8, 63
Загайнов Н. А. 1, 89
Загрядцкий В. И. 9, 82
Зайдман И. Д. 12, 78
Зайцев Г. З. 11, 80
Залесский А. М. 5, 83; 7, 38
Заруди М. Е. 7, 46
Зборовский И. А. 3, 57; 4, 40
Здрок А. Г. 3, 47
Зейлидзон Е. Д. 3, 1
Зеленцов В. А. 6, 86
Земсдорф Г. К. 8, 23
Зинченко В. М. 11, 78
Златковская М. А. 1, 52
Злобин Ю. П. 9, 75
Злстник С. Г. 2, 14; 8, 84
Зотов Б. И. 5, 17
Зубарев Ю. Я. 8, 46
Зубков В. П. 7, 18
Зусман В. Г. 4, 15

И

Иванков Б. Ф. 6, 70
Иванов А. В. 3, 71
Иванов В. А. 1, 16
Иванов И. И. 2, 5
Иванов Ю. П. 4, 84
Иванова М. И. 1, 66
Ивановский А. 11, 44
Иванчук Б. Н. 12, 34
Иоботенко Б. А. 8, 51
Игнатов В. Е. 8, 27
Ильин О. П. 12, 74
Ильиничнин В. В. 5, 12; 7, 75
Ильинский Н. Ф. 2, 24
Ионкин Н. А. 2, 91; 6, 61
Иоффе Ю. Н. 7, 41
Ипатов П. М. 2, 1
Ирлахман М. Я. 6, 13
Исаев И. П. 2, 5

К

Каганов З. Г. 11, 83
Кадымов Я. Б. 2, 44
Каленик В. А. 1, 16
Калинкин Г. И. 9, 81
Каменева В. В. 9, 85
Камша М. М. 1, 21
Каплан В. В. 7, 26
Каплан Г. С. 7, 35
Караев Р. И. 11, 50
Каринский Ю. И. 4, 36
Каркер Я. И. 9, 59
Карпенко Б. К. 12, 46
Карпов Г. В. 9, 1
Карцев В. Л. 5, 86
Кереселидзе А. Е. 10, 83
Кессель Е. Л. 9, 75
Киклевич Н. А. 2, 64
Кирюхин В. П. 5, 32
Китушин В. Г. 6, 13
Клевицкий В. А. 9, 92
Климков А. К. 1, 21
Климов В. П. 5, 43
Кмечь А. 11, 44
Кобыляцкий Н. И. 9, 82
Ковалев В. Д. 4, 29
Ковалев Н. Н. 4, 92
Ковальков Г. А. 8, 27
Коген — Далин В. В. 10, 72
Коган М. Г. 9, 59
Колесов С. Н. 9, 84
Колесов Ю. А. 6, 50
Колечицкий Е. С. 11, 93
Колосков И. И. 12, 34
Константинов Б. А. 3, 77; 6, 75; 11, 80
Копылов И. П. 2, 24
Корнев А. Е. 7, 90
Корнилов В. И. 5, 28
Королев В. А. 1, 86
Костенко М. П. 2, 1
Костицына К. В. 3, 81
Коструба С. И. 1, 77; 9, 87
Кошталюк Р. 11, 44
Кощеев Л. Г. 3, 61
Кравченко А. Н. 11, 6
Крайз А. Г. 5, 4; 6, 93
Крастина А. Д. 7, 5; 7, 18
Крижанский С. М. 7, 30
Круг Н. К. 1, 19
Крымский Г. А. 12, 80
Крюкова Н. Н. 8, 81
Кузнецов Б. А. 9, 92
Кузнецов И. Ф. 5, 64; 6, 58
Кузнецов М. В. 11, 60
Кузнецов Н. Л. 2, 24
Кузьмин Я. Ф. 7, 62
Кукеков Г. А. 7, 35
Кулесский Р. А. 1, 48
Кулиев З. Я. 2, 44
Кулик В. Д. 3, 83
Куликов А. А. 8, 88
Кунин Р. З. 2, 90
Куприянов В. Е. 12, 14
Куприянович Ю. М. 4, 91
Куракин К. И. 9, 27
Куренный Э. Г. 6, 45
Кутузов В. К. 8, 68
Курочкин А. Н. 7, 51
Кучумов Л. А. 1, 26

Л

Лабунцов В. А. 9, 62
Лагин Г. И. 11, 78
Лагутин В. И. 11, 1
Лазаренко Л. Ф. 11, 26
Лабезник А. И. 5, 1; 7, 65
Лакс Б. М. 10, 16
Ланген А. М. 5, 37
Лапицкий Ю. С. 6, 7
Лаптева Т. И. 6, 35
Ларионов В. П. 3, 71
Левинтов С. Д. 8, 90
Левитов В. И. 5, 68
Левиуш А. И. 6, 66
Левкович М. И. 6, 50
Левшунов Р. Т. 6, 76
Ленда Г. А. 1, 66
Леонтьев Н. И. 1, 82
Лернер М. М., 5, 72
Лернер Т. И. 5, 72
Либкинд М. С. 5, 78
Лисочкина Т. В. 3, 86
Литкенс И. В. 7, 56
Логинов С. И. 8, 79; 10, 85
Ломакин В. П. 2, 37
Лопухина Е. М. 9, 13
Лосев Э. А. 6, 75
Лоханин А. К. 3, 53; 10, 56
Лугинский Я. Н. 3, 1
Лурье С. И. 2, 52
Лысенко Е. В. 3, 26; 12, 19
Лысков Ю. И. 11, 89
Любомирова Г. Б. 8, 79; 10, 85
Лютер Р. А. 2, 1
Ляпин А. Г. 5, 68

М

Майбога В. А. 9, 35
Майергойз И. Д. 2, 88
Майкопар А. С. 12, 62
Максименко Н. Н. 9, 44
Мамиконянц Л. Г. 3, 1
Маневич А. С. 5, 78
Манн Э. Г. 8, 23
Мантров М. И. 4, 74
Марек Б. А. 7, 37
Маркович И. М. 7, 65
Марьяновский Д. И. 1, 66
Матевосян П. А. 6, 73
Межалс Л. В. 3, 22
Мелешкин В. Н. 8, 63
Мельников Н. А. 6, 61
Мельцер М. И. 8, 46
Мерабишвили П. Ф. 5, 52
Месенжник Я. З. 2, 86
Мешель Б. С. 3, 85
Мёллер К. Ю. 6, 27
Милайкин И. Ф. 9, 92
Миронов В. Г. 2, 91; 6, 78
Миронов Г. А. 7, 80
Миронов С. М. 8, 40
Михайлов А. С. 4, 92
Михайлов В. В. 1, 31
Михайлов Ю. А. 11, 91
Михневич Г. В. 7, 51
Мишкин В. М. 10, 58
Мишуков В. К. 4, 47
Мищенко В. А. 9, 23
Мовсесов Ф. А. 3, 68
Морозов Е. Ф. 10, 80
Морозов К. С. 1, 37
Морозова Ю. А. 5, 9
Мохов В. В. 3, 47
Музыка Н. А. 1, 34
Музыка Ю. А. 1, 34

Н

Назаров Г. И. 1, 52
Найдис В. А. 4, 15; 10, 29
Найфельд М. Р. 4, 91; 11, 87
Накрохин В. Г. 4, 40
Нашатырь В. М. 7, 26
Неделку В. Н. 11, 11
Неймарк В. Е. 1, 55
Непорожний П. С. 12, 1
Нестерин В. А. 11, 15
Нижник Л. П. 11, 6
Никитаев В. Г. 1, 86
Никифоров Б. Д. 2, 5
Никулин В. Б. 11, 79
Новелла Н. В. 5, 17
Новиков А. А. 6, 76
Нопираковский И. 9, 62

О

Овсеенко В. В. 3, 14
Окин А. А. 6, 7
Окороков В. Р. 3, 86
Ольшевский О. В. 11, 88
Ольяк В. Д. 10, 34
Орехов Л. А. 3, 22
Орлов Е. Г. 4, 54
Орурк И. А. 6, 92
Остренко В. С. 10, 34

П

Павлинин В. М. 9, 92
Панова Е. Д. 5, 24
Панченко Б. Я. 6, 70
Панченко В. А. 2, 72
Партс Р. Р. 3, 39
Певзнер Е. М. 1, 44
Пеккер И. И. 11, 84
Пережогин М. И. 1, 1
Петров И. И. 6, 91
Петров Л. П. 10, 11
Петров О. А. 5, 24
Петров С. Я. 10, 42
Пиковский А. А. 11, 80
Пистрак М. Я. 1, 55
Пластун А. Т. 9, 8
Плесков В. И. 11, 55
Погарский Н. А. 1, 40
Полтев А. И. 5, 83; 7, 38
Поляков Л. М. 10, 29
Поляков В. Е. 3, 80; 6, 69; 8, 9; 10, 48
Понкратов Б. К. 10, 88
Попов В. А. 2, 86
Попов Д. А. 4, 69; 8, 35
Попов И. Н. 1, 90
Попов С. М. 11, 44
Порошина М. Н. 12, 76
Портной М. Г. 3, 1; 6, 7
Поскробко А. А. 11, 55
Поспелов Г. Е. 8, 6
Приходько Г. Н. 10, 34
Прудков М. Л. 4, 61; 8, 31; 12, 38
Прудковский Г. П. 6, 82
Прудников Н. И. 2, 89
Пястолов В. И. 5, 24

Р

Рабинович И. Н. 2, 69
Рагозин А. А. 12, 70
Радовицкий В. Т. 2, 78
Раздин А. Е. 7, 51
Разевиг Д. В. 8, 14; 9, 48; 11, 66
Разин Н. В. 1, 40
Ратнер Н. И. 8, 77
Рашкес Б. С. 1, 8; 3, 14; 11, 44
Регирер Л. Е. 1, 40
Резин М. Г. 9, 92
Реймерс А. В. 4, 84
Ренне В. Т. 2, 74; 3, 68
Репин О. М. 1, 82
Рогоза В. В. 10, 68
Розенкранц А. С. 12, 57
Ройзен С. С. 2, 72

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Рокотян И. С. 4, 29
Рублев В. М. 1, 86
Рудакова Р. М. 7, 71
Русин Ю. С. 4, 90
Рывкин А. М. 3, 65; 4, 67
Рябкова Е. Я. 10, 58

С

Сабинин О. Ю. 8, 46
Сабинин Ю. А. 6, 92
Савин А. И. 11, 78
Саврухин А. П. 4, 80
Садовский И. М. 6, 84
Садыхова Е. А. 10, 63
Саенко В. М. 2, 72
Саймуков В. Н. 1, 82
Сакалас А. П. 9, 41
Салютин А. А. 3, 47
Самойлов Е. М. 11, 83
Самородов Г. И. 11, 88
Самсонов Б. Б. 11, 84
Сапир Е. Д. 6, 66
Сапожников А. В. 2, 61
Свенчанский А. Д. 1, 1
Свечарник Д. В. 6, 50
Семенчуков Г. А. 9, 13
Семенов Ю. Н. 5, 68
Серебрянников А. М. 12, 78
Сережкин Ю. Н. 10, 91
Сиваков А. Р. 1, 60
Симоновский В. И. 12, 43
Симоновский С. Ф. 2, 89
Синайский М. М. 6, 91
Синев В. С. 9, 72
Сиунов Н. С. 9, 8; 9, 92
Скороваров В. Е. 2, 32
Скутельников В. И. 3, 80; 8, 9
Слуховцкий А. Е. 12, 23
Смирнова Т. В. 3, 22
Смоловик С. В. 12, 70
Смородинов В. В. 9, 79
Совалов С. А. 3, 1
Согомонян С. С. 6, 73
Соколов А. А. 2, 91
Соколов В. И. 7, 86
Соколов Н. И. 6, 78
Соколова М. В. 9, 48; 11, 66
Сомов В. А. 5, 20
Сорокин В. М. 5, 78
Соя Г. П. 3, 75
Стасяк В. И. 8, 90
Степанов А. Д. 1, 40
Степанова В. Г. 2, 32
Степе Ф. Ю. 2, 72
Стогний Б. С. 10, 68
Страхов С. В. 11, 31
Стрельцов Б. Н. 2, 78
Стрельцова А. П. 3, 75
Строганов Р. П. 12, 14

Т

Талалов И. И. 4, 47
Таммет Х. Ф. 12, 82
Тареев Б. М. 5, 72
Тарнижевский М. В. 5, 57; 12, 51
Таршис А. С. 9, 76
Тевосян Т. А. 3, 8
Тенетко Н. И. 5, 28
Тилик В. Г. 5, 68
Токарева В. Д. 10, 21
Толкачев Э. А. 11, 19
Толстов Ю. Г. 2, 32
Тольский Г. А. 3, 75
Томасов В. С. 12, 27
Тотладзе З. Д. 8, 84
Третьяк Т. П. 3, 61
Туккель И. Л. 12, 14
Тулин В. С. 2, 67
Туманьян Г. Т. 6, 81
Тупиков А. Н. 11, 78
Турубинер А. Т. 11, 78

У

Урин В. Д. 8, 84
Урусов И. Д. 12, 43

Ф

Фабрикант В. Л. 3, 22; 8, 91
Файнберг М. Ю. 10, 86
Федотов В. П. 8, 9
Федоров Д. А. 4, 29
Феоктистов В. П. 10, 24
Фиалков В. М. 7, 51
Фигурнов Е. П. 7, 83
Фильц Р. В. 6, 30
Фотин В. П. 1, 8
Фурман В. Б. 1, 72

Х

Халилов Ф. Х. 11, 91
Хачатуров А. А. 3, 1; 6, 7
Хубларов Н. Н. 4, 43; 5, 4

Ц

Царевский В. В. 12, 23
Цаценкин В. К. 8, 51
Цветкова А. А. 4, 84
Целемецкий В. А. 6, 16; 6, 20
Цицикян Г. Н. 5, 64; 6, 58

Ч

Чанкветадзе Д. А. 7, 38
Чатинян Ю. С. 3, 68
Червоненкис Я. М. 1, 80
Чередниченко В. С. 2, 40
Черемисов И. Я. 5, 28
Черненко В. А. 10, 68
Черновец А. К. 1, 26
Чернышев А. Н. 4, 61
Чиликин М. Г. 10, 7

Ш

Шабуров М. А. 6, 75
Шарнин Ю. К. 6, 69
Шаров В. С. 11, 15
Шахтахтинский Т. И. 11, 86
Шевченко В. В. 4, 47
Шенкман Л. З. 11, 50
Шереметев В. Г. 12, 67
Шестаков И. А. 12, 78
Шестопалов В. Н. 1, 90
Шкловский Б. И. 10, 29
Шнеерсон Э. М. 4, 77
Шнель Р. В. 8, 1
Шрейнер Р. Т. 9, 23
Штовбанько Т. Н. 12,
Шубенко В. А. 1, 48; 9, 23
Шубов И. Г. 2, 69
Шукалов В. Ф. 1, 44
Шулаков Н. В. 8, 23

Щ

Щедрин В. А. 6, 78
Щелыкалов 4, 47

Э

Эдельман В. И. 1, 31
Эйбшиц А. Г. 2, 69
Эфендизаде А. А. 10, 1

Ю

Юревич Е. И. 12, 14
Юхов В. В. 2, 28

Я

Якобс А. И. 8, 19; 10, 58
Якуб Ю. А. 5, 4
Янбухтина С. Д. 7, 32
Янес Х. И. 3, 32
Янчус Э. И. 7, 26
Ярвик Я. Я. 1, 26
Яуре А. Г. 1, 44

◇ ◇ ◇

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. А. Афанасьев, А. И. Бертинов, В. Г. Бирюков, В. А. Веников, И. С. Ефремов, Л. А. Жекулин, Д. Г. Жимерин, А. М. Залесский, П. М. Ипатов, М. П. Костенко, Л. Г. Мамиконянц (зам. главного редактора), **Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, Д. В. Разевиг** (главный редактор), **А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. 2/10. Телефон 294-24-80.
Почтовый адрес: Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648.
Адрес для телеграмм: МОСКВА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Сдано в набор 16/X 1970 г. Подписано к печати 30/XI 1970 г. Т-18809
Формат бумаги 60×90¹/₈ Усл. печ. л. 12 Уч.-изд. л. 14,73
Тираж 10878 экз. Цена 80 коп. Зак. 1420

Московская типография № 10 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Шлюзовая наб., 10.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

СОДЕРЖАНИЕ

П. С. Непорожний — Осуществление ленинского плана электрификации 1

В. А. Веников — Развитие энергетики и социальный прогресс в свете ленинских идей о значении электрификации 5

В. Г. Давыдов, В. Е. Куприянов, Р. П. Строганов, И. Л. Туккель, Е. И. Юревич и М. Д. Кучкин — Цифровой регулятор частоты и перетоков активной мощности для объединенных энергосистем . . . 14

Е. В. Лысенко — Способ построения быстродействующего реле с одной подведенной величиной . 19

А. Е. Слухоцкий и В. В. Царевский — Анализ характеристик инвертора с встречно-параллельными вентилями и параллельной компенсацией реактивной мощности нагрузки 23

Т. А. Глазенко, С. Г. Герман-Галкин и В. С. Томасов — Анализ электромагнитных процессов и расчет характеристик тиристорных широтно-импульсных преобразователей с последовательным гашением 27

Б. Н. Иванчук и И. И. Колосков — Тиристорные регуляторы постоянного тока с повышенной частотой коммутации 34

М. Л. Прудков — Об инвариантных и автономных системах автоматического регулирования натяжений и скорости тонколистовой прокатки на реверсивном стане 38

И. Д. Урусов и В. И. Симоновский — Анализ тока асинхронного двигателя при пульсирующей нагрузке 43

Б. К. Карпенко — Геометрия якоря с печатной обмоткой 46

М. В. Тарнижевский — Повышение эффективности работы совместной противокоррозионной защиты подземных металлических сооружений 51

А. С. Розенкранц — Методы расчета нелинейных электрических полей в ионизированном облучением газе 57

А. С. Майкопар, Э. С. Глебов и К. Д. Вольпов — Методика оценки работоспособности линейной изоляции по влагоразрядным характеристикам . . . 62

В. Г. Шереметев — Прогнозирование электропотребления в сельском хозяйстве на основе закономерности его роста в различных странах . . . 67

А. А. Рагозин и С. В. Смоловик — Влияние дополнительных электромагнитных моментов на движение ротора гидрогенератора при несимметричных коротких замыканиях 70

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

В. Л. Анхимюк и О. П. Ильин — Расчет корректирующих устройств вентильного электропривода с комбинированным регулированием 74

М. И. Порошина — Характеристики потерь в горячекатаной электротехнической стали в сильных переменных магнитных полях 76

СООБЩЕНИЯ

И. А. Шестаков, И. Д. Зайдман, А. М. Серебренников и Т. Н. Штовбанько — Полистная неоднородность магнитных свойств холоднокатаной текстурованной электротехнической стали 78

Г. А. Крымский — К расчету энергии, выделяющейся в предохранителе при отключении тока короткого замыкания 80

Х. Ф. Таммет — Вольт-амперные характеристики униполярного коронного разряда 82

ХРОНИКА

Борис Алексеевич Константинов. Игорь Александрович Будзко. О. В. Слежановский 84

Указатель материалов, помещенных в журнале «Электричество» в 1970 г. 86

◇ ◇ ◇

CONTENTS

Carrying Out Lenin's Plan for the Electrification of Our Country — **P. S. Neporodjny** 1

Development of the Power Industry and Social Progress in the Light of Lenin's Ideas on the Importance of Electrification — **V. A. Venikov** 5

A Digital Frequency Regulator and Real Power Exchange for Interconnected Power Systems — **V. G. Davidov, V. E. Kuprianov, R. P. Stroganov, I. L. Tukkel, E. I. Urevitch** 14

A Way for Constructing a High-speed Relay Responding to One Electrical Quantity — **E. V. Lisenko** . . . 19

Analysis of Inverter Characteristics with Bucking Parallel Valves and Parallel Compensation of Load Reactive Power — **A. E. Slukhotski, V. V. Tsarevski** . . . 23

Analysis of Electromagnetic Processes and Calculation of Pulse-Width Thyristor Converter Characteristics — **T. A. Glazenko, S. G. German-Galkin, V. S. Tomasov** 27

D. C. Thyristor Regulators with a High Switching Frequency — **B. N. Ivanchuk, I. I. Koloskov** . . . 34

On Invariant and Independent Systems Automatically Controlling the Tension and Speed of Thin-Walled Rolling on a Reversing Mill — **M. L. Prudkov** . . 38

Analysis of Induction Motor Currents for a Pulsating Load — **I. D. Urusov, V. I. Simonovski** . . . 43

The Geometry of an Armature with Printed Winding — **B. K. Karpenko** 46

Improving the Effectiveness of Composite Anti—corrosive Protection ifor Underground Metal Structures — **M. V. Tarnidjevski** 51

Methods for Calculating Non-linear Electric Fields in a Gas Ionized Due to Radiation — **A. S. Rosenkrantz** 57

A Method for Evaluating Line Insulation Capability on the Basis of Wet Discharge Characteristics — **A. S. Maikopar, E. S. Glebov, K. D. Volpov** . . 62

Forcasting Electric Power Consumption in Agriculture on the Basis of How it is Developing in Different Countries — **V. G. Sheremetev** 67

How Additional Electromagnetic Torque Components Influence the Rotation of Hydro-generator Rotors for Unsymmetrical Faults — **A. A. Ragozin, S. V. Smolovik** 70

FROM OPERATING EXPERIENCE

Design of Correction Devices for a Valve Type Drive with Combined Regulation — **V. L. Anhimiuk, O. P. Ilyn** 74

Loss Characteristics for Hot-Rolled Electric Steel in Strong A. C. Magnetic Fields — **M. N. Poroshina** 76

REPORTS

Magnetic Non-uniformities from Sheet to Sheet of Cold-Rolled Texturized Electric Steel — **I. A. Shestakov, I. D. Zaidman, A. M. Serebrennikov, T. N. Shtovbanko** 78

Calculating the Energy Given Off in a Fuse When Interrupting a Short Circuit Current — **G. A. Krimski** 80

The Volt-ampere Characteristics of Unipolar Corona Discharge — **H. F. Tammet** 82

CHRONICLE 84

◇ ◇ ◇

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.316.726:621.316.728

Цифровой регулятор частоты и перетоков активной мощности для объединенных энергосистем

Давыдов В. Г., Куприянов В. Е., Строганов Р. П., Туккель И. Л., Юревич Е. И., Кучкин М. Д.

«Электричество», 1970, № 12

Приводится обоснование целесообразности создания системы автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности в Объединенных энергосистемах с использованием в качестве центральных регуляторов цифровых управляющих машин. Описывается функциональная и структурная схемы цифрового регулятора частоты и перетоков активной мощности, представляющего собой специализированную цифровую управляющую машину, и даются результаты его испытаний в условиях работы реальной энергосистемы. Илл. 4. Библ. 6.

УДК 621.316.925.42:621.316.925.43

Способ построения быстродействующего реле с одной подведенной величиной

Лысенко Е. В.

«Электричество», 1970, № 12

Приводятся структурная и принципиальная схемы полупроводникового реле. Рассматривается принцип его действия, определяется чувствительность, входное сопротивление, предельно допустимое значение входной величины и время действия. Приведены экспериментальные данные. Илл. 4. Библ. 4.

УДК 621.314.572

Анализ характеристик инвертора с встречно-параллельными вентилями и параллельной компенсацией реактивной энергии нагрузки

Слухоцкий А. Е., Царевский В. В.

«Электричество», 1970, № 12

Рассматриваются характеристики инвертора с встречно-параллельными вентилями, параллельной компенсацией реактивной энергии нагрузки и демпфирующей индуктивностью. В результате анализа характеристик получим приближенные формулы для напряжений на нагрузке и токов в вентилях, сделано сравнение рассмотренной схемы с другими и показаны ее преимущества и недостатки. Табл. 1. Илл. 3. Библ. 6.

УДК 621.314.6:62—83

Анализ электромагнитных процессов и расчет характеристик тиристорных широтно-импульсных преобразователей с последовательным гашением

Глазенко Т. А., Герман-Галкин С. Г., Томасов В. С.

«Электричество», 1970, № 12

Предлагается аналитический способ расчета основных характеристик тиристорных широтно-импульсных преобразователей (ШИП) постоянного напряжения с последовательным гашением и цепями рассеяния электромагнитной энергии в коммутирующем контуре. Аналитический способ расчета основных характеристик ШИП базируется на методе точечного преобразователя фазового портрета коммутирующей цепи. Рассмотрены три схемы преобразователей.

Выбор параметров коммутирующих цепей предлагается производить из условия минимума относительных коммутационных потерь мощпостн. Табл. 1. Илл. 6. Библ. 7.

УДК 621.316.722.1

Тиристорные регуляторы постоянного тока с повышенной частотой коммутации

Иванчук Б. Н., Колосков И. И.

«Электричество», 1970, № 12

Рассмотрен ряд основных схем тиристорных регуляторов постоянного тока, предназначенных для работы на повышенных частотах коммутации. Приведены упрощенные выражения для коммутационных процессов и сравнительные характеристики рассмотренных регуляторов. Определены области применения регуляторов с повышенной частотой коммутации. Табл. 2. Илл. 6. Библ. 4.

УДК 621.3.078:621.771

Об инвариантных и автономных системах автоматического регулирования натяжений и скорости тонколистовой прокатки на реверсивном стане

Прудков М. Л.

«Электричество», 1970, № 12

Получены уравнения, описывающие процессы регулирования переднего, заднего натяжений и скорости реверсивной холодной прокатки рулонной стали и учитывающие взаимосвязь этих процессов.

Построена структурная схема реверсивного стана как многомерного объекта связного регулирования натяжений и скорости прокатки и приведены в общем виде уравнения САР. Из уравнений САР получены условия их автономности и инвариантности. Для САР натяжений и скорости, синтезированных по принципам подчиненного регулирования, приведены передаточные функции компенсирующих звеньев, обеспечивающих автономность и инвариантность САР. Илл. 3. Библ. 5.

УДК 621.313.333:621.3.014.001.24

Анализ тока асинхронного двигателя при пульсирующей нагрузке

Урусов И. Д., Симоновский Б. И.

«Электричество», 1970, № 12

Изложен новый метод расчета колебаний тока асинхронного двигателя с периодически изменяющейся нагрузкой (типа компрессорной). Метод позволяет учесть электромагнитные процессы в роторе, в статье показана необходимость такого учета.

Анализ статорного тока и момента проведен на основе использования метода эллиптических диаграмм. Метод рекомендуется использовать при проектировании автономных электроэнергетических систем с жесткими нормами по качеству электроэнергии. Показано, что изменение тока статора в течение цикла колебаний характеризуется эллиптической диаграммой на комплексной плоскости, а электромагнитного момента — в плоскости координат «момент — скольжение». Илл. 3. Библ. 4.

УДК 621.316.973:620.197

Повышение эффективности работы совместной противокоррозионной защиты подземных металлических сооружений

Тарнижевский М. В.

«Электричество», 1970, № 12

Рассмотрены вопросы влияния устройств электрозащиты от коррозии одного подземного сооружения на режим работы защитных устройств другого сооружения. Установлены основные зависимости, определяющие согласованную работу электродренажных установок и катодных станций, обеспечивающих защиту подземных сооружений. Илл. 5. Библ. 4.

УДК 737.212.001.24

Методы расчета нелинейных электрических полей в ионизированном облучением газе

Розенкранц А. С.

«Электричество», 1970, № 12

Предлагаются два способа расчета. При первом способе учитываются два вида заряженных частиц (ионы обоих знаков) и не учитывается диффузия; расчетное уравнение для вспомогательной функции, характеризующей искажение поля, позволяет при этом способе найти распределение напряженности вдоль линии тока и вольт-амперную характеристику трубки тока расчетом на ЦВМ при любом пространственном распределении ионизирующего фактора и любой геометрии трубки тока, но при ограниченной величине главного критерия подобия таких полей.

Второй способ позволяет вести расчет, учитывая несколько видов заряженных частиц, а также диффузию. При этом способе решения открывается также возможность учета ударной ионизации. Второй способ пригоден для любой геометрии трубки тока и любого пространственного распределения ионизирующего фактора. Он допускает решение и для больших значений M, недоступных при использовании первого способа. Уравнения решаются методом итерации. В результате решения вторым способом определяется распределение напряженности и концентраций заряженных частиц вдоль линии тока, а также вольт-амперная характеристика. Приводятся примеры результатов расчета. Илл. 3. Библ. 10.

УДК 621.317.333

Методика оценки работоспособности линейной изоляции по влагоразрядным характеристикам

Майкопар А. С., Глебов Э. С., Вольпов К. Д.

«Электричество», 1970, № 12

В работе излагается методика оценки степени загрязнения изоляторов линий на основе выборочных данных по влагоразрядным характеристикам ограниченного количества гирлянд. При этом сведения о влагоразрядных характеристиках могут быть получены как при лабораторных испытаниях гирлянд, загрязненных на линии, так и с помощью измерений удельной поверхностной проводимости изоляторов или регистраций токов утечки по гирляндам.

В результате соответствующей обработки измерений оказывается возможным оценить степень загрязнения гирлянды, находящейся в наиболее неблагоприятных условиях, и затем оценить работоспособность линейной изоляции в нормальных эксплуатационных режимах.

Регистрации выполнялись на линиях 110, 220 и 500 *кв*, и результаты обработки сравнивались с данными опыта эксплуатации. Табл. 1. Илл. 3. Библ. 5.

УДК 63:621.311

Прогнозирование электропотребления в сельском хозяйстве на основе закономерности его роста в различных странах

Шереметев В. Г.

«Электричество», 1970, № 12

Исследуются закономерности роста удельного электропотребления в сельском хозяйстве в расчете на один гектар сельскохозяйственных угодий в ряде стран.

Найдены выражения, описывающие изменение удельного электропотребления во времени, и дана их геометрическая интерпретация. Выражения позволяют рассчитывать значения удельного электропотребления на различные перспективные сроки. Предлагаемый метод дополняет известные и может быть использован в исследованиях по перспективному планированию электрификации сельского хозяйства. Илл. 2. Библ. 4.

УДК 621.311

Влияние дополнительных электромагнитных моментов на движение ротора гидрогенератора при несимметричных коротких замыканиях

Рагозин А. А., Смоловик С. В.

«Электричество», 1970, № 12

Изложена методика расчета уточненного движения ротора гидрогенератора при несимметричных коротких замыканиях с учетом пульсирующих моментов и моментов потерь, обычно не учитываемых в расчетах динамической устойчивости; в качестве примера оценивается влияние дополнительных моментов на предел динамической устойчивости капсульного гидрогенератора. Результаты расчетов по аналитическим соотношениям сопоставлены с результатами расчетов, полученными на цифровой вычислительной машине. Илл. 3. Библ. 5.

УДК 621.316.718.5:62—83

Расчет корректирующих устройств вентильного электропривода с комбинированным регулированием

Анхимюк В. Л., Ильин О. П.

«Электричество», 1970, № 12

Рассматривается двухканальная система комбинированного регулирования с косвенным измерением возмущающего воздействия, в которой для улучшения динамических свойств применены корректирующие устройства.

Приводится аналитический метод расчета параметров этих устройств, позволяющий обеспечить необходимые динамические свойства системы в широком (до $D=1000$) диапазоне регулирования при возмущающих воздействиях. Илл. 3. Библ. 4.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru