



Л. А. Шматко

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

1967 11



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ЭНЕРГИЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

11
1967
НОЯБРЬ

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

**Да здравствует славное 50-летие Великой Октябрьской
социалистической революции!**

(Из призывов ЦК КПСС к 50-летию Великой
Октябрьской социалистической революции)

УДК 621.311

Электрификация СССР за годы Советской власти

П. С. НЕПОРОЖНИЙ

Министр энергетики и электрификации СССР

За полвека, прошедшие со времени Великой Октябрьской социалистической революции, советский народ под руководством Коммунистической партии коренным образом изменил нашу страну, которая из отсталого, крестьянского государства со слаборазвитой промышленностью выросла в могучую индустриальную державу. В этом видную роль сыграла электрификация, ставшая стержнем народного хозяйства страны.

Советское государство получило от дореволюционной России энергетическое хозяйство, находившееся в самой начальной стадии развития: суммарная мощность всех электростанций составляла в 1916 году 1,2 млн. квт, а выработка электроэнергии 2,6 млрд. квт·ч. Мощность самой крупной электростанции была около 50 Мвт, а наибольшая мощность турбин — 10 Мвт. По уровню развития энергетика была наиболее слабой отраслью народного хозяйства России.

За годы первой мировой и гражданской войн и иностранной интервенции электрохозяйство страны пришло в еще больший упадок. Подавляющее число электростанций бездействовало из-за отсутствия топлива, и производство электроэнергии снизилось в 1921 году до 520 млн. квт·ч.

В этих условиях по инициативе и под руководством В. И. Ленина в 1920 году был разработан и одобрен Всероссийским съездом Советов первый единый государственный план перестройки экономики страны на основе электрификации — план ГОЭЛРО.

С 1921 года, когда практически началось осуществление плана ГОЭЛРО, в стране создано перво-

классное электроэнергетическое хозяйство, распологавшее к началу 1967 года электростанциями общей мощностью 125 млн. квт (101,8 млн. квт тепловые электростанции и 23,2 млн. квт гидростанции), которые выработали в 1966 году 545 млрд. квт·ч электроэнергии, и электрическими сетями на напряжение 35—800 кв протяженностью 332 тыс. км. По производству электроэнергии и мощности энергетическая база нашей страны занимает второе место в мире.

По сравнению с дореволюционным временем к 1967 году мощность электростанций возросла более чем в 100 раз, производство электроэнергии — в 210 раз и электропотребление на душу населения в 170 раз.

За 20 предвоенных лет (1921—1940 годы) в результате осуществления плана ГОЭЛРО и пятилетних планов мощность электростанций была увеличена с 1,2 до 11,2 млн. квт, производство электроэнергии с 0,52 до 48,5 млрд. квт·ч и протяженность линий электропередачи 35 кв и выше со 156 км до 20,2 тыс. км. Уже в 1935 году Советский Союз по выработке электроэнергии занял второе место в Европе и третье в мире.

Во время Великой Отечественной войны фашистские захватчики разрушили более 60 крупных электростанций общей мощностью 5,8 млн. квт. Были разрушены Днепрогэс, Нижне-Свирская гэс, Зуевская, Дубровская, Новомосковская и другие электростанции. Оккупанты разрушили около 10 тыс. км высоковольтных сетей. Часть оборудования электростанций и подстанций была демонтирована и эвакуирована в восточные районы страны.

На Урале, в Сибири, Казахстане и Средней Азии развернулось строительство новых электростанций. Они были сооружены в исключительно короткие сроки: за три года (1942—1944) было введено в действие 3,4 млн. квт новых мощностей.

Восстановление довоенного уровня энергетического хозяйства было завершено в 1945 году по установленной мощности электростанции и в 1946 году — по производству электроэнергии. В 1947 году по этому показателю Советский Союз вышел на второе место в мире.

За 20-летие, прошедшее с начала первой послевоенной пятилетки (1946—1965 годы), производство электроэнергии возросло до 507 млрд. квт·ч, мощность электростанций до 115 млн. квт, протяженность линий электропередачи 35 кв и выше до 307 тыс. км и сельских электрических сетей — до 1,6 млн. км. Мощность и выработка электростанций более чем в 10 раз превысили довоенный уровень, протяженность линий электропередачи — в 15 раз, а потребление электроэнергии на душу населения в сравнении с довоенным возросло в 8,5 раз, составив 2200 квт·ч на человека.

Огромные работы по развитию энергетики были проведены в республиках Средней Азии и Казахстане. От 7 млн. квт·ч электроэнергии, произведенной в дореволюционное время, до 36 млрд. квт·ч в 1965 году — таков масштаб развития энергетики в этих союзных республиках.

В столь мощном развитии энергетики большую роль сыграло успешное выполнение заданий семилетнего плана 1959—1965 годов. За этот период мощность электростанций увеличилась на 61,3 млн. квт, прирост выработки электроэнергии составил 271,4 млрд. квт·ч, а протяженность линий электропередачи напряжением 35—800 кв возросла на 224,5 тыс. км.

Большие успехи, достигнутые в развитии энергетики, были обусловлены проведением технической политики в следующих направлениях:

- концентрация производства электроэнергии путем развития и объединения энергетических систем с постепенным охватом централизованным электроснабжением подавляющего количества потребителей электроэнергии;

- наращивание мощности энергохозяйства главным образом за счет строительства тепловых электростанций, увеличения их мощности и широкого применения энергетических блоков мощностью 150—300 Мвт, работающих на паре до — и закритических параметров и использующих лучшие виды топлива — природный газ и топочный мазут; дальнейшее развитие теплофикации;

- сооружение крупных по мощности, наиболее экономичных гидростанций, решающих комплекс по улучшению топливно-транспортного хозяйства страны;

- повышение технического уровня эксплуатации электростанций, электрических и тепловых сетей; улучшение технико-экономических показателей энергосистем;

- повышение технического уровня проектирования и строительства энергетических объектов.

По плану ГОЭЛРО большинство ТЭС должно было иметь установленную мощность 40—

60 тыс. квт, и лишь единственная Штеровская ГРЭС — 100 тыс. квт. Однако уже в 1935 году в стране работало 6 электростанций мощностью свыше 150 тыс. квт, а крупнейшая в то время Горьковская ГРЭС имела мощность 204 тыс. квт. В послевоенные годы в эксплуатацию вступили тепловые электростанции мощностью 600 и более тыс. квт. В 1966 году работало 14 тепловых электростанций мощностью более миллиона киловатт каждая. В числе этих электростанций: Приднепровская ГРЭС (2,4 млн. квт), Старо-Бешевская ГРЭС (2,1 млн. квт), Прибалтийская и Верхне-Тагильская ГРЭС (по 1,6 млн. квт). Конаковская и Троицкая ГРЭС (по 1,2 млн. квт). В настоящее время строится ряд тепловых электростанций мощностью 1,2—2,4 млн. квт.

Долгое время Днепровская ГЭС имени В. И. Ленина была самой мощной в стране гидростанцией (560 до войны и 650 тыс. квт после восстановления). В 1957 году вошла в эксплуатацию на полную мощность Волжская ГЭС имени В. И. Ленина (2,3 млн. квт), в 1963 году — Волжская ГЭС имени XXII съезда КПСС (2,53 млн. квт), в 1966 году — Братская ГЭС (4,05 из запроектированных 4,5 млн. квт). В 1967 году войдут в действие два агрегата Красноярской ГЭС (ее полная мощность 6 млн. квт). Строятся несколько гидростанций, мощность которых превышает 1 млн. квт: Саяно-Шушенская (5 млн. квт), Усть-Илимская (3,6 млн. квт), Нурекская (2,7 млн. квт) и другие.

До 1941 года на тепловых электростанциях устанавливались преимущественно турбогенераторы мощностью 50 Мвт, а в послевоенный период — 100 Мвт. С конца пятидесятых годов началась установка энергетических блоков мощностью 150—300 Мвт. К началу 1967 года в эксплуатации находился 141 такой энергоблок на общую мощность более 27 млн. квт, что составляет более четверти всей установленной мощности тепловых электростанций; из них 66 энергоблоков по 150 Мвт, 54 по 200 Мвт и 21 энергоблок мощностью по 300 Мвт. Находятся в монтаже два энергоблока мощностью 500 и 800 Мвт на Назаровской ГРЭС в Сибири и Славянской ГРЭС на Украине.

Аналогичная картина наблюдается и на гидростанциях. Если на Волжских ГЭС (имени В. И. Ленина и имени XXII съезда КПСС) единичная мощность агрегатов составляла 115 Мвт, то на Братской ГЭС она увеличилась до 225 Мвт, а на Красноярской ГЭС составит 500 Мвт.

Увеличение мощности отдельных электростанций и установленных на них энергоблоков оказалось возможным лишь благодаря созданию крупных объединенных энергетических систем. Это дало возможность повысить маневренность, надежность, экономичность и качество электроснабжения, и, кроме того, создало возможность для сокращения резервов мощности, уменьшения совмещений максимумов нагрузок, более совершенного использования мощности гидростанций.

В последние годы высоковольтные линии электропередачи перешагнули границы нашей страны — было осуществлено соединение наших энергосистем с энергетическими системами Венгрии, Польши, Румынии и Чехословакии. Более того, энергосистемы названных стран, Болгарии и ГДР, а также

Западно-Украинская энергосистема СССР работают параллельно при оперативном руководстве Центрального диспетчерского управления, находящегося в Праге. Помимо этого, от советских гидростанций передается электроэнергия в Норвегию и Финляндию.

Теплофикация — комбинированное производство электрической и тепловой энергии — стала одной из важнейших отраслей энергетики, обеспечивая экономическую выработку электроэнергии и отпуск тепла. По мощности действующих теплоэлектроцентралей, отпуску тепла и протяженности тепловых сетей СССР опередил все другие страны Европы.

Большие успехи достигнуты во внедрении новой техники на районных электростанциях и в электросетях. К началу 1967 года мощность турбоагрегатов высокого давления составила более 82% мощности турбоагрегатов тепловых электростанций. В большинстве котлоагрегатов автоматизировано регулирование процесса горения. Телемеханизировано 58 диспетчерских пунктов и более 68 подстанций, что охватывает 90% мощности энергосистем.

Повышение параметров пара и рост единичных мощностей агрегатов тепловых электростанций, реконструкция и модернизация некоторой части оборудования на них, развитие теплофикации, внедрение новой техники, непрерывное повышение технической культуры эксплуатации электростанций обеспечили:

— систематическое снижение удельного расхода топлива на киловатт-час, важнейший показатель экономичности работы тепловой электростанции; с 1928 по 1965 год удельный расход топлива снизился более чем в два раза;

— снижение за семилетие удельной численности обслуживающего персонала на тепловых электростанциях на 38% и на гидростанциях почти на одну четверть;

— снижение за семилетие производственной себестоимости электроэнергии на 14%.

В послевоенный период было обращено особое внимание на оснащение энергетического строительства технически современными средствами механизации, что обеспечивалось растущей производственной мощью отечественного машиностроения, в результате массовые строительные работы достигли высокой степени механизации.

В этот период были также проведены работы по сооружению новых, реконструкции и расширению действующих предприятий базы строительной индустрии энергостроительства. В настоящее время действует мощная база стройиндустрии, обеспечивающая сооружаемые энергетические объекты в достаточной мере сборным железобетоном, инертными и теплоизоляционными материалами, металлоконструкциями, трубопроводами, котельно-вспомогательным оборудованием и многим другим.

Наряду с созданием базы стройиндустрии и непрерывным повышением уровня механизации строительно-монтажных работ, совершенствовались проекты тепловых и гидравлических электростанций, линий электропередачи и подстанций. Созданы типовые проекты тепловых электростанций и электросетей, позволяющие широко применять унифицированные сборные железобетонные элементы кон-

струкций и освободить строительную площадку от многих подсобных предприятий.

Все эти меры дали возможность снизить к концу семилетки, по сравнению с 1959 годом, трудозатраты на введенный в эксплуатацию киловатт на тепловых электростанциях более чем в 2,2 раза, на гидростанциях на 20%, на линиях электропередачи напряжением 35 кв и выше почти на 30% (на один километр). Кроме того, эти меры помогли удешевить энергетическое строительство и позволили по стране в целом за последние 4 года вводить в действие ежегодно по 10 и более млн. квт новых генерирующих мощностей (в 1965 году ввод новых мощностей превысил 11 млн. квт, в то время как в 1958 году было введено лишь 5,2 млн. квт), почти 30 тыс. км линий электропередачи напряжением 35—500 кв и около 250 тыс. км линий электропередачи низкого напряжения для электрификации сельского хозяйства.

Высокий уровень развития энергетического хозяйства и энергомашиностроения, огромный накопленный опыт проектирования, строительства и эксплуатации электростанций и электросетей дали возможность нашей стране оказывать большую помощь в развитии энергетического хозяйства не только братским социалистическим странам, но и многочисленным развивающимся странам. Ярким примером тому является помощь Советского Союза, оказываемая Объединенной Арабской Республике в строительстве уникального Асуанского гидроузла и высоковольтных линий электропередачи от Асуанской ГЭС до Каира и других городов.

История развития советской энергетики свидетельствует о том, что на всех ее этапах основой производства электроэнергии являлись тепловые электростанции, вырабатывающие более 80% всей производимой в стране электроэнергии.

Такая роль тепловых электростанций в электробалансе страны вытекает из их специфических свойств: исходя из потребностей энергоснабжения, тепловые электростанции любой мощности можно сооружать в любых районах страны и они обеспечивают снабжение потребителей не только электроэнергией, но горячей водой и паром; высоко используют установленную мощность; ко всему этому — капитальные вложения на киловатт установленной мощности в строительстве подавляющего большинства тепловых электростанций (особенно работающих на газе и топочном мазуте) существенно меньше по сравнению с гидростанциями.

Однако тепловые электростанции требуют, по сравнению с гидростанциями, более сложного и дорогостоящего технологического оборудования (его стоимость вместе с монтажом в современных мощных тепловых электростанциях составляет более 65% всей стоимости электростанции), огромного количества топлива, и, как следствие этого, большое количество и эксплуатационного ремонтного персонала. Все это отражается на себестоимости электроэнергии, которая на тепловых электростанциях выше, чем на гидравлических в среднем в 3—3,5 раза.

В огромном энергетическом хозяйстве страны, в условиях его работы в крупных объединенных энергосистемах большое значение имеет правиль-

ное сочетание мощностей тепловых и гидравлических электростанций, особенно использование последних в условиях работы каскадов гидростанций.

Остановимся вкратце на развитии тепло- и гидроэнергетики за годы советской власти.

На увеличение темпов развития теплоэнергетики оказала большое влияние разработка, освоение и широкое практическое внедрение методов сжигания низкосортного топлива — бурых углей и угольных штабиков, торфа (кускового, гидравлического и фрезерного), сланцев, благодаря чему удалось включить в хозяйственный оборот ряд видов топлива пониженного качества и направить на технологические цели лучшие сорта топлива.

Как указывалось выше, основным направлением развития теплоэнергетики нашей страны является увеличение мощности энергоблоков, что может быть достигнуто только путем повышения параметров пара.

С начала осуществления плана ГОЭЛРО и до первой пятилетки строились электростанции мощностью 10—20 тыс. квт с установкой турбогенераторов по 3—6—10 тыс. квт давлением пара 16—18 ата и температурой 350—375°С. В последующем началось массовое применение паровых турбин мощностью 20—25 Мвт с параметрами пара 26 ата и 375°С. Мощность электростанций повысилась до 100 тыс. квт. Оборудование электростанций в большинстве было импортным.

В период второй и третьей пятилеток строящиеся электростанции обеспечивались почти полностью отечественным оборудованием с параметрами пара 29 ата и 400°С.

Послевоенный период развития теплоэнергетики характеризуется широким внедрением пара высоких параметров — 90 ата, 500°С и установкой турбогенераторов мощностью 100 Мвт (в настоящее время в эксплуатации находится более 120 агрегатов указанной мощности), повышением мощности электростанции до 300 тыс. квт, а в дальнейшем до 500—600 тыс. квт. В этот же период была запроектирована и построена Черепетская ГРЭС с турбогенераторами мощностью по 150 тыс. квт, работающими на паре давлением 170 ата с температурой 550—580°С.

В последние годы развитие теплоэнергетики шло по пути строительства крупных конденсационных электростанций мощностью один и более млн. квт, с установкой на них агрегатов с промежуточным перегревом пара, по схеме блока (котел — турбогенератор — трансформатор) мощностью 150, 200 Мвт с докритическими параметрами пара (130 ата и 565°С) и 300 Мвт с закритическими параметрами пара (240 ата и 565°С).

В 1954 году в стране была введена в действие первая в мире опытная атомная электростанция мощностью 5 тыс. квт, а через 4 года — первая очередь Сибирской атомной электростанции мощностью 100 тыс. квт. Затем были построены первые очереди Белоярской мощностью 100 тыс. квт и Нововоронежской мощностью 210 тыс. квт атомных электростанций. Сооружаются вторые очереди этих электростанций мощностью соответственно 200 и 375 тыс. квт.

В 1966 году на Камчатке введен в эксплуатацию турбогенератор мощностью 2,5 тыс. квт Пажутской геотермальной электростанции, опытной установки по использованию внутреннего тепла земли. В 1967 году войдет в работу второй агрегат такой же мощности.

Если в техническом прогрессе теплоэнергетики ведущая роль принадлежит технологическому оборудованию, а экономика производства, в основном, определяется видом топлива, величиной параметров пара и единичной мощностью агрегата, то технический прогресс гидроэнергетики в первую очередь зависит от совершенствования типов сооружений, их компоновки, методов и степени механизации работ в их строительстве. Это следствие огромного объема работ и того, что к. п. д. гидросилового оборудования в современных образцах машин находится на столь высоком уровне (более 90%), что здесь трудно ожидать каких-либо серьезных усовершенствований, кроме снижения веса машин и улучшения условий их эксплуатации, а также оказания влияния на уменьшение объема строительных работ (горизонтальные типы гидроагрегатов).

Строительство Волховской, Днепровской и Нижне-Свирской гидростанций оказали исключительное влияние на все последующее развитие отечественной гидроэнергетики.

Если строительство Волховской ГЭС явилось только зачатком механизации массовых работ на крупномасштабном (по тому времени) объекте, то сооружение Днепровской ГЭС стало объектом, на котором в полной мере были использованы последние достижения передовых зарубежных стран в области методов производства гидротехнических работ и комплексной механизации разработки скалы, приготовления и укладки бетона, производства инертных материалов и много другого, что непосредственно связано со строительством крупнейшего гидроузла. Нижне-Свирская ГЭС была первым крупным гидросооружением, построенным на мягких грунтах в исключительно тяжелых гидрогеологических и геологических условиях. Огромный опыт, полученный при этом, был в последующем развит на многих других гидроэнергетических и водотранспортных стройках. Это позволило уверенно и надежно строить на слабых грунтах крупнейшие гиротехнические сооружения.

От сооружения бетонных и земляных плотин с напором 36, 40, 67, 81, 106, 101 м (Днепровская, Усть-Каменогорская, Бухтарминская, Мингечаурская, Братская и Красноярская ГЭС) гидростроители вплотную подошли к сооружению арочных бетонных плотин высотой 210 м на Токтогульской ГЭС, 230 м на Чиркейской ГЭС, 270 м на ГЭС Ингури и земляных плотин высотой 160 м и 300 м на Чарvakской и Нурукской ГЭС.

В настоящее время работают свыше 170 районных гидростанций с напором от 7,5 до 580 м. Построены подземные гидростанции и оригинальные судоходные устройства. Сооружено более 160 км гидротехнических тоннелей и многокилометровые каналы большой водопропускной способности.

Строительство гидростанций развивалось, исходя из многих факторов, в том числе судоходства, орошения, лесосплава, водоснабжения, борьбы с на-

воднениями и др. и шло по пути сооружения каскадов гидростанций.

Волжские, Караванская и Цимлянская ГЭС построены из учета возможности орошения 4,75 млн. га и обводнения 9,7 млн. га земель. Сооружение Фархадской ГЭС позволило оросить 150 тыс. га земель в Голодной степи, а ввод в действие Кайрак-Кумской ГЭС увеличил возможности орошения всех 500 тыс. га земель в этой степи. Мингечаурская ГЭС защищает от губительных речных паводков нижележащую Кура-Араксинскую низменность и позволяет оросить 1,3 млн. га ее плодородных земель.

Строящаяся Нурекская ГЭС, помимо ежегодной выработки 11,8 млрд. квт·ч электроэнергии, что делает ее опорным звеном Единой среднеазиатской энергосистемы, обеспечит орошение и улучшение водоснабжения более 1,5 млн. га земель.

Сооружение каскадов гидростанций дает возможность наиболее полно использовать весь энергетический потенциал реки, обеспечить сплошной глубоководный путь. Вместе с тем, это помогает созданию единой системы глубоководных внутренних путей.

Волжско-Камский, Днепровский, Севан-Разданский, Чирчик-Бозсуйский, Ковдинский, Нижне-Выгский, Свирский, Нивский, Ангарский — вот основные действующие каскады ГЭС.

Образование районных энергетических систем и последующее укрупнение их в мощные объединенные энергосистемы неразрывно связано с развитием электросетевого хозяйства.

В 1922—1927 гг. были периодом освоения и начала строительства линий электропередачи напряжением 100 кв (первая построенная на это напряжение была линия Кашира — Москва длиною 120 км). В 1932—1936 годах началось сооружение магистральных линий напряжением 220 кв. В 1933 году вошла в действие первая в стране линия 220 кв Свирская ГЭС — Ленинград длиною 240 км.

Рост мощности энергосистем привел к строительству линий электропередачи напряжением 400—500 кв. Первая из них, Куйбышев—Москва длиной 900 км была введена в действие в 1956 году. В 1957 году было решено заменить напряжение 400 кв на напряжение 500 кв. В связи с этим действовавшие линии Куйбышев—Москва и Куйбышев—Урал (1 000 км) были переведены на это напряжение. За семилетие были построены такие важные линии напряжением 500 кв, как Волгоград—Москва (1 000 км), Братск—Иркутск (580 км), Братск—Красноярск—Кузбасс (1 100 км).

Линии электропередачи напряжением 220, 330 и 500 кв служат в настоящее время межсистемными связями, образующими энергообъединения Европейской части страны и Сибири. Протяженность этих линий на начало 1967 года составила более 47 тыс. км.

С 1961 года находится в опытно-промышленной эксплуатации линия постоянного тока 800 кв Волгоград—Донбасс. Построена и в ближайшее время войдет в эксплуатацию линия электропередачи переменного тока 750 кв Конаково—Москва (в настоящее время она работает на напряжении 500 кв).

Опыт эксплуатации этих линий позволит правильно запроектировать сверхдалние линии электропередачи напряжением 1 500 кв постоянного тока и 750 кв переменного тока для передачи мощных потоков электроэнергии на Западной Сибири на Урал и из Казахстана в Центральные районы страны.

В настоящее время сетями напряжением 35 кв и выше охвачено около 60% обжитой территории страны (против 20% в 1958 г.).

Большие успехи достигнуты в электрификации сельского хозяйства. Особенно быстрыми темпами развивалась сельская электрификация после 1953 года, когда главным направлением в этом деле стало подключение колхозов и совхозов к сетям энергосистем. За это время к 1967 году отпуск электроэнергии сельским потребителям от энергосистем увеличился в 19 раз и достиг 17 млрд. квт·ч или около 72% общего потребления электроэнергии в сельском хозяйстве. В настоящее время более половины колхозов и совхозов страны получают электроэнергию от энергосистем.

Только за последние 4 года (1963—1966 гг.) введено в действие 930 тыс. км сельских линий электропередачи 0,4—110 кв, что составляет почти половину протяженности всех сельских электросетей, построенных за время проведения сельской электрификации.

Развитие энергетики в 1966—1970 гг. пойдет в соответствии с Директивами по новому пятилетнему плану развития народного хозяйства, утвержденными XXIII съездом КПСС, с учетом итогов развития народного хозяйства за первые два года пятилетки.

К 1970 г. производство электроэнергии возрастает до 800 млрд. квт·ч, что почти в 1,6 раза превышает уровень 1965 г.

Главным направлением в развитии электрификации на ближайшие годы будет дальнейшая централизация электроснабжения и концентрация мощностей на районных электростанциях. Последнее должно быть осуществлено на тепловых электростанциях мощностью 2,4 млн. квт и выше с преимущественной установкой энергоблоков мощностью 300 тыс. квт (войдут в действие также семь блоков мощностью 500 и 800 тыс. квт).

За текущее пятилетие на электростанциях необходимо обеспечить снижение не менее чем на 12% удельных расходов условного топлива.

Техническая основа роста централизации электроснабжения — это дальнейшее развитие электросетей и образование новых объединенных энергосистем.

В скором будущем протяженность линий электропередачи напряжением 35 кв и выше увеличится в 1,5 раза, а линий для электрификации сельского хозяйства — примерно в 2 раза; будут завершены работы по созданию Единой энергосистемы Европейской части СССР, электросети которой практически охватят всю обжитую территорию этой части нашей Родины.

В этом пятилетии должно быть уделено большое внимание мероприятиям, связанным с освоением линий электропередачи переменного тока напряжением 750 кв и постоянного тока напряжением 1 500 кв, что необходимо для переброски в ближай-

шие годы больших количеств электроэнергии из восточных районов страны в Европейскую часть СССР.

Необходимо также улучшить систему капитальных и текущих ремонтов энергетического оборудования, снизить стоимость ремонтов и сроки их проведения.

Вместе с тем должны быть проведены обширные работы по освоению новых перспективных способов получения электроэнергии, в том числе дальнейшее освоение крупных газотурбинных установок, парогазовых циклов, магнитогидродинамического метода производства электроэнергии, расширение строительства атомных электростанций и др.

Исключительно важной мерой в улучшении хозяйственной и экономической деятельности является перевод предприятий и строек Министерства энергетики и электрификации СССР на новую систему планирования и экономического стимулирования. В настоящее время переведено 27 энергосистем, 376 энергетических и 4 промышленных предприятия. Однако при решении этого вопроса требуется учитывать специфику, присущую энергетическим предприятиям, которая заключается в следующем.

Количество произведенной электро- и тепловой энергии в точности соответствуют их потреблению. Поэтому степень использования основных фондов энергопредприятий целиком зависит от графика потребления, а это ограничивает возможности использования основных фондов в результате усилий коллективов.

Энергохозяйство страны состоит из ряда крупных объединенных энергосистем. Оперативное управление производством электроэнергии осуществляется диспетчерскими пунктами, которые ведут эту работу, исходя из народнохозяйственной целесообразности. В то же время хозяйственныe интересы отдельных энергосистем, входящих в энергобольшинства, часто не совпадают с интересами энергообъединения в целом. Это противоречие весьма усложняет перевод энергетических предприятий на новую систему. Существуют и другие трудности. Электростанции не производят товарной продукции, отдавая выработанную электроэнергию в общую сеть. В то же время сетевые предприятия осуществляют только транспорт электроэнергии и не имеют функций сбыта. Лишь энергосистема

в целом является комплексным хозрасчетным органом, в составе которого осуществляется производство, транспорт и сбыт продукции. В то же время необходимо обеспечить заинтересованность всех коллективов энергосистемы в экономических результатах их деятельности. Задача заключается в том, чтобы, имея показатели реализации и прибыли только по энергосистеме в целом, обеспечить каждой электростанции, сетевому району, энергосбыту энергосистемы и самой энергосистеме в целом наиболее экономичные показатели работы по новой экономической системе.

Продажа электроэнергии различным категориям потребителей производится по разным тарифам. Поэтому при одном и том же полезном ее отпуске, но продаже различным категориям потребителей объем реализации в денежном выражении претерпевает различные изменения. Следовательно, степень выполнения плана реализации продукции зависит не только от усилий коллективов, но и от того, насколько точно предусмотрены в плане категории потребителей и объем продаваемой электроэнергии.

Одной из важных задач энергетиков является полное завершение в ближайшие несколько лет электрификации обжитой части страны, в том числе всего сельского хозяйства. Это связано с непрерывным и большим ростом дорогостоящих электрических сетей, которые существенно увеличивают пассивную часть основных фондов, так как электросети лишь транспортируют, но не производят электроэнергию. Большой удельный вес пассивных фондов и их быстрый рост отрицательно отражаются на эффективности использования основных фондов, что требуется учитывать в оценке хозяйственной деятельности энергетических предприятий, в то время как в других отраслях промышленности такого явления нет.

В 1967 юбилейном году в стране будет произведено почти 600 млрд. квт·ч электроэнергии, войдет в действие 10 млн. квт новой энергетической мощности, на тепловых электростанциях будет введено блоками 150, 200 и 300 тыс. квт более половины всей мощности, войдут в действие линии электропередачи напряжением 35 кв и выше протяженностью 28,5 тыс. км и напряжением 0,4—20 кв протяженностью 256 тыс. км. Над осуществлением этой программы трудятся энергетики нашей страны.



Слава великому советскому народу — доблестному строителю коммунизма, мужественному борцу за свободу, мир и счастье трудящихся!

(Из призывов ЦК КПСС к 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции)

УДК 621.311

Важнейшие научно-технические проблемы развития отечественной энергетики

Г. В. АЛЕКСЕНКО

Заместитель председателя Государственного комитета по науке и технике Совета Министров СССР

Отмечая 50-летие победы Великой Октябрьской социалистической революции, каждый из нас вспоминает основные этапы пройденного пути и испытывает законное чувство гордости за свою Родину. Для электриков и энергетиков, работников многих других отраслей народного хозяйства, важнейшим событием первых лет существования Советской власти является принятие VIII Всероссийским съездом Советов Ленинского плана электрификации России — «первого шага великого хозяйственного начинания». Значение этого плана для нашей страны заключалось не только в определении конкретных энергетических объектов, которые необходимо было построить в течение ближайших 10 лет, но и в разработке основных научных принципов планирования народного хозяйства социалистического государства, которые не потеряли силу и в наши дни.

В плане ГОЭЛРО электрификация страны рассматривалась как основная база развития промышленности и сельского хозяйства, обеспечивающая поднятие его технического уровня, повышения культуры производства и производительности труда. Опережающие темпы развития энергетики заложивались во все последующие хозяйствственные планы нашей страны, благодаря чему энерговооруженность и электровооруженность труда, а следовательно, и его производительность росли быстрыми темпами.

Основным направлением развития энергетики Советского Союза, начиная с плана ГОЭЛРО, является централизация электроснабжения потребителей. Уже в 1928 г. от сетей энергосистем питалось 38,9% потребителей, а в 1965 г. — 94%.

Для организации централизованного электроснабжения потребовалась большая работа по строительству электрических сетей как магистральных, так и распределительных. Наиболее высоки были темпы сетевого строительства за последнее семилетие.

Именно в этот период в Советском Союзе создавались крупные объединенные энергосистемы, позволившие поднять электроснабжение на новый технический уровень.

К концу 1965 г. в СССР имелось около 90 районных энергетических систем и 9 объединенных энергосистем — Центра, Юга, Урала, Среднего По-

волжья, Северного Кавказа, Закавказья, Северо-Запада, Центральной Сибири и Средней Азии. На базе первых пяти объединенных энергосистем была сформирована Единая энергетическая система Европейской части СССР (ЕЭС), установленная мощность электростанций которой к концу 1965 г. достигла 54 млн. квт, а выработка электроэнергии — 292 млрд. квт·ч.

К концу текущего пятилетия намечается закончить формирование ЕЭС и создать объединенные энергосистемы в Северном Казахстане, Забайкалье и на Дальнем Востоке.

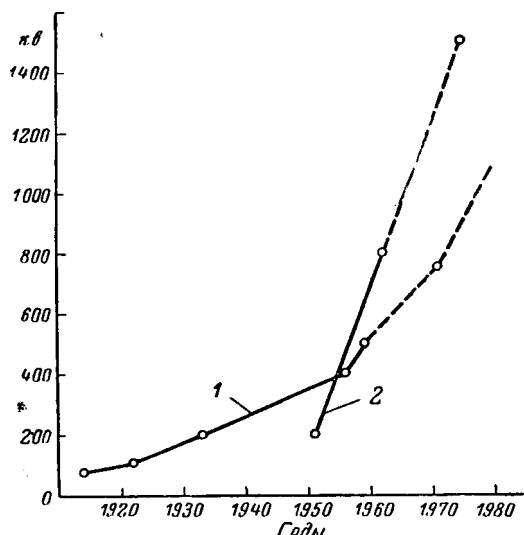
Как указывалось в статье акад. Л. А. Мелентьева¹, топливно-энергетический баланс Советского Союза на 1965—1980 гг. складывается таким образом, что для энергоснабжения центральных районов необходимо существенное развитие атомной энергетики и передача большого количества электроэнергии из восточных районов страны в центральные. Эту передачу намечено осуществить по линии постоянного тока 1 500 кв (± 750 кв) из Экибастуз и Итата в центр. После сооружения этой линии мощными электрическими связями будут объединены все основные промышленно-развитые районы страны и тем самым будет создана основа Единой энергетической системы Советского Союза.

В ближайшее десятилетие ежегодный ввод новых генерирующих мощностей в 2—2,5 раза превысит достигнутый в 1965 г. уровень, причем все эти мощности будут сосредоточены на районных электростанциях, объединенных в системы. Структура вводимых в строй новых генерирующих мощностей должна определяться на основании оптимизации балансов мощности и энергии в энергетических системах с учетом межсистемных связей и условий теплоснабжения отдельных районов страны.

Примерная структура генерирующих мощностей в ближайшие годы в целом по стране представляется так: около 51% всей мощности сосредоточено на КЭС, 28% на ТЭЦ и 21% на ГЭС. Около 84% выработки электроэнергии будут давать КЭС и ТЭЦ, т. е. основная масса электроэнергии будет вырабатываться на тепловых электростанциях.

В публикуемой в настоящем номере статье Министра энергетики и электрификации СССР

¹ «Электричество», 1967, № 6.



Динамика роста наивысших номинальных напряжений, применяемых в энергосистемах СССР.
1 — переменный ток; 2 — постоянный ток.

П. С. Непорожнего даны основные этапы по осуществлению сплошной электрификации СССР и намечены перспективы на ближайшие годы. В этой статье мы остановимся на важнейших научно-технических проблемах, которые надо решить для успешного выполнения задач, поставленных перед советскими энергетиками.

Создание энергетических систем и развитие крупнейших энергетических объединений ставит ряд вопросов, связанных с планированием, проектированием и эксплуатацией сверхмощных объединений.

Прежде всего должна быть разработана методика выбора наиболее рационального построения системообразующей сети и межсистемных связей и методика определения оптимального уровня надежности энергосистем. Теория надежности сложных объектов пока еще не разработана, а без этой теории трудно решать такие важные вопросы как выбор величины резерва мощности, определение наиболее выгодной единичной мощности энергоблоков для данной системы, установление рациональных сроков службы агрегатов и длительности межремонтных периодов и т. д.

Должна быть разработана оптимальная система управления энергообъединениями с широким использованием современных средств вычислительной и управляющей техники, связи и телемеханики. В практику эксплуатации энергосистем необходимо ввести расчеты экономически оптимальных режимов энергосистем и автоматическую реализацию этих режимов. Для этой цели научно-исследовательские организации должны разработать программы для универсальных и специализированных цифровых вычислительных машин и рекомендации по оснащению энергосистем этими машинами.

В Советском Союзе всегда большое внимание уделялось повышению устойчивости электрических систем. Наличие дальних, сильно нагруженных линий электропередачи, объединение энергосистем потребовали серьезной проработки методов

повышения устойчивости (автоматическое регулирование возбуждения, автоматическая разгрузка по частоте, автоматы повторного включения, аварийное регулирование паровых турбин, автоматическое управление нагрузкой линий постоянного тока и др.) и разработке более тонких методов определения оптимальных уровней устойчивости энергосистем.

Необходимо также решить вопросы автоматизации нормальных и аварийных режимов работы электрических систем, найдя правильное сочетание централизованной и децентрализованной систем автоматизации. В области релейной защиты следует ускорить работы по созданию принципиально новых решений, например, защит, реагирующих на волновые процессы в линиях электропередачи и обмотках электрических машин.

Укрупнение электрических систем, увеличение дальности электропередач и передаваемой по ним мощности привели к непрерывному росту номинальных напряжений (см. рисунок). Предварительные проработки, проведенные институтом Энергосетьпроект, показывают, что уже за пределами 1975 г. необходимо освоение не только электропередач постоянного тока напряжением 1 500 кв, но и с напряжением 2 200 кв, а также следующей ступени переменного напряжения, которая должна иметь порядок 1 000—1 200 кв. Применение таких сверхвысоких напряжений требует серьезной работы по ограничению перенапряжений, исследованию и ограничению потерь энергии и радиопомех, вызываемых коронным разрядом на проводах и арматуре линий электропередачи, применению новых изоляционных материалов и созданию более совершенных и надежных изоляционных конструкций.

Для осуществления намеченных планов развития электрификации нашей страны электропромышленность должна создать серию уникальных машин и аппаратов. Так, например, потребуются автотрансформаторы 750 и 1 000—1 200 кв мощностью до 1 250 МвА в группе с регулированием напряжения под нагрузкой, реакторы мощностью 300—600 МвА, синхронные компенсаторы мощностью 200 Мвар. Отключающая способность выключателей должна быть увеличена до 60—80 МвА. Одновременно следует искать новые пути уменьшения токов короткого замыкания в энергосистемах.

Необходимо создать надежные конструкции комплектных распределительных подстанций мощностью до 300 МвА с малогабаритными трансформаторами. Следует начать поисковые работы по использованию на таких подстанциях в качестве изолирующей среды газа под давлением, применение которого может оказаться весьма перспективным, новых изолирующих жидкостей и др.

Увеличение мощности турбогенераторов настоятельно требует увеличения их номинального напряжения, что одновременно несколько упрощает изготовление повышающих трансформаторов. При мерно к 1970 г. следует обеспечить переход всех турбогенераторов на новые виды изоляции статора и освоить напряжение 24 кв. Необходимо также работать над созданием изоляции на еще более высокие номинальные напряжения, в частности будущие машины с изоляцией, первые попытки приме-

нения которой уже сделаны Новосибирским турбогенераторным заводом.

Большие работы предстоят также по усовершенствованию систем возбуждения генераторов. В частности, предстоит ликвидировать имеющееся отставание в области создания бесщеточных систем с управляемыми вращающимися выпрямителями.

Для линий постоянного тока необходимо создать мощные полупроводниковые и ионные вентили, силовые, вольтодобавочные и изолирующие трансформаторы, мостовые и линейные фильтровые реакторы, защитные аппараты и другое оборудование.

Для решения этих сложнейших задач электропромышленность и научно-исследовательские организации должны быть оснащены рядом испытательных стендов и лабораторий. Требуется соорудить опытные линии постоянного и переменного токов соответственно напряжением 2 200 и 1 200 кв, ударные генераторы мощностью 8—9 тыс. Мвт, синтетические схемы для испытания выключателей с отключаемой мощностью 60÷80 тыс. Мвт, генераторы импульсных напряжений на 10 млн. в, каскадные трансформаторы напряжением 2,25—3,0 млн. в, установки постоянного напряжения 2,4 млн. в, 0,5 а, стенд для испытания мощных вентилей 4 000 а, 250 кв и многое другое.

Необходимо выполнять ряд научных исследований и проектных разработок по оптимизации построения распределительных сетей. В частности, следует обосновать целесообразность перехода с системы напряжений 110/6 кв на более перспективную систему 110/10—20 кв. В распределительные сети следует внедрять средства новой техники для регулирования напряжения, сетевой автоматики и телемеханики с целью обеспечить необходимое качество напряжения у потребителя и надежность электроснабжения.

Строительство крупнейших тепловых электростанций выдвигает целый ряд сложных научно-технических проблем, среди которых не последнее место занимает задача защиты воздушного бассейна от загрязнений вредными выбросами из дымовых труб. Необходимо срочно ликвидировать отставание в области создания мощных высокоеффективных электрофильтров и обеспечить их своевременный пуск на вновь строящихся ГРЭС и ТЭЦ. Увеличивающееся использование высокосернистых мазутов и газовых углей донецкого месторождения выдвигает проблему улавливания сернистого ангидрида или его эффективного рассеивания. В последнем случае следует для мощных станций строить трубы высотой до 320 м, что значительно удорожает строительство.

Важное значение для крупных ТЭЦ имеет правильная организация электроснабжения собственных нужд. Укрупнение энергоблоков требует соответствующего укрупнения механизмов и двигателей собственных нужд, на что до сих пор не обращалось должного внимания.

В настоящее время во всем мире работают газотурбинные установки общей мощностью около 16 тыс. Мвт. Эти установки могут найти применение, в первую очередь, в качестве пиковых станций, а также резервных станций на промышленных пред-

приятиях, удаленных от системы. Первое время они будут работать на газе или мазуте. Использование для них твердого топлива пока встречает большие трудности. В настоящее время для энергетики созданы и находятся в процессе наладки газотурбинные установки мощностью 12, 25 и 50 Мвт. Разрабатывается пиковая газотурбинная установка мощностью 100 Мвт.

Использование на тепловых станциях неводяных паров может решить две проблемы, каждая из которых обеспечивает увеличение к. п. д. станции. Проблема повышения единичной мощности турбогенераторов может быть решена путем применения рабочих тел, давление пара которых было бы существенно выше давления водяного пара на выхлопе (например, водо-фреоновые циклы). Путем применения низкотемпературных веществ (углекислота) или жидких металлов (натрий, ртуть) можно решить проблему повышения разности температур рабочего тела в начале и конце цикла.

Наиболее эффективный путь увеличения к. п. д. тепловых станций заключается в значительном повышении начального температурного уровня рабочего тела. С этой точки зрения перспективными являются тепловые станции с МГД-генераторами, в которых высокотемпературная часть установки, преобразующая тепловую энергию в электрическую, осуществляется без вращающихся частей, что существенно облегчает условия работы конструкционных материалов.

Коэффициент полезного действия с МГД-генератором уже в первых опытах их внедрения будет, по-видимому, составлять около 55%, а в дальнейшем может быть увеличен до 60%.

Использование МГД-генераторов в большой энергетике может идти по двум направлениям.

1. Тепловые станции с МГД-генератором, работающим на продуктах сгорания газообразного или жидкого топлива (открытый цикл). Эти установки наиболее просты по своему принципу и имеют более близкую перспективу промышленного внедрения.

2. Атомные электростанции, в которых МГД-генератор работает на инертном газе, нагреваемом в атомном реакторе (закрытый цикл).

Для создания промышленных МГД-установок необходимо решить ряд исследовательских, проектно-изыскательских и конструкторских работ.

Основное направление развития современной теплотехники заключается в непрерывном увеличении рабочих температур, поэтому задача создания жаропрочных материалов очень актуальна. Что касается явления сверхпроводимости, то эффект от его применения в электротехнических установках в настоящее время трудно оценить, однако ясно, что он будет большим.

В частности, необходимо проводить научно-исследовательские работы по изысканию возможности применения сверхпроводящих линий. Как известно, развитие энергетики сопровождается непрерывным ростом номинальных напряжений линий электропередач. Если экстраполировать кривую, изображенную на рисунке за пределы 1980 г., то окажется, что через 20—25 лет для передачи энергии по-

требовалось бы внедрение номинального напряжения порядка 1 500—2 000 кв_{макс} относительно земли. Эксперименты показывают, что воздушные линии электропередачи на такие напряжения построить весьма трудно, так как изолирующие свойства воздуха оказываются практически исчерпанными. Один из возможных путей создания мощных электропередач — применение сверхпроводящих кабельных линий, работающих при относительно низких напряжениях (порядка 100—200 кв), но с очень большими токами. Следует также оценить техническую возможность осуществления передачи энергии по волноводам при высокой частоте (предложение акад. П. Л. Капицы) и электрокинетических передач (предложение акад. А. М. Буддера).

Для осуществления задач, поставленных партией и правительством по созданию материально-технической базы коммунизма, необходимо сохранить и в будущем опережающие темпы развития

энергетики и электротехники. Однако из важнейших условий для этого — систематическое повышение технического уровня энергетики путем внедрения новой техники, находящейся на уровне лучших достижений отечественной и мировой науки. Энергетика должна быть передовой отраслью народного хозяйства не только по темпам количественного роста, но и по научно-техническому уровню. Поэтому особенно большое значение имеет правильная организация научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ. Необходимо найти разумную пропорцию между работами сегодняшнего дня и работами, рассчитанными на ближайшую и дальнюю перспективы.

Славные традиции советских энергетиков и электротехников, начало которым положено ленинским планом электрификации России, являются залогом успешного выполнения стоящих перед ними грандиозных задач.



УДК 621.3

Основные этапы развития автоматизированного электропривода в СССР

А. И. МАЙОРЕН

Зам. министра Электротехнической промышленности

Электротехническая промышленность Советского Союза, ее многотысячный коллектив рабочих, инженерных работников и служащих, как и весь советский народ, отмечают 50-летие Советского государства новыми трудовыми достижениями.

За истекшие 50 лет советский народ под руководством КПСС добился исторических достижений в социальной, культурной и экономической областях. Эти достижения основаны, в частности, на непрерывном росте производительности общественного труда; совершенствовании производственных процессов; электрификации, механизации и автоматизации машинного оборудования всех отраслей народного хозяйства.

В России вплоть до Великой Октябрьской социалистической революции мускульная сила оставалась во многих производствах основным видом привода. Земляные работы при строительстве железных дорог, производственных и жилых помещений, внутрицеховой и внутризаводской транспорт в промышленности были основаны главным образом на использовании неквалифицированной рабочей силы.

Годовая выработка электроэнергии в царской России была приблизительно равна лишь полутора-дневной выработке электроэнергии в нашей стране в настоящее время. Основным видом машинного привода был привод от механических двигателей. Слабой стороной этого привода была недостаточная дробимость мощности, ставшая на пути развития

непрерывно-поточного производства и затруднявшая широкое применение индивидуального привода. Для наиболее мощных машин применялся паровой привод, реже — двигатель внутреннего сгорания. Привод промышленных механизмов мощностью до 100 л. с. осуществлялся, как правило, с применением паровых, гидравлических и пневматических устройств. Некоторое применение в этих механизмах находил также электропривод. Однако почти везде предпочитался дешевый тяжелый ручной труд.

После Великой Октябрьской революции, окончания гражданской войны и разгрома иностранных интервентов партия и правительство в 1920 г. поставили вопрос о хозяйственном строительстве, коренной реорганизации всего народного хозяйства. На основе указаний IX съезда партии по инициативе и под руководством В. И. Ленина был разработан план развития хозяйства страны Советов — план ГОЭЛРО.

В плане ГОЭЛРО была дана принципиальная оценка значимости электропривода в развитии экономического потенциала страны: «...если бы мы сосредоточили все усилия исключительно на паровом хозяйстве и на двигателях внутреннего сгорания, нам пришлось бы идти гораздо более рассыпным строем и понести значительно большие материальные и персональные потери...» [Л. 1].

На основании плана ГОЭЛРО и довоенных пятилеток периода 1928—1941 гг. происходит плано-

мерное восстановление и развитие отечественной машиностроительной и электротехнической промышленности, реконструкция старых и строительство новых машиностроительных, металлургических и электромеханических заводов. На электромеханических заводах создаются крупные конструкторские бюро и лаборатории, определяется собственная техническая политика.

Большое значение в довоенные годы приобрели разработка вопросов теории и практика автоматизированного электропривода.

Ведущее значение при этом имел металлургический электропривод. Это положение металлургического электропривода определялось не только необходимостью первоочередного развития металлургии, но также специфическими особенностями металлургического электропривода, доменного и прокатного электрооборудования, отличавшегося значительной мощностью, весом, сложностью и высокими требованиями к надежности и безотказности работы. Первые довоенные конференции по электроприводу в Харькове были посвящены металлургическому электроприводу. На металлургических агрегатах в этот предвоенный период развития электропривода широкое применение получает релейно-контакторная аппаратура. На ХЭМЗ были созданы первая отечественная система комплексной автоматизации — автоматическая загрузочная система доменных печей, система управления главным приводом блюминга, первые отечественные системы Г—Д для главного подъемника доменных печей и основных механизмов блюминга, автоматизированный электропривод для холоднокатных и других станов.

Развитие электропривода в довоенные годы проходило главным образом на основе работы трех заводов электротехнической промышленности: ХЭМЗ, «Электросила» им. С. М. Кирова и «Динамо» им. С. М. Кирова. В соответствии со специализацией, установленной в то время для этих заводов, ХЭМЗ специализировался в области производства комплектных электроприводов, электромашин, электрической аппаратуры управления и релейной защиты, а также в области точной электромеханики и регуляторостроения. Завод «Электросила» был специализирован в области электромашиностроения, а завод «Динамо» — в области комплектного электрооборудования для электротяги и внутризаводского транспорта.

Заводом «Динамо» были освоены: электрооборудование для первых советских электровозов, тепловозов, Московского метрополитена, пригородных электропоездов, серии крановых электродвигателей и комплектующей их релейной-контакторной аппаратуры в виде автоматизированных магнитных контроллеров.

Завод «Электросила» изготавлял все виды электромашин, включая турбогенераторы мощностью до 100 тыс. квт, наиболее крупные в то время гидрогенераторы, прокатные двигатели блюмингов и других прокатных станов, питающие их преобразовательные агрегаты и др. В 1926—1927 гг. завод «Электросила» выпустил для электропривода прядильных машин серию коллекторных двигателей переменного тока с питанием через ротор и по-

воротными щетками для регулирования скорости в отношении 2:1. В 1940 г. эта серия была модернизирована и выпущена для нужд текстильной и полиграфической промышленности. В 1929—1935 гг. был выпущен ряд серий асинхронных короткозамкнутых обдуваемых электродвигателей с повышенным пусковым моментом для текстильной промышленности [Л. 4].

В 1934 г. заводом «Электросила» была выпущена серия многоскоростных короткозамкнутых двигателей с переключением полюсов. В 30-х годах этим заводом была освоена серия специальных рольганговых электродвигателей АЗР, получивших большое распространение на металлургических заводах СССР.

В 1931 г. на ХЭМЗ были организованы отдел и лаборатория автоматизированного электропривода, которые в довоенные годы выполнили значительную работу по освоению электроприводов. Большой размах и научная постановка работ по электроприводу, комплексность проведенных работ, включая исследование, проектирование, изготовление и наладку электрооборудования, завершенность и результативность работ, имели важное значение при становлении и развитии в Советском Союзе теории и практики автоматизированного электропривода. Информация о работах по электроприводу ХЭМЗ, опубликованная в журналах «Электричество», «Вестник электропромышленности», «Автоматика и телемеханика», способствовала развитию электропривода и машиностроения в нашей стране.

Велись работы по электроприводу в угольной, нефтяной, железорудной, металлургической промышленности, по электроприводу лифтов высотных зданий, автоматизации тепловых и гидроэлектростанций, а также целый ряд других промышленных и специальных работ по электроприводу. Для доменных печей было освоено и поставлялось комплексное электрооборудование автоматических грузочных систем. Впервые в мировой практике эта система поставлялась как комплексная система электроприводов и электроавтоматики. Для прокатных станов были разработаны все виды систем электропривода и электроавтоматики, в том числе для индивидуального электропривода валков блюмингов, для непрерывных станов горячей и холодной прокатки.

В 1936 г. впервые в мировой практике специалистами Советского Союза были начаты работы по комплексной автоматизации макеевского блюминга [Л. 5]. Разрабатывались и изготавливались все виды комплектного электрооборудования для подземных выработок в угольной промышленности, на рудниках и шахтах и комплектного электропривода для шахтных подъемных машин постоянного и переменного токов. Большое внимание уделялось электрификации и автоматизации бурения в нефтяной промышленности. Высокого уровня совершенства достиг разработанный и изготовленный ХЭМЗ комплектный многодвигательный электропривод бумагоделательных машин, впервые освоенный в 1934 г. Первая автоматизированная в СССР Рублевская гидроэлектростанция на Москве-реке была оснащена аппаратурой и автоматикой ХЭМЗ. Были созданы оригинальные копировальные следящие си-

стемы для станков-автоматов. Высокого развития на ХЭМЗ достигли работы по созданию средств автоматизации. Разрабатывались электромашинные усилители с поперечным полем, магнитные усилители, фотоэлектронные устройства и другие новые виды регуляторов и средств автоматизации, освоенные за рубежом лишь в послевоенные годы. К концу 30-х и в начале 40-х годов техника автоматизированного электропривода, а вместе с ней и машинного оборудования в СССР достигла высокого уровня развития и в ряде направлений превысила уровень, достигнутый в то время в США и других капиталистических странах.

В электротехнической промышленности было освоено производство всех видов сложного электрооборудования для генерирования, передачи, преобразования и распределения электроэнергии, все виды приемников электроэнергии, включая электротермические, электросварочные, электролизные установки, медицинское электрооборудование (рентгеноскопия и др.), светотехническое оборудование. Однако особое развитие получили к тому времени металлургический электропривод, средства автоматизации и системы управления. Импорт электрооборудования для металлургии был полностью прекращен. Страна в достатке получила сложное металлургическое электрооборудование.

В первый период Великой Отечественной войны наращиваемые в Поволжье, на Урале и в Сибири мощности металлургической, химической и других отраслей промышленности требовали огромного количества дополнительной электроэнергии, изготовления и ввода в действие значительных мощностей электроприводов. После перелома в ходе Великой Отечественной войны и начала освобождения от фашистских захватчиков оккупированных районов эта задача еще более осложнилась, так как потребовалось вводить в действие разрушенные металлургические и химические предприятия, электрические станции, рудники, шахты и предприятия машиностроения.

В связи с указанным перед электропромышленностью СССР была поставлена задача — обеспечить восстановление электрооборудования и создать условия для непрерывного наращивания производственных мощностей электростанций, черной и цветной металлургии и других отраслей промышленности. С этой целью в 1942 г. было организовано специальное проектно-монтажное бюро «ПМБ 644» Народного комисариата электропромышленности, на которое была возложена задача восстановления в нашем народном хозяйстве крупного силового электрооборудования и электротехники. Позднее, в том же 1942 г., постановлением Государственного комитета обороны СССР «ПМБ 644» было реорганизовано в проектно-монтажный трест.

Под руководством КПСС и Советского правительства, благодаря творческому размаху и самоотверженности советских рабочих и специалистов, разрушенные заводы электротехнической промышленности были восстановлены в минимальные сроки.

В первые послевоенные годы наряду с восстановлением происходило развитие автоматизирован-

ного электропривода во всех направлениях: развивались силовые, преобразовательные, передаточные механизмы и средства автоматики, создавались новые системы комплексной автоматизации производственных процессов, модернизировались и автоматизировались электроприводы действующих агрегатов, проводилась унификация и типизация электрооборудования. Широкое применение получили электромашинные усилители, системы Г—Д и др.

Указанные усовершенствования и в настоящее время играют значительную роль в производстве как в нашей стране, так и за рубежом. Период развития отечественного электропривода за 1951—1960 гг. был исключительно плодотворен и не имел precedентов в практике развитых капиталистических стран. В табл. 1 с использованием данных, опубликованных в [Л. 2] и МЭП, представлены количественные показатели роста производства основного электрооборудования, комплектующего электропривода. Как видно из табл. 1, за десятилетие производство наиболее массовых электродвигателей переменного тока мощностью до 100 квт выросло до 13,5 млн. квт в год или больше чем в 3 раза. Особенно сильно выросло производство крупных электромашин, основную часть которых (80%) составили электродвигатели и питающие их электромашинные преобразовательные агрегаты. За рассматриваемый период количество изготовленных крупных машин возросло почти в 6 раз и достигло 8 тыс. шт. в год. Суммарная мощность изготовленных в Советском Союзе электродвигателей в 1960 г. достигла 25 млн. квт. Это в 2,74 раза превысило суммарную мощность всех электродвигателей, изготовленных в Советском Союзе в 1950 г. Установленная мощность электродвигателей промышленных предприятий за этот период возросла с 26,4 до 70,2 млн. квт, т. е. в 2,66 раза.

Таблица 1

Рост производства основного электрооборудования, комплектующего электроприводы

Наименование электрооборудования	Производство			
	1950 г.	1960 г.	1965 г.	1966 г.
Электромашины крупные, шт.	1 383	7 972	15 300	15 964
Электромашины переменного тока мощностью до 100 квт:				
тыс. шт.	787	2 820	4 687	4233,5
тыс. квт	4 238	13 493	21 600	21581,7
Электродвигатели переменного тока мощностью свыше 100 квт:				
тыс. шт.	15,8	19,5	25,2	25,25
тыс. квт	2 536	4 101	5 300	5518,85
Электродвигатели взрывобезопасные:				
тыс. шт.	73,3	147,9	237,23	263,63
тыс. квт	929	1 859	2716,7	2919,94
Электродвигатели врубовые, шт.	2 266	4 364	—	3 434
Электродвигатели трамвайные, шт.	1 790	1 900	2 839	3 005
Машины постоянного тока, тыс. шт.	43	82,2	105,7	107,19
Магнитные станции, тыс. шт.	14,15	81,2	217,061	240,62
Магнитные станции в крупноблокном исполнении, тыс. шт.	—	2,5	42,2	47,0
Комплектные реверсивные статические управляемые преобразователи:				
рутные, тыс. квт	—	—	8 404	5 954
полупроводниковые, тыс. квт	—	—	2101,6	4 602

Результаты производственной деятельности электротехнической промышленности в течение десятилетия (1951—1960 гг.) характеризуются изготовлением электродвигателей мощностью 145 млн. квт при установленном парке их в 1950 г. в основной отрасли народного хозяйства — промышленности — 26,4 млн. квт. Следовательно, за этот период времени имело место многократное увеличение моторовооруженности во всех отраслях народного хозяйства и особенно в промышленности и на железнодорожном транспорте.

Рост установленной мощности электродвигателей в промышленности СССР характеризуют кривые, представленные на рис. 1. Как видно из рис. 1, для 50-х годов был характерен резкий перелом нарастания мощностей электродвигателей во всех отраслях народного хозяйства. Указанный количественный рост сопровождался также резким качественным техническим прогрессом автоматизированного электропривода. Это прежде всего выражалось в росте уровня автоматизации, в связи с чем количество изготавляемых магнитных станций возросло с 14 до 81 тыс. шт. или в 5,72 раза [Л. 3]. Наиболее значительным был рост производства крупных индивидуальных электромашин для наиболее сложных электрифицированных мощных видов машинного оборудования.

Таблица 2

Ряд реверсивных двигателей постоянного тока для блюмингов, слябингов и других обжимных прокатных станов

Мощность, квт	Скорость вращения, об/мин	Напряжение, в	Номинальный момент, т. м	Маховой момент якоря, т·м ²	Диаметр якоря, ми
10 000	56	930	174	540	3 800
9 000	63	930	138,5	370	3 400
5 600	63	930	116	287	3 100
4 500	71	750	61,8	135,8	2 500
4 000	85	750	45,9	82,5	2 150

Приложения. 1. Длина сердечника якоря — 1 500 мм.

2. При применении для сердечника якоря холоднокатаной стали величина махового момента уменьшается на 10—12%.

К этим видам машинного оборудования относятся: доменное и прокатное оборудование, оборудование для шахтного подъема и вентиляции рудников и шахт, нефтебурое оборудование, экскаваторы, крупные индивидуальные станки, бумагоделательные машины, лифты высотных зданий и др.

Разработка сложных автоматизированных электроприводов оказалась возможной благодаря серьезной научной, проектной и конструкторской работе, которая проводилась в течение ряда лет такими организациями, как ГПИ Тяжпромэлектро-проект, ЭНИМС, ВНИИМЕТМАШ и рядом высших учебных заведений (МЭИ, ЛПИ, ЛЭТИ, ХПИ и др.). Большое значение для развития электропривода в стране имело создание Центрального конструкторского бюро электропривода Министерства электротехнической промышленности (ныне ВНИИ электропривод). Сосредоточение в этой организации работ по электроприводу и автоматике для целого ряда отраслей народного хозяйства позволило ей обобщать опыт в различных областях и пере-

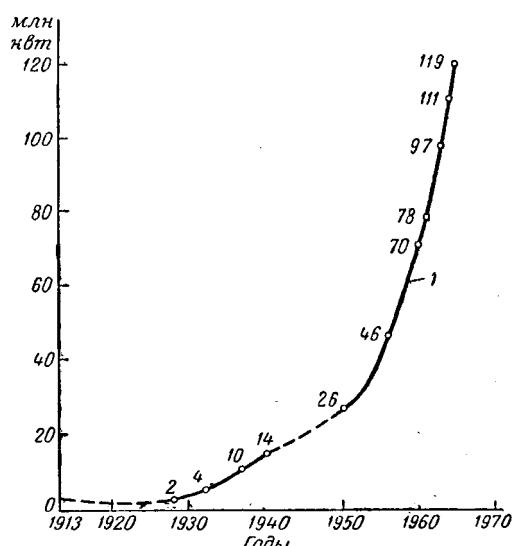


Рис. 1. Установленная мощность электродвигателей в промышленности СССР.

носить его из одной области в другую, что дало возможность значительно сократить сроки выполнения научно-исследовательских работ и проектно-конструкторских заданий и, таким образом, в значительной мере способствовало развитию механизации и автоматизации отстающих отраслей народного хозяйства. При разработке систем электропривода и электроавтоматики особое внимание уделялось повышению уровня механизации и автоматизации производственных процессов, обеспечению максимальной производительности агрегатов, достижению простоты и надежности разрабатываемых систем [Л. 3].

В 50-х годах были созданы системы электропривода и электроавтоматики для всех видов прокатных станов, выпускавшихся заводами тяжелого машиностроения — блюмингов, слябингов, рельсобалочных, трубозаготовочных, трубопрокатных, трубосварочных, толстолистовых, непрерывных и реверсивных станов холодной прокатки; электроприводы и комплексная автоматика для загрузочных систем доменной печи и другого оборудования доменного цеха (воздухонагревателей, вагон-весов, электропушки, разливочных машин и др.).

В области шахтных подъемных установок была разработана и широко внедрена в железнодорожную и угольную промышленность система электропривода и автоматики как постоянного, так и переменного тока для всех типоразмеров подъемных машин, изготавливавшихся на предприятиях тяжелого машиностроения и угольной промышленности.

В это время важным направлением в области электропривода была разработка и широкое внедрение системы комплексной автоматики шахтных и рудничных подъемных установок, а также широкое применение безредукторных электроприводов для принципиально новых конструкций шахтных подъемников (например, шахтные подъемные машины с многоканатными шкивами трения). Наиболее сложной из этих разработок была система комплексной автоматизации для подъемных машин с асинхронным электроприводом. Одна такая уста-

Таблица 3

Продолжение табл. 3

Основные технические данные новых и проектируемых электроприводов

Наименование электроприводов	Основные технические характеристики	Наименование электроприводов	Основные технические характеристики
Электрические мощные одноковшовые экскаваторы	Индивидуальные электроприводы: механизмов подъема, тяги и поворота шагающих экскаваторов с ковшом емкостью до 80 м ³ и длиной стрелы до 100 м; гусеничных экскаваторов с ковшом емкостью до 100 м ³ . Безредукторный привод механизмов подъема гусеничных экскаваторов, двух-, четырех- и восьмидвигательные электроприводы механизмов поворота, одно- и двухдвигательные электроприводы механизмов подъема и тяги. Система Г—Д постоянного тока. Последовательное соединение якорей электромашин, работающих на общий вал. Управление возбуждением генераторов: с помощью электромашинных усилителей поперечного поля; по двухкаскадной схеме с электромашинным усилителем поперечного поля и промежуточным магнитным усилителем; от силового двухтактного трехфазного усилителя и полупроводниковых преобразователей. Релейно-контакторное управление с применением бесконтактных сельсинных командонконтроллеров ручного и ножного управления; электрическая система координатной защиты стрелы от растяжки; автоматическое регулирование уровня платформы для гусеничных экскаваторов.	на станках указанний диапазон увеличивается до 1/2500. Мощность главных электроприводов до 150—175 квт при диапазоне регулирования скорости вращения электродвигателей до 1/4—1/5 изменением потока возбуждения. Система главного электропривода включает статический преобразователь постоянного и переменного токов на управляемых кремниевых диодах для питания двигателей главного привода постоянного тока, управляемый статический преобразователь для питания обмотки возбуждения того же двигателя. Находят также применение электроприводы по системе Г—Д с применением электромашинных, магнитных или полупроводниковых усилителей. Подача суппортов от электроприводов по системе ЭМУ—Д, а также с полупроводниковыми преобразователями. Быстрое установочное перемещение суппортов карусельных станков осуществляется отдельными электроприводами переменного тока. Система управления карусельных станков предусматривает возможность выполнения электроокопировальных работ с помощью контактных датчиков на электромагнитных муфтах. Использование электропривода подачи суппортов на некоторых карусельных станках для подачи резца при выполнении на станке резьбовых работ.	
Главные приводы реверсивных обжимных горячепрокатных станов: бломингов, слябингов, толстолистовых, среднелистовых, рельсобалочных, крупносортовых и других реверсивных станов	Индивидуальный привод при диаметре валков 1 000 мм и более. Номинальная мощность прокатных двигателей постоянного тока: для блюмингов 1 150 квт — 2×6 300 квт, 60/90 об/мин и 2×5 600 квт, 70/100 об/мин; для блюмингов 1 300 мм — 2×6 800 квт, 60/90 об/мин; для слябингов 1 150 мм — 2×6 000 квт, 50/80 об/мин; 2×6 600 квт, 50/80 об/мин; 2×9 000 квт, 60/80 об/мин; для слябинга 1 250 мм — 2×6 700 квт, 45/80 об/мин; групповой привод для модернизируемых блюмингов 1 150 мм — 10 500 квт, 65/90 об/мин и 9 000 квт, 67/90 об/мин; для трубозаготовочного стана 900 мм — 8 000 квт, 107/150 об/мин. Одноякорное (в основном) исполнение прокатных двигателей. Максимальная номинальная мощность прокатных двигателей в одной единице до 10 600 квт при 56/90 об/мин.	Гребная установка атомного ледокола „Ленин“	Водоизмещение ледокола 16 тыс. т, наибольшая длина 134 м, мощность турбины 44 тыс. л. с., максимальная скорость 18 узлов, автономность плавания — один год. Мощность электродвигателей среднего гребного винта 19 600 л. с., бортовых гребных электродвигателей по 9 800 л. с., двигатели напряжением 1 200 в в двухъякорном исполнении. Двухконтурная система управления Г—Д с управлением напряжения и потока возбуждения двигателей от электромашинных усилителей с поперечным и продольным возбуждением. Переключение при подготовке системы к работе и при резервировании отдельных электромашин в главной цепи, цепях возбуждения и управления производится избирательными переключателями генераторов. Для предотвращения ошибочных переключений ось штурвала избирательного переключателя стопорится магнитом, который освобождает ее только при снятом напряжении с коммутируемых цепей.
Тяжелые токарные и карусельные станки	Применение в некоторых случаях двухъякорных прокатных двигателей мощностью 6 800 квт, 50/80 об/мин для слябингов и 5 130 квт 60/120 об/мин для черновой клети рельсобалочного стана и обжимных клетей станов для прокатки алюминия. Питание прокатных двигателей от ионных преобразователей мощностью до 8 000—10 000 квт при номинальном напряжении до 1 500 в, от тиристорных преобразователей мощностью 2×5 000 квт при номинальном напряжении до 1 000 в, а также от генераторов постоянного тока при мощности генераторов в одноякорном исполнении до 8 500 квт и номинальном напряжении до 900 в.	Бумагоделательная машина	Многодвигательный и многогенераторный (с индивидуальным питанием каждого приводного двигателя секций) электропривод с двигателями секций мощностью 14—300 квт, 1 000—1 500 об/мин, с магнитными регуляторами скорости и напряжения для обеспечения диапазона регулирования рабочей скорости в пределах до 1 : 3, в отдельных случаях до 1 : 5—1 : 10. Возможность обеспечения вспомогательной скорости всех секций машины за исключением секции «накат» на уровне 0,02—0,03 максимальной рабочей скорости. Динамическое торможение отдельных секций при остановке, возможность работы отдельных секций в режимах «провернуть», «подтянуть», «реверс», контроль рассогласования скоростей между сеточной частью и пересасывающим устройством. Возможность работы одних секций в специальных режимах, при работе других — с рабочей скоростью. Установленное соотношение скоростей отдельных секций с точностью до ±0,1% при изменении нагрузки +30%. Обеспечение рабочих скоростей до 700—800 м/мин с перспективой дальнейшего роста по мере усовершенствования технологического процесса и механизации оборудования.
Широкий диапазон регулирования скорости шпинделя до 1/125, 1/175 — для токарных станов и до 1/100, 1/150 — для карусельных станов. В режимах фрезерования на тяжелых каруселях	на станках указанний диапазон увеличивается до 1/2500. Мощность главных электроприводов до 150—175 квт при диапазоне регулирования скорости вращения электродвигателей до 1/4—1/5 изменением потока возбуждения. Система главного электропривода включает статический преобразователь постоянного и переменного токов на управляемых кремниевых диодах для питания двигателей главного привода постоянного тока, управляемый статический преобразователь для питания обмотки возбуждения того же двигателя. Находят также применение электроприводы по системе Г—Д с применением электромашинных, магнитных или полупроводниковых усилителей. Подача суппортов от электроприводов по системе ЭМУ—Д, а также с полупроводниковыми преобразователями. Быстрое установочное перемещение суппортов карусельных станков осуществляется отдельными электроприводами переменного тока. Система управления карусельных станков предусматривает возможность выполнения электроокопировальных работ с помощью контактных датчиков на электромагнитных муфтах. Использование электропривода подачи суппортов на некоторых карусельных станках для подачи резца при выполнении на станке резьбовых работ.		

Продолжение табл. 3

Наименование электроприводов	Основные технические характеристики
Доменные печи 2 000—2 700 м ³	Высокомеханизированные сверхмощные доменные печи, оснащенные комплексными полностью автоматическими системами электроприводов для агрегатов воздухоподогрева, загрузки печи и управления ходом печи, а также для машин разливки чугуна. Двухдвигательный электропривод главного подъема мощностью 2×550 квт обеспечивает подъем скипов 20 м ³ со скоростью до 4 м/сек. Наиболее высокий достигнутый в СССР уровень типизации и надежности специального электрооборудования. Крупноблочность электроавтоматики. Комплектность поставки. Автоматические электроприводы обеспечивают расчетную производительность доменной печи по чугуну до 320 и более тонн в час. Полупроводниковые и ртутные реверсивные преобразовательные агрегаты до 4 000 а, 850 в наряду с электромашинами для главного подъема и лебедки конусов. Бесконтактное управление распределителем шихты с применением магнитных логических элементов и специализированных управляющих вычислительных машин (см. рис. 5). Специальный фотоэлектронный аппарат для контроля факела в горелках воздухонагревателей. Радиометрические зонды.

новка была разработана и внедрена в Донбассе. Широко применялся разработанный ЦКБ Электропривод безредукторный автоматизированный электропривод по системе Г—Д с электромашинной и магнитной автоматикой. В это же время была разработана и внедрена первая мощная реверсивная ионная установка с управляемыми ртутными выпрямителями для шахт «Саксагань» и «Октябрьская» Криворожского железорудного бассейна.

Реверсирование было осуществлено с помощью перекрестной схемы соединения управляемых ртутных выпрямителей. Установки отличались большими грузоподъемностью (25 т) и скоростью подъема (16 м/сек) при мощности подъемных электродвигателей 3 800 квт [Л. 3].

В эти же годы в СССР были созданы ряды электроприводов и автоматики для экскаваторов с емкостью ковша от 0,5 до 10 м³ и выше. Мощные экскаваторы, например, типа ЭШ 14/65, оснащались электроприводами по системе Г—Д с электромашинной и магнитной автоматикой. Применение магнитных усилителей позволило значительно повысить стабильность и точность работы электроприводов экскаваторов. Были выполнены разработки для буровых установок «Уралмаш-4М» и «Уралмаш-6М», в том числе, с безредукторным электроприводом. Большое внимание былоделено автоматизации спуско-подъемных операций, занимающих в настоящее время значительное время при бурении скважин [Л. 3].

В 1950 г. началась разработка электроприводов бумагоделательных машин со статической системой регулирования. В 1957 г. были разработаны, а с 1960 г. начали внедряться многогенераторные электроприводы для бумагоделательных машин средней и высокой производительности. В настоящее время 10 подобных машин отечественного про-

изводства с многогенераторными и многодвигательными электроприводами работают в СССР и за рубежом.

Применительно к лифтам жилых домов, общественных и административных зданий был разработан и освоен в серийном производстве ряд систем электропривода и автоматики на постоянном и переменном токе. Для высотных зданий в Москве и Варшаве были разработаны скоростные пассажирские лифты с электроприводами по системе Г—Д с электромашинными и магнитными усилителями. В качестве датчиков положения кабины на этажах были применены индуктивные датчики [Л. 3].

Значительная работа выполнена отраслевыми НИИ, КБ и заводами электротехнической промышленности в 1961—1967 гг. по созданию, усовершенствованию и изготовлению основного электрооборудования для электроприводов. Как и в 50-х годах, большое внимание уделяется электрификации сложных рабочих машин и агрегатов, для которых применяются индивидуальные электромашины. В связи с этим более чем в 2 раза увеличивается производство крупных электромашин для укомплектования главных и основных электроприводов мощных и сверхмощных производственных агрегатов металлургической, горнодобывающей, энергетической, химической и других отраслей промышленности (табл. 1).

Почти в 2 раза возрастают количество и суммарная мощность взрывобезопасных электродвигателей, применяемых для механизации работ в угледобывающей, химической и нефтегазовой отраслях производства. К концу 1967 г. производство этих двигателей по суммарной мощности достигнет 3,3 млн. квт.

Высокие темпы жилищного строительства, расширение и благоустройство городов, а также развитие городского транспорта потребовали резкого увеличения ежегодного производства трамвайных электродвигателей, которое за истекшее семилетие возрастет в 1,86 раза и достигнет в текущем году 3,53 тыс. шт.

Прогресс в области технологии и интенсификации производства потребовали от электротехнической промышленности расширения поставок комплектных автоматизированных электроприводов для металлургии, энергетики, горнодобывающей, бумагоделательной, химической промышленности, а также в последние годы и для сельского хозяйства, которое потребляет приблизительно третью часть из 4,622 млн. шт. электродвигателей производства 1967 г. Систематически возрастает объем поставок средств электроавтоматики в крупноблочном виде для обеспечения индустриальных методов строительно-монтажных работ. За 1961—1967 гг. производство магнитных станций электроавтоматики в крупноблочном виде увеличилось более чем в 22 раза и составит 55,3 тыс. шт. в 1967 г.

Наряду с этим электротехническая промышленность еще не удовлетворяет потребности народного хозяйства в статических преобразователях тока.

Суммарная мощность ртутных и полупроводниковых преобразователей, изготовленных ежегодно с 1965 по 1967 гг., остается на уровне 10,5—

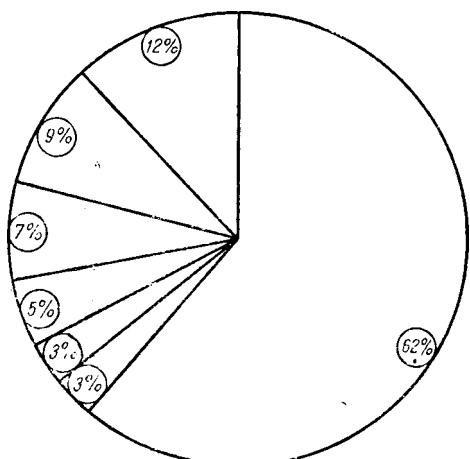


Рис. 2. Структура потребления электроэнергии в СССР в 1965 г.

62% — электропривод, в том числе бытовые электротрибопы и машины; 12% — электролиз и электрохимия; 9% — электроосвещение; 7% — электротермия; 5% — электротягия; 3% — электросварка; 2% — телевизоры и связи.

10,6 млн. квт без увереной тенденции к росту. В то же время следует отметить, что производство полупроводниковых преобразователей за это время более чем удвоилось и в 1967 г. составит 5,15 млн. квт. Однако потребности народного хозяйства СССР в этом оборудовании еще далеко не удовлетворены.

Дальнейшему расширению применения полупроводниковых преобразователей в СССР будет способствовать значительное снижение стоимости полупроводниковых кремниевых вентилей, произведенное с 1 июля 1967 г.

Большие работы были проведены в области электропривода станков — токарных, карусельных, строгальных, шлифовальных и других тяжелых и уникальных станков. Проводились исследовательские работы по созданию и внедрению электронно-копировальных устройств для продольно-фрезерных и тяжелых карусельных станков, по применению силовых магнитных усилителей для питания маломощных двигателей постоянного тока, по применению управляемых запаянных ртутных выпрямителей.

Важной работой явилось создание и внедрение мощных электроприводов для гребной установки атомного ледокола «Ленин». Средний гребной электродвигатель этого судна имеет мощность 19 600 л. с., два бортовых гребных электродвигателя, каждый мощностью по 9 800 л. с. с номинальным напряжением 1 200 в. Питание электродвигателей осуществляется от генераторов мощностью по 3 840 квт; все двигатели, как и генераторы, двухъякорные. Особенностью системы Г—Д атомохода «Ленин» является ограничение энергии рекуперации, что необходимо в связи с приводом генераторов от дизелей. Наиболее приемлемой в данном случае явилась схема реверсивного изменения направления магнитного потока гребного двигателя [Л. 6].

В настоящее время автоматизированный электропривод является большой и важной составной частью современного машинного устройства. В этом перевоплощении электропривода из основательного

ной части машинного устройства в ведущую его часть и заключается основная особенность развития отечественного электропривода.

Силовой основой промышленности является автоматизированный электропривод, что следует из структуры потребления электроэнергии, представленной на рис. 2. Опыт показывает, что в его развитии скрыты неограниченные возможности роста производительности труда, дальнейшего увеличения размеров и экономичности производственных процессов, комплексной автоматизации и механизации и облегчения условий труда. Развитие автоматизированного электропривода не только определяет принцип конструкций машинных установок, агрегатов и машин, способствуя все большему развитию непрерывного и поточного производства, но также является важнейшим средством увеличения их производительности. Как известно, индивидуальные приводы предопределили современную конструкцию и развитие непрерывных и полунепрерывных горячепрокатных станов, впервые появившихся около сорока лет назад. С тех пор производительность этих станов возросла в десятки раз. Особенно сильно возросла производительность широкополосных непрерывных станов горячей прокатки. В самое последнее время развитие электропривода широкополосных станов создало возможности для нового скачка в увеличении скорости прокатки с 9—10 до 20—22 м/сек путем ускорения главного электропривода в процессе прокатки. Это достигнуто на основе усовершенствования конструкции и повышения мощности прокатных двигателей чистовых клетей.

Современный электропривод является главным источником прогресса при механизации и автоматизации производства, основой преобразования прерывистых производственных процессов в непрерывные, средством увеличения производительности машинного оборудования и масштабов производства. Гиганты современной отечественной индустрии — самые мощные в мире блюминги и слябинги, дающие до 5 млн. т проката в год; доменные печи с суточной производительностью до 5 тыс. т чугуна; одноковшовые экскаваторы, производительность которых за год достигает 6 млн. m^3 , проволочные станы со скоростью прокатки до 40 $m/\text{сек}$; бумагоделательные машины со скоростью до 14 $m/\text{мин}$ — созданы на основе развития современных систем электропривода.

Электродвигатели являются главным элементом электропривода и важнейшей частью современного производства. Производственное значение электродвигателей определяется тем, что в них непосредственно происходит преобразование электроэнергии в механическую двигательную силу. Увеличение относительной мощности и количества электродвигателей на рабочего (моторовооруженность) характеризует развитие механизации производственных процессов как в промышленности, так и народном хозяйстве в целом, на каждом предприятии и в каждом цехе. Применение электродвигателей означает повышение уровня электрификации и механизации и является единственной возможностью создать предпосылки для механизации

ся на коэффициенте электрификации, показано на рис. 3.

Многолетний опыт создания и внедрения главных электроприводов реверсивных обжимных прокатных станов показал, что возможная производительность этих станов увеличивается приблизительно пропорционально росту мощности прокатных двигателей при условии усовершенствования динамических показателей двигателей. Высокими качествами обладают, например, электродвигатели новой серии ХЭМЗ, частично представленные в табл. 2.

В Советском Союзе в последние годы достигнуты значительные успехи в развитии как врачающихся машинных преобразователей и ртутных выпрямительных, так и полупроводниковых статических управляемых преобразователей. Прогресс в области врачающихся агрегатов характеризуется ростом единичной мощности генераторов, которая в настоящее время достигла 8 500 квт (375 об/мин) при трехкратной перегрузочной способности.

В результате большой работы по улучшению конструкции и технологии количество обратных зажиганий и выход из строя ртутных выпрямителей, изготавляемых для промышленности, уменьшился за последние годы в 7—10 раз. Обратные зажигания в ртутных выпрямителях в 1966 г. практически не наблюдались (одно обратное зажигание на 164 вентиля в год при норме — одно на шесть вентиляй). Изготавливаемые в настоящее время запаянные игнитроны типа ИВУ-250 используются в режимах работы электропривода со среднеквадратичным током до 250 а, перегрузочной способностью 500—600 а при напряжении до 900 в. На

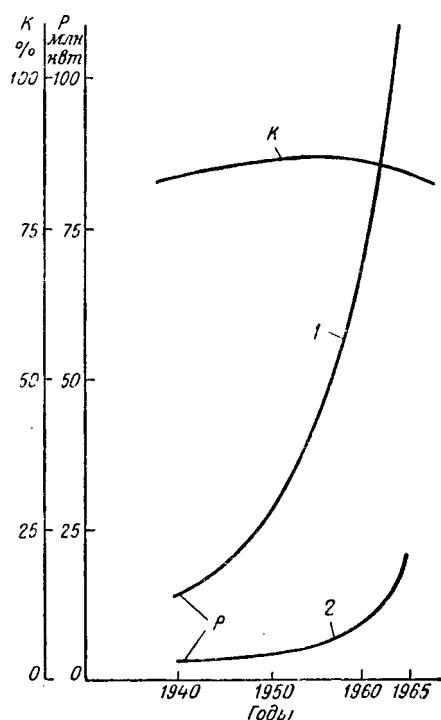


Рис. 3. Коэффициент электрификации силовых процессов в промышленности СССР (K) и мощность двигателей (P), обслуживающих производственные процессы.

1 — электродвигатели; 2 — механические двигатели.

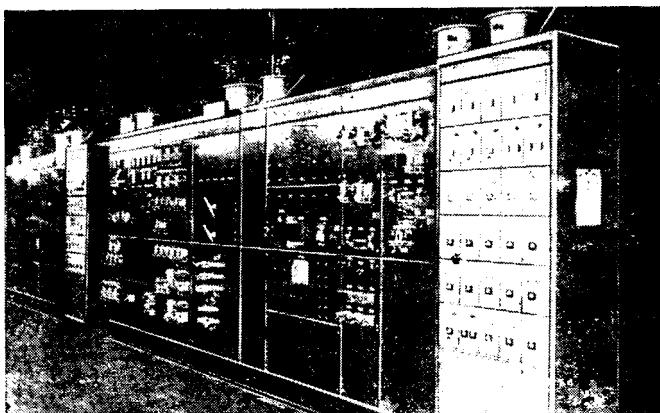


Рис. 4. Универсальные блоки системы регулирования в составе щита управления прокатным становом.

их основе создаются преобразовательные агрегаты до 12 000 а, 900 в.

В настоящее время для управления ионными преобразователями используются сеточные системы с применением транзисторов, отличающиеся высоким быстродействием. Качество и надежность этих систем в значительной мере определяют успех работы ионных преобразователей, долговечность ртутных выпрямителей и отсутствие обратных зажиганий. Поэтому усовершенствование сеточных систем управления ионными преобразователями и впредь должно уделяться большое внимание.

Завод «Уралэлектротяжмаш» на основе откаченных экситронов АРМНВ-1000 изготовил ртутновыпрямительный агрегат для питания реверсивного прокатного двигателя мощностью 9 000 квт, 1 500 в для главного привода блюминга одного из металлургических заводов. Этот самый мощный в мире ионный преобразователь для электропривода успешно эксплуатируется с 1965 г.

Существенные успехи в последние годы достигнуты в производстве кремниевых управляемых вентиляй в СССР. В промышленности СССР в настоящее время работают полупроводниковые преобразователи с неуправляемыми и управляемыми вентилями на общую мощность около 1 млн. квт. Осваиваются и поставляются тиристорные преобразователи, в том числе реверсивные, при мощности до 300 квт. Опыт эксплуатации свидетельствует о высокой надежности, малых эксплуатационных расходах и безотказности действия тиристорных преобразователей.

Таким образом, в настоящее время в Советском Союзе созданы возможности для эффективного использования всех трех видов преобразовательных агрегатов — машинных, ионных и полупроводниковых.

В последние годы в системе электротехнической промышленности СССР разработан целый ряд новых комплексных систем автоматизированных электроприводов, находящихся на высоком мировом уровне. Основные технические данные некоторых из них приведены в табл. 3.

Выводы. 1. Дальнейшее развитие народного хозяйства в нашей стране требует непрерывного повышения силовой электровооруженности машин,

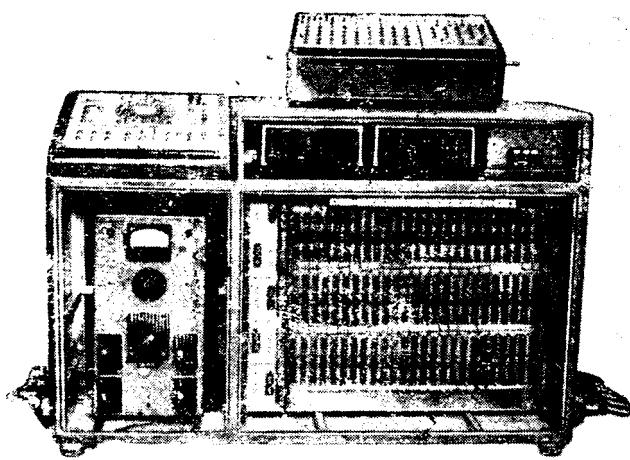


Рис. 5. Специализированная управляющая машина комплекса электроавтоматики вращающегося распределителя шихты доменной печи.

механизмов, агрегатов, станков и производственных процессов во всех отраслях народного хозяйства путем увеличения мощности электроприводов (моторовооруженности), создания и внедрения новых органически связанных с машинами и механизмами электроприводов, повышения на этой основе рабочих скоростей, улучшения динамики машин и механизмов.

2. Развитие автоматизированного электропривода и совершенствование производственных процессов происходит на основе непрерывного совершенствования электромашин, передаточных механизмов, преобразователей тока, низковольтной аппаратуры, электрических систем управления и систем комплексной автоматизации.

3. Большое внимание в нашей стране уделяется совершенствованию электродвигателей, как важнейших элементов электропривода. Совершенствование электродвигателей производится путем проектирования и внедрения в производство новых, более совершенных серий двигателей, создания индивидуальных электромашин со специальными характеристиками, соответствующими требованиям развивающегося машиностроения.

Основными направлениями совершенствования электродвигателей являются: повышение единичной мощности; улучшение динамических показателей для реверсивных двигателей; применение кремнийорганических, термореактивных и других современных видов электроизоляции; улучшение энергетических показателей и обеспечение органического слияния электродвигателей с исполнительными органами рабочих машин.

4. Все более перспективным становится применение статических преобразователей тока, используемых для питания нереверсивных и реверсивных электроприводов.

Важной задачей является внедрение в промышленность в ближайшие годы статических полупроводниковых преобразователей для реверсивных регулируемых электроприводов постоянного тока мощностью до 10 тыс. квт и переменного тока мощностью до 40 тыс. квт при скорости вращения электродвигателей до 3 500 об/мин.

5. Уже многие годы низковольтные аппараты управления являются основным массовым средством автоматизации промышленности в различных отраслях народного хозяйства. Существенное значение низковольтных средств автоматизации сохранится и в ближайшие годы.

Основным направлением развития низковольтных средств автоматизации является все большее повышение комплектности, блочности в поставках электротехнической промышленности и увеличение надежности работы аппаратуры в эксплуатации. Важное значение при этом имеет широкое внедрение бесконтактных средств электроавтоматики: бесконтактных магнитных и электронных логических элементов, универсальных функциональных блоков систем регулирования, сельсинных командоаппаратов и др.

6. В области дальнейшего развития народного хозяйства нашей страны одной из важнейших задач является повышение инициативы и активности всех звеньев электротехнической промышленности в обеспечении технического прогресса электромашин, преобразователей тока и низковольтной аппаратуры.

При этом необходимо, чтобы решаемые в электротехнической промышленности задачи технического прогресса обосновывались экономически, с целью получения наибольшего экономического эффекта, т. е. максимальной суммарной прибыли, получаемой как изготовителями электрооборудования, так и его потребителями.

Литература

- Доклад VIII съезду Советов Государственной комиссии по электрификации России, изд. II, Госполитиздат, 1955, стр. 38—39.
- Промышленность СССР, Статистический сборник, изд-во «Статистика», 1964.
- Работы Министерства электротехнической промышленности СССР по механизации и автоматизации народного хозяйства, ЦБТИ, 1956, т. I.
- Голован А. Т., Очерки по истории энергетической техники СССР, Электропривод, Госэнергоиздат, 1955.
- Бирфельд А. Г., Гнилосыров Е. Г., Слежановский О. В. и Тищенко Н. А., Комплексная автоматизация блюмингов, «Электричество», 1955, № 12.
- Бершадский В. Л., Калашников В. К., Кряжевский В. В. и Попов Г. А., Автоматизированный электропривод гребной установки атомного ледокола «Ленин», Труды научно-исследовательского института электропромышленности, ЦБТИ ЭП, 1959, т. 5.
- Автоматизированный электропривод производственных механизмов, Труды IV Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу под общой ред. Б. Б. Воронецкого, И. И. Петрова, М. Г. Чиликина, изд-во «Энергия», 1966, т. I—III.



Деятели науки и техники! Активнее боритесь за ускорение научно-технического прогресса нашей Родины, за дальнейший расцвет науки

(Из призывов ЦК КПСС к 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции)

УДК 061.22

Деятельность энергетической общественности в годы Советской власти

и. п. полуушкин

Мощность энергетических систем за годы Советской власти увеличена более чем в 130 раз, а по выработке электрической энергии Советский Союз занимает второе место в мире. В этом большая заслуга принадлежит энергетической общественности, деятельность которой на всем пятидесятилетнем пути Советской власти способствовала подъему производительных сил в нашей стране.

После Великой Октябрьской социалистической революции работе научно-технических обществ было уделено внимание Коммунистической партией, правительством и лично В. И. Лениным.

Видные специалисты, общественные деятели энергетики были привлечены к разработке проекта плана ГОЭЛРО. Среди них: Г. М. Кржижановский, И. Г. Александров, А. В. Винтер, А. А. Горев, Г. О. Графтио, К. А. Круг, В. С. Кулебакин, Р. А. Лютер, М. А. Шателен, Р. Э. Классон, М. Д. Каменский и др.

По предложению В. И. Ленина проект плана ГОЭЛРО был рассмотрен на VIII Всесоюзном электротехническом съезде, в работе которого приняли участие более 1800 ученых, передовых рабочих и руководителей предприятий.

В. И. Ленин дал высокую оценку работе этого съезда, обеспечившего «проверку лучшими техническими и научными силами России того плана, который является единственным научно-проверенным, кратчайшим и ближайшим планом для восстановления нашей крупной промышленности»¹.

Немало творческого труда вложила научно-техническая общественность и в решение отдельных вопросов, связанных с осуществлением плана ГОЭЛРО.

Когда решался вопрос о заказе электрооборудования для первенца Советской энергетики — Волховской ГЭС, некоторые специалисты настаивали на приобретении оборудования у шведских фирм, указывая на то, что предприятия энергетической промышленности страны не готовы к выполнению этой серьезной работы.

Научно-техническая общественность не согласилась с этим заявлением и утверждала, что часть необходимого оборудования можно изготовить на предприятиях страны.

Как известно, по решению Советского правительства изготовление четырех из восьми гидрогенераторов для Волховской ГЭС было поручено заводу «Электросила».

Электросиловцы выполнили этот заказ в заданный срок и вот уже больше 40 лет их гидрогенераторы надежно работают на Волховской ГЭС, не уступая по своим эксплуатационным данным генераторам шведской фирмы АЕСА. Аналогичное положение было и с заказами на электрические машины и электроаппаратуру для тепловых электростанций, металлургической, угольной промышленности, транспорта и др. В целях лучшего использования инициативы и творчества ученых и инженерно-технических работников ЦК ВКП(б) 19 января 1931 г. приняло решение о создании научных инженерно-технических обществ. В соответствии с этим решением в 1932 г. было создано Всесоюзное научно-техническое общество энергетиков — ВНИТОЭ энергетиков. Первым председателем общества был избран А. В. Винтер.

С организацией ВНИТОЭ научно-техническая работа на общественных началах в энергетике значительно оживилась. В организациях общества были созданы научно-технические секции, объединившие большую часть ученых и инженерно-технических работников различных специальностей.

Секции организовывали общественное обсуждение отдельных актуальных вопросов развития энергетики и электротехники, давая предложения по ускорению их решений. Организации ВНИТОЭ вели большую работу по пропаганде достижений науки и техники среди широких кругов энергетиков и занимались повышением уровня технических знаний членов общества.

Деятельность организаций научно-технического общества не прекращалась и в годы отечественной войны.

В этот период они оказывали большую помощь оборонной промышленности по подготовке кадров, использованию местного топлива, замене материалов, разрабатывали рекомендации по обеспечению снабжения теплом и электроэнергией промышленных предприятий, госпиталей, детских учреждений.

Много творческого труда вложили в годы войны, в частности, члены ВНИТОЭ Ленинградской организации. Перед ними стояла задача — обеспе-

¹ В. И. Ленин. Соч., т. 33, стр. 139.

чить блокированный город электрической энергией от Волховской ГЭС через Ладожское озеро.

Некоторые важные вопросы, стоявшие перед энергетической промышленностью, были рассмотрены на научно-технических совещаниях. В Томске, например, было проведено в 1943 г. научно-техническое совещание по электрической изоляции, а в Ярославле в 1944 г.— по новым материалам и заменителям.

В послевоенный период энергетическая общество направила свою деятельность на восстановление народного хозяйства и ускорение технического прогресса в энергетике и электротехнике.

На пленумах ВНИТОЭ и его отделениях рассматривались вопросы электрификации страны, отдельных республик и областей, перспективы развития газификации СССР, применения постоянного тока высокого напряжения, строительства энергетических объектов и др.

Многие актуальные вопросы энергетики обсуждались на научно-технических совещаниях, проводимых секциями. Однако деятельность организаций ВНИТОЭ, как и других обществ, была ограничена и не обеспечивала полного использования творческой инициативы ученых, инженеров и рабочих-новаторов в решении задач, стоящих перед народным хозяйством.

В конце 1954 г. научные инженерно-технические общества (НИТО) были реорганизованы в массовые научно-технические общества (НТО) по отраслям производства. Они объединяли в своих рядах научных и инженерно-технических работников, а также рабочих-новаторов.

Руководство деятельностью НТО возложено на ВЦСПС. В 1955 г. был создан Всесоюзный Совет научно-технических обществ (ВСНТО), который объединил все отраслевые общества. С этого времени общества становятся массовыми организациями работников науки и производства.

В соответствии с этим постановлением Всесоюзное научное и инженерно-техническое общество энергетиков (ВНИТОЭ) преобразовалось в научно-техническое общество энергетической промышленности (НТОЭП).

За короткое время общество значительно выросло и представляет собой многочисленный отряд научно-технической общественности.

В настоящее время НТО энергетической промышленности объединяет 87 правлений, в которые входят 2 676 первичных организаций, более 160 тысяч действительных членов общества, в том числе 5 действительных членов и 7 членов-корреспондентов АН СССР, среди которых наиболее активные: М. А. Стырикович, Л. А. Мелентьев, И. А. Будзко, Н. Н. Ковалев, Г. Н. Петров, А. Е. Алексеев, М. В. Костенко, 1 500 докторов наук и профессоров, более 4 500 кандидатов наук.

Раз в 2 года проводятся съезды и республиканские, краевые и областные конференции, а в промежутках между ними — пленумы правлений.

На съездах и пленумах, кроме организационных вопросов, обсуждаются актуальные проблемы развития энергетики страны и отдельных районов, связанные с повышением качества и надежности выпу-

скаемых отраслью изделий, с подготовкой специалистов-энергетиков, внедрением новой техники и др.

Большую работу проводят в обществе секции Центрального республиканского, краевых и областных правлений, а их насчитывается 1 832, в которые входят 40 229 человек. Ими проводится ежегодно более 7 000 научно-технических совещаний, дискуссий, около 1 200 конкурсов, более 20 000 лекций и докладов.

Разработанные научно-техническими совещаниями рекомендации способствовали ускорению строительства энергетических объектов и решению технических вопросов при создании энергетического оборудования, в том числе гидроагрегатов для Волжской ГЭС, Красноярской ГЭС и многих других гидростанций, созданию современного оборудования для энергоблоков тепловых электростанций, в том числе для блоков мощностью 100—200—300—500 тыс. квт, высоковольтной аппаратуры и др.

Многие полезные рекомендации разработаны совещаниями по вопросам повышения экономичности работы энергетических систем и предприятий, использования топлива, газификации, электрификации сельского хозяйства и т. д. Наиболее эффективные из них нашли отражение в постановлениях правительства и приказах министерств.

Огромную работу по пропаганде достижений науки и техники и повышению уровня знаний инженерно-технических работников ведут семь научно-технических журналов, соиздателем которых является НТОЭП: «Электричество», «Электрические станции», «Теплоэнергетика», «Промышленная энергетика», «Электротехника», «Светотехника», «Гидротехническое строительство» и сборник по гидроэнергетическому строительству.

Эффективно трудятся в обществе коллективы общественных форм труда: ОКБ, ОБЭА, творческие бригады и др., а их в обществе более 6 700 с числом участников свыше 45 000 человек. Ими разработано только за 1966 г. 8 016 предложений, внедрение которых может дать экономический эффект в миллионы рублей.

Подавляющее большинство организаций и членов НТОЭП в честь 50-летия Октября приняли социалистические обязательства по скорейшему внедрению в народное хозяйство достижений науки и техники. Этой знаменательной дате посвящаются многие научно-технические совещания и отдельные работы творческих коллективов.

Свои ближайшие задачи организации НТОЭП видят в мобилизации инициативы и творчества ученых, инженерно-технических работников и рабочих-новаторов производства на решение следующих вопросов:

освоение вновь вводимых в 1966—1970 гг. энергоблоков мощностью 300, 500 и 800 тыс. квт с доведением их до проектных показателей;

снижение удельных расходов топлива;
снижение удельной численности эксплуатационного и ремонтного персонала на электростанциях; повышение уровня экономической работы на предприятиях электротехнической промышленности,

энергетических системах, на электростанциях и в электрических и тепловых сетях, постепенный переход всех энергетических и электротехнических предприятий на новые условия планирования и экономического стимулирования;

повышение качества изделий электротехнической промышленности;

повышение надежности работы энергетических систем, электростанций и электрических сетей за счет усиления электрических связей, внедрения автоматического регулирования и ограничений перетоков мощности по «слабым» межсистемным связям, применения комплексных устройств противоаварийной автоматики и пр.;

повышение общей культуры производства, эксплуатации электростанций и электросетей, обеспечение безаварийной работы и ликвидации производственного травматизма;

дальняя централизация производства ремонта энергетического оборудования электростанций

и электросетей и выполнение этих работ специализированными организациями;

строительство и расширение тепловых и гидравлических станций;

повышение темпов сооружений линий электропередачи;

дальнейшее повышение степени индустриализации строительства энергетических объектов с доведением удельных объемов элементов и конструкций заводского изготовления к 1970 г. до 75—90% от общего объема строительных конструкций;

повышение производительности труда к 1970 г. в энергетическом строительстве на 35—40% против 1965 г.;

внедрение на предприятиях МЭТП и в энергетическое строительство новых форм организаций и управления с широким применением сетевых графиков, средств вычислительной техники, современных средств обработки информации и связи;

совершенствование форм организации научно-технической работы на общественных началах.



УДК 621.3.016.351 : 681.942

Исследование с помощью ЦВМ статической устойчивости сложных автоматически регулируемых электрических систем

Доктор техн. наук, проф. В. А. ВЕНИКОВ, канд. техн. наук Н. Д. АНИСИМОВА,
канд. техн. наук. Р. МИЧКЕ и инж. Т. И. ШЕЛУХИНА

Московский ордена Ленина энергетический институт

Введение. Исследование статической устойчивости сложных автоматически регулируемых электрических систем имеет целью определение параметров предельного режима и коэффициента запаса по устойчивости [Л. 1].

Результаты расчетов устойчивости в дальнейшем используются для обоснования технической допустимости и экономической целесообразности того или иного режима системы.

На основании теоретических и экспериментальных данных кафедра электрических систем МЭИ, где проводилась настоящая работа, считает наиболее правильным концентрический подход к определению статической устойчивости сложной регулируемой электрической системы.

В соответствии с таким подходом устойчивость регулируемой системы проверяется дважды.

Первая проверка проводится в предположении, что исследуемая система и все ее регулирующие устройства в силу своих физических свойств не способны к самораскачиванию, и нарушение устойчивости такой системы может происходить только апериодически.

Вторая проверка проводится со специальной целью — выявить самораскачивание, обусловленное

действием тех или иных регулирующих элементов системы. При этом необходимо учитывать, что, как правило, вся сложная система создается и пускается не одновременно, а к уже работающим ее частям присоединяются новые регулируемые станции. Проверка возможности их раскачивания должна производиться с учетом влияния находящихся в эксплуатации частей системы.

При таком подходе всегда возникает вопрос о закономерности разделения исследуемой проблемы.

Постановка задачи «первая проверка» предполагает, что все электрические и механические регуляторы системы настроены так, что самораскачивание исключено и, что в силу этого, с достаточным приближением можно заменить все генераторы электродвигущими силами $k_E E_q$, приложенными за сопротивлением $\Delta x = k_x x_d$, где k_E и k_x — коэффициенты, зависящие от типа генератора, вида регулятора и его настройки.

При проектных расчетах, избегая специального анализа, выявляющего значения k_E и связь $k_x = \phi(k_E)$ принимают в блоке генератор—трансформатор $\Delta x = k_x x_d = k'_x + x$ и E' для регулятора про-

порционального типа и $\Delta x = x_t$ и U_r для регулятора сильного действия.

Обоснование расчленения системы на две — «апериодическую» и «способную к самораскачиванию» — можно дать на основе теории положительных вещественных функций, облегчающей обобщенный подход к оценке условий, при которых возможно отсутствие самораскачивания.

При таком подходе ищутся условия пассивных отдельных выделенных элементов системы, как и для каждого эквивалентного операторного сопротивления регулируемой машины, работающей в сложной системе. Эта операция упрощается тем, что, как было показано в [Л. 2], ее можно проводить, выделяя отдельно каждую крупную регулируемую машину системы.

При соблюдении указанных условий пассивности регулируемая машина может замещаться эквивалентным сопротивлением и э. д. с., обладая, таким образом, всеми свойствами нерегулируемой и не способной к самораскачиванию машины.

Поочередная проверка всех элементов регулируемой системы дает уверенность в возможности подхода к этой системе с теми же методами и расчетными приемами, что и к регулируемой машине.

Для сложной системы обе части единой проблемы исследования статической устойчивости могут быть удовлетворительно решены лишь с помощью ЦВМ.

Настоящая статья касается только одного наиболее важного вопроса. Исходя из предположения, что система не склонна к самораскачиванию, в ней отыскиваются предельные значения мощностей.

На кафедре электрических систем МЭИ разработана методика анализа статической устойчивости и соответствующие алгоритмы и программы. Эта методика предусматривает исследование ряда нормальных режимов системы с постепенным их утяжелением вплоть до предельного. Критерием устойчивости системы может являться любой из

Исходные положения и принятые допущения.

1. Электрическая система, каждая из станций которой представляется одним эквивалентным генератором, рассматривается как позиционная [Л. 2 и 3]. При этом схема замещения системы, параметры которой считаются линейными, характеризуется модулями и аргументами собственных и взаимных проводимостей в соответствии с заданной схемой электрических соединений системы, где все нагрузки представлены постоянными проводимостями.

В этих условиях, при постоянстве той или иной э. д. с. синхронных машин, мощности, выдаваемые генераторами, являются функциями углов сдвига между их роторами.

2. Схемы замещения синхронных машин в соответствии с изложенным выше принимаются с учетом имеющегося на них АРВ.

3. Утяжеление нормального исходного режима системы происходит вследствие перераспределения активных мощностей генераторных станций, при котором активные мощности ($n-2$) станций остаются неизменными, одна из станций (наиболее нагруженная или удаленная) нагружается и одна станция принимается как балансирующая.

Предельному режиму системы соответствует максимум характеристики мощности станции, которая нагружается, или $\frac{dP}{d\delta} = 0$.

При принятых допущениях предельный режим находится в предположении отсутствия самораскачивания синхронных машин. Уточнить параметры предельного режима можно, приняв во внимание характеристики систем возбуждения и регулирования синхронных машин [Л. 4].

Характеристики мощности генераторов системы и статическая характеристика системы. Выражения для активных мощностей, каждой из n -станций, входящих в состав электрической системы в соответствии с [Л. 3 и 5], имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \dots + E_1 E_n y_{1n} \sin(\delta_{1n} - \alpha_{1n}); \\ P_2 &= E_2 E_1 y_{21} \sin(\delta_{21} - \alpha_{21}) + E_2^2 y_{22} \sin \alpha_{22} + \dots + E_2 E_n y_{2n} \sin(\delta_{2n} - \alpha_{2n}); \\ &\vdots \\ P_n &= E_n E_1 y_{n1} \sin(\delta_{n1} - \alpha_{n1}) + E_n E_2 y_{n2} \sin(\delta_{n2} - \alpha_{n2}) + \dots + E_n^2 y_{nn} \sin \alpha_{nn}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

практических критериев, однако наиболее удобным оказывается $\frac{dP}{d\delta}$.

Подчеркнем, что при такой постановке задачи целесообразно исследовать предлагаемым способом статическую устойчивость систем, содержащих протяженные нагруженные электропередачи, где сомнительной координатой является относительный угол между станциями — нагруженной и балансирующей —, а вопросов устойчивости нагрузки не возникает. Предусмотрена также возможность расчета напряжений в контрольных точках и потоков мощности на отдельных участках системы во всех рассматриваемых режимах.

При принятых допущениях активная мощность каждой i -й станции P_i зависит только от относительных углов δ_{ij} , из которых лишь $n-1$ являются независимыми переменными.

Приняв за ось отсчета углов вектор э. д. с. балансирующей станции (придадим ей индекс n), можно выразить относительные углы следующим образом:

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j + \delta_n - \delta_n = \delta_{in} - \delta_{jn}.$$

С учетом сказанного систему уравнений (1), записанную в матричной форме, можно представить так:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 y_{11} \sin \alpha_{11} & E_1 y_{12} \sin (\delta_{1n} - \delta_{2n} - \alpha_{12}) & \dots & E_1 y_{1n} \sin (\delta_{1n} - \alpha_{1n}) \\ E_2 y_{21} \sin (\delta_{2n} - \delta_{1n} - \alpha_{21}) & E_2 y_{22} \sin \alpha_{22} & \dots & E_2 y_{2n} \sin (\delta_{2n} - \alpha_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_n y_{n1} \sin (-\delta_{1n} - \alpha_{n1}) & E_n y_{n2} \sin (-\delta_{2n} - \alpha_{n2}) & \dots & E_n y_{nn} \sin \alpha_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Выражения для реактивной мощности, выдаваемой станциями системы, можно записать уравнениями аналогичными приведенным выше [Л. 3 и 5].

При рассмотрении статической устойчивости исходят из нормального установившегося режима работы системы и параметров этого режима; при этом уравнения (2) удовлетворяются.

Коэффициент запаса по устойчивости, равный $k_3 = \frac{P_{1\text{пр}} - P_{10}}{P_{10}}$, можно определить, найдя статическую характеристику системы и параметры предельного режима.

Под статической характеристикой понимают зависимость активной мощности нагруженной станции P_1 в функции относительного угла δ_{1n} при постепенном утяжелении режима, когда станция 1 нагружается, а станция n является балансирующей.

Утяжелять режим системы можно двумя путями. В первом случае предполагается дискретное приращение активной мощности загруженной станции ΔP_1 , во втором — отыскивается режим, получающийся при новом заданном значении относительного угла между векторами э. д. с. нагруженной и балансирующей станций, т. е. δ_{1n} .

Исследования показали, что второй способ утяжеления режима целесообразнее, так как существенно уменьшаются затраты машинного времени на расчет каждого режима, а также устраняются трудности выбора оптимальной величины ΔP_1 и необходимость изменения ее при подходе к пределу.

Расчеты режимов электрической системы с целью построения статической характеристики $P_1 = f(\delta_{1n})$ предполагают, таким образом, решение системы нелинейных уравнений (2).

Заметим, что после того, как система (2) решена и найдены значения всех относительных

углов, определение реактивной мощности станций не представляет труда.

При принятом способе задания утяжеления режима значением относительного угла δ_{1n} в системе уравнений (2) неизвестными будут: P_1 , δ_{2n} , δ_3 , ..., $\delta_{(n-1)n}$ и P_n .

При этом неизвестные P_1 , δ_{2n} , ..., $\delta_{(n-1)n}$ могут быть найдены из $(n-1)$ -го уравнения системы (2), а величина P_n — из последнего уравнения как следствие решения $(n-1)$ уравнения системы (2).

Тогда решение системы уравнений (2) без последнего методом «скорейшего спуска» от p -й к $(p+1)$ -й итерации может быть найдено в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} P_1^{(p+1)} \\ \delta_{2n}^{(p+1)} \\ \vdots \\ \delta_{(n-1)n}^{(p+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1^{(p)} \\ \delta_{2n}^{(p)} \\ \vdots \\ \delta_{(n-1)n}^{(p)} \end{bmatrix} - \frac{\mathbf{F}^{(p)}, \mathbf{A}^{(p)} \mathbf{A}'^{(p)} \mathbf{F}^{(p)}}{\mathbf{A}^{(p)} \mathbf{A}'^{(p)} \mathbf{F}^{(p)}, \mathbf{A}^{(p)} \mathbf{A}'^{(p)} \mathbf{F}^{(p)}} \mathbf{A}'^{(p)} \mathbf{F}^{(p)}, \quad (3)$$

где знак „·“ обозначает скалярное произведение векторов; $\mathbf{A}^{(p)}$ — матрица Якоби вектора-функции $\mathbf{F}^{(p)}$, равная:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & E_1 E_2 y_{12} \cos (\delta_{1n} - \delta_{2n} - \alpha_{12}) & \dots & \dots & -E_1 E_{n-1} y_{1(n-1)} \cos (\delta_{1n} - \delta_{(n-1)n} - \alpha_{1(n-1)}) \\ 0 & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^n E_2 E_j y_{2j} \cos (\delta_{2n} - \delta_{jn} - \alpha_{2j}) & \dots & \dots & -E_2 E_{n-1} y_{2(n-1)} \cos (\delta_{2n} - \delta_{(n-1)n} - \alpha_{2(n-1)}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & -E_{n-1} E_2 y_{(n-1)2} \cos (\delta_{(n-1)n} - \delta_{2n} - \alpha_{(n-1)2}) & \dots & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n-1}}^n E_{n-1} E_j y_{(n-1)j} \cos (\delta_{(n-1)n} - \delta_{jn} - \alpha_{(n-1)j}) & \vdots \end{bmatrix}$$

углов, определение реактивной мощности станций не представляет труда.

Алгоритм расчета режимов электрической системы. Система нелинейных (трансцендентных) уравнений (2) может быть решена только итера-

¹ Часто применяемый в этих случаях обобщенный метод Ньютона — Рафсона оказался нецелесообразным, так как необходимо отыскание не только матрицы Якоби для системы функций относительно переменных, но и обращение ее, что связано с дополнительными затратами машинного времени.

Здесь A' — транспонированная матрица Якоби, а $F^{(p)}$ — вектор невязок, равный:

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{c} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ F_{n-1} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} -P_1 \\ -P_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ -P_{n-1} \end{array} \right] + \\
 & + \left[\begin{array}{c} E_1 y_{11} \sin \alpha_{11} \\ E_2 y_{21} \sin (\delta_{1n} - \delta_{2n} - \alpha_{21}) \\ \vdots \\ \vdots \\ E_{n-1} y_{(n-1)1} \sin (\delta_{(n-1)n} - \delta_{1n} - \alpha_{(n-1)1}) \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ E_{n-1} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ E_n \end{array} \right].
 \end{aligned}$$

В случае плохой сходимости итерационного процесса можно получать процесс, сходящийся быстрее (или к более точному решению), если величину скалярную $\frac{F^{(p)}, A(p)A'(p)F^{(p)}}{A(p)A'(p)F^{(p)}, A(p)A'(p)F^{(p)}}$, входящего в (3), умножить

[Л. 6 и 10] на коэффициент ускорения (или замедления), что предусмотрено программой.

Применение итеративных методов предполагает существование критериев оценки окончания итерационного процесса.

В данном случае такими критериями, заложенными в программу, являются:

$$\Delta \delta = |\delta_{(i-1)n}^{(p+1)} - \delta_{(i-1)n}^{(p)}| \leq \varepsilon_1; \Delta P_i \leq \varepsilon; \quad (4)$$

$$F^{(p)} \leq \varepsilon_2, \quad (5)$$

где невязка по мощности i -й станции при p -й итерации равна:

$$F_i = -P_i + E^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j y_{ij} \sin (\delta_{in} - \delta_{jn} - \alpha_{ij}).$$

Заметим, что при использовании для оценки погрешности решения системы уравнений (2) крите-

рия окончания счета (5) необходимо помнить, что минимальные невязки не всегда соответствуют максимальной точности расчета [Л. 6].

Алгоритм проверки статической устойчивости системы по практическому критерию. При оценке статической устойчивости системы по критерию $\frac{dP}{d\delta}$ можно исходить или из закрепления углов э. д. с. всех станций, кроме одной, или из закрепления активных мощностей всех станций, кроме двух.

В данной работе при определении величины $\frac{dP_1}{d\delta_{1n}}$ принято постоянство активных мощностей станций, что, как показывает опыт сопоставления исследований, проведенных обоими методами, дает практически удовлетворительные результаты.

В соответствии с этим каждый рассчитанный режим считается устойчивым, если $\frac{dP}{d\delta} > 0$.

Принимая во внимание систему уравнений (2), а также постоянство активных мощностей станций 2, 3, ..., $n-1$, во всех рассматриваемых режимах (т. е. $dP_2 = dP_3 = \dots = dP_{n-1} = 0$), получим нижеследующую систему уравнений, записанную в классической форме:

$$\left[\begin{array}{ccccc} 1 & -\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{2n}} & -\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{3n}} & \dots & -\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{(n-1)n}} & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{2n}} & -\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{3n}} & \dots & -\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{(n-1)n}} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & -\frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_{2n}} & -\frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_{3n}} & \dots & -\frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_{(n-1)n}} & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_n}{\partial \delta_{2n}} & -\frac{\partial P_n}{\partial \delta_{3n}} & \dots & -\frac{\partial P_n}{\partial \delta_{(n-1)n}} & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \frac{dP_1}{d\delta_{1n}} \\ \frac{d\delta_{2n}}{d\delta_{1n}} \\ \vdots \\ \frac{d\delta_{(n-1)n}}{d\delta_{1n}} \\ \frac{dP_n}{d\delta_{1n}} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{1n}} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{1n}} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_{1n}} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_{1n}} \end{array} \right]. \quad (6)$$

Система уравнений (6) содержит n линейных уравнений и $n \left(\frac{dP_1}{d\delta_{1n}}, \frac{d\delta_{2n}}{d\delta_{1n}}, \dots, \frac{d\delta_{(n-1)n}}{d\delta_{1n}}, \frac{dP_n}{d\delta_{1n}} \right)$ неизвестных.

Для решения системы линейных уравнений (6) применен метод Гаусса².

Необходимым и достаточным условием применимости метода Гаусса является неравенство нулю всех ведущих элементов матрицы, составленной из коэффициентов системы уравнений (6), что в рассматриваемом случае имеет место.

Алгоритм расчета напряжений в узлах и мощностей участков сложной системы. Первый из указанных выше алгоритмов основан на применении коэффициентов распределения напряжения K_{li} . В общем случае K_{li} является комплексной величиной, соответствующей слагающей напряжения в узле l системы, от действия э. д. с. какого-либо одного источника питания, когда э. д. с. всех остальных источников равны нулю. Таким образом:

$$\dot{K}_{li} = \frac{\dot{U}_l}{\dot{E}_i}, \text{ если } \dot{E}_1 = \dot{E}_2 = \dots = \dot{E}_n = 0, \text{ а } \dot{E}_i \neq 0.$$

Коэффициенты распределения напряжения могут быть получены из расчетов собственных и взаимных проводимостей методом единичных токов или методом единичных напряжений на ЦВМ³.

Если известны все коэффициенты распределения напряжения в узлах, то напряжение в любой контрольной точке системы найдем как

$$\dot{U}_l = \sum_{i=1}^n \dot{K}_{li} \dot{E}_i. \quad (7)$$

Мощность в начале любого участка, ограниченного двумя соседними узлами d и m , может быть найдена из уравнения:

$$S_d = \sqrt{3} \dot{U}_d I_{dm},$$

где \dot{U}_d вычислено в соответствии с (7), а

$$I_{dm} = \frac{\dot{U}_d - \dot{U}_m}{\sqrt{3} Z_{dm}}.$$

Предлагаемый метод расчета напряжений в контрольных точках системы и мощностей на участках для реализации на ЦВМ прост.

Общая характеристика программы. На основе описанных выше алгоритмов был составлен вариант универсальной программы для ЦВМ

² Для ЦВМ «Урал-2» существует стандартная программа решения систем линейных уравнений методом Гаусса.

³ Программа расчета собственных и взаимных проводимостей для ЦВМ «Урал-2» разработана Киевским институтом электродинамики АН УССР. Вологодская областная научная библиотека

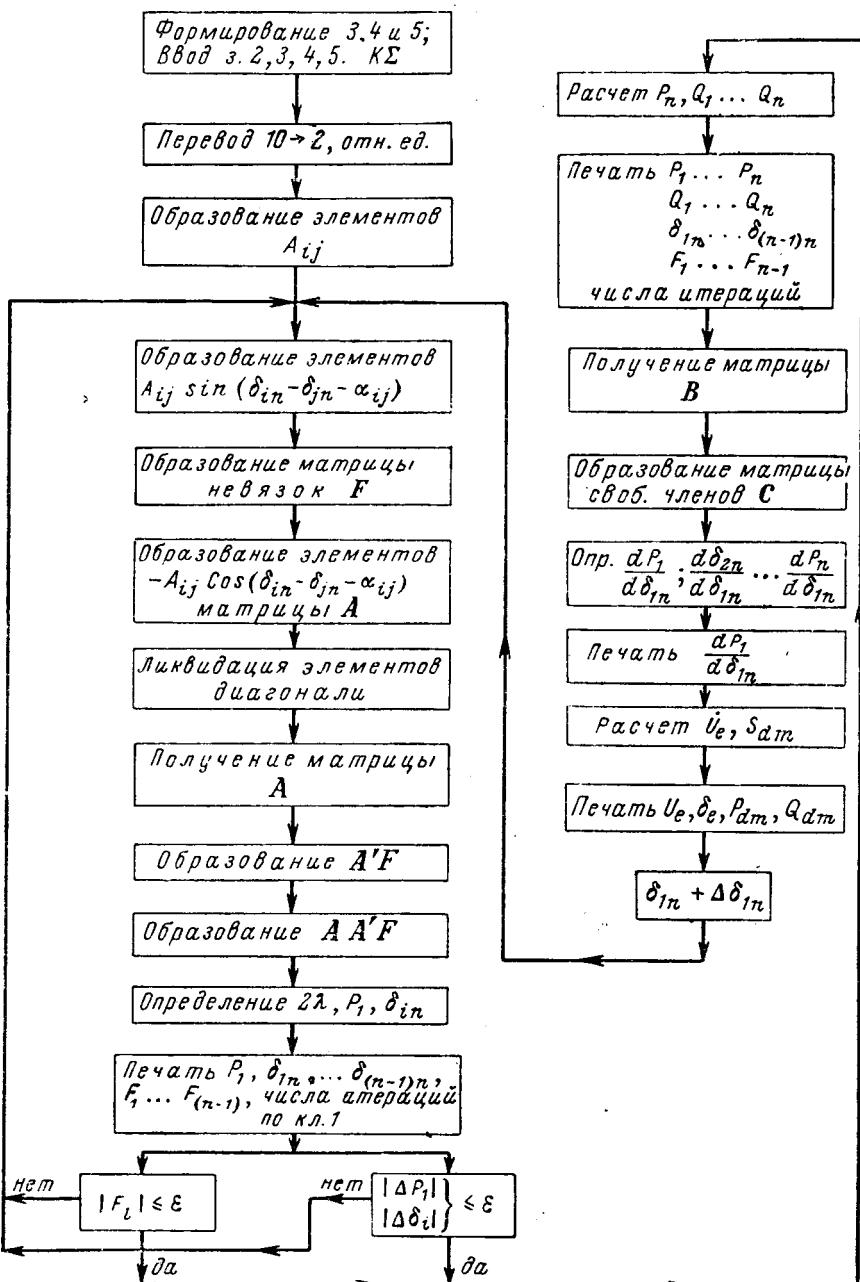


Рис. 1. Блок-схема программы.

(8) «Урал-2», блок-схема которой приведена на рис. 1. По этой программе могут рассчитываться режимы и определяться статическая устойчивость систем, содержащих не более 15 станций при любой сложности сети, объединяющей их. Число контрольных точек по напряжению не должно превосходить шести. Максимальное число участков сети, где может быть рассчитана мощность, пять. В программе предусмотрена возможность поочередной разгрузки станций при достижении заранее заданной (по тем или иным причинам) величины активной мощности балансирующей (разгружаемой) станции. Эта часть программы занимает в оперативной памяти машины место программы расчета синхронизирующей мощности $\frac{dP_1}{d\delta_1n}$.

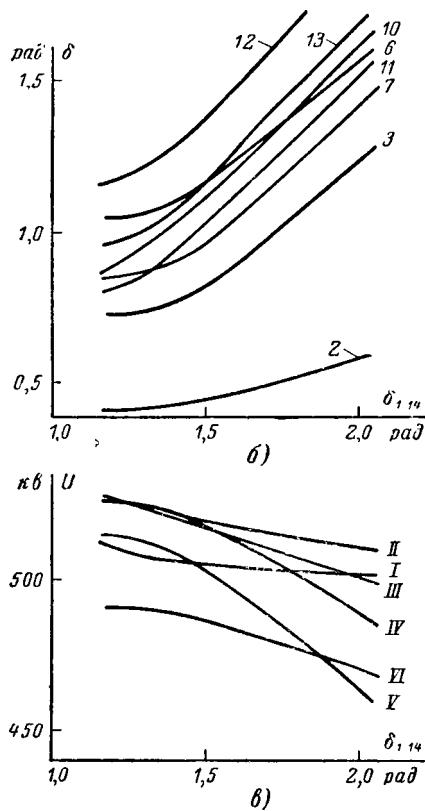
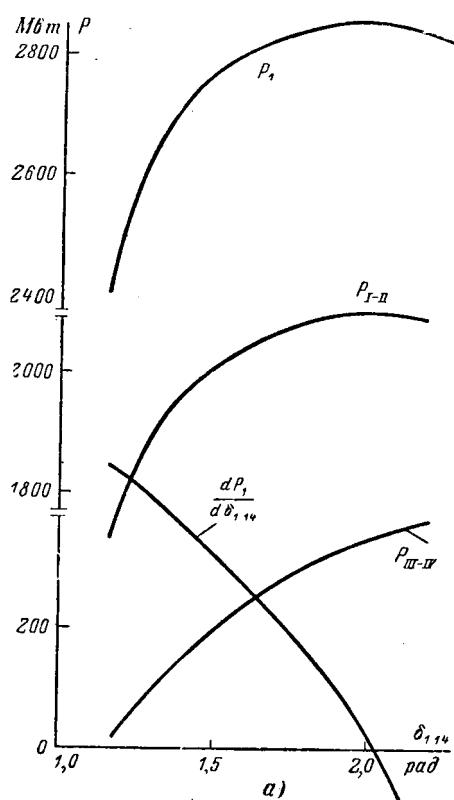


Рис. 2. Результаты расчетов по программе в схеме, содержащей 14 станций.

а—зависимость мощностей и $\frac{dP_1}{ddelta_14}$ в функции угла $delta_14$; P_1 —статическая характеристика; P_{I-II} , P_{III-IV} —активные мощности на участках между узлами I—II, III—IV; б—зависимости относительных углов станций 2, 3, 6, 7, 10, 11, 12, и 13 в функции угла $delta_14$; в—величины напряжений в узлах I—VI в функции угла $delta_14$.

В каждом расчетном режиме на печать выводятся: значения активных и реактивных мощностей всех станций, относительные углы станций, кроме балансирующей, величины невязок активных мощностей станций, число итераций, значение $\frac{dP_1}{ddelta_1n}$, модули и аргументы напряжений в контрольных точках, активные и реактивные мощности на участках.

Некоторые результаты расчетов по программе. Были проведены расчеты систем, содержащих три, восемь, четырнадцать и пятнадцать станций. На рис. 2 приведены некоторые результаты расчетов схемы, содержащей четырнадцать станций⁴. Целью расчетов было определение пропускной способности линии электропередачи 500 кв, имеющей в промежуточных точках присоединения крупных станций и связь с системами. Выявлялась также целесообразность применения на линии устройства продольной компенсации (УПК) для увеличения ее пропускной способности (рис. 3).

Опыт работы на ЦВМ позволил оценить время необходимое на расчеты:

Количество станций в системе	Время, затраченное на расчет в полном объеме, мин
3	10
8	50
14	150

Как видно из данных, затраты машинного времени сильно растут с увеличением числа станций в системе и в основном определяются временем, необходимым на решение системы нелинейных уравнений (2).

⁴ Схема не приводится из-за ее громоздкости.

В схемах с числом станций 14—15 оптимальная, с точки зрения используемого машинного времени, величина приращения угла (при переходе от одного режима к другому) $\Delta delta_{1n}$ составляет 1°.

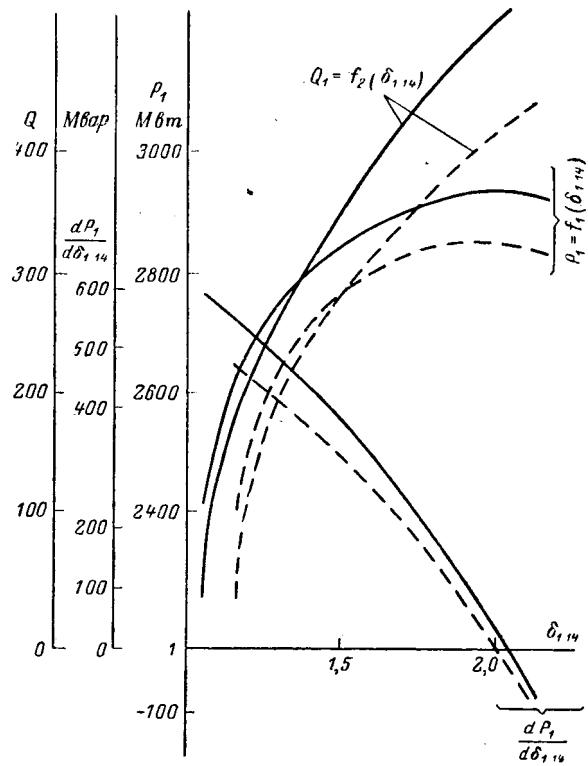


Рис. 3. Зависимости P_1 , Q_1 и $\frac{dP_1}{ddelta_14}$

— без УПК; — с УПК ($x_c = 0.2x_n$).

Заключение. Разработана методика анализа статической устойчивости, соответствующие алгоритмы и программа, которые позволяют оценивать статическую устойчивость сложной системы по практическому критерию $\frac{dP}{d\delta}$.

При этом в процессе расчетов находится предельный режим и его параметры, на основе которых можно определить коэффициент запаса по статической устойчивости.

Одновременно с этим во всех режимах могут определяться напряжения в контрольных точках системы и мощности на участках сети, объединяющей станции.

Для получения параметров наиболее вероятных предельных режимов в программе предусмотрена циклическая замена одной балансирующей станции другой.

Л и т е р а т у р а

1. Азарьев Д. И., Веников В. А., Литкенс И. В., Мамиконянц Л. Г., Портной М. Г. и Соловьев С. А.,

Основные положения по определению устойчивости энергетических систем, «Электричество», 1963, № 11.

2. Анисимова Н. Д., Веников В. А., Ежков В. В., Жуков Л. А., Литкенс И. В., Федоров Д. А. и Цовьянов А. Н., Методика расчетов устойчивости автоматизированных электрических систем, изд-во Высшая школа, 1966.

3. Веников В. А., Переходные электромеханические процессы в электрических системах, изд-во «Энергия», 1964.

4. Литкенс И. В. и Гамазин С. И., Расчеты статической устойчивости с использованием электронных цифровых вычислительных машин, Московский дом научно-технической пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского, Применение вычислительной техники в электроэнергетике, Материалы конференции, М., 1964.

5. Жданов П. С., Устойчивость электрических систем, Госэнергоиздат, 1948.

6. Бут Э. Д., Численные методы, Физматгиз, 1959.

7. Хаусхолдер А. С., Основы численного анализа, Изд-во иностр. лит., 1956.

8. Дж. Н. Ланс, Численные методы для быстродействующих вычислительных машин, Изд-во иностр. лит., 1962.

9. Демидович Б. П. и Марон И. А., Основы вычислительной математики, Физматгиз, 1963.

10. Фадеев А. К. и Фадеева В. Н., Вычислительные методы линейной алгебры, Физматгиз, 1960.

[27.6.1967]



УДК 621.318.6.315.592

Теория полупроводниковых импульсных реле времени

Канд. техн. наук. Е. П. ФИГУРНОВ

Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта

Реле времени с использованием заряда конденсатора широко известны [Л. 1—3]. Для повышения удельной выдержки времени используется заряд конденсатора импульсами тока [Л. 4—6]. Изменение параметров элементов схемы реле под влиянием ряда факторов вызывает нестабильность времени срабатывания. Она проявляется в некотором отклонении Δt времени срабатывания t при неизменной уставке срабатывания t_b .

Одним из дестабилизирующих факторов является изменение параметров резисторов и конденсаторов при колебаниях температуры и в результате старения [Л. 1 и 2]. Замедленная поляризация диэлектрика конденсатора (абсорбция заряда) [Л. 7] также является причиной нестабильности, особенно при малых токах заряда и быстром повторном срабатывании реле. Стабильность импульсных реле зависит и от типа применяемых датчиков дозирующих импульсов и времени подготовки схемы к повторному действию.

Отмеченные факторы присущи как контактным, так и бесконтактным реле времени с накопительной емкостью любых типов. Учитывая имеющиеся рекомендации [Л. 1 и 2], в дальнейшем внимание на этих вопросах акцентироваться не будет, хотя полученные формулы и позволяют произвести анализ влияния указанных факторов.

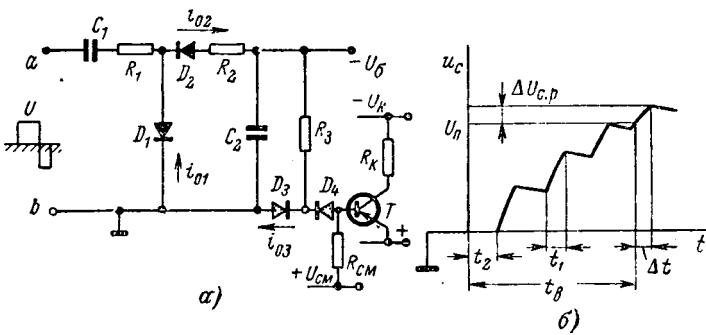
Весьма существенными дестабилизирующими факторами, характерными для реле рассматриваемого типа, являются температурная нестабильность параметров полупроводниковых приборов, технологический разброс и старение. Для схем с диодами и транзисторами определяющими параметрами

являются обратные токи $p-n$ переходов I_o , падение напряжения в прямом направлении Δu и коэффициент передачи тока базы B .

Реле времени в общем случае состоит из ряда самостоятельных узлов. Основной интерес с точки зрения стабильности представляет узел выдержки времени, который в дальнейшем и рассматривается.

При проектировании полупроводниковых импульсных реле времени возникает задача оптимизации параметров схемы реле и обеспечения минимальных погрешностей в широком диапазоне температур с учетом технологического разброса, старения и температурных изменений свойств и характеристик полупроводниковых приборов. Эта задача может быть решена при кусочно-линейной аппроксимации характеристик полупроводниковых приборов и расчете по предельным состояниям, т. е. при наибольших эксплуатационных обратных токах $p-n$ переходов и прямых падений напряжения на переходах и наименьшем коэффициенте передачи тока базы.

На рис. 1,а изображена основная схема, в которой используется импульсный заряд накопительного конденсатора C_2 . На вход ab схемы поступают в общем случае разнополярные импульсы. Когда полярность импульса такова, что точка b положительна относительно точки a , происходит подзаряд емкости C_2 . При противоположной полярности импульса конденсатор C_2 отделяется от источника диодом D_2 . Диод D_3 также закрыт падением напряжения на сопротивлении R_3 от тока базы транзистора T . Последний при этом открыт.



Узел выдержки времени.

а — принципиальная схема узла; б — график напряжений на конденсаторе C_2 .

Через заданное число импульсов напряжение на конденсаторе C_2 станет равным падению напряжения на резисторе R_3 . При следующем импульсе диод D_3 откроется, а D_4 и, следовательно, транзистор T закроются. Выдержка времени исчисляется от момента начала подачи импульсов на схему до закрытия транзистора T .

На рис. 1,б приведен график изменения напряжения на конденсаторе C_2 . В течение времени t_1 конденсатор заряжается положительным импульсом, в течение времени t_2 разряжается токами утечки через сопротивление изоляции и обратными токами диодов. Выдержка времени t_v обусловлена временем заряда емкости до напряжения U_n , примерно равного U_b .

Нестабильность падения напряжения на диоде D_4 и переходе эмиттер — база транзистора может изменить уровень напряжения, при котором диод D_3 откроется на величину ΔU_{cp} . При этом выдержка времени изменится на величину Δt .

При заряде емкости C_2 существенное влияние на процесс может оказывать сопротивление изоляции конденсатора, а также обратные токи через диоды D_1 и D_3 , которые на рис. 1,б обозначены соответственно i_{01} и i_{03} . При подаче на вход b отрицательного импульса конденсатор C_2 разряжается через сопротивление изоляции. Кроме того, на его заряд оказывают влияние обратные токи диодов D_2 (на схеме обозначен i_{02}) и D_3 .

Емкость дозирующего конденсатора C_1 обычно невелика (менее 0,5 мкФ). Нетрудно так подобрать тип конденсатора C_1 , чтобы сопротивление его изоляции было в 100—1000 раз больше сопротивлений R_1 и R_2 . В этом случае сопротивление изоляции этого конденсатора практически не оказывает влияния на процессы в схеме и в дальнейшем не учитывается.

Импульсы напряжения положительной полярности U_1 , подаваемые на вход схемы, и импульсы напряжения отрицательной полярности U_2 предлагаются стабилизованными.

Скважность Q импульсов положительной полярности при частоте следования f равна:

$$Q = \frac{t_1 + t_2}{t_1} = \frac{1}{f t_1}. \quad (1)$$

За время действия отрицательного импульса емкость C_1 должна успеть полностью перезарядиться через сопротивление R_1 и диод D_1 до напряжения U_2 . Если принять, что перезаряд емкости C_1

полностью заканчивается через время, равное 3—4 постоянным времени, то для обеспечения такого режима требуется иметь:

$$R_1 + R_r < \frac{Q - 1}{(3 - 4) f Q C_1}, \quad (2)$$

где R_r — внутреннее сопротивление генератора импульсов.

Обратные токи полупроводниковых приборов, находящихся на стадии глубокого старения, определяются в общем виде из [Л. 8]

$$\left. \begin{aligned} i_o &= I_o + \gamma U; \quad I'_o = b I_o \exp[a(\theta - \theta_{ii})]; \\ \gamma &= c \frac{I_o}{U_{ii}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где U — напряжение, приложенное к переходу в обратном направлении;

I'_o — начальное значение обратного тока при испытательном обратном напряжении U_{ii} и температуре θ_{ii} ;

a — коэффициент, учитывающий температурную зависимость насыщенной составляющей обратного тока (0,06—0,011);

b — коэффициент, учитывающий изменения насыщенной составляющей тока в процессе старения (1,5—2,5);

c — коэффициент, учитывающий изменение тока поверхности утечки (10—30);

θ — наибольшая рабочая температура, °C.

Для наших условий при положительном импульсе на входе

$$\left. \begin{aligned} i_{01} &= I'_{01} + \gamma_1 (U_1 + U_2); \\ i_{03} &= I'_{03} + \gamma_3 (U_b - u_c). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При отрицательном импульсе на входе

$$\left. \begin{aligned} i_{02} &= I'_{02} + \gamma u_c; \\ i_{03} &= I'_{03} + \gamma_3 (U_b - u_c). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где u_c — текущее значение напряжения на емкости C_2 .

Для увеличения стабильности схемы диоды желательно выбирать кремниевыми с возможно меньшим значением обратных токов. В целях унификации удобно все диоды принять одного типа, поэтому в дальнейшем будем считать величину γ для всех диодов одинаковой.

При подаче на вход положительного импульса процесс заряда емкости C_2 описывается следующей системой уравнений в операторной форме с учетом зависимостей (4):

$$\left. \begin{aligned} i(p) &= i_c(p) + i_y(p) - i_{03}(p); \\ i_c(p) &= p C_2 [u_c(p) - U_{c20}], \\ U_1 &= [i_1(p) + i_{01}(p)] \left(\frac{1}{p C_1} + R_1 \right) - \\ &\quad - U_2 + i_1(p) R_2 + u_c(p); \\ i_y(p) &= \frac{u_c(p)}{R_y}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где R_y — сопротивление утечки через изоляцию конденсатора C_2 ;

U_{c20} — начальное напряжение на конденсаторе C_2 .

Решение этой системы относительно напряжения на конденсаторе C_2 имеет вид:

$$\begin{aligned} u_C(p) &= U_{C20} \frac{p^2 + a_1 p + a_0}{(p - p_1)(p - p'_{12})}, \quad p_1 = -\alpha - \beta; \\ p'_{12} &= -\alpha + \beta; \\ \alpha &= \frac{k + 1 + (R_1 + R_2) \left(\gamma + \frac{1}{R_y} \right)}{2(R_1 + R_2) C_2}; \\ \beta &= \sqrt{\alpha^2 - \frac{\gamma R_y + 1}{(R_1 + R_2) R_y C_1 C_2}}; \\ a_0 &= \frac{I'_{o3} - I'_{o1} - \gamma(U_1 + U_2 - U_6)}{(R_1 + R_2) C_2 U_{C20}}, \quad k = \frac{C_2}{C_1}; \\ a_1 &= \frac{(U_1 + U_2)(1 - \gamma R_1) + k U_{C20} + (I'_{o3} + \gamma U_6)(R_1 + R_2) - I'_{o1} R_1}{(R_1 + R_2) C_2 U_{C20}}. \end{aligned}$$

Переходя к оригиналам, имеем:

$$\begin{aligned} u_C &= U_{C20} \left[\frac{a_0}{p_1 p_2} + \frac{p_1^2 - a_1 p_1 + a_0}{p_1 (p'_{12} - p_1)} \exp(p_1 t_1) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{p_{12}^2 - a_1 p_{12} + a_0}{p_2 (p_{12} - p_1)} \exp(p_{12} t_1) \right]. \end{aligned}$$

Анализ выражений для α и β показывает, что процесс заряда может быть существенно стабилизирован, если выполняются условия:

$$\left. \begin{aligned} k &\geq 2(R_1 + R_2) \left(\gamma + \frac{1}{R_y} \right), \\ R_1 + R_2 &\ll \frac{1}{\gamma + \frac{1}{R_y}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При этом имеем $\alpha = \beta$ и $p_{12} = 0$. Тогда

$$\begin{aligned} u_C(p) &= U_{C20} \frac{p_1^2 + a_1 p_1 + a_0}{p_1 (p_1 + a)}, \quad p_1 = -\frac{k+1}{(R_1 + R_2) C_2}; \\ u_C &= U_{C20} \left\{ \exp(p_1 t_1) - \frac{p_1 a_1 + a_0}{p_1^2} [1 - \exp(p_1 t_1)] - \right. \\ &\quad \left. - \frac{a_0}{p_1} t_1 \right\}. \end{aligned}$$

Подставляя сюда значения a_0 и a_1 , получаем:

$$\begin{aligned} u_C &= \frac{k + \exp(p_1 t_1)}{k + 1} U_{C20} + \\ &+ \frac{1}{k + 1} (U_1 + U_2 + A_1) [1 - \exp(p_1 t_1)] + A_2 t_1; \\ A_1 &= \frac{R_1 + R_2}{1 + k} (I'_{o3} + \gamma U_6) + \\ &+ \frac{(R_2 - R_1)}{k + 1} [I'_{o1} + \gamma(U_1 + U_2)]; \\ A_2 &= \frac{I'_{o3} - I'_{o1} - \gamma(U_1 + U_2 - U_6)}{(k + 1) C_1}. \end{aligned}$$

Для стабильности заряда необходимо соблюдение условий

$$\left. \begin{aligned} U_1 + U_2 &\gg A_1; \\ U_1 + U_2 &\gg \frac{(k+1) A_2 t_1}{1 - \exp(p_1 t_1)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Исследование правой части второго неравенства показывает, что при некотором значении времени заряда t_1 она имеет наибольшее значение. При

соблюдении указанных ниже условий экстремум наступает при времени, существенно большем, чем постоянная времени заряда. Это дает основание заменить экспоненциальную функцию в последнем неравенстве первыми двумя членами разложения ее в ряд. Дальнейший анализ приведенных неравенств приводит к следующим условиям стабильности:

$$\left. \begin{aligned} U_1 + U_2 &\gg |(R_1 + R_2)(I'_{o3} - I'_{o1} + \gamma U_6)|, \\ U_1 + U_2 &\gg R_2 I'_{o2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

При их выполнении для процесса заряда имеем:

$$\begin{aligned} u_C &= \frac{k + \exp(p_1 t_1)}{k + 1} U_{C20} + \\ &+ \frac{1}{k + 1} (U_1 + U_2) [1 - \exp(p_1 t_1)] = M U_{C20} + N, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$M = \frac{k + \exp(p_1 t_1)}{k + 1} = 1 - \frac{1}{k + 1} [1 - \exp(p_1 t_1)].$$

При подаче на вход схемы отрицательного импульса процесс разряда емкости C_2 токами утечки описывается, с учетом выражений (5), следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} i_C(p) &= i_{o2}(p) + i_y(p), \quad i_y(p) = \frac{u_C(p) - R_y i_{o2}(p)}{R_y}, \\ i_C(p) &= [u_C(p) - U_{C20}] p C_2. \end{aligned}$$

Изображение напряжения на конденсаторе C_2 при разряде

$$u_C(p) = \frac{p U_{C20} + \frac{I'_{o2} - I'_{o3} - \gamma U_6}{C_2}}{p - \frac{1 + \gamma R_y}{C_2 R_y}}.$$

Оригинал этого изображения

$$\begin{aligned} u_C &= U_{C20} \exp(p_2 t_2) - \frac{\frac{I'_{o2} - I'_{o3} - \gamma U_6}{C_2}}{\gamma + \frac{1}{R_y}} [1 - \\ &- \exp(p_2 t_2)] = D U_{C20} - H; \\ p_2 &= -\frac{1}{\gamma + \frac{1}{R_y}}. \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (11)$$

Для того, чтобы при отрицательном импульсе на входе конденсатор C_2 разряжался бы незначительно, необходимо обеспечить $p_2 t_2 \leq (0,005 - 0,01)$. Из этого условия, с учетом выражений (1) и (11), получаем:

$$f \geq \frac{\left(\gamma + \frac{1}{R_y} \right) (Q - 1)}{(0,005 - 0,01) C_2 Q}. \quad (12)$$

При подаче на вход серии разнополярных периодических импульсов со скважностью Q , наибольшее напряжение на конденсаторе C_2 после прохождения n периодов будет равно

$$\begin{aligned} U_n &= (N - M H) \sum_{k=1}^n (MD)^{k-1} + \frac{H}{D} (MD)^n = \\ &= (N - M H) \frac{1 - (MD)^n}{1 - MD} + \frac{H}{D} (MD)^n. \end{aligned} \quad (13)$$

Для стабильности требуется выполнение условия:

$$N \gg M H.$$

Используя для анализа этого условия выражения (1), (10) — (12), получаем:

$$Q \ll 1 + \left| \frac{U_1 + U_2}{(R_1 + R_2)(I'_{o2} - I'_{o3} - \gamma U_6)} \right|. \quad (14)$$

При этом условии вместо (13) будем иметь:

$$(MD)^n = \frac{U_1 + U_2 - U_n}{U_1 + U_2 - \frac{H}{D}}.$$

Следующим условием, необходимым для повышения стабильности, является неравенство

$$U_1 + U_2 \geq \frac{H}{D}.$$

Воспользовавшись выражениями (1), (11) и (12), получаем:

$$U_1 + U_2 \geq \left| \frac{I'_{o3} - I'_{o2} + \gamma U_6}{(100 \div 200) \left(\gamma + \frac{1}{R_y} \right)} \right|. \quad (15)$$

Число импульсов, необходимых для достижения напряжением на конденсаторе значения U_6 при выполнении условий стабильности (7), (9), (12) и (15), равно:

$$n = \frac{\ln \left(\frac{U_1 + U_2}{U_1 + U_2 - U_n} \right)}{\ln \left[\frac{(k+1) \exp(p_2 t_2)}{k + \exp(p_1 t_1)} \right]}.$$

Время, которое требуется для подачи этого числа импульсов, равно:

$$\frac{n}{f} \left(1 + \frac{1}{nQ} \right) \leq t_B \leq \frac{n}{f}. \quad (16)$$

Неравенство обусловлено тем, что при включении схемы первый импульс может быть как положительным, так и отрицательным. Однако уже при числе импульсов, превышающем 25, можно считать, что

$$t_B = \frac{n}{f} = \frac{\ln \left(\frac{U_1 + U_2}{U_1 + U_2 - U_n} \right)}{f \ln \left[\frac{(k+1) \exp(p_2 t_2)}{k + \exp(p_1 t_1)} \right]}. \quad (17)$$

Если конденсатор C_1 замкнуть накоротко, то

$$t'_B = Q C_2 (R_1 + R_2) \ln \left(\frac{U_1 + U_2}{U_1 + U_2 - U_n} \right). \quad (18)$$

Если же

$$R_1 + R_2 = 0, k \geq 10, f \gg \frac{1}{Q C_1} \left(\gamma + \frac{1}{R_3} \right) (Q - 1),$$

то

$$t''_B = \frac{C_2}{f C_1} \ln \left(\frac{U_1 + U_2}{U_1 + U_2 - U_n} \right). \quad (19)$$

Эти два частных случая имеют важное практическое значение.

Для стабильности выдержки времени играют существенную роль абсолютные значения уровней напряжения U_1 , U_2 и U_6 , поскольку в действительности открытие диода D_3 произойдет, когда после поступления n -го положительного импульса будет выполнено условие:

$$U_n - \Delta u_3 \geq U_6 \text{ Волт.}$$

Δu_3 , Δu_4 , $\Delta u_{\text{об}}$ — падения напряжения в прямом направлении на переходах соответственно диодов D_3 , D_4 и в цепи эмиттер — база транзистора.

Условие срабатывания реле времени имеет вид:

$$\Delta U_{\text{c.p.}} = |U_n - U_6| \geq \Delta u_4 - \Delta u_3 + \Delta u_{\text{об}}. \quad (20)$$

Выбором оптимальных уровней напряжений в схеме можно снизить нестабильность выдержки времени Δt до приемлемого значения.

Для окрестностей точки пересечения кривой заряда с заданным уровнем напряжения U_n (рис. 1, б) можно записать следующее условие, справедливое при малых приращениях:

$$\Delta U_{\text{c.p.}} \leq \frac{du}{dt} \Delta t. \quad (21)$$

Заменим ступенчатую кривую заряда непрерывной кривой. На основании (17) при данных параметрах схемы, неизменных частоте и скважности импульсов имеем:

$$U_6 = (U_1 - U_2) [1 - \exp(p_4 t_B)],$$

$$p_4 = -f \ln \left[\frac{(k+1) \exp(p_2 t_2)}{k + \exp(p_1 t_1)} \right].$$

Используя далее выражения (17), (19) и (20), получаем:

$$\left(1 - \frac{U_6}{U_1 + U_2} \right) \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{U_6}{U_1 + U_2}} \right) \geq \frac{\Delta U_{\text{c.p.}}}{(U_1 + U_2) \left(\frac{\Delta t}{t_B} \right)}.$$

Исследуя это выражение обычным образом на экстремальное значение, получаем оптимальное соотношение напряжений, при котором нестабильность минимальна:

$$\frac{U_6}{U_1 + U_2} = 1 - \frac{1}{e} = 0,632. \quad (22)$$

Необходимое напряжение входных импульсов, при которых относительная погрешность не превысит $\frac{\Delta t}{t_B}$, в этом случае определяется из следующего неравенства:

$$U_1 + U_2 \geq \frac{\Delta U_{\text{c.p.}}}{(0,347 \div 0,368) \left(\frac{\Delta t}{t_B} \right)}. \quad (23)$$

В этом выражении 0,368 соответствует условию (22), а 0,347 — тому распространенному случаю, когда соотношение (22) принимается равным 0,5.

Для проектирования выходной части схемы важно знать время закрытия транзистора T при срабатывании схемы. Уравнения, описывающие переходный процесс в схеме, в данном случае имеют вид, аналогичный (6), а общее решение описывается выражением (7). Анализ его показывает, что при неправильном выборе параметров схемы диод D_3 может вообще не открыться. Для нормальной работы необходимо соблюдение следующего соотношения:

$$C_1 < C_2 \left(\frac{R_3}{R_1 + R_2} \right).$$

Если

$$C_1 (R_1 + R_2) \ll C_2 R_3,$$

то при заданном времени открытия t_0 транзистора надо иметь:

$$\left. \begin{array}{l} C_1 > \frac{t_0}{R_s \left(\frac{U_1 + U_2}{U_b} \right)}, \\ t_0 < \frac{1}{fQ}. \end{array} \right\} \quad (24)$$

При замкнутом накоротко конденсаторе C_1 , время закрытия транзистора T будет равно продолжительности действия положительного импульса, если

$$R_1 + R_2 < R_s \left(\frac{U_1 + U_2}{U_b} - 1 \right). \quad (25)$$

Сопротивление R_s находится из условия:

$$R_s < \frac{U_b}{i_{cm} + i_b}, \quad (26)$$

где i_b — ток базы транзистора, необходимый для обеспечения режима насыщения при наименьшем эксплуатационном значении коэффициента усиления;

i_{cm} — ток положительного смещения базы транзистора.

Если напряжение $U_1 + U_2 - U_b$ не превышает допустимого для транзистора, то диод D_4 , резистор R_{ct} и источник смещения U_{cm} могут быть из схемы изъяты.

Необходимые для расчета условий стабильности по приведенным формулам значения обратных токов вычисляются на основании выражений (3) с использованием данных, указанных в таблице. В этой же таблице указаны примерные значения прямых падений напряжения на переходах, необходимые для расчетов. Более точные данные могут быть получены по индивидуальным характеристикам полупроводников.

Вывод. Выбором оптимальных уровней напряжения и значений сопротивлений в схеме полупроводникового реле времени можно обеспечить такие условия, когда в широком интервале изменения температур стабильность выдержки времени реле будет зависеть в основном от стабильности напряжений, частоты или скважности импульсов, от стабильности зарядных резисторов и конденсаторов и практически не будет зависеть от изменения свойств полупроводниковых приборов, технологического разброса их параметров и токов утечки.

Типы полупроводниковых приборов		Δu , в	γ , а/в
Германиевые	Диоды плоскостные	0,05—0,3	10^{-5}
	Диоды точечные	0,2—0,8	10^{-5}
	Транзисторы (э—б)	0,2—0,4	10^{-6}
	Транзисторы (э—к)	0,05—0,3	10^{-6}
Кремниевые	Диоды плоскостные	0,1—0,8	$10^{-8}—10^{-9}$
	Диоды точечные	0,6—1,5	10^{-8}
	Транзисторы (э—б)	0,4—0,7	10^{-8}
	Транзисторы (э—к)	0,3—0,5	10^{-8}

Приложение. Пример 1. Рассчитать параметры схемы импульсного реле времени без зарядных сопротивлений с выдержкой времени до 300 сек.

Выбираем кремниевые диоды типа Д223 Б. ($I_0 = 10^{-8}$ а, $\gamma = 10^{-9}$ а/в, $\Delta u = 0,15$ в) и транзисторы типа П106 ($I_0 = 10^{-7}$ а, $\Delta u_b = 0,3$ в при токе коллектора 0,3 ма).

Из (20) найдем:

$$|\Delta U_{cp}| = 0,15 - 0,15 + 0,3 = 0,3 \text{ в.}$$

Принимая допустимое значение относительной погрешности уставки равным 0,01, найдем из (23):

$$U_1 + U_2 \geq \frac{0,3}{0,368 \cdot 0,01} = 81,5 \text{ в.}$$

Считаем, что амплитуды положительных и отрицательных импульсов одинаковы, и принимаем их равными 45 в. На основании (22) найдем:

$$U_b = 0,632(U_1 + U_2) = 0,632(45 + 45) = 57 \text{ в.}$$

Определяем ток смещения транзистора при температуре 50°С из (3):

$$\begin{aligned} i_{cm} &= i_0 = bI_0 \exp[a(\theta - \theta_n)] + cI_0 \frac{U_k}{U_n} = \\ &= 2 \cdot 10^{-7} \exp[0,11(50 - 20)] + 20 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{12}{5} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ а.} \end{aligned}$$

Принимая ток коллектора равным 0,3 ма и коэффициент усиления транзистора 10, определяем, что необходимый ток базы равен 0,03 ма. На основании (26) найдем:

$$R_s < \frac{57 \cdot 10^6}{10 + 30} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ ом.}$$

Принимаем R_s равным 1,2 мом. Найдем из (24) минимальное допустимое значение дозирующей емкости при t_0 равном $3 \cdot 10^{-3}$ сек:

$$C_1 > \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 57 \cdot 10^6}{1,2 \cdot 10^6 (45 + 45)} = 1,58 \cdot 10^{-3} \text{ мкф.}$$

Принимаем эту емкость равной 2000 пф. Найдем допустимую частоту импульсов, полагая, что сопротивление утечки конденсатора не менее 100 мом и скважность равна 2:

$$\begin{aligned} f &\gg \frac{1}{C_1 Q} \left(\gamma + \frac{1}{R_s} \right) (a - 1) = \frac{10^6}{0,002 \cdot 2} \left(10^{-9} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{10^6} \right) (2 - 1) = 2,75 \text{ гц.} \end{aligned}$$

Принимаем частоту 50 гц. Найдем емкость конденсатора C_2 из (19):

$$C_2 = f C_1 t''_v = 50 \cdot 0,002 \cdot 300 = 30 \text{ мкф.}$$

Проверим условие (12):

$$f \geq \frac{(10^{-9} + 10^{-8})(2 - 1)}{0,01 \cdot 30 \cdot 10^{-6} \cdot 2} \approx 0,018 \text{ гц.}$$

Найдем на основании (3) обратные токи диодов:

$$I'_0 = 2,5 \cdot 10^{-8} \exp[0,11(50 - 20)] = 68 \cdot 10^{-8} \text{ а.}$$

Проверим условие (15), полагая, что в худшем случае ток I'_{o2} равен нулю:

$$U_1 + U_2 \geq \left| \frac{68 \cdot 10^{-8} + 10^{-9} \cdot 57}{100(10^{-8} + 10^{-9})} \right| = 0,74 \text{ в.}$$

Удельная выдержка времени

$$t''_* = \frac{t''_v}{C_1 + C_2} = \frac{300}{30} = 10 \frac{\text{сек}}{\text{мкф.}}$$

Пример 2. Рассчитать параметры реле времени без дозирующей емкости при выдержке времени до 300 сек. Принимаем те же полупроводники.

Аналогично предыдущему случаю найдем:

$$U_1 = U_2 = 45 \text{ в.}, U_b = 57 \text{ в.}, R_s = 1,2 \text{ мом.}$$

Из условия (7) найдем при сопротивлении изоляции конденсатора не менее 100 мом:

$$R_1 + R_2 \leq \frac{1}{10^{-8} + 10^{-9}} = 900 \text{ мом.}$$

Примем $R_1 = 30$ ком, $R_2 = 750$ ком.

Проверим условие (9) и (15) для самого неблагоприятного случая, когда I'_{o1} или I'_{o2} равны нулю:

$$U_1 + U_2 \geq |(30 + 750) \cdot 10^3 (68 \cdot 10^{-8} + 57 \cdot 10^{-9})| = 0,975 \text{ в.}$$

$$U_1 + U_2 \geq |750 \cdot 10^3 \cdot 68 \cdot 10^{-8}| = 0,51 \text{ в.}$$

$$U_1 + U_2 \geq \left| \frac{68 \cdot 10^{-8} + 57 \cdot 10^{-9}}{100 (10^{-9} + 10^{-8})} \right| = 0,67 \text{ в.}$$

Все три условия удовлетворяются.

Найдем скважность из (14):

$$Q \leq 1 + \frac{45 + 45}{(30 + 750) \cdot 10^3 (68 \cdot 10^{-8} + 5,7 \cdot 10^{-9})} = 157.$$

Принимаем скважность равной 13.

Найдем из (17) емкость конденсатора C_2

$$C_2 = \frac{300 \cdot 10^6}{13 (30 + 750) \cdot 10^3 \cdot 1} = 29,6 \text{ мкФ.}$$

Принимаем 30 мкФ .

Частота выбирается по (12):

$$f \geq \frac{(10^{-9} + 10^{-8})(13 - 1) \cdot 10^6}{0,005 \cdot 30 \cdot 13} = 0,068 \text{ Гц.}$$

Принимаем $f = 50 \text{ Гц}$.

Удельная выдержка времени

$$t_* = \frac{t'}{C_2} = \frac{300}{30} = 10 \text{ сек/мкФ.}$$

Литература

1. Малаховский Е. И., Вопросы теории и расчета реле времени на полупроводниках с контуром RC , сб. «Автоматизация энергетики», Киев, 1964.

2. Малаховский Е. И., Исследование стабильности реле времени с электрическим контуром RC , «Электричество», 1965, № 8.

3. Овлашюк В. Я. и Быков В. А., Комплексная электронная система автоматики и защиты фидеров контактной сети, сб. «Электронные схемы автоматики и защиты тяговых подстанций железных дорог», Труды ВНИИЖТ, вып. 315, изд-во «Транспорт», 1966.

4. Синельников В. Я. и Славинский А. К., Увеличение выдержки времени полупроводниковых реле времени, «Приборостроение», 1965, № 5.

5. Турченков В. И., Электронное реле времени с частотно-зависимой характеристикой, ПНТПО, ГОСИНТИ, 1966, № 4—66—929/50.

6. Дмитренко Л. П. и Дудкин Р. И., Тиратронное реле времени с большим диапазоном выдержки, «Приборостроение», 1966, № 7.

7. Грибанов Ю. И., Измерение слабых токов, зарядов и больших сопротивлений, Госэнергоиздат, 1962.

8. Овлашюк В. Я., Сухопрудский Н. Д. и Хальков В. С., Надежность аппаратуры автоматики и телемеханики электротяговых устройств, изд-во «Транспорт», 1965.

{3.3.1967]



УДК 621.315

Пределы мощности электропередач с промежуточными отборами мощности для железнодорожного транспорта, электрифицированного на переменном токе

Канд. техн. наук, доц. Л. А. ЖУКОВ и инж. Ч. С. ХАЛИЛОВ

Московский энергетический институт

Постановка задачи. При расчетах предельных режимов электропередач, от которых получают питание подстанции железнодорожного транспорта, электрифицированного на переменном токе, может быть важна оценка влияния на предел пропускной способности электропередачи многократной поперечной несимметрии и случайного характера тяговой нагрузки.

Учет поперечной несимметрии в нескольких точках схемы замещения электрической системы при определении предела мощности может быть осуществлен при применении для расчета итерационного метода [Л. 1] и пренебрежении электромагнитными моментами, обусловленными высшими гармоническими токами [Л. 2]. В этих условиях предельная мощность определяется максимумом характеристики мощности в начале или конце передачи, вычисленной в соответствии с выражением

$$P_j = 3 \operatorname{Re} (\dot{U}_{j(1)} \hat{I}_{j(1)} + \dot{U}_{j(2)} \hat{I}_{j(2)}), \quad (1)$$

где $\dot{U}_{j(1)}$ и $\hat{I}_{j(1)}$ — соответственно напряжение и ток прямой последовательности в узле и ветви j ;

$\dot{U}_{j(2)}$ и $\hat{I}_{j(2)}$ — то же, но обратной последовательности.

Изменение токовых нагрузок отдельных тяговых подстанций определяется стохастическими законами, поэтому модули и аргументы тока и напряжения обеих последовательностей в выраже-

нии (1) являются случайными величинами. Предел мощности в этом случае характеризуется функцией распределения ряда случайных величин.

В настоящей статье излагается методика определения этой функции распределения, разработанная на кафедре электрических систем МЭИ применительно к двухмашинной схеме замещения системы, показанной на рис. 1. В статье приводятся результаты некоторых расчетов, выполненных для линии межсистемной связи, с промежуточными отборами мощности для электрифицированного железнодорожного транспорта.

Основные этапы решения. В соответствии с рекомендациями [Л. 3] активная и реактивная слагающие тока тяговой подстанции могут быть определены выражениями:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a*} I_{a\max}, \\ I_r &= I_{r*} I_{r\max}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $I_{a\max}$ и $I_{r\max}$ — наибольшие значения соответственно активной и реактивной слагающих фазных токов данной подстанции;

I_{a*} и I_{r*} — действительные случайные функции относительных величин соответственно активной и реактивной составляющих фазных токов нагрузок, определенные по заданному интегральному закону.

Токи I_a и I_r могут быть найдены по среднему току нагрузки тяговой подстанции. Аргументы комплексных средних токов каждой подстанции могут быть заданы только при отсчете относительно вектора фазного напряжения на шинах данной подстанции. Поскольку последние зависят от нагрузки, то ориентироваться вектора средних токов подстанций относительно оси, общей для отсчета аргументов всех комплексных величин, характеризующих режим рассматриваемой схемы, без предварительного расчета не представляется возможным.

Это обстоятельство определяет необходимость в качестве первого этапа решения поставленной задачи выполнить расчет для определения фазных напряжений на шинах тяговых подстанций по модулю и аргументу.

Результаты первого этапа расчета позволяют воспользоваться выражениями (2) и с их помощью задать закон распределения токов всех тяговых подстанций, а затем найти составляющие прямой и обратной последовательностей этих токов. При известных своими законами распределения задающих токах тяговых подстанций токи и напряжения прямой и обратной последовательностей в начале и конце линии (ветви j) могут быть определены по модулю следующей общей зависимостью [Л. 3]:

$$\zeta = \sqrt{(a_0 + a_1 \xi_1 + \dots + a_n \xi_n)^2 + (b_0 + b_1 \xi_1 + \dots + b_n \xi_n)^2}. \quad (3)$$

Вещественная и мнимая слагающая ζ равны соответственно:

$$\begin{aligned} \zeta_a &= a_0 + a_1 \xi_1 + \dots + a_n \xi_n, \\ \zeta_r &= b_0 + b_1 \xi_1 + \dots + b_n \xi_n. \end{aligned} \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) ξ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) — независимые случайные относительные величины задающих токов, a_i и b_i — коэффициенты, определяемые параметрами схем замещения системы для токов прямой и обратной последовательностей, действующими в ней э. д. с. и наибольшими значениями активных и реактивных слагающих задающих токов. Вычисление коэффициентов a_i и b_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) составляет содержание второго этапа расчета.

Мощности P_j определяются в результате третьего — последнего этапа. Практически не представляется возможным воспользоваться методами классической теории вероятностей для определения статистического закона изменения P_j , поскольку, как показывают выражения (1) и (3), мощность P_j характеризуется функцией распределения системы большого количества случайных величин ξ_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Возникающие из-за этого трудности могут быть преодолены при применении метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) и выполнения расчета с помощью ЦВМ.

Метод статистических испытаний позволяет заменить аналитическое решение задачи моделированием случайного процесса. При этом для каждой из тяговых подстанций «разыгрываются» случайные числа, равномерно распределенные в интервале $(0; 1)$ и приводятся к заданному закону распределения

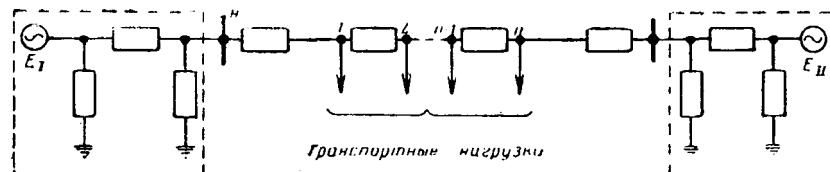


Рис. 1. Двухмашинная схема замещения электрической системы.

ления, причем для каждой из подстанций определяется случайная независимая величина ξ . Затем в соответствии с выражениями (4) вычисляются вещественная и мнимая слагающие тока и напряжения прямой и обратной последовательностей в ветви j и находится значение активной мощности.

Вычисления мощности выполняются в соответствии с формулой (1), приведенной при учете (4) к виду:

$$\begin{aligned} P_j = & 3 [(a_{U(1)0} + a_{U(1)1}\xi_1 + \dots + a_{U(1)n}\xi_n) \times \\ & \times (a_{I(1)0} + a_{I(1)1}\xi_1 + \dots + a_{I(1)n}\xi_n) + \\ & + (b_{U(1)0} + b_{U(1)1}\xi_1 + \dots + b_{U(1)n}\xi_n) \times \\ & \times (b_{I(1)0} + b_{I(1)1}\xi_1 + \dots + b_{I(1)n}\xi_n) + \\ & + (a_{U(2)1}\xi_1 + a_{U(2)2}\xi_2 + \dots + a_{U(2)n}\xi_n) \times \\ & \times (a_{I(2)1}\xi_1 + a_{I(2)2}\xi_2 + \dots + a_{I(2)n}\xi_n) + \\ & + (b_{U(2)1}\xi_1 + b_{U(2)2}\xi_2 + \dots + b_{U(2)n}\xi_n) \times \\ & \times (b_{I(2)1}\xi_1 + b_{I(2)2}\xi_2 + \dots + b_{I(2)n}\xi_n)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученный результат, являющийся возможным случайнм значением мощности, регистрируется, после чего весь расчет повторяется вновь.

Информация, полученная после большого количества таких расчетов — испытаний (порядка 1 000...2 000) обрабатывается, причем устанавливаются пределы возможных значений мощности и вероятность промежуточных значений. Результатом такой обработки является функция распределения и числовые характеристики случайной величины P_j .

Для оценки предельных значений мощности все при этапа расчета выполняются для ряда постепенно увеличивающихся значений угла δ_{12} , характеризующего расхождение по фазе э. д. с. генераторных станций в схеме рис. 1. Результатом таких расчетов является серия интегральных кривых распределения вероятностей мощности, одна из которых отвечает предельному режиму.

Некоторые расчетные формулы и блок-схема расчета. Напряжение в любом узле линейной схемы и ток в любой ее ветви могут быть найдены методом наложения как результат действия э. д. с. генераторных станций и задающих токов. В двухмашинной схеме замещения системы связь между э. д. с. станций, задающими токами и искомыми напряжениями и токами определяется матричными выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{kj} &= \|D_{kj}\| \times \dot{E}_k + \|Z_{mj}\| \times \dot{I}_m, \\ \dot{I}_{kj} &= \|Y_{kj}\| \times \dot{E}_k + \|C_{mj}\| \times \dot{I}_m, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\|\dot{E}_k\|$ и $\|\dot{I}_m\|$ — столбцовые матрицы соответственно э. д. с. генераторных станций и задающих токов;

- $|D_{kj}|$ — прямоугольная матрица комплексных коэффициентов распределения напряжения для узлов j от первой и второй генераторных станций;
- $|Z_{mj}|$ — прямоугольная матрица общих сопротивлений между ветвями задающих токов и узлами j ;
- $|Y_{kj}|$ — прямоугольная матрица взаимных проводимостей между ветвями j и ветвями генераторных станций;
- $|C_{mj}|$ — прямоугольная матрица комплексных коэффициентов распределения задающих токов по ветвям j .

Формулы (6) справедливы для схем как прямой, так и обратной последовательностей, причем для последней $|E_k| = 0$. Их последовательное применение совместно с известными соотношениями между фазными величинами и их слагающими прямой и обратной последовательностей позволяет итерационным путем выполнить первый этап расчета.

В программе, разработанной для ЦВМ Урал-2 применительно к блок-схеме, показанной на рис. 2, расчеты нулевой итерации ведутся при представлении тяговой нагрузки неизменными сопротивлениями. Эти сопротивления вычисляются в предположении симметрии нагрузки тяговых подстанций. При последующих итерациях для каждой из тяговых подстанций вычисляются фазные токи в обмотках трансформаторов с учетом схем соединения обмоток и схемы включения трансформаторов в сеть.

Исходными данными для таких расчетов слу-

жат комплексные значения напряжений $|U_i|$, найденные в результате предыдущей итерации, и активные и реактивные нагрузки контактной сети. По полученным результатам вычисляются слагающие токов прямой и обратной последовательностей, определяются с помощью выражений (6) напряжения прямой и обратной последовательностей на шинах этих подстанций, после чего весь расчет повторяется.

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока различие напряжений на шинах всех тяговых подстанций, найденных в результате двух последних итераций, не станет меньше некоторой наперед заданной величины.

Исходными данными для вычисления коэффициентов квадратичной формы a_l и b_l являются комплексные токи (I_{icp}) контактной сети, аргументы которых устанавливаются по результатам первого этапа расчетов. Расчетные формулы для определения a_l и b_l для каждой тяговой подстанции при заданном угле δ_{12} определяются из выражений (6), составленных с учетом формул (2) и (4) [Л. 4]. При этом для вычисления максимальных значений токов, входящих в выражение (2), используется соотношение [Л. 3]:

$$I_{l\max} = \frac{I_{icp}}{I_{cp*}},$$

где I_{cp*} — средний статистический относительный ток, отвечающий заданному числу пар поездов.

Такой подход позволяет получить [Л. 4] для коэффициентов a_l , используемых для определения

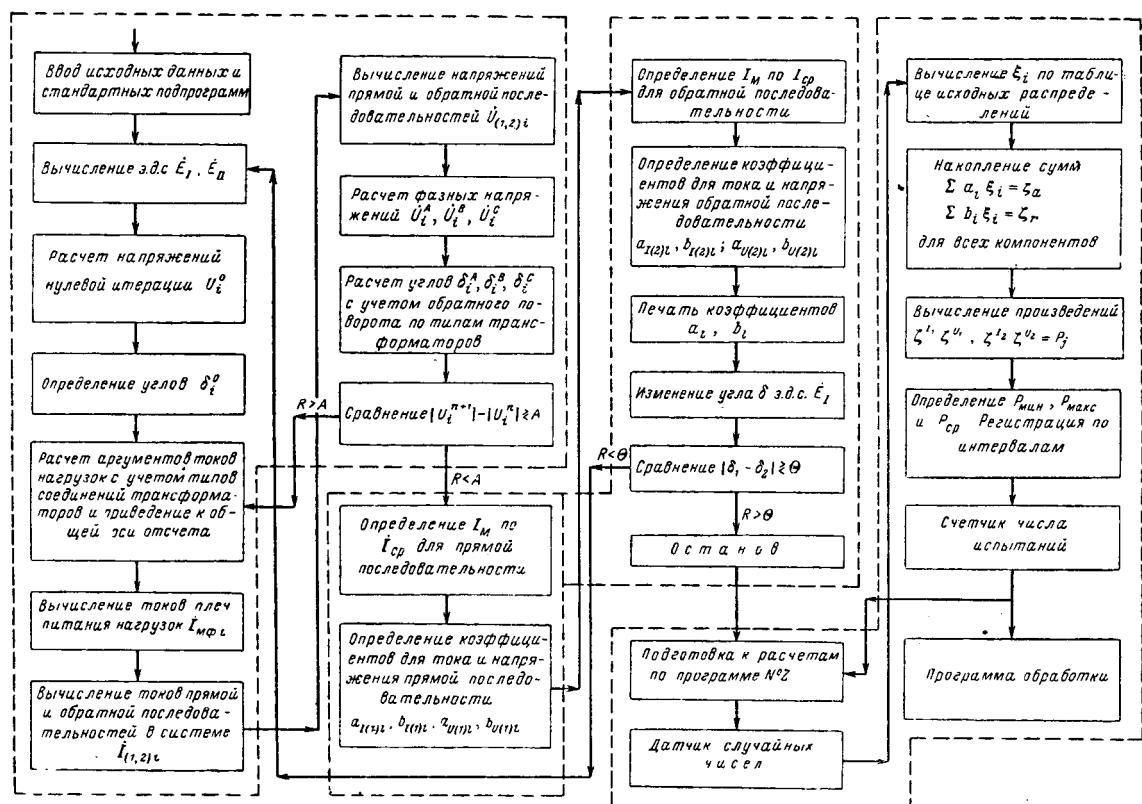


Рис. 2. Блок-схема расчета функций распределения мощности.

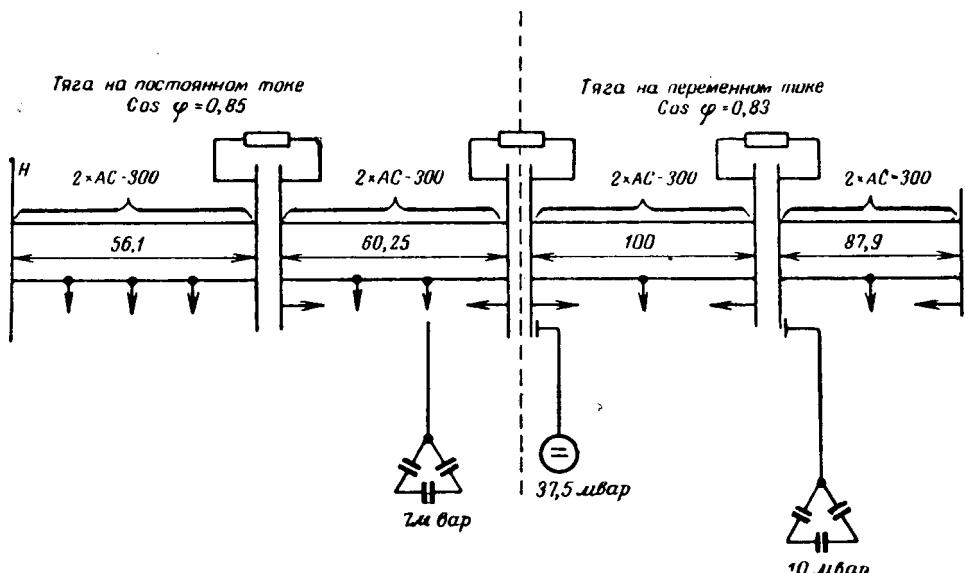


Рис. 3. Расчетная схема.

напряжений прямой и обратной последовательностей, следующие выражения:

$$a_{U(1)i} = \operatorname{Re} \left[\sum_{i=1}^n Z_{li(1)} \frac{j_i^{ca} + a j_i^{ab} + a^2 j_i^{bc}}{\sqrt{3} I_{cp*}} \right],$$

$$a_{U(2)i} = \operatorname{Re} \left[\sum_{i=1}^n Z_{li(2)} \frac{j_i^{ca} + a^2 j_i^{ab} + a j_i^{bc}}{\sqrt{3} I_{cp*}} \right].$$

Аналогичными по структуре формулами определяются коэффициенты $b_{U(1)i}$ и $b_{U(2)i}$, а также коэффициенты a_l и b_l для токов прямой и обратной последовательностей.

Программа второго этапа расчета, разработанная на основе блок-схемы рис. 2, предусматривает последовательное увеличение аргумента э. д. с. одной из генераторных станций, что обеспечивает получение коэффициентов a_l и b_l в диапазоне углов $0 \leq \delta_{12} \leq 90^\circ + k$ и в том числе для угла, отвечающего предельному режиму.

В программе третьего этапа расчета, выполняемого с целью получения интегрального закона распределения мощности P_j , для получения последовательности случайных чисел на ЭЦВМ [Л. 5], соответствующих заданному закону распределения,

а также для обработки результатов использован алгоритм и программа ВНИИЭ [Л. 6].

Результаты выполненных расчетов. На рис. 3 показана схема замещения линии межсистемной связи 110 кВ длиной в 300 км, в промежуточных точках которой включены тяговые подстанции постоянного и переменного токов. Применительно к этой схеме исследовалось влияние на предел мощности электропередачи несимметрии и случайного характера нагрузки тяговых подстанций, снабжающих энергией электровозы переменного тока. В расчетах нагрузка подстанций постоянного тока условно считалась детерминированно заданной. В схеме замещения она учитывалась неизменными сопротивлениями. Такое грубое допущение было принято для того, чтобы более отчетливо выявить влияние исследовавшихся факторов, присущих тяговым сетям переменного тока.

Искомой функцией распределения в поставленной задаче явилась функция распределения предельной мощности в начале линии (ветвь Н на схеме рис. 3).

Расчеты выполнялись при удельной плотности тяговой нагрузки 250 квт/км и соответствующего плотности движения поездов величине среднего статистического значения относительного тока нагрузки $I_{cp*} = 0,44$. Для всех тяговых подстанций был принят нормальный закон распределения токов.

Полученные в результате расчета кривые интегрального распределения мощности для двух значений угла δ_{12} показаны на рис. 4. Эти кривые показывают, что абсолютный максимум мощности, имеющий место в рассматриваемом случае при $\delta_{12} = 82,5^\circ$, составляет 0,225 отн. ед. Для этих условий математическое ожидание предела мощности было найдено равным $M_* = 0,2214$, среднее квадратичное отклонение $\sigma_* = 0,00133$.

Расчеты были повторены при детерминированном задании нагрузки как при учете, так и без учета несимметрии. Расхождение результатов трех этих расчетов оказалось практически в пределах точности расчета. Сопоставление расчетных пред-

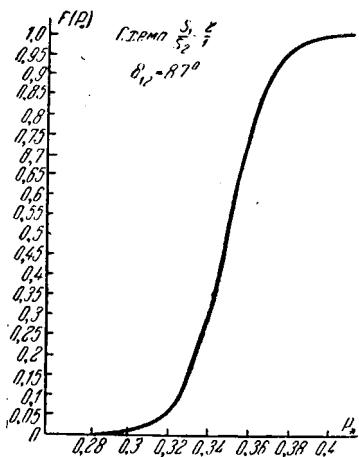


Рис. 5. Кривая интегрального распределения предельного режима для линии со значительной транспортной нагрузкой.

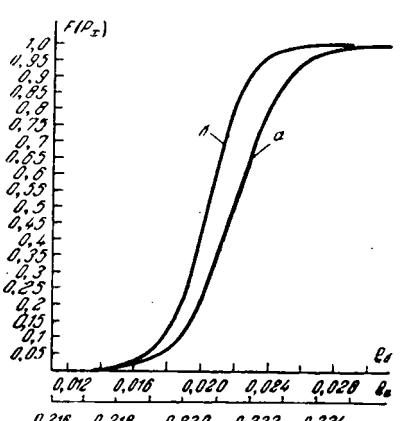


Рис. 4. Кривые интегрального распределения предельного (а) и исходного (б) режимов.

а — $\delta_{12} = 82,5^\circ$; б — $\delta_{12} = -17,30^\circ$.

лов мощности с данными эксплуатации подтвердило полную достоверность результатов выполненных расчетов.

На рис. 5 показана кривая интегрального распределения предельной мощности, полученная для расчетной схемы, которая характеризуется значительно большей долей тяговой нагрузки в суммарной нагрузке системы, а также большей относительной пропускной способностью линии межсистемной связи, чем схема на рис. 3. Нетрудно видеть, что и в этом случае, для которого математическое ожидание предела мощности составляет $M_* = 0,349$, а среднее квадратичное отклонение $\sigma_* = 0,0188$, влияние вероятностного характера транспортной нагрузки на предел не является решающим.

Заключение. 1. Расчеты мощности линий с промежуточной тяговой нагрузкой показывают, что случайный характер и несимметрия такой нагрузки оказывают незначительное влияние на результаты оценки предела пропускной способности линий. Поэтому можно считать оправданным вычисление предельной мощности электропередач, подобным рассмотренным в настоящей статье, при детерминированном задании промежуточной нагрузки и неучете ее несимметрии.

2. В электрических системах, содержащих тяговую нагрузку, соизмеримую по мощности с промышленной нагрузкой, можно ждать более заметного влияния стохастического характера этой на-

грузки на числовые характеристики предела пропускной способности электропередач. Оценка ее в этих условиях может быть осуществлена с помощью программы, разработанной на кафедре электрических систем МЭИ.

3. Незначительность изменения предела мощности при случайных независимых изменениях мощности промежуточной нагрузки еще не свидетельствует о нецелесообразности учета влияния этих изменений на другие характеристики режима системы и отдельных ее элементов.

Литература

- Жуков Л. А., Расчеты пределов мощности электрической системы, содержащей слабые связи с промежуточной транспортной, электрифицированной на переменном токе нагрузкой, «Применение вычислительной техники в электроэнергетике» (материалы конференции), Сборник 2, 1964.
- Жуков Л. А. и Зотов В. И., О влиянии несимметрии и толчков промежуточной нагрузки на устойчивость слабых межсистемных связей, «Электричество», 1965, № 5.
- Тимофеев Д. В., Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками, изд-во «Энергия», 1965.
- Халилов Ч. С., К расчету функций распределения токов и напряжений в электрической системе, содержащей транспортную нагрузку, «За технический прогресс», 1965, № 12 (60), Баку.
- Бусленко Н. П., Голенко Д. И. и др., Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), Физматгиз, 1962.
- Фролов А. С., Определение методом статистических испытаний одномерной функции распределения величин модуля тока (напряжения), Труды ВНИИЭ, вып. XV, Госэнергоиздат, 1963.

[31.10.1966]



УДК 621.313.322—81.+621.315.592

Исследование полупроводниковой системы возбуждения мощного турбогенератора

Доктор техн. наук, проф. И. А. ГЛЕБОВ, инж. В. М. БОБРОВ, инж. Е. Н. ПОПОВ
(Институт электромеханики).

К. В. ЛАПАЕВ А. В. ПТАШКИН
(ВНИИЭМ) (ОРГРЭС)

В настоящей работе изложены основные результаты исследований полупроводниковой системы возбуждения турбогенератора ТВВ-200-2, проведенных в промышленных условиях на ГРЭС с установленной мощностью генераторов 1 300 Мвт.

Целью испытаний было определение оптимального варианта настройки, оценка надежности и получение технических характеристик системы возбуждения в различных установившихся и переходных режимах работы турбогенератора.

Основные элементы и параметры системы. На ис. 1 показана принципиальная схема системы возбуждения, а также схема первичных соединений ГРЭС и участка энергосистемы при проведении испытаний.

Система возбуждения выполнена по принципу выпрямления переменного напряжения статическим выпрямителем. Схема выпрямительной установки ВУ) — два последовательно соединенных трехфазных моста с 12 параллельными и 2 последовательными

ными диодами ВКД-200. Всего в установке 288 диодов. ВУ соединена с возбудителем двумя шинопроводами кольцевого сечения.

В качестве возбудителя использован индукторный генератор мощностью 2 620 ква частотой 500 гц, непосредственно соединенный с валом турбогенератора. Параметры высокочастотного трехфазного генератора (ВГТ): $x_d = 0,218 \text{ ом}$, $x'_d = -0,139 \text{ ом}$, $x_2 = 0,168 \text{ ом}$. ВГТ имеет на статоре две рабочих обмотки, соединенных треугольником, и три обмотки возбуждения. Намагничающая сила возбуждения вnomинальном режиме турбогенератора составляет 2 430 а. Последовательная обмотка возбуждения возбудителя имеет один эквивалентный виток на полюс, осуществляет компаундирование по току ротора и вnomинальном режиме обеспечивает н. с. равную 2 600 а, т. е. возбудитель перекомпаундирован. Две другие обмотки, имеющие по 30 витков на полюс, предназначены для управления режимом возбуждения,

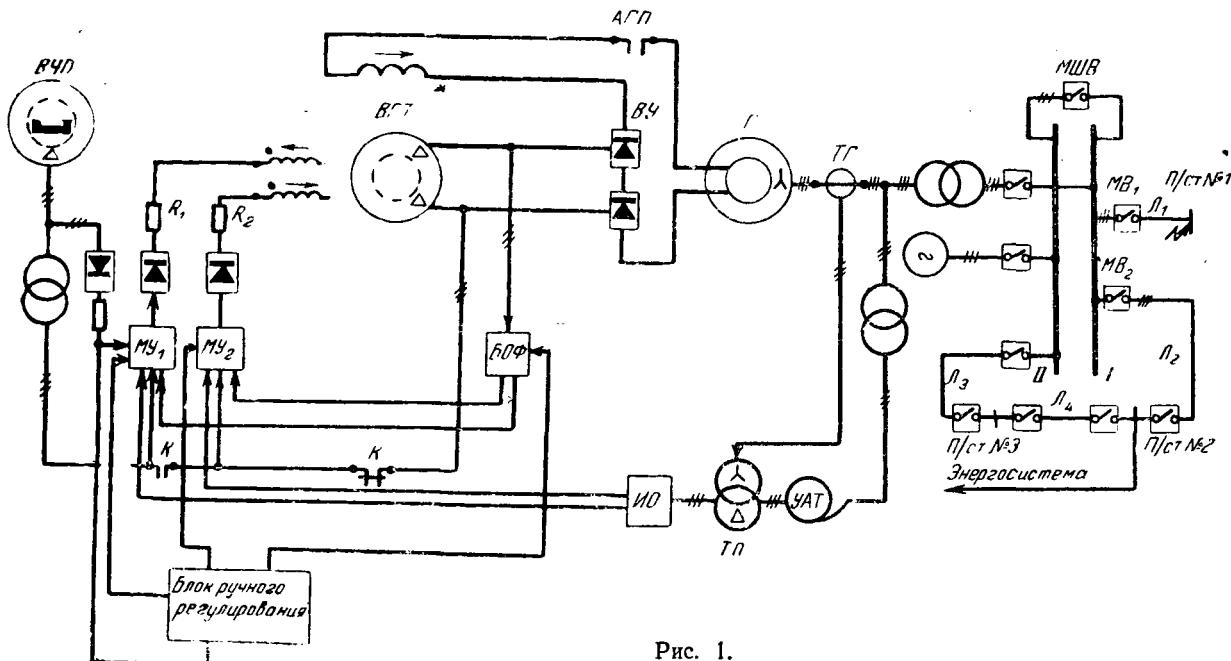


Рис. 1.

одна из них создает н. с., направленную встречно, а вторая согласно по отношению к н. с. последовательной обмотки. Вnomинальном режиме, как показано ниже, н. с. второй обмотки равна 370 а. Поэтому н. с. противовключенной обмотки должна быть 540 а. Питание противовключенной обмотки осуществляется через магнитный усилитель МУ₁ от высокочастотного подвозбудителя (ВЧП), в качестве которого используется синхронный генератор частотой 400 гц с постоянными магнитами мощностью 3,6 квт. Питание согласно включенной обмотки возбудителя осуществляется через магнитный усилитель МУ₂, который нормально подключен к выводам возбудителя. При пуске системы МУ₂ подключается к подвозбудителю. Переключение осуществляется контактором К.

Управление возбуждением осуществляется автоматически в функции отклонения напряжения статора. АРВ имеет фазовое компаундирование по току статора. Измерительный орган (ИО) регулятора выполнен на электромагнитных элементах. Выход его подключен к обмоткам управления магнитных усилителей. Уставка АРВ регулируется установочным автотрансформатором (УАТ).

В схеме имеется специальный блок — электромагнитное устройство, предназначенное для ограничения потолка форсировки (БОФ). Имеется также релейное устройство, обеспечивающее автоматическое снятие форсировки с переводом на ручное регулирование через 15 сек (на рис. 1 не показано).

Вся аппаратура схемы регулирования возбуждения, за исключением установочного автотрансформатора (УАТ), смонтирована в одной панели, УАТ установлен на пульте управления генератора.

Гашение поля турбогенератора осуществляется автоматом типа АГП-30-42.

Параметры возбуждения турбогенератора при номинальной нагрузке по опытным данным следующие: напряжение $U_{f\text{н}} = 290$ в, ток $I_{f\text{н}} = 2600$ а. Но-

толок форсировки по напряжению двухкратный.

Система возбуждения разработана Ленинградским филиалом ВНИИЭМ и в настоящее время серийно поставляется на все турбогенераторы мощностью 150, 200 и 300 Мвт производства Ленинградского электромашиностроительного объединения «Электросила».

Режим работы выпрямителя. Режим выпрямителя в данной установке определяется не только реактивностью источника питания, но и реактивностью шинопроводов между возбудителем и выпрямительной установкой. В связи с большой длиной последних ($l \approx 12$ м) и высокой частотой реактивное сопротивление (x_w) получается по опытным данным 0,0179 ом. Реактивное сопротивление возбудителя, определяющее коммутационные процессы, выпрямителя по заводским данным равно

$$x_r = \frac{x'_d + x_2}{2} = 0,051 \text{ ом},$$

где x'_d , x_2 — соответственно переходное реактивное сопротивление по продольной оси и реактивное сопротивление обратного следования фаз, полученные преобразованием «треугольника» в эквивалентную «звезду». Если сопротивление ротора в номинальном режиме $r_{f\text{н}} = 0,112$ ом, то отношение суммарного реактивного сопротивления возбудителя и шинопровода к сопротивлению ротора получается равным 0,615, что соответствует режиму работы выпрямителя с углом коммутации $\gamma = 60^\circ$ и вынужденным углом задержки α . Из известных равенств для мостовой трехфазной схемы

$$u_f = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E \cos \alpha - \frac{3}{\pi} i_f (x_r + x_w), \cos(\alpha + \gamma) = \\ = \cos \alpha - \frac{2(x_r + x_w)i_f}{\sqrt{6}E},$$

где u_f и i_f — средние значения выпрямленных напряжений и тока;

E — расчетная э. д. с. возбудителя за со противлением коммутации x_r .

следует, что

$$\alpha = \arctg \left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{x_r + x_w}{r_f} \right) - \frac{\pi}{6}.$$

Подставив соответствующие значения, находим вынужденный угол задержки $\alpha = 15^\circ$. Таким образом, выпрямитель работает с углом коммутации $\gamma = 60^\circ$ и углом задержки $\alpha = 15^\circ$, что хорошо согласуется с осциллографическими записями. В этом случае имеет место одновременная работа трех плеч каждого моста.

При таком глубоком режиме работы выпрямителя пульсация выпрямленного напряжения получается повышенной. Отношение максимального напряжения к среднему напряжению ($u_{f\max}/u_{f\text{ср}}$) ротора при этом должно быть равным 1,41. Практически же из-за наличия коммутационных перенапряжений это отношение будет в несколько раз выше. Однако с помощью цепочек $R-C$, установленных параллельно вентилям и на выходе мостов, отношение $u_{f\max}/u_{f\text{ср}}$ может быть уменьшено (рис. 2, а) и доведено до 2,06 (рис. 2, б). Поэтому в номинальном режиме и в режиме форсировки максимальное напряжение на обмотке ротора соответственно будет $u_{f\max} \approx 600$ в и $u_{f\max\phi} \approx 1190$ в. Эти величины не являются опасными для изоляции ротора. Максимальное мгновенное значение напряжения на кольцах ротора в длительном режиме не должно превышать 30% амплитуды заводского испытатель-

ного напряжения относительно корпуса, т. е. амплитуда пульсаций, не должна превышать 1500 в. Максимальное напряжение может быть снижено за счет уменьшения реактивного сопротивления шинопроводов. В частности, при $x_w = 0$ угол коммутации γ получается близким к 60° , а угол $\alpha \approx 0$. Кратность пульсаций в этом режиме снижается без учета коммутационных перенапряжений до 1,21.

Технические характеристики в статических режимах. Для определения оптимального варианта настройки был проведен комплекс исследований при работе турбогенератора в сети. Оценка производилась по быстродействию, устойчивости и статизму регулирования напряжения генератора. Отличительной особенностью системы регулирования возбуждения является непостоянство ее коэффициента усиления, зависимость его от режима генератора. Обусловлено это, главным образом, тем, что магнитный усилитель M_2 канала регулирования, имеющего выход на согласно включенную обмотку возбудителя, подключен к выводам возбудителя, т. е. на источник изменяющегося напряжения. Кроме того, характеристики этого канала имеют значительную нелинейность: с увеличением тока выхода коэффициент усиления возрастает. В результате этого коэффициент усиления канала регулирования, воздействующего на согласно включенную обмотку возбуждения, в номинальном режиме превышает его величину в режиме холостого хода примерно в 10 раз (рис. 3).

Канал регулирования, воздействующий на противовключенную обмотку возбудителя, имеет практически неизменный коэффициент усиления. Величина его соответствует значению, при котором изменение линейного напряжения на измерительном органе на 1 в вызывает изменение н. с. возбудителя на 60—90 а.

В случае перекомпаундированного ВГТ регулирование в основном осуществляется по каналу, воздействующему на противовключенную обмотку. Канал регулирования согласно включенной обмотки служит, главным образом, для обеспечения режима форсировки и степень его участия в нормальных режимах турбогенератора незначительная. Коэффициент усиления системы в этом случае мало зависит от уровня возбуждения, что положительно сказывается на обеспечении устойчивости регулирования. В этом отношении вариант с перекомпаундированием ВГТ лучше, чем вариант с недокомпаундированием. В последнем случае регулирование в основном осуществляется по каналу согласно включенной обмотки, коэффициент усиления которой резко изменяется при изменении уровня возбуждения. В результате этого область устойчивой работы системы регулирования сужается, причем при малых коэффициентах усиления имеет место апериодическая неустойчивость, сопровождающаяся полной потерей возбуждения генератора.

Испытания показали, что с увеличением активной нагрузки турбогенератора возможность возникновения неустойчивости колебательного характера возрастает. Поэтому окончательный выбор параметров регулятора производится из условия исключения колебательной неустойчивости при работе генератора с номинальной активной нагрузкой

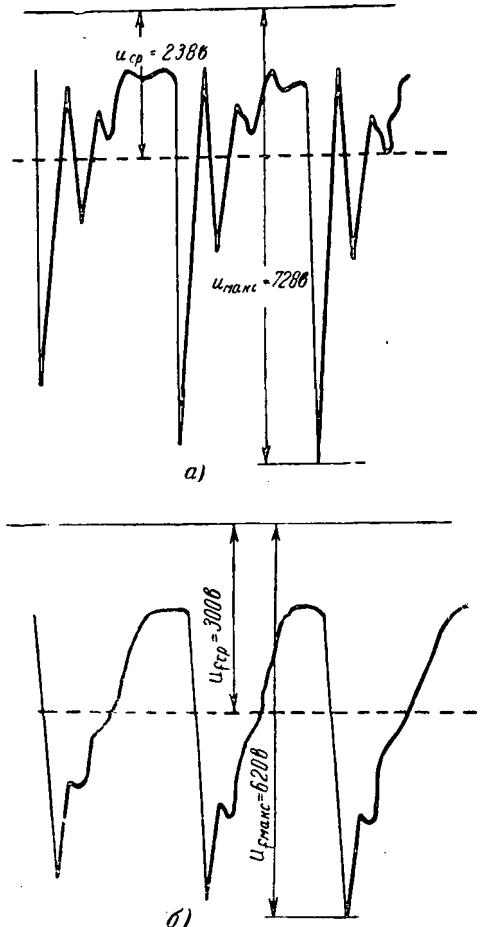


Рис. 2. Осциллограммы напряжения ротора.

— параллельно вентилям установлены цепочки из $R=5$ ом и $C=0.5$ мкФ; б — то же, но на выходе мостов подключены цепочки из $R=1$ ом и $C=28$ мкФ.

при наибольших эксплуатационных уровнях возбуждения — перегрузка по току ротора на 15—30%. Практически регулирование коэффициента усиления системы производится изменением рабочей зоны токов выхода $I_{\text{вых}}$ канала, воздействующего на согласно включенную обмотку возбудителя, что достигается сдвигом его характеристики $I_{\text{вых}} = f(U)$ (рис. 3) по оси напряжения генератора, где U — напряжение генератора. Экспериментально установлено, что достаточный запас устойчивости регулирования обеспечивается, если вnominalном режиме величина коэффициента усиления этого канала не превышает значения, при котором изменению на 1 в линейного напряжения на входе регулятора соответствует изменение н. с. возбудителя на 30—45 а. Это соответствует такому положению характеристики на оси напряжений, когда вnominalном режиме величина н. с., создаваемой согласно включенной обмоткой, составляет примерно 360 а.

Испытания показали, что наличие активных сопротивлений, включенных последовательно в цепи согласной и противовключенной обмоток возбуждения, увеличивает запас устойчивости регулирования. Кроме того, добавочные активные сопротивления уменьшают демпфирующее действие этих обмоток на результатирующую н. с., создаваемую свободным током обмотки ротора турбогенератора во время внезапных коротких замыканий. Величины этих сопротивлений выбраны $R_1 = 0,8 \text{ ом}$, $R_2 = 1,2 \text{ ом}$ (рис. 1).

Шунтирующие сопротивления на обмотках возбуждения, особенно на последовательной, значительно уменьшают быстродействие системы возбуждения. Поэтому их решено было не устанавливать.

Проверка статизма регулирования напряжения генератора показала, что принятый вариант с рекомпаундированным возбудителем обеспечивает поддержание практически неизменного (в пределах 1%) напряжения генератора во всем диапазоне изменения реактивной нагрузки вплоть до величины, соответствующей потолку возбуждения.

При изменении активной нагрузки от нуля доnominalной обеспечивается автоматическое увеличение возбуждения в такой степени, что поддерживается примерно nominalный $\cos \phi$. При этом напряжение генератора увеличивается на 5—7%, что достигнуто введением положительной обратной связи по активной составляющей тока статора.

При изменении частоты на 1% напряжение генератора в режиме холостого хода изменяется примерно на такую же величину с тем же знаком. Нижний предел частоты, при котором происходит полная потеря возбуждения, составляет приблизительно 35 гц.

Проверка эффективности системы возбуждения по обеспечению статической устойчивости турбогенератора производилась при работе его через линию передачи в режиме недовозбуждения. Для этого испытуемый генератор был выделен на 1-ю систему шин, все остальные турбогенераторы ГРЭС были переведены на 2-ю систему шин (рис. 1) отключением междушинного выключателя МШВ. Турбогенератор был переведен в режим работы на

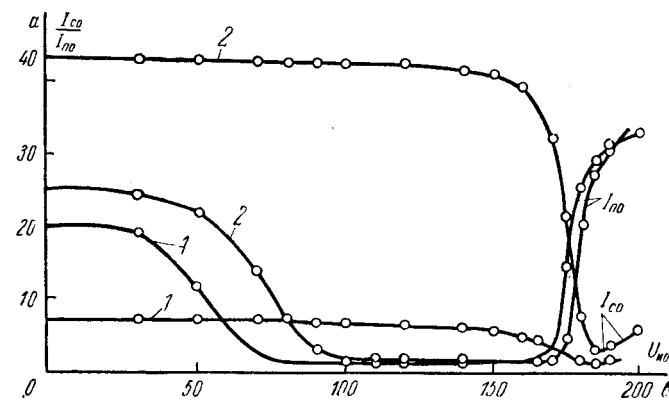


Рис. 3. Характеристики каналов регулирования, воздействующих на согласно включенную обмотку (СО) и противовключенную обмотку (ПО) ВГТ. (Сняты на эквивалентные сопротивления $R_{\text{co}} = 2,5 \text{ ом}$, $R_{\text{po}} = 2 \text{ ом}$)

1 — при $U_{\text{вгт}} = 45 \text{ в}$; 2 — при $U_{\text{вгт}} = 140 \text{ в}$. $U_{\text{и.о.}}$ — напряжение непосредственно на измерительном органе после промежуточных трансформаторов ТП (рис. 1).

шины подстанции № 2, являющейся узловым пунктом энергосистемы, через линию L_2 длиной 150 км. Активная нагрузка генератора в опыте составляла 170 Мвт. Уставка АРВ была снижена с помощью УАТ до крайнего нижнего значения. При этом напряжение статора составляло 0,82 nominalного, ток ротора — 0,62 nominalного. Угол между э. д. с. холостого хода генератора и напряжением 2-й системы шин увеличился до 106°. Нарушения статической устойчивости в этом режиме не наблюдалось. Величина предельного угла определена не была из-за невозможности более значительного снижения возбуждения.

Контрольный опыт при работе на ручном регулировании при отключенном АРВ показал, что при той же величине активной нагрузки нарушение устойчивости происходит при снижении уровня возбуждения до величины, соответствующей напряжению статора 0,9 nominalного.

Переходные аварийные режимы. При удаленных коротких замыканиях и нарушении баланса реактивной мощности в энергосистеме, когда в роторе не возникает больших свободных токов и, следовательно, отсутствует форсировка со стороны последовательной обмотки возбудителя, быстродействие системы возбуждения определяется практически только характеристиками каналов регулирования. В связи с этим необходимо было определить быстродействие системы при форсировке возбуждения только по каналам регулирования. Для имитации снижения напряжения генератора в цепь измерительного органа со стороны трансформаторов напряжения были включены активные сопротивления, нормально закороченные автоматом. При отключении автомата сопротивления вводились в цепь, напряжение на измерительном органе снижалось и АРВ начало форсировать возбуждение. Опыты проводились при работе турбогенератора в системе с активной нагрузкой 150—180 Мвт при различных уровнях начального возбуждения и разных величинах снижения напряжения на измерительном органе. На рис. 4 показана осциллограмма одного из этих опытов при nominalном напряжении возбуж-

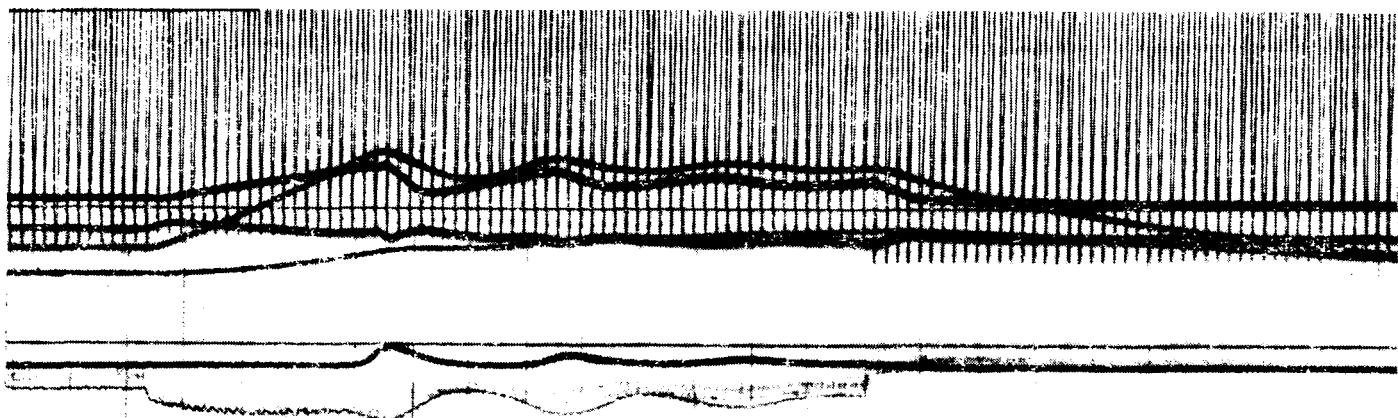


Рис. 4.

дения в исходном режиме и средней величине снижения напряжения на измерительном органе примерно 5 %. Результаты испытаний по определению быстродействия по каналам регулирования приведены в табл. 1. Определение скорости нарастания производилось согласно ГОСТ 10169-62.

Таблица 1

Напряжение возбуждения в исходном режиме	Снижение напряжения на измерительном органе, %	Скорость нарастания напряжения о.е/сек
u_{j_n}	5	2,4
$0,85u_{j_n}$	5	2,1
u_{j_n}	10÷40	2,5÷2,8

Таким образом, как видно из табл. 1, при удаленных коротких замыканиях скорость нарастания напряжения ротора будет составлять 2 1/сек и более.

Для комплексной проверки поведения турбогенератора с полупроводниковой системой возбуждения при внезапных коротких замыканиях в энергосистеме было проведено четыре опыта: два трехфазных, двухфазное и однофазное к. з. на землю. Во время испытаний турбогенератор был подключен на 1-ю систему шин и отключением МШВ переведен в режим работы через линию L_2 на шины подстанции № 2 (рис. 1). Закоротка устанавливалась на подстанции № 1. Длина линии L_1 примерно 40 км, рабочее напряжение 220 кв. Реактивное сопротивление блочного трансформатора $x_r = 0,103$. Короткое замыкание производилось включением линейного выключателя МВ₁, а отключение — релейной защитой с заданной выдержкой времени. В табл. 2 приведены данные исходного режима и результаты обработки осциллограмм. Здесь P — мощность турбогенератора в долях номинальной активной мощности, $t_{k.z}$ — длительность короткого замыкания. Вторую систему шин с достаточной точностью можно принять за систему шин бесконечной мощности.

В графе 1 указаны значения величин в исходном режиме, в графике 2 — перед отключением к. з., в графике 3 — в момент наибольшего угла вылета ротора после отключения к. з., V_1 — скорость на-

растания напряжения на кольцах ротора. В числителе указаны значения, определенные по ГОСТ 10169-62, а в знаменателе — по ГОСТ 183-55. V_2 — скорость уменьшения напряжения на кольцах ротора после отключения к. з. от момента прохождения угла через максимум до момента снижения напряжения до величины исходного режима.

В опыте трехфазного к. з. длительностью 0,54 сек турбогенератор выпал из синхронизма и после двух асинхронных проворотов через 1,6 сек втянулся в синхронизм. В остальных опытах выпадения из синхронизма не было.

На рис. 5 показаны осциллограммы трехфазного короткого замыкания длительностью 0,175 сек. Рассмотрим подробнее физические процессы, возникающие в цепях системы возбуждения в этом опыте.

В момент короткого замыкания в цепи ротора турбогенератора возникает свободный ток, что приводит к скачкообразному увеличению среднего тока выпрямителя. Этот же повышенный ток протекает и по последовательной обмотке возбудителя. Однако суммарная н. с., а следовательно, и э. д. с. возбудителя в начале короткого замыкания остаются практически неизменными в связи с демптирующим действием двух других обмоток возбуждения, особенно противовключенной обмотки (рис. 5, б). Так как ток выпрямителя увеличился, а э. д. с. осталась прежней, то выпрямитель переходит в режим, близкий к одновременной работе четырех плеч каждого моста, что соответствует режиму короткого замыкания выпрямителя. Поэтому напряжение на кольцах ротора в начальной части аварийного режима получается близким к нулю. Однако наличие периодической составляющей в роторном токе приводит к пульсации тока ротора (рис. 5, а). В интервалы времени, соответствующие повышенным значениям тока, напряжение на кольцах ротора становится равным нулю. В интервалы времени, соответствующие пониженным значениям тока, на кольцах ротора появляется напряжение. Все это приводит к тому, что среднее значение напряжения на кольцах ротора, хотя и существенно снижается, но не становится равным нулю. Указанный режим имеет место на протяжении прибли-

Таблица 2

Наименование величин	Трехфазное короткое замыкание, $t_{k,3} = 0,175$ сек			Трехфазное короткое замыкание, $t_{k,3} = 0,54$ сек			Двухфазное короткое замыкание, $t_{k,3} = 0,68$ сек			Однофазное короткое замыкание, $t_{k,3} = 0,53$ сек		
	1	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2	3
P , отв. ед.	0,82	0,35	1,3	0,84	0,30	—	0,81	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
U , отн. ед.	1,05	0,44	1,0	1,04	1,31	—	1,05	0,58	0,95	1,05	0,95	—
u_f , отн. ед.	0,77	1,03	2,07	0,78	2	—	0,77	1,95	1,95	0,74	1,97	—
i_f , отн. ед.	0,73	1,34	1,08	0,75	2,02	—	0,73	1,56	1,56	0,7	1,26	—
θ , град.	54°	60°	76°	51°	164°	—	56°	90°	90°	56°	60°	—
V_1 , отн. ед/сек	—/2,4			2,68/2,03			2,9/2,03			2,56/2,03		
V_2 , отн. ед/сек	2,85			—			2,8			3		

зительно 0,08 сек. Следует заметить, что длительность интервалов с нулевыми значениями напряжений будет тем меньше, чем выше напряжение и ток ротора в исходном режиме. Так как опыт короткого замыкания проводился при исходном напряжении на кольцах ротора 220 в, то можно ожидать, что при номинальном исходном напряжении (290 в) среднее значение напряжения было бы несколько выше.

В дальнейшем происходит затухание свободных (демпфирующих) составляющих токов в обмотках возбуждения (рис. 5,б). Наряду с этим под действием устройств регулирования уменьшается ток в противовключенной обмотке и увеличивается в согласно включенной обмотке, особенно при возрастании напряжения возбудителя. В результате этого получается увеличение напряжения на кольцах ротора (рис. 5,а).

Необходимо отметить, что постоянная времени индуктивно связанных цепей противовключенной и согласно включенной обмоток с учетом добавочных сопротивлений составляет около 0,3 сек. Поэтому к концу короткого замыкания (через 0,175 сек) демпфирующие токи указанных обмоток существенно уменьшаются. В результате этого последовательная обмотка с повышенным током во время короткого замыкания получает возможность существенно увеличить магнитный поток возбудителя.

При отключении короткого замыкания происходит скачкообразное уменьшение тока ротора до величины, приблизительно равной 1,1 исходного значения. При этом уменьшается ток последовательной обмотки, а в двух других обмотках возникают свободные токи (рис. 5,б), которые стремятся поддержать магнитный поток возбудителя неизменным. Однако, как указано выше, магнитный поток возбудителя к концу интервала короткого замыкания получается повышенным. Поэтому при отключении короткого замыкания свободные токи согласной и противовключенной обмоток поддерживают этот повышенный магнитный поток, несмотря на скачкообразное уменьшение тока ротора и тока последовательной обмотки. В результате этого напряжение ротора скачкообразно увеличивается до величины 2,1 исходного значения перед коротким замыканием. Если бы указанного эффекта не было, то напряжение ротора после отключения короткого замыкания было бы приблизительно равным исходному напряжению перед коротким замыканием.

Таким образом, положительное действие последовательной обмотки проявляется не столько при коротком замыкании, как предполагалось ранее, а сколько в послеаварийном режиме после отключения короткого замыкания.

В связи с высокой эффективностью последовательной обмотки, проявляющейся после отключения короткого замыкания, необходимо обратить внимание на следующее существенное обстоятельство. Если бы возбудитель имел только одну обмотку независимого возбуждения, то ее постоянная времени при работе возбудителя на выпрямитель получилась бы около одной секунды, а необходимая мощность в номинальном режиме — около 3 квт. При мощности подвозбудителя в 30 квт и двойной допустимой перегрузке в течение 20 сек указанная постоянная времени может быть снижена за счет включения добавочного сопротивления приблизительно в 5 раз. В случае мгновенной форсировки возбудителя за время короткого замыкания можно при этих условиях увеличить магнитный поток возбудителя лишь в 1,5÷1,6 раза. В то же

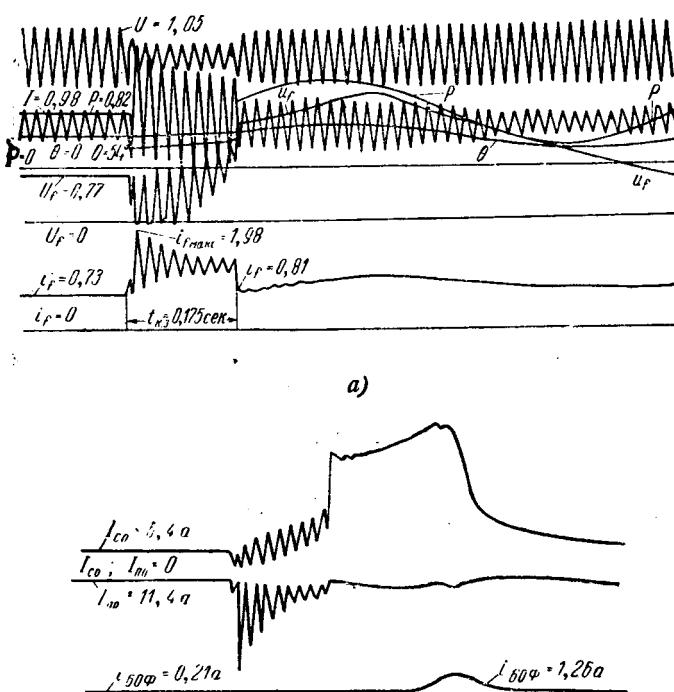


Рис. 5.

время применение последовательной обмотки позволяет, как указано выше, получить приблизительно двухкратное увеличение потока.

Вполне естественно, что после отключения короткого замыкания свободные токи в обмотках возбуждения начинают уменьшаться. Однако в связи с резким увеличением напряжения возбудителя ток в согласно включенной обмотке начинает быстро расти (рис. 5, б). Поэтому результирующая н. с., магнитный поток и э. д. с. возбудителя увеличиваются вплоть до потолочного значения. После этого вступает в действие блок ограничения форсировки (рис. 5, б). Снятие форсировки произошло через 0,05 сек после достижения ротором максимального отклонения.

Рассмотрев протекание переходных процессов при трехфазном коротком замыкании, необходимо отметить, что такой же характер переходных процессов получается и для несимметричных коротких замыканий. Из табл. 2 следует, что при несимметричных коротких замыканиях система имеет скорость нарастания напряжения возбуждения турбогенератора более 2 1/сек.

Исследования показали, что при всех видах коротких замыканий ток ротора турбогенератора не достигает нулевого значения. Поэтому на кольцах ротора и на вентилях не возникает опасных перенапряжений, связанных с невозможностью протекания отрицательного тока из-за наличия выпрямителя. Более того, осциллографические записи показывают, что во время коротких замыканий эти напряжения получаются небольшими. В этих условиях кратковременные токовые перегрузки получаются для выпрямителя более легкими, чем в режиме длительной (20 сек) форсировки с двухкратным потолочным напряжением.

Если короткое замыкание было длительным и среднее значение выпрямленного напряжения достигло двойного значения по отношению к номинальному, то при отключении короткого замыкания повышение напряжения на кольцах ротора может оказаться более высоким. В связи с этим возникали опасения о возможности повреждения выпрямителя. Опыты внезапного короткого замыкания повышенной длительности, проведенные при холостом ходе турбогенератора, где указанные повышения напряжения получаются наибольшими, показали, что среднее значение выпрямленного напряжения в момент отключения короткого замыкания составляло $2,6u_{f,n}$ и затем (в течение 0,1 сек) уменьшалось до двухкратного значения. Так как при этом выпрямитель работает с меньшим углом коммутации, а следовательно, и пульсацией выпрямленного напряжения, то относительное увеличение его максимальных значений оказывается меньше. Поэтому рас-

смотренный режим не представляет опасности для выпрямителя.

Аналогичные процессы имеют место и при отключении АГП. Опыты гашения поля при испытаниях были проведены в различных режимах турбогенератора: на холостом ходу, при работе под нагрузкой, в режиме установившегося короткого замыкания и при внезапных коротких замыканиях. Они показали, что такие режимы не представляют опасности для выпрямителя. Однако при гашении поля в режиме внезапного короткого замыкания напряжение возбудителя в течение некоторого времени после срабатывания АГП может оказаться приблизительно равным двухкратному номинальному значению. В этих условиях целесообразно применить гашение поля не только турбогенератора, но и возбудителя, так как гашение поля последнего в заводской схеме не предусмотрено.

Выходы. 1. Установлено, что полупроводниковая система возбуждения обеспечивает необходимое быстродействие (более 2 1/сек) и потолочное напряжение ($2u_{f,n}$) как при удаленных коротких замыканиях, так и при близких симметричных и несимметричных коротких замыканиях.

2. В связи с большими индуктивными сопротивлениями цепей переменного тока возбудителя выпрямитель в нормальных условиях при форсировках работает в глубоком режиме (угол коммутации $\gamma = 60^\circ$ и угол вынужденной задержки $\alpha = 15^\circ$), что приводит к повышенной пульсации напряжения на кольцах ротора турбогенератора. Однако максимальное напряжение не превышает допустимого. Во время внезапных коротких замыканий в отдельные интервалы времени выпрямитель переходит в режим короткого замыкания, что приводит к снижению среднего значения напряжения возбуждения турбогенератора.

3. Для снижения реактивного сопротивления шинопровода необходимо его выполнять кабелем и располагать выпрямительную установку в непосредственной близости от возбудителя.

4. Для повышения быстродействия системы возбуждения в переходных режимах необходимо в существующей схеме регулирования с регулятором ЭРА-325Б исключить шунтирующие сопротивления на последовательной обмотке возбуждения и на обмотках независимого возбуждения ВГТ-2700-500 с расположением обмоток на каждом полюсе.

5. Для уменьшения демпфирующего действия независимых обмоток и увеличения быстродействия системы следует увеличить сопротивления, включаемые последовательно с независимыми обмотками, и применить подвозбудитель мощностью 30 квт.

[14.1967]



Трудящиеся Советского Союза! Теснее сплачивайтесь под ленинским знаменем Коммунистической партии!

(Из призывов ЦК КПСС к 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции)

УДК 621.313.325+621.316.722

Об автоматическом регулировании синхронных компенсаторов

Г. В. МИХНЕВИЧ и В. М. ФИАЛКОВ

Москва

Введение. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных компенсаторов — это средство повышения их эффективности [Л. 1—3]. В работах последних лет [Л. 4 и 5] показано, что синхронные компенсаторы при определенных условиях снижают предел динамической устойчивости электропередачи. Несмотря на то, что проблема определения рациональной системы автоматического регулирования возбуждения была предметом исследования в ряде работ, до настоящего времени остается открытым вопрос об эффективности регулирования возбуждения синхронных компенсаторов в функции производных режимных величин.

В статье излагается методика анализа динамических свойств автоматически регулируемых энергосистем, содержащих синхронные компенсаторы. Система автоматического регулирования рассматривается как многосвязная [Л. 6], динамические свойства которой в значительной степени определяются взаимодействием регуляторов, установленных на генераторах электростанции и на синхронных компенсаторах. Использование разработанной методики позволяет установить основные особенности исследуемой системы и определить ее рациональную структуру.

В качестве объекта исследования выбрана система, содержащая передающую станцию, работающую через линию электропередачи на приемную систему, и синхронный компенсатор, включенный в промежуточной точке линии. Схема системы изображена на рис. 1.

Уравнения и структурная схема. Уравнения малых отклонений для рассматриваемой системы можно записать в следующем виде [Л. 7 и 8]:

$$(J_1 p^2 + D_{11} p + S_{\delta_{11}}) \Delta \delta_1 + (D_{12} p + S_{\delta_{12}}) \Delta \delta_2 + S_{E_{11}} \Delta E_1 + S_{E_{12}} \Delta E_2 = 0; \quad (1)$$

$$(J_2 p^2 + D_{22} p + S_{\delta_{22}}) \Delta \delta_2 + (D_{21} p + S_{\delta_{21}}) \Delta \delta_1 + S_{E_{22}} \Delta E_2 + S_{E_{21}} \Delta E_1 = 0; \quad (2)$$

$$(1 + T_{11} p) \Delta E_1 + T_{12} p \Delta E_2 + N_{11} p \Delta \delta_1 + N_{12} p \Delta \delta_2 = \Delta U_{B1}, \quad (3)$$

$$(1 + T_{22} p) \Delta E_2 + T_{21} p \Delta E_1 + N_{22} p \Delta \delta_2 + N_{21} p \Delta \delta_1 = \Delta U_{B2}, \quad (4)$$

$$(1 + T_{B1} p) \Delta U_{B1} = \Delta U_{F1}, \quad (5)$$

$$(1 + T_{B2} p) \Delta U_{B2} = \Delta U_{F2}, \quad (6)$$

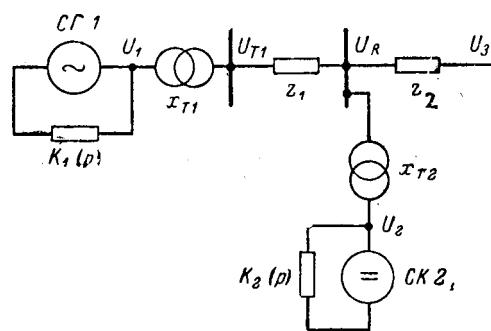
$$\begin{aligned} \Delta U_{F1} = & \frac{1}{1 + T_{\Phi p}} \left[K_{E11} \Delta E_1 + K_{E12} \Delta E_2 + K_{\delta_{11}} \Delta \delta_1 + \right. \\ & + K_{\delta_{12}} \Delta \delta_2 + \frac{p}{1 + T_{1p}} (K'_{E11} \Delta E_1 + K'_{E12} \Delta E_2 + \\ & + K'_{\delta_{11}} \Delta \delta_1 + K'_{\delta_{12}} \Delta \delta_2) + \frac{p^2}{(1 + T_{2p})^2} \left(K''_{E11} \Delta E_1 + \right. \\ & \left. \left. + K''_{E12} \Delta E_2 + K''_{\delta_{11}} \Delta \delta_1 + K''_{\delta_{12}} \Delta \delta_2 \right) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{F2} = & \frac{1}{1 + T_{\Phi p}} \left[K_{E22} \Delta E_2 + K_{E21} \Delta E_1 + K_{\delta_{22}} \Delta \delta_2 + \right. \\ & + K_{\delta_{21}} \Delta \delta_1 + \frac{p}{1 + T_{1p}} (K'_{E22} \Delta E_2 + K'_{E21} \Delta E_1 + \\ & + K'_{\delta_{22}} \Delta \delta_2 + K'_{\delta_{21}} \Delta \delta_1) + \\ & + \frac{p^2}{(1 + T_{2p})^2} (K''_{E22} \Delta E_2 + K''_{E21} \Delta E_1 + \\ & \left. \left. + K''_{\delta_{22}} \Delta \delta_2 + K''_{\delta_{21}} \Delta \delta_1 \right) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где J_1 и J_2 — постоянные инерции генератора СГ1 и синхронного компенсатора СК2; D_{11} , D_{12} , D_{22} , D_{21} — демпферные коэффициенты; $S_{\delta_{ik}} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k}$; $S_{Eik} = \frac{\partial P_i}{\partial E_k}$;

T_{ik} и N_{ik} — коэффициенты, определяемые параметрами и режимом системы; T_{Bi} , T_{Φ} , T_1 , T_2 — постоянные времена возбудителя, фильтра, звеньев получения первой и второй производной; $K_{\delta_{ik}}$, $K'_{\delta_{ik}}$, $K''_{\delta_{ik}}$, K_{Eik} , K'_{Eik} , K''_{Eik} — коэффициенты регулирования по отклонению и производным углов δ_1 и δ_2 , э. д. с. E_1 и E_2 .

Уравнения (1)–(8) не содержат других режимных величин, кроме э. д. с. E_1 и E_2 , углов δ_1 и δ_2 .



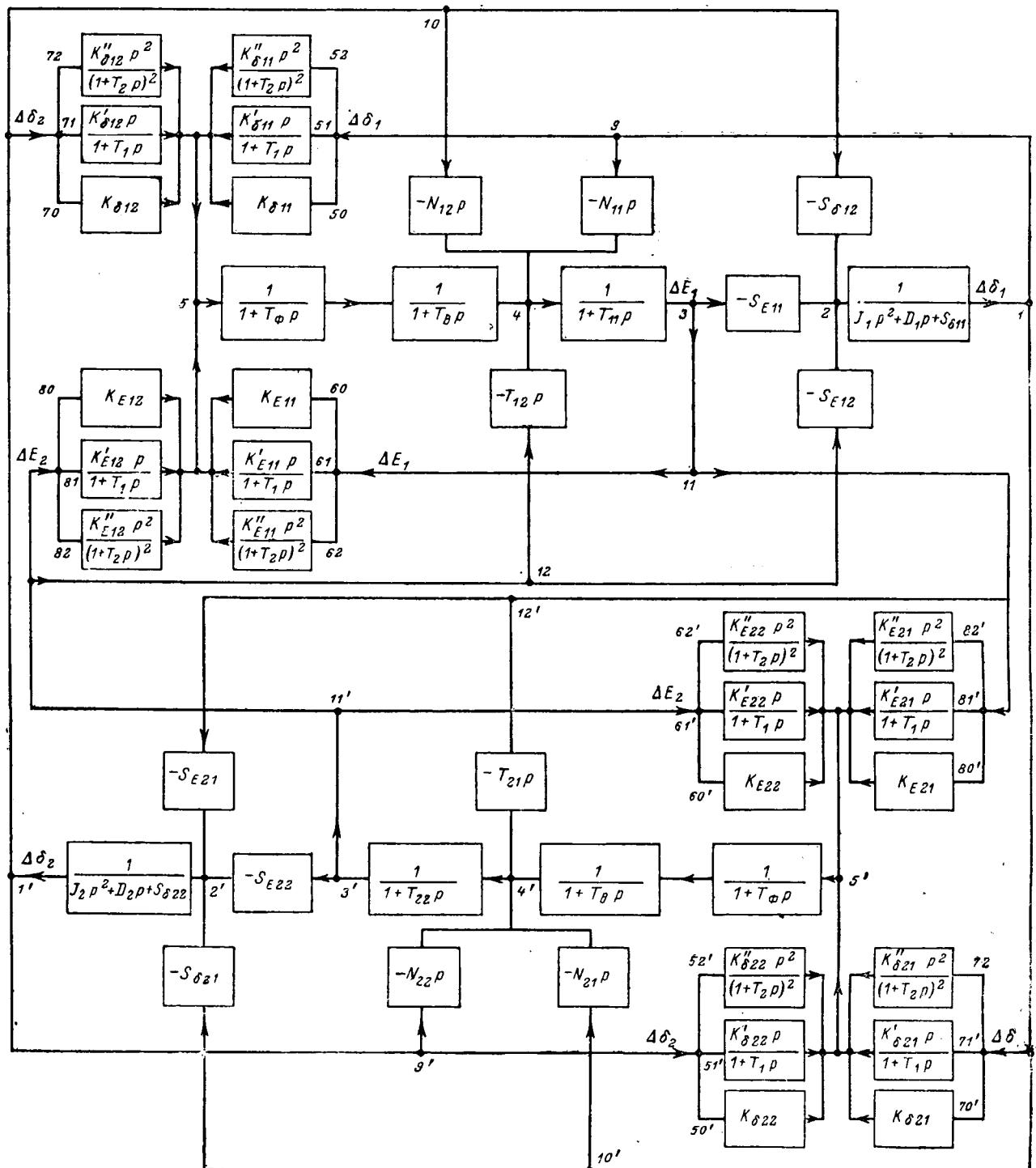


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического регулирования.

Поэтому эти уравнения пригодны для анализа систем регулирования возбуждения в функции любых режимных величин и их сочетаний. Уравнения (1) \div (8) позволяют построить обобщенную структурную схему системы регулирования (рис. 2). Отметим некоторые особенности структурной схемы, изображенной на рис. 2, имеющие существенное значение для анализа динамических свойств системы автоматического регулирования. Определяющим в отношении устойчивости обычно оказывается поведение колебательных звеньев, передаточная функция которых имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{J_n p^2 + D_n p + S_{nii}}. \quad (9)$$

Регуляторы возбуждения оказывают воздействие на колебательные звенья через звенья с передаточными функциями $-S_{Eii}$ и $-S_{Eik}$. Дополнительный момент, действующий на ротор каждой машины, будет иметь две составляющие, одна из которых определяется законом изменения собственной э. д. с. машины E_i , а другая — законом изменения э. д. с. параллельно работающей машины E_k . Коэффициенты S_{Eii} и S_{Eik} характеризуют величину

и знак составляющих дополнительного момента, создаваемого в результате действия регуляторов возбуждения.

Величины S_{Eii} и S_{Eik} определяются по известным формулам [Л. 7]:

$$S_{Eii} = I_{qi}, \quad (10)$$

$$S_{Eik} = E_i \frac{\partial I_{q4}}{\partial E_k}. \quad (11)$$

Для генератора СГ1 $I_{qi} > 0$, поэтому $S_{Eii} > 0$. Частная производная, входящая в уравнение (11), для генератора определяется по следующей формуле:

$$\frac{\partial I_{q1}}{\partial E_2} = -\frac{1}{Z_{12}} \sin \delta_{12}. \quad (12)$$

Поскольку $\delta_{12} > 0$, то $S_{Eii} > 0$.

Для синхронного компенсатора $I_{q2} = 0$, следовательно, $S_{Eii} = 0$. Частная производная

$$\frac{\partial I_{q2}}{\partial E_1} = \frac{1}{Z_{21}} \sin \delta_{21}, \quad (13)$$

поэтому при $E_2 > 0$

$$S_{Eii} < 0.$$

Таким образом, первой особенностью синхронного компенсатора является то обстоятельство, что на движение его ротора непосредственно оказывает влияние не закон изменения его э. д. с., а закон изменения э. д. с. генератора СГ1. При этом, поскольку $S_{Eii} < 0$, то увеличение э. д. с. E_1 приводит к увеличению угла смещения ротора синхронного компенсатора δ_2 . Обычно $S_{Eii} > 0$, поэтому увеличение э. д. с. E_2 синхронного компенсатора приводит к уменьшению угла δ_1 .

Второй особенностью синхронного компенсатора является равенство нулю коэффициента N_{22} , который определяется по уравнению:

$$N_{22} = -T_{d02} (x_{d2} - x'_{d2}) I_{q2}. \quad (14)$$

Этот коэффициент в обычных условиях работы синхронной машины характеризует эффект саморегулирования.

В связи с тем, что прямое воздействие на ротор синхронного компенсатора со стороны его регулятора отсутствует, приобретают большее значение взаимные связи, осуществляемые в структурной схеме (рис. 2) через звенья с передаточными функциями $-N_{21}p$ и $-T_{21}p$.

Коэффициенты N_{21} и T_{21} определяются по следующим формулам:

$$N_{21} = \frac{E_1 T_{d02}}{z_{21}} (x_{d2} - x'_{d2}) \sin \delta_{21}, \quad (15)$$

$$T_{21} = \frac{T_{d02}}{z_{21}} (x_{d2} - x'_{d2}) \cos \delta_{21}. \quad (16)$$

Из этих формул следует, что с увеличением угла передачи абсолютная величина коэффициента N_{21} увеличивается, а T_{21} — уменьшается. Как будет показано ниже, это обстоятельство имеет существенное значение при анализе процессов в системе, содержащей синхронные компенсаторы.

Динамические свойства системы при регулировании в функции производных угла передачи. Для характеристики динамических свойств автоматически

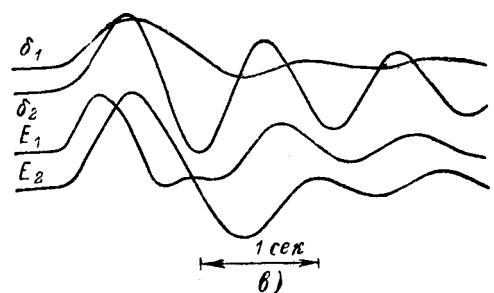
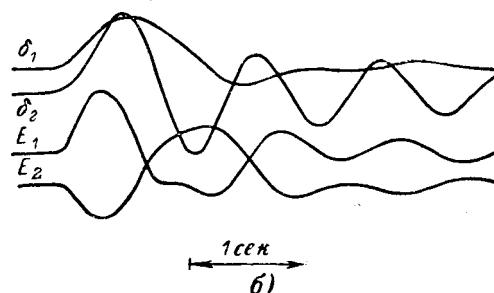
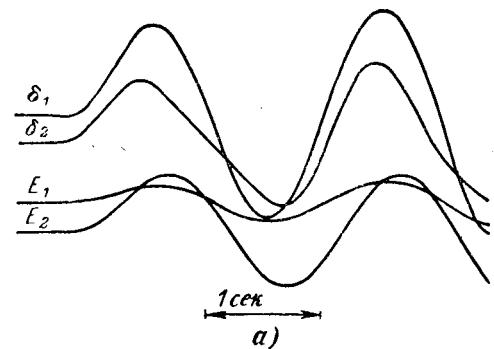


Рис. 3. Осциллографмы переходного процесса при отсутствии регулирования в функции производных (а), при регулировании в функции производных: передающей станции (б), передающей станции и синхронного компенсатора (в). Режим $\delta_{\pi} = 40^\circ$.

регулируемой энергосистемы, содержащей синхронные компенсаторы, используем конкретный пример энергосистемы, схема которой приведена на рис. 1. Основные параметры исследуемой системы имели следующие значения:

а) передающая станция: $x_{d1} = 0,45$; $x'_{d1} = 0,2$; $J_1 = 16$ сек; $T_{d01} = 5,5$ сек; б) синхронный компенсатор: $x_{d2} = 2,3$; $x'_{d2} = 0,4$; $x_{T_2} = 0,1$; $J_2 = 4,1$ сек; $T_{d02} = 10$ сек; в) линия: $x_{T_1} + z_1 = z_2 = 0,6$.

Для того чтобы установить влияние регулирования на динамические процессы в энергосистеме с синхронным компенсатором, проанализируем три осциллографмы, снятые при значении угла по линии $\delta_{\pi} = 40^\circ$.

1. При регулировании генератора СГ1 и синхронного компенсатора СК2 в функции отклонения напряжения. Производные режимных величин не вводились (рис. 3, а).

2. При введении производных углов δ_1 , только на генераторе СГ1 (рис. 3, б).

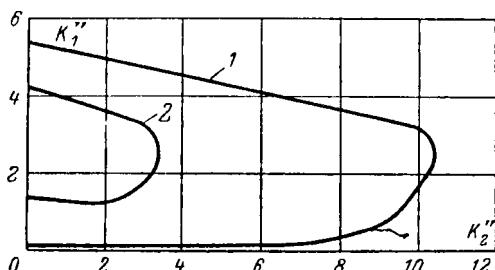


Рис. 4. Области устойчивости в плоскости $K''_2K''_1$ при $\Pi_{12} = \Pi_{22} = \delta_1$
 $1 - \delta_{\pi} = 70^\circ; 2 - \delta_{\pi} = 140^\circ$.

3. При введении производных углов δ_1 как на СГ1, так и на СК2 (рис. 3,в).

Во всех случаях была принята единая система регулирования в функции отклонения напряжения ($K_{U1}=K_{U2}=40$) и возмущение сохранялось одинаковым, вызывающим синфазное отклонение роторов СГ1 и СК2. Возмущение подавалось на входы звеньев, вырабатывающих координаты углов δ_1 и δ_2 .

При отсутствии регулирования в функции производных (рис. 3,а) возникает самораскачивание. Введением производных на СГ1 можно обеспечить устойчивость системы (рис. 3,б). В табл. 1 даны результаты обработки осциллограмм. Здесь приняты следующие обозначения: Π_{11} , Π_{12} — режимные величины, в функции первой и второй производной которых осуществляется регулирование; η_{δ} — логарифмический декремент затухания, определяемый по амплитудам второго и третьего полупериодов; A_{δ} — относительная величина амплитуды вылета роторов СГ1 и СК2. За единицу принята амплитуда вылета роторов на рис. 3,а.

Таблица 1

№ ряда	Структура				K'_1	K''_1	K'_2	K''_2	$\frac{\eta_{\delta}}{\delta_1}$	A_{δ}	
	Π_{11}	Π_{12}	Π_{21}	Π_{22}							
$\delta_{\pi} = 40^\circ$											
3,а	—	—	—	—	—	—	—	—	0,94	1,20	1,0
3,б	δ_1	δ_1	—	—	10,0	2,0	—	—	>10,0	1,64	0,561
3,в	δ_1	δ_1	δ_1	—	10,0	2,0	10,0	1,0	>10,0	1,21	0,530
—	δ_1	δ_1	δ_1	—	10,0	2,0	10,0	—	>10,0	1,26	0,530
—	—	δ_1	δ_1	δ_1	—	2,0	10,0	1,0	1,56	1,45	0,676
$\delta_{\pi} = 140^\circ$											
5,а	δ_1	δ_1	—	—	10,0	2,0	—	—	1,55	1,62	1,12
—	—	δ_1	δ_1	—	—	2,0	10,0	—	1,22	1,05	1,26
—	δ_1	δ_1	δ_1	—	10,0	2,0	10,0	—	>10,0	2,17	0,725
5,б	δ_1	δ_1	δ_1	δ_1	10,0	2,0	10,0	1,0	>10,0	1,32	0,650
—	δ_1	δ_1	—	δ_2	10,0	2,0	—	0,3	1,58	1,14	1,12
—	δ_1	δ_1	—	δ_{12}	10,0	2,0	—	0,3	1,90	1,91	1,12
3,02											

В результате сравнения первых двух строк табл. 1 устанавливаем, что для рассматриваемого случая за счет введения производных на СГ1 уменьшается вылет ротора на 44%, но одновременно увеличивается вылет ротора СК2 на 29%. С помощью осциллограмм на рис. 3,а и б, а также структурной схемы, можно объяснить причину отрицательного воздействия интенсивного регулирования СГ1 на движение ротора СК2. Резкое увеличение э. д. с. E_1 приводит к торможению ротора СГ1. Электродвижущая сила E_1 действует на соб-

ственный ротор через звено — $S_{E_{11}}$, а на ротор СК2 через звено — $S_{E_{21}}$. Поскольку $S_{E_{11}} < 0$, увеличение э. д. с. E_1 будет уменьшать тормозной момент, действующий на ротор СК2. Заключаем, что чем интенсивнее с помощью регулирования по производным на передающей станции будут тормозиться роторы ее генераторов, тем больше будет амплитуда вылета роторов синхронных компенсаторов. Обнаруженное явление необходимо учитывать при анализе результатов расчета динамической устойчивости и соответствующего экспериментального материала.

Отметим еще одну специфическую особенность работы системы регулирования в том случае, когда производные вводятся только на генераторах передающей станции. Резкое увеличение в первый момент э. д. с. E_1 на рис. 3,б сопровождается уменьшением э. д. с. синхронного компенсатора. Это явление объясняется наличием связи между э. д. с. E_1 и э. д. с. E_2 , которая осуществляется через звено — T_{21p} .

Система регулирования возбуждения синхронного компенсатора в функции производных может частично компенсировать отмеченное выше отрицательное явление (рис. 3,в). Благодаря одновременному введению производных и на СГ1 и на СК2 удается уменьшить амплитуды вылета ротора СГ1 на 5% и ротора СК2 на 2% относительно того случая, когда производные вводились только на СГ1 (табл. 1). Сопоставляя осциллограммы, изображенные на рис. 3,б и в, можно установить, что амплитуда э. д. с. E_1 в первом полупериоде на рис. 3,в меньше, чем на рис. 3,б. В результате уменьшается угол вылета ротора синхронного компенсатора. Уменьшение тормозного момента, действующего на ротор СГ1 из-за уменьшения э. д. с. E_1 , полностью компенсируется изменением знака приращения э. д. с. E_2 ($\Delta E_2 > 0$).

С помощью табл. 1 можно установить роль первой и второй производных. Повышение показателей качества переходных процессов на рис. 3,в в сравнении с рис. 3,б, как следует из табл. 1, обусловлено в первую очередь действием первой производной на СК2. Первая производная на СК2 через звено $S_{E_{12}}$ будет обеспечивать увеличение тормозного момента, действующего на ротор СГ1 в тот период, когда начинает уменьшаться э. д. с. E_1 .

На рис. 4 изображены области устойчивости в плоскости $K''_2K''_1$ для двух режимов передачи. Приведенные кривые позволяют заключить, что введение производных на передающей станции — необходимое условие для обеспечения устойчивости электропередачи. Без регуляторов сильного действия на передающей станции не может быть реализована известная схема Баума даже в том случае, если будет снято ограничение на установленную мощность компенсаторов.

При введении производных углов δ_1 на СГ1 можно обеспечить статическую устойчивость вплоть до углов по линии порядка 160—170°. Это соответствует увеличению максимальной мощности в 1,9 раза относительно случая, когда СК2 отсутствовал.

Влияние изменения режима. При увеличении передаваемой мощности изменяются величины ко-

коэффициентов, входящих в передаточные функции звеньев структурной схемы и динамические свойства системы. В табл. 2 приведены значения некоторых коэффициентов для двух режимов при $\delta_L = -40^\circ$ и $\delta_L = 140^\circ$.

Таблица 2

δ_L	$S_{E_{12}}$	$S_{E_{21}}$	T_{12}	T_{21}	N_{12}	N_{21}
40°	0,08	-0,1	0,2	2,0	0,15	-1,5
140°	0,21	-0,83	0	-0,3	1,15	-4,1

На рис. 5, а и б изображены осциллограммы переходного процесса в режиме $\delta_L = 140^\circ$ при регулировании соответственно в функции производных только на СГ1 и на СГ1 и СК2. В табл. 1 приведены результаты обработки осциллограмм, снятых в режиме $\delta_L = 140^\circ$ при различной структуре закона регулирования.

Сопоставляя осциллограммы, изображенные на рис. 5, а и 3, б, устанавливаем, что с увеличением угла передачи снижается эффективность регулирования в функции производных на передающей станции. Увеличение частоты колебаний ротора СК2 и семикратное увеличение коэффициента N_{12} в режиме $\delta_L = 140^\circ$ срывает форсировку возбуждения на СГ1 (рис. 5, а). Угол выбега ротора СГ1 на рис. 5, а увеличивается почти в 2 раза по сравнению с рис. 3, б, хотя возмущение в обоих случаях было одинаковым. Увеличение абсолютного значения $S_{E_{21}}$ приводит к двухкратному увеличению амплитуды угла вылета ротора СК2 (табл. 1). В режиме $\delta_L = 140^\circ$ значительно увеличивается эффективность регулирования в функции производных на СК2 (рис. 5, б). Сопоставляя осциллограммы, изображенные на рис. 5, а и б, устанавливаем, что можно уменьшить амплитуды вылета роторов СГ1 и СК2 соответственно на 42 и 25% по сравнению с тем случаем, когда производные вводились только на СГ1. Наблюдаемый эффект объясняется увеличением скорости нарастания э. д. с. E_2 и уменьшением амплитуды э. д. с. E_1 . В результате можно заключить, что с увеличением угла передачи увеличивается эффективность регулятора сильного действия на синхронном компенсаторе.

Выбор структуры сигналов производных на синхронном компенсаторе. Исследовалась возможность использования на синхронном компенсаторе производных следующих величин: угла э. д. с. СК (δ_2) относительно вектора U_3 ; угла э. д. с. СК относительно э. д. с. передающей станции (δ_{21}); напряжения на зажимах компенсатора (U_2); углов напряжения на зажимах СК (δ_{U2}) и в точке подключения СК к линии (δ_{UR}); тока компенсатора (I_2); сигналов, структура которых определяется уравнениями (17) и (18).

Регулирование синхронного компенсатора в функции производных углов δ_2 и δ_{21} резко снижает показатели качества переходных процессов относительно того случая, когда используются производные полного угла передачи (табл. 1). Это объясняется, в первую очередь, уменьшением максимально допустимых значений коэффициентов K'_2 и K''_2 .

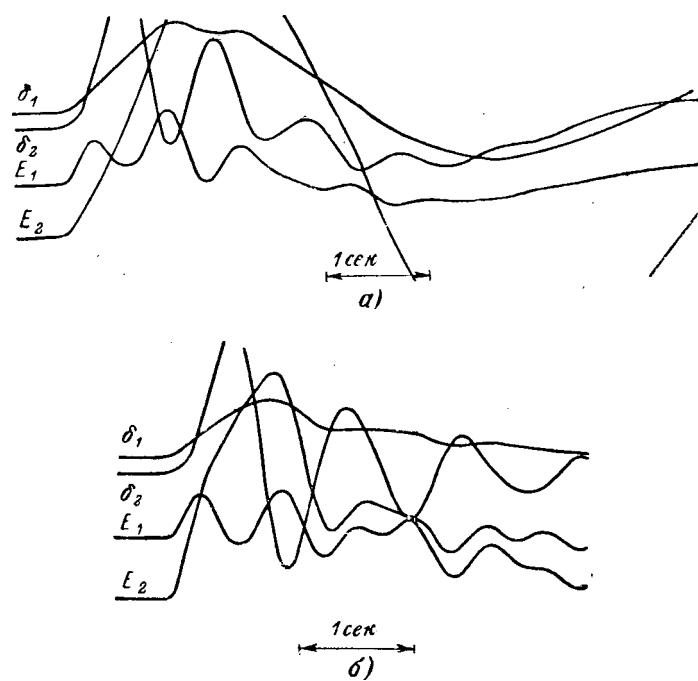


Рис. 5. Осциллограммы переходного процесса при регулировании в функции производных передающей станции (а), передающей станции и синхронного компенсатора (б). Режим $\delta_L = 140^\circ$.

Исследование местных сигналов проводилось с помощью обобщенных характеристик [Л. 7 и 8] и анализа осциллограмм переходных процессов. Для производных тока I_2 и частоты (производные углы δ_{UR}) максимальные значения коэффициентов K''_2 и структурных коэффициентов приведены в табл. 3.

Таблица 3

δ_L	Ток I_2			Частота δ_{UR}		
	a_{28}	a_{21}	K''_{2max}	a_{21}	b_{22}	K''_{2max}
40°	4,550	-1,380	0,070	0,624	0,730	2,50
140°	1,710	0,048	0,165	-7,820	-20,40	0,064

Из табл. 3 видно, что сигналы I_2 и δ_{UR} характеризуются большими абсолютными величинами структурных коэффициентов. В результате снижаются предельно допустимые значения K'_2 , K''_2 и ухудшаются динамические свойства системы. Показатели качества переходных процессов при использовании местных сигналов близки к данным, полученным для сигналов δ_2 и δ_{21} (табл. 1).

Наилучшие динамические показатели обеспечиваются при использовании на передающей станции и на синхронном компенсаторе сигналов следующей структуры:

$$\Delta \Pi_{1i} = \Delta \delta_1 - 0,2 \Delta E_1, \quad (17)$$

$$\Delta \Pi_{2i} = \Delta \delta_1 - 0,2 \Delta E_2. \quad (18)$$

В этом случае значительно увеличиваются K'_{2max} и K''_{2max} , обеспечивается независимость настроек регуляторов на СГ1 и СК2 и повышается эффективность воздействия системы регулирования на переходные процессы.

Выводы. 1. Разработанная методика анализа динамических свойств автоматически регулируемой энергосистемы, содержащей синхронные компенсаторы, позволяет установить ее принципиальные особенности.

2. Без регуляторов сильного действия на передающей станции по условиям устойчивости не может быть реализована известная схема Ф. Баума.

3. На движение ротора синхронного компенсатора существенное влияние оказывает закон изменения э. д. с. передающей станции. Интенсивное торможение роторов генераторов передающей станции, при использовании на ней регулирования возбуждения в функции производных режимных величин, сопровождается уменьшением тормозного момента, действующего на ротор синхронного компенсатора. Система регулирования возбуждения синхронного компенсатора может частично компенсировать отрицательное влияние регуляторов передающей станции на движение роторов компенсатора.

4. Эффективность системы автоматического регулирования синхронных компенсаторов в сильной степени зависит от структуры сигналов производных и режима электропередачи. Наиболее высокие динамические показатели могут быть обеспечены при использовании на синхронном компенсаторе производных полного угла передачи или сочетания этих производных и производных его э. д. с.



УДК 621.313.322—82:62—752

Вибрации гидрогенераторов

Доктор техн. наук П. М. ИПАТОВ

(Москва),

Инж. А. А. ДУКШТАУ и канд. техн. наук. Ф. М. ДЕТИНКО

• (Ленинград)

За последнее десятилетие различными научно-исследовательскими организациями и электромашиностроительными заводами были проведены обширные исследования вибрационного состояния гидрогенераторов. Результаты этих исследований показывают, что вибрации гидрогенераторов продолжают оставаться источником серьезных повреждений и аварий. Причем наибольшим повреждениям подвержен статор гидрогенератора. Между тем электромашиностроительные заводы до настоящего времени не располагают методикой, с помощью которой можно было бы предрешить вибрационное состояние проектируемых генераторов. Основным препятствием для разработки такой методики явились толкования об изменчивости в широких пределах модуля упругости шихтованного сердечника статора. Основанием для такого вывода послужило наблюдаемое на некоторых машинах изменение вибрации статора с увеличением возбуждения при номинальной скорости вращения.

Зависимость вибрации от тока возбуждения напоминает вид резонансной кривой с максимумом при промежуточном значении возбуждения. Трудности в объяснении явления породили гипотезу о резонансных чисто радиальных вибрациях

Литература

1. Качанова Н. А. и Круткова В. Е., Исследование способов повышения устойчивости дальних электропередач переменного тока, Изд-во АН УССР, 1955.
2. Броиштейн Э. Л., Соловьев С. А., Соколов Н. И. и Чернобровов Н. В., Испытания и анализ режимов одноцепной электропередачи 400 кв при работе генераторов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина с регуляторами сильного действия, Труды ВНИИЭ, Госэнергоиздат, 1959, вып. IX.
3. Веников В. А., Герценберг Г. Р., Соловьев С. А. и Соколов Н. И., Сильное регулирование возбуждения, Госэнергоиздат, 1963.
4. Герценберг Г. Р., Шабад В. К., Каштелян В. Е. и Сирый Н. С., Исследование эффективности регулирования возбуждения синхронных компенсаторов, работающих в приемной системе, Труды ВЭИ, вып. 73, изд-во «Энергия», 1966.
5. Каштелян В. Е., Сирый Н. С., Герценберг Г. Р. и Шабад В. К., Исследование эффективности и способов регулирования возбуждения внутрисистемных синхронных компенсаторов, сб. «Электрооборудование и режимы электроэнергетических систем», изд-во «Наука», 1965.
6. Мееров М. В., Системы многосвязного регулирования, изд-во «Наука», 1965.
7. Михневич Г. В., Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин, изд-во «Наука», 1964.
8. Михневич Г. В. и Фиалков В. М., Автоматическое регулирование компенсирующих устройств в энергосистемах, Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1965, № 3.

[7.2.1967]

статора, связанных с изменением эквивалентного модуля упругости шихтованного сердечника. Для обоснования такого предположения величина эквивалентного модуля упругости для двух различных машин найдена равной $3 \cdot 10^5$ и $9 \cdot 10^5$ кГ, см⁻².

Если воспользоваться работами [Л. 1 и 2], учесть опубликованные экспериментальные данные, а также данные, полученные Ленинградским филиалом ВНИИЭМ объединения «Электросила», то можно дать более строгое объяснение повышенным вибрациям гидрогенераторов. Данная статья может послужить основой для разработки достаточно точной практической методики расчета.

Основной причиной вибрации сердечника статора могут быть дробные гармонические н. с. реакции якоря, когда число пазов на полюс и фазу дробные и, как показано в [Л. 2], частота этих вибраций равна двойной частоте сети, а величина их растет с увеличением тока статора. Там же указывается на неполное демпфирование гармонических демпферными обмотками.

Длина силовых волн, обусловленных дробными гармоническими н. с.,

$$L = \frac{2\pi m_0}{m - m_0}. \quad (1)$$

Каждая из гармоник, представленных рядом порядков с указанием взаимных направлений вращения вида

$$+m_1 - m_2 + m_4 - m_5 + m_7 - m_8 + m_{10} - m_{11} - m_{13}$$

и т. д.

при четном знаменателе дробностей обмотки и

$$+m_1 - m_6 + m_7 - m_{11} + m_{13} - m_{17} + m_{19} - m_{23} + m_{25}$$

и т. д.

при нечетном знаменателе дробности, создает свою силовую волну. Наиболее длинная силовая волна создается гармонической, ближайшей по порядку к основной. По мере удаления порядков гармонических от порядка основной волны длины созданных ими силовых волн уменьшаются.

Порядок основной гармонической m_0 определяется как $m_0 = d$ при нечетном знаменателе дробности и $m_0 = \frac{d}{2}$ при четном знаменателе дробности в том

случае, когда число членов числового ряда чередования фазных групп равно d членам. Если же число членов числового ряда принимается увеличенным (вида nd , где n — целое число, являющееся делителем числа $t = \frac{z}{p}$), то соответственно возрастает порядок основной гармонической в n раз и возникают силовые волны новых порядков. Если наиболее длинную силовую волну принять за волну первого порядка, то силовые волны, созданные гармоническими н. с., можно представить в виде ряда их порядков

$$M_1, M_2, M_3, M_4, \dots, M_k.$$

Тогда число силовых волн каждого порядка на машину будет равно:

$$M = \frac{2pk}{nd}, \quad (2)$$

где $k = 1, 2, 3, 4 \dots$

Сердечник статора имеет собственную частоту колебаний

$$f_c = \frac{C_m}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi g E_{sh} J}{R_c^3 G_c}}. \quad (3)$$

Здесь число C_m зависит от числа силовых волн на машину и равно

$$C_m = \frac{M(M^2 - 1)}{\sqrt{M^2 + 1}}.$$

Зная амплитуду удельного усилия, созданного гармонической н. с. порядка m , равную

$$F = \frac{\Delta B_m B_0}{5000^2},$$

можно оценить вибрацию сердечника (двойную амплитуду радиальных колебаний)

$$A = k_d C_m \frac{F I_t R_c^3 R_{st}}{E_{sh} J}, \quad (4)$$

где k_d — коэффициент динамичности;

$$k_d = \frac{1}{1 - \left(\frac{2f}{f_c}\right)^2},$$

$2f$ — частота изменения силы;

C'_m — величина, зависящая от числа силовых волн одного порядка;

$$C'_m = \frac{1}{(M^2 - 1)^2},$$

E_{sh} — модуль упругости шихтованного сердечника; определяется по (3), если f_c известно из опыта.

В соответствии с экспериментами модуль упругости шихтованных сердечников статоров лежит в пределах $(1,3 \div 1,5) \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}$. Нижний предел следует принимать для разъемных статоров, верхний — для неразъемных. По зарубежным данным [Л. 9] $E_{sh} = 2,2 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}$ и для шихтованных сердечников малых машин хорошо согласуется с опытом при определении звуковых частот.

В практике эксплуатации и исследования гидрогенераторов наблюдались случаи повышенной вибрации статора на различных оборотах при выбеге генератора с возбуждением. Это явление замечено в гидрогенераторах, имеющих сосредоточенное расположение параллельных ветвей, а также в гидрогенераторах с одной параллельной ветвью, но при выбеге с малой нагрузкой.

При глухом соединении сосредоточенных параллельных ветвей обмотка статора обтекается уравнительными токами как в нагрузочных режимах, так и в режиме холостого хода, так как у машин большого диаметра всегда имеют место колебания воздушного зазора. Величина гармонических н. с. реакции от уравнительного тока при дробном числе пазов на полюс и фазу сама по себе незначительна, однако при совпадении частот изменения сил при изменении скорости машины с частотами собственных колебаний сердечника наступает резонанс, сопровождаемый вибрациями существенной величины. Если собственная частота колебаний сердечника сравнительно далека от 100 гц , то вибрации не представляют опасности для машины.

В случае сосредоточенного распределения параллельных ветвей при неравномерном воздушном зазоре в режиме холостого хода по параллельным ветвям начинают протекать уравнительные токи, различающиеся по величине и знаку, что приводит к появлению силовых волн. В практике наблюдались колебания статора с числом волн равным трем, в то время как основной вид колебания должен был иметь четыре волны. Распределение уравнительных токов между параллельными ветвями, когда их число больше двух, происходит произвольно и определяется случайными колебаниями воздушного зазора. Поэтому идентичность кривых н. с. единичных машин нарушается, спектр гармонических расширяется и в пределе может достигнуть спектра, соответствующего случаю, когда числовой ряд чередований фазных групп состоит из td членов. Если в машине две сосредоточенные параллельные ветви, то при колебаниях зазора спектр гармонических расширяется еще и потому, что уравнительные токи в параллельных ветвях имеют противоположное направление. В самом деле кривая н. с. от уравнительного тока теряет повторяющийся вид в отличие от кривой н. с., образуемой током нагрузки. Это следует учитывать и в том случае, когда число параллельных ветвей больше двух.

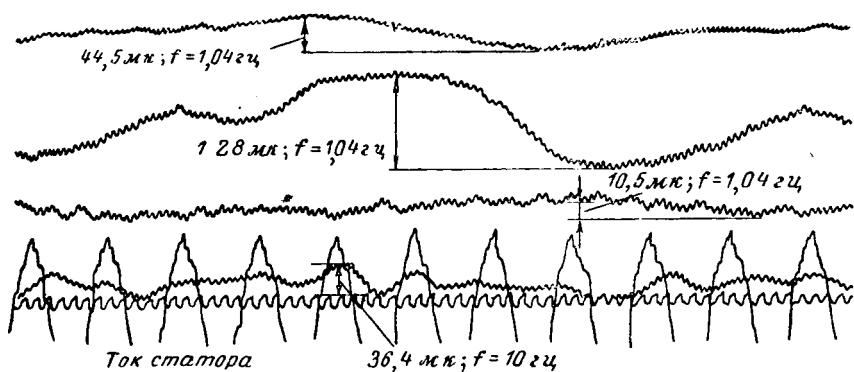


Рис. 1. Осциллограмма тангенциальных, радиальных и аксиальных вибраций статора гидрогенератора типа СВ 1250/170-96 в режиме холостого хода с возбуждением.

Расчетные собственные частоты колебаний сердечника статора для некоторых гидрогенераторов приведены в таблице. Модуль упругости сердечника определялся по опытной резонансной частоте, соответствующей пологим участкам кривой выбега или кривой увеличения скорости вращения для ненагретой машины (чтобы уменьшить влияние скорости прохождения через резонанс).

Частоты собственных колебаний сердечника статора (гц)

Возможный порядок силовой волны	Тип гидрогенатора			
	СВ 1100/145-88	СВ 655/110-32	СВ 1160/180-72	СВ 1250/170-96
M_1	40	—	185	13
M_2	160	7,2	740	51
M_3	360	20	1 670	115
M_4	630	39	3 100	205
M_5	—	64	—	—
M_6	—	93	—	—
M_7	—	127	—	—
M_{2p}	4 230	2 330	3 100	3 300

Вибрации ненагретого статора от действия гармонических н. с. при циркуляции уравнительного тока по параллельным ветвям могут быть и при постоянной, например номинальной, скорости вращения машины с возбуждением. При изменении возбуждения от нуля до номинального значения холостого хода наблюдается рост вибраций частоты 100 гц с увеличением уравнительного тока. Переход рабочей точки с прямолинейного участка кривой намагничивания на более пологую приводит к уменьшению вибраций. Зависимость вибраций частоты 100 гц от уравнительного тока можно иллюстрировать осциллограммами рис. 1 и 2. Для уменьшения вибраций оборотной частоты в опытном генераторе выводы обмотки статора были раздвинуты так, чтобы смещением параллельных ветвей отдельных фаз обмотки увеличить компенсацию магнитного небаланса от колебаний зазора за счет увеличения уравнительного тока. Как видно из рис. 2, при такой реконструкции уменьшились вибрации оборотной частоты, но несколько увеличились вибрации частоты 100 гц.

До последнего времени в программу работ по улучшению вибрационного состояния гидрогенера-

торов входили предварительные электромеханические испытания. Они сводились к определению тех гармонических составляющих, которые являлись основной причиной повышенных вибраций. Для этого измерялись поля в зазоре машины, амплитудные значения вибраций в основных режимах, числа волн деформаций и направление их перемещений. Только после тщательного изучения экспериментальных данных можно было приступить к поиску решения по реконструкции обмотки статора. Если число существенных волн деформации статора составляет две или более, а согласно [Л. 2] они могут вращаться в разные стороны, то вибрации в этом случае принимают вид стоячих волн. Это обстоятельство в большой

степени затрудняет уменьшение вибраций. Снятие резонансных характеристик может значительно облегчить исследования.

Исследования влияния неравномерности воздушного зазора на вибрации частоты 100 гц были проведены на гидрогенераторе ($P=50$ Мвт, $I_p=1 150$ а) с повышенными вибрациями статора от дробных гармонических н. с. Опыты показали, что при номинальном воздушном зазоре $\delta_{min}=17$ мм реальный зазор колеблется примерно в пределах 14÷20 мм. Путем измерения вибраций сердечника в зоне минимального, номинального и максимального зазора (соответственно кривые 1, 2 и 3 на рис. 3) была найдена зависимость вибраций частоты 100 гц от величины зазора, чем больше зазор, тем больше амплитуда колебаний и наоборот. Зависимость величины вибраций от зазора можно установить по кривым намагничивания участков машины с минимальным, номинальным и максимальным зазором (соответственно кривые 1, 2 и 3 на рис. 4) при одной и той же н. с. ротора [Л. 3]. Для качественной оценки явления на кривых рис. 4 выбраны рабочие точки характеристик, которые при нагрузке располагаются несколько дальше номинальной точки холостого хода. По отношению к указанной точке отложена н. с. гармонической (ΔAW_m), соответствующая которой изменения индукции (ΔB) зависят от характера кривых намагничивания. Рис. 4 показывает, что индукции от гармонических, соответствующие прямолинейным участкам кривых намагничивания, явно больше, чем индукции на насыщенных участках.

С влиянием состояния воздушного зазора на вибрации следует считаться. Если расчетом будет допущен тот или иной процент содержания гармонических, то в случае увеличения воздушного зазора в отдельных точках машины могут проявиться недопустимые вибрации.

Выводы. 1. При выборе обмотки статора с дробным числом пазов на полюс и фазу, помимо определения состава и содержания дробных гармонических н. с., следует рассчитывать также частоты собственных колебаний сердечника статора и амплитуды суммарной вибрации от действия дробных гармонических. Расчетные значения вибраций сердечника статора определяются для ненагретой машины без учета связи сердечника с корпусом

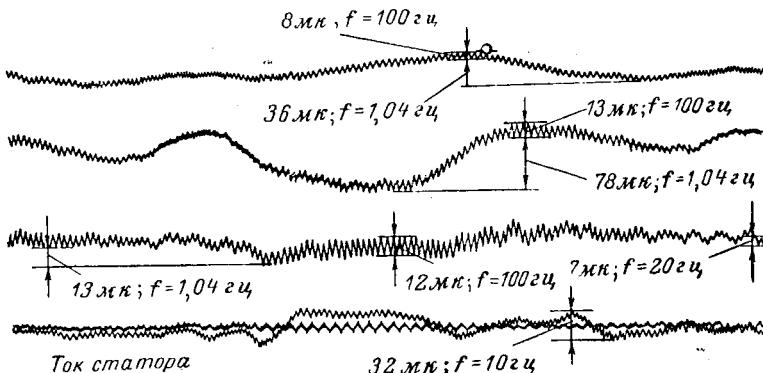


Рис. 2. Осциллографмма тангенциальных, радиальных и аксиальных вибраций статора гидрогенератора типа СВ 1250/170-96 в режиме холостого хода с возбуждением.

статора. В качестве допустимого значения суммарной расчетной частоты 100 гц сердечника статора можно рекомендовать 10 мк при расчетном модуле упругости для шихтованного сердечника $E_{ш} = (1,3 \div 1,5) \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}$. Ограничение вибраций достигается выбором числового ряда обмотки, например, по методу [Л. 7].

2. Недопустимо содержание тех дробных гармонических в кривой н. с. статора, которые образуют систему сил, обусловливающую частоту собственных колебаний сердечника статора в диапазоне 80 \div 150 гц.

3. В гидрогенераторах без параллельных ветвей в обмотке статора или с распределенными параллельными ветвями отклонения величины воздушного зазора вдоль всей окружности машины сверх пределов, установленных ГОСТ на гидрогенераторы недопустимы.

4. При проектировании гидрогенераторов с параллельными ветвями необходимо выполнять их сосредоточенными, а при двух параллельных ветвях устанавливать уравнительные соединения в обмотку статора.

Приложение 1. Пример расчета вибрации сердечника статора гидрогенератора типа СВ 1100/145-88. Гидрогенератор выполнен с дробной обмоткой статора ($q = 1 \frac{7}{11}$), $2p = 88$. Существенные дробные гармонические н. с. — порядка m_1 и m_7 . Их амплитудные значения в процентах к основной гармонической $K_{013} = 8$ и $K_{07} = 6,5\%$.

Данные для расчета: $R_c = 550 \text{ см}$, $h_c = 13 \text{ см}$, $V\eta = 1,3$, $I_t = 145 \text{ см}$, $I_{в\phi} = 111 \text{ см}$, $B_d = 7400 \text{ гс}$, $x_{ad} = 0,48$, $R_i = 529 \text{ см}$.

Статор генератора разъемный, $E_{ш} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}$. После несложных преобразований выражение (3) приводится к виду

$$f_c = 18,9 \cdot 10^3 \frac{C_m}{V\eta} \frac{h_c}{R_c^2} [\text{гц}]$$

Принимая по (2) число силовых волн для m_1 и m_7 соответственно равным $M = 8$ и $M = 16$, найдем:

$$f_{c1} = 18,9 \cdot 10^3 \frac{62,5}{1,3} \frac{13}{550^2} = 40 \text{ гц};$$

$$f_{c7} = 18,9 \cdot 10^3 \frac{255}{1,3} \frac{13}{550^2} = 160 \text{ гц}.$$

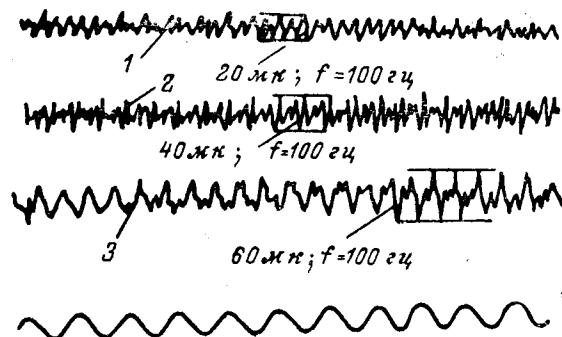


Рис. 3. Осциллографмма вибрации сердечника статора генератора типа СВ 1100/145-88 при нагрузке.

Выражение (4) при введении в него момента инерции спинки сердечника $J = \frac{l_{в\phi} h_c^3}{12}$ примет вид:

$$A = 12 \frac{R_i F}{E_{ш}} \frac{R_c^3}{h_c^3} \frac{l_t}{l_{в\phi}} \frac{10^4}{(M^2 - 1)^2 \left[1 - \left(\frac{2f}{f_c} \right)^2 \right]} [\text{мк}].$$

Для подсчета амплитуды удельного магнитного усилия найдем индукции, обусловленные дробными гармоническими н. с.:

$$\Delta B_{13} = \frac{K_{013}}{100} x_{ad} B_d = 300 \text{ гс};$$

$$\Delta B_7 = 244 \text{ гс}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} F_{13} &= \frac{\Delta B_{13} B_d}{5000^2} = 0,09 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}; \\ F_7 &= 0,072 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}. \end{aligned}$$

Двойная амплитуда радиальных колебаний

$$A_{13} = 21 \text{ мк}; A_7 = 11 \text{ мк}.$$

Максимальная амплитуда

$$A_{7+13} = 32 \text{ мк},$$

что близко к опыту (рис. 3). Гармонические других порядков существенных вибраций не вызывают.

Приложение 2. К определению составляющих магнитного усилия, обусловленного циркуляцией уравнительных токов. В качестве примера выбран гидрогенератор типа СВ 655/110-32. Обмотка статора генератора имеет четыре сосредоточенных параллельных ветви, $q = 3 \frac{1}{8}$, а число полюсов машины $2p = 32$. Для пояснений принято искажение формы воздушного

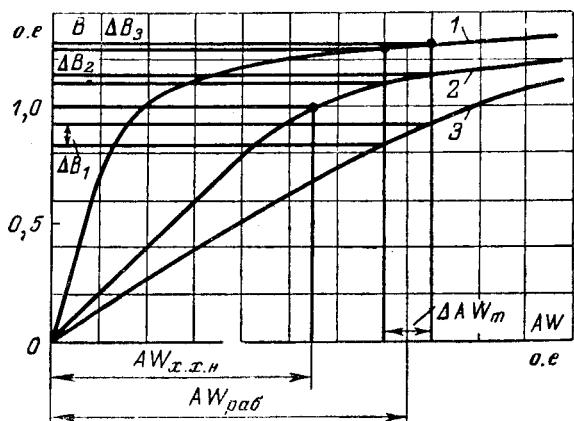


Рис. 4. Кривые намагничивания для участков машины с разной величиной среднего воздушного зазора.

зазора от эксцентричного смещения статора, либо ротора. Тогда одним из способов, например тем, который дается ниже, можно оценить возникающие усилия.

На холостом ходу машины уравнительные токи, подмагничивая машину на участке III и размагничива на участке I (рис. 5, а), по отношению к выводам обмотки будут иметь противоположное направление

$$I_{y1} = -I_{y3}, \quad I_{y2} = I_{y4} = 0.$$

Ближайшая по порядку к основной дробная гармоническая н. с. реакции, суммируясь с последней, образует наиболее существенные силовые волны на участках I и III, но противоположного направления (верхний график рис. 5, б) на развернутой окружности статора). Мысленно прибавив и вычитая две волны усилия на участке I, амплитуда которых равна амплитуде образованной волны, получим две системы волн. Первую — симметричную систему волн (средний график) — можно разложить на всей окружности машины в гармонический ряд, который будет представлен некоторым спектром четных гармоник.

Вторая — система из одной волны, но удвоенной амплитуды (нижний график) — дает более широкий спектр гармонических составляющих. Если обозначить амплитуду волны через $2F$, период разложения на полной длине окружности машины через $2T$, составляющие усилия через F_m , а порядок силовой волны через M_k , то получим:

$$\begin{aligned} F_m &= 2F \frac{2}{T} \int_0^{T/4} \sin \frac{\pi}{T} 4x \sin \frac{\pi}{T} M_k x dx = \\ &= 2F \frac{2}{T} \frac{1}{2} \left[\frac{\sin \frac{\pi}{T} (4 - M_k) x}{\frac{\pi}{T} (4 - M_k)} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin \frac{\pi}{T} (4 + M_k) x}{\frac{\pi}{T} (4 + M_k)} \right]_0^{T/4} = 2F \left[\frac{\sin \frac{\pi}{4} (4 - M_k)}{\pi (4 - M_k)} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin \frac{\pi}{4} (4 + M_k)}{\pi (4 + M_k)} \right]. \end{aligned}$$

Учитывая, что гармонические, кратные четырем, будут отсутствовать, а при $M_k=4$ первый член в квадратных скобках обращается в $1/4$, получим следующий спектр гармоник и их амплитудные значения.

M_k	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	и. т. д.
F_m	0,24	0,42	0,5	0,5	0,4	0,26	0,11	

Таким образом, получен полный спектр существенных гармонических усилий с достаточно высокими амплитудными значениями, действие которых может наблюдаться в опыте.

Условные обозначения:

$q = b \frac{c}{d}$ — число пазов на полюс и фазу;

$t = \frac{z}{p}$ — число идентичных ветвей обмотки статора (число единичных машин);

z — число пазов статора;

p — число пар полюсов;

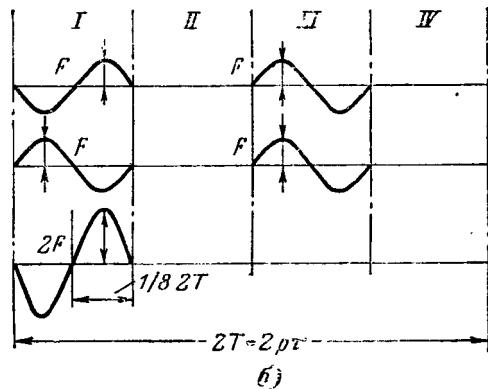
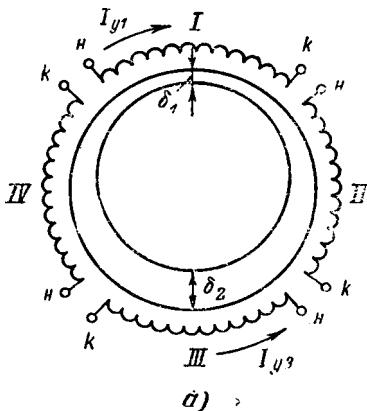


Рис. 5. Распределение уравнительных токов и диаграмма усилий для заданной несимметрии воздушного зазора.

τ — полюсное деление машины, см;

m_0 — порядок основной гармонической;

m — порядок дробной гармонической н. с. статора;

M — число силовых волн на машину, обусловленных дробной гармонической н. с.;

M_k — порядок силовой волны;

x_{ad} — продольная реактивность взаимоиндукции;

f — частота сети, герц;

B_d — индукция в воздушном зазоре машины, гс;

ΔB_m — индукция в зазоре от дробной гармонической н. с., гс;

g — ускорение силы тяжести, см·сек⁻²;

E_w — модуль упругости шихтованного сердечника статора кг·см⁻²;

J — момент инерции спинки сердечника статора, см⁴;

G_c — вес спинки сердечника с обмоткой, кг;

R_c — средний радиус спинки сердечника, см;

R_h — радиус расточки статора, см;

F — амплитуда удельного магнитного усилия, кг·см⁻²;

$\eta = \frac{F}{G_c}$ — вес спинки сердечника;

K_0 — амплитуда дробной гармонической в процентах к амплитуде основной гармонической;

A — двойная амплитуда колебаний спинки, мк;

l_t — активная длина машины, см;

l_{ef} — эффективная длина сердечника статора, см;

I_y — уравнительный ток обмотки статора, а;

h_c — высота спинки сердечника статора, см.

Литература

1. Ипатов П. М., Гармонические н. с. обмотки статора с дробным числом пазов на полюс и фазу, сб. «Электросила», № 20.

2. Ипатов П. М. и Дукштау А. А., О действии гармонических н. с. обмотки статора с дробным числом пазов на полюс и фазу, «Электротехника», 1965, № 1.

3. Еремеев А. С., Обмотка статоров мощных гидрогенераторов с параллельными ветвями, «Электричество», 1954, № 10.

4. Карташкин Б. А. и Хургин М. Э., Резонансные вибрации статора гидрогенератора, «Вестник электропромышленности», 1961, № 11.

5. Карташкин Б. А., Прадо Фернандес Х. и Элькинд Ю. М., Вибрация конструктивных узлов статора гидрогенератора, «Электрические станции», 1965, № 8.

6. Сахаров И. Е., О вынужденных колебаниях статоров электрических машин, Изв. АН СССР, 1957, № 11.

7. Ипатов П. М. и Дукштау А. А., Выбор схемы обмотки статора синхронной машины с учетом демпфирования полей от дробных гармонических н. с., изд-во «Наука», 1965.

8. Ипатов П. М. и Дукштау А. А., Статорная обмотка электрической машины переменного тока, Авторское свидетельство № 152499.

[20.2.1967]

Да здравствует рожденное Великим Октябрем наше родное многонациональное Советское социалистическое государство!

(Из призывов ЦК КПСС к 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции)

УДК 621.313.32:621.3.013

Магнитное поле в воздушном зазоре синхронной явнополюсной машины

Канд. техн. наук А. И. ДУЛЬКИН
и доктор техн. наук А. В. ИВАНОВ-СМОЛЕНСКИЙ
Московский энергетический институт

Магнитное поле в воздушном зазоре машины переменного тока формируется в результате воздействия вращающихся н. с. обмоток статора и ротора на проводимость воздушного зазора. При бесконечно большой магнитной проницаемости стали математическое описание распределения магнитной индукции в воздушном зазоре можно получить, умножив н. с. $f(\alpha)$ возбуждающей обмотки на проводимость $\lambda(\alpha)$ воздушного зазора

$$b = \mu_0 f(\alpha) \lambda(\alpha), \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха;
 α — текущая угловая координата точки воздушного зазора.

Такой метод исследования поля в воздушном зазоре, сначала примененный для асинхронного двигателя с односторонней зубчатостью, получил существенное развитие в работе А. И. Вольдека [Л. 1], впервые посвященной сложному случаю воздушного зазора с двухсторонней зубчатостью. Используя этот метод, М. К. Захаров сделал некоторые обобщающие выводы о формировании гармонических магнитного поля в воздушном зазоре с односторонней зубчатостью [Л. 2].

С помощью того же метода А. И. Вольдек рассмотрел и магнитное поле в воздушном зазоре синхронной явнополюсной машины с бесконечно узкими открытиями пазов якоря [Л. 3 и 4]. В последние годы появился ряд работ, в которых этот метод получил определенное развитие (например [Л. 5 и 6]).

В статье на базе идей и представлений указанного метода анализируется магнитное поле в воздушном зазоре трехфазной синхронной явнополюсной машины. Учтены одновременно зубчатость статора и явнополюсность ротора. Анализ распространен на случай дробных обмоток. Рассмотрены особенности формирования полей зубцовогопорядка и получены обобщенные выражения для их расчета. Анализ выполнен в предположении, что демпфирование магнитных полей отсутствует.

Магнитная проводимость воздушного зазора.
Магнитная проводимость воздушного зазора с двусторонней зубчатостью может быть весьма точно описана выражением [Л. 5]

$$\lambda_\delta = \delta \lambda_1 \lambda_2, \quad (2)$$

где δ — минимальный воздушный зазор между сердечниками, образующими воздушный зазор;

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

$\lambda_1(\lambda_2)$ — магнитная проводимость воздушного зазора, образованного зубчатым статором (ротором) и гладким ротором (статором) с минимальным расстоянием между ними, равным δ .

В случае гладкого ротора и зубчатого статора (якоря) проводимость воздушного зазора для волны индукции с бесконечно большим периодом (волны нулевого порядка) может быть представлена в следующем виде:

$$\lambda_1 = \frac{1}{k_{\delta_1} \delta} - \sum_k \lambda_k \cos kZ\alpha, \quad (3a)$$

где k_{δ_1} — коэффициент воздушного зазора для статора;

Z — число зубцов статора;
 $k = 1, 2, 3, \dots$ — порядок зубцовой гармонической проводимости по отношению к низшей зубцовой гармонической ($k = 1$);

λ_k — амплитудный коэффициент k -й зубцовой гармонической проводимости воздушного зазора, определяющий величину амплитуды и ее знак в начале координат.

Выражение (3) соответствует случаю, когда в качестве начала координат при отсчете угла α принята ось паза статора.

Амплитудные коэффициенты зубцовых гармонических проводимости равны:

$$\lambda_k = \frac{1}{\delta} \beta \eta_k,$$

где β и η_k определяются по рис. 3 и 4 из [Л. 1] или по рис. 6-3 и 6-10 из работы [Л. 5], в которой вместо η_k применено обозначение F_v . Для определения коэффициентов λ_k можно также использовать графики из статьи [Л. 6], в обозначениях которой $\beta \eta_k = \frac{a_k}{100} = \frac{v_k B}{100}$.

Если в качестве начала координат принять ось зубца, то, очевидно, вместо (3a) следует записать:

$$\lambda_1 = \frac{1}{k_{\delta_1} \delta} - \sum_k (-1)^k \lambda_k \cos kZ\alpha. \quad (3b)$$

В общем виде проводимость воздушного зазора в рассматриваемом случае можно описать выражением:

$$\lambda_1 = \frac{1}{k_{\delta 1} \delta} - \sum_k A^k \lambda_k \cos kZ\alpha, \quad (4)$$

где $A = +1$, если начало координат совпадает с осью паза;

$A = -1$, если начало координат совпадает с осью зубца.

При определении проводимости воздушного зазора в случае гладкого статора и явнополюсного ротора совместим ось отсчета угловой координаты α с осью полюса. Тогда проводимость воздушного зазора для волны индукций с бесконечно большим периодом в неподвижных координатах статора равна:

$$\lambda_2 = \frac{1}{k_{\delta 2} \delta} + \sum_m \lambda_m \cos 2m(p\alpha - \omega t - \psi), \quad (5)$$

где $k_{\delta 2}$ — коэффициент, которым учитывается влияние явнополюсной конструкции ротора на проводимость λ_2 ;

p — число пар полюсов ротора;
 $m = 1, 2, 3, \dots$ — порядок полюсной гармонической проводимости воздушного зазора по отношению к низшей полюсной гармонической ($m=1$);

λ_m — амплитудный коэффициент m -й полюсной гармонической проводимости воздушного зазора;

ω — электрическая угловая скорость вращения ротора (в эл. град за единицу времени);

ψ — угол опережения осью полюса оси отсчета угла α в координатах статора в начальный момент времени (в эл. град главной гармонической поля);

δ — воздушный зазор над серединой полюсного наконечника.

Определим физический смысл коэффициента $k_{\delta 2}$,

При анализе явлений в синхронной машине на основе метода двух реакций раздельно рассматриваются продольные и поперечные поля, неподвижные относительно полюсов машины. Однако в ряде случаев, например при исследовании процессов демпфирования полей обмотки якоря демпферной обмоткой ротора синхронной машины, удобно рассматривать вращающиеся относительно ротора гармонические поля [Л. 7]. В связи с этим представляется целесообразным ввести в расчеты коэффициент $k_{\delta 2}$, который показывает, во сколько раз средняя индукция в воздушном зазоре при явнополюсном роторе меньше, чем при гладком (при одинаковых зазорах над серединой явно выраженного полюса и между статором и гладким ротором).

Аналитически коэффициент $k_{\delta 2}$ может быть найден по [Л. 4] как величина, обратная постоянной составляющей λ_0 относительной проводимости воздушного зазора: $k_{\delta 2} = \frac{1}{\lambda_0}$. По [Л. 4] можно рассчитать

и амплитудный коэффициент $\lambda_{m=1}$ низшей полюсной гармонической проводимости.

Значения λ_0 и λ_m в общем случае могут быть найдены в результате моделирования магнитного поля в воздушном зазоре машины. В таблице приведены в относительной форме результаты гармонического анализа полученных методом моделирования кривых распределения магнитной индукции в воздушном зазоре явнополюсной машины, образующихся в результате воздействия волны н. с. нулевого порядка (частично данные таблицы приведены в [Л. 8]). Отношение максимального зазора над полюсом к минимальному $\frac{\delta_{\max}}{\delta}$ = 1,5. В таблице через a_p обозначен коэффициент полюсного перекрытия (отношение ширины полюсного наконечника к полюсному делению τ). За единицу проводимости принято значение постоянной составляющей проводимости λ_0 .

В этом случае коэффициент $k_{\delta 2}$ численно равен относительному значению проводимости над серединой полюса λ_{\max}^* .

δ/τ	a_p	λ_{\max}^*	λ_0^*	λ_1^*	λ_2^*	λ_3^*
0,03	0,65	1,51	1	0,63	-0,126	0,020
	0,80	1,31	1	0,38	-0,122	0,097
0,05	0,65	1,51	1	0,59	-0,098	0,075
	0,80	1,30	1	0,35	-0,077	0,040

Значения $\lambda_{\max}^* = k_{\delta 2}$, приведенные в таблице, очень хорошо согласуются со значениями $k_{\delta 2}$, рассчитанными по [Л. 4] (расхождение составляет менее 2%).

Магнитная проводимость воздушного зазора, образованного зубчатым статором и явнополюсным ротором, на основании (2), (4) и (5) равна:

$$\lambda_3 = \frac{1}{k_{\delta 1} k_{\delta 2} \delta} - \frac{1}{k_{\delta 2}} \sum_k A^k \lambda_k \cos kZ\alpha + \frac{1}{k_{\delta 2}} \sum_m \lambda_m \cos 2m(p\alpha - \omega t - \psi) - \frac{\delta}{2} \sum_k \sum_m A^k \lambda_k \lambda_m \{ \cos [(kZ + 2pm)\alpha - 2m(\omega t + \psi)] + \cos [(kZ - 2pm)\alpha + 2m(\omega t + \psi)] \}. \quad (6)$$

Последнее слагаемое этого выражения во многих практических расчетах может не учитываться ввиду его малости. В дальнейшем для упрощения будем им пренебречь.

Выражения для проводимости воздушного зазора в принятой здесь трактовке могут быть использованы для гармонического анализа магнитного поля в воздушном зазоре по (1), так как про-

* Чтобы указать на относительный характер величин, в таблице символы проводимостей λ отмечены звездочкой (*).

проводимости воздушного зазора электрической машины для реально значимых гармонических поляя численно мало отличаются от проводимости воздушного зазора для нулевой волны поля.

Магнитное поле в воздушном зазоре. Анализ магнитного поля в воздушном зазоре синхронной явнополюсной машины удобно вести, раздельно рассматривая намагничивающие силы обмоток статора и ротора.

Магнитное поле обмотки якоря. При определении кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по (1) следует для выражений н. с. $f(a)$ и проводимости $\lambda(a)$ выбрать одну базу для отсчета текущей угловой координаты a точки воздушного зазора. За начало координат целесообразно принять ось н. с. фазы, которая всегда совпадает либо с осью зубца, либо с осью паза. Совместим начало координат с осью н. с. фазы, в которой в начальный момент времени ($t = -0$) протекает максимальный ток. Тогда произвольная v -я гармоническая н. с. обмотки якоря описывается выражением

$$f_v = F_v \cos(\omega t \mp va), \quad (7)$$

где $F_v = 1,35 \frac{I_w k_{0v} k_{Fv}}{v}$ — амплитуда гармонической¹;

I_w , ω — ток и число последовательно включенных витков фазы;

k_{0v} , k_{Fv} — обмоточный коэффициент и коэффициент формы н. с. [Л. 1 и 9].

В (7) и далее верхний знак в аргументе тригонометрической функции относится к гармоническим, вращающимся согласно, а нижний — к гармоническим, вращающимся встречно по отношению к главной волне н. с.

Полагая, что поле ротора опережает поле статора по главной гармонической на угол ψ , найдем на основании (1), (6) и (7) поле, созданное v -й гармонической н. с. якоря:

$$\begin{aligned} b &= \mu_0 F_v \left\{ \frac{1}{k_{01} k_{02} \delta} \cos(\omega t \mp va) - \right. \\ &- \frac{1}{2k_{02}} \sum_k A^k \lambda_k [\cos(\omega t + (kZ \mp v)a) + \\ &+ \cos(\omega t - (kZ \pm v)a)] + \frac{1}{2k_{01}} \sum_m \lambda_m [\cos((1 - \\ &- 2m)\omega t + (2mp \mp v)a - 2m\psi) + \cos((1 + 2m)\omega t - \\ &\left. - (2mp \pm v)a + 2m\psi)] \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

Чтобы сделать выражение (8) вполне определенным, выясним, в каких случаях ось н. с. фазы трехфазной обмотки совпадает с осью паза или с осью зубца. В отношении обмоток с целым числом пазов на полюс и фазу этот вопрос решается просто (см. например, [Л. 1] или [Л. 5]). Рассмотрим трехфазные дробные обмотки с 60-градусной фазной зоной. Заметим, что на звезде векторов катушечных э. д. с. ось н. с. фазы совпадает со сред-

ней линией (осью) 60-градусного сектора звезды, включающего векторы э. д. с. всех катушек повторяющейся части обмотки фазы.

Обозначим число катушек на полюс и фазу через $q_N = \frac{b}{c}$, где b и c — взаимно простые числа. При c — четном каждая из повторяющихся частей обмотки фазы состоит из b катушек, т. е. из нечетного числа катушек. Следовательно, ось н. с. фазы совпадает с осью катушки. Если шаг катушки в зубцовых делениях равен четному числу, то ось н. с. фазы совпадает с осью паза; если шаг катушки равен нечетному числу, то ось н. с. фазы совпадает с осью зубца.

При c и b — нечетных получается такая же картина, как и в случае c — четного.

При c — нечетном и b — четном каждая из повторяющихся частей обмотки фазы состоит из четного числа катушек. Ось н. с. фазы проходит посередине между двумя катушками, которым на звезде векторов катушечных э. д. с. соответствуют два средних вектора в 60-градусном секторе звезды, включающем векторы э. д. с. катушек одной фазы. Расстояние в катушечных делениях² между этими двумя катушками обязательно равно нечетному числу. Следовательно, ось н. с. фазы двухслойных обмоток проходит посередине между осями катушек, взаимно смещенных на нечетное число зубцовых делений. В этом случае, если шаг катушек в зубцовых делениях равен четному числу, их оси совпадают с осями пазов, а ось н. с. фазы совпадает с осью зубца; если же шаг катушек равен нечетному числу, то их оси совпадают с осями зубцов, а ось н. с. фазы совпадает с осью паза. Ось н. с. фазы однослойной обмотки проходит посередине между осями катушек, взаимно смещенных на четное число зубцовых делений. В этом случае, если шаг катушек в зубцовых делениях равен четному числу, то ось н. с. фазы совпадает с осью паза; если же шаг катушек равен нечетному числу, то ось н. с. фазы совпадает с осью зубца.

Этот анализ позволяет сформулировать для дробных обмоток следующие правила определения коэффициента A во втором слагаемом в (8).

Коэффициент $A = +1$ и $A^k = 1$:

при шаге катушки, равном четному числу зубцовых делений, для двухслойных и однослойных обмоток при b — нечетном и однослойных обмоток при b — четном;

при шаге катушки, равном нечетному числу зубцовых делений, для двухслойных обмоток при b — четном.

Коэффициент $A = -1$, $A^k = -1$ при k — нечетном и $A^k = +1$ при k — четном:

при шаге катушки, равном нечетному числу зубцовых делений, для двухслойных обмоток при b — нечетном и однослойных обмоток при любом b ;

при шаге катушки, равном четному числу зубцовых делений, для двухслойных обмоток при b — четном.

Из (8) видно, что гармоническая поляя такого же порядка v , как и возбуждающая ее гармоническая

¹ Порядок гармонических н. с. и поля определяется полным числом периодов гармонической на всей длине расточки статора.

² Катушечное деление — часть окружности расточки, приходящаяся на одну катушку.

н. с., возникает вследствие воздействия последней на постоянную составляющую проводимости воздушного зазора. Эта гармоническая поля вращается в пространстве с синхронной электрической угловой скоростью ω или с синхронной механической угловой скоростью $\frac{\omega}{v}$.

Гармонические поля зубцового порядка $kZ \pm v$ появляются в результате воздействия волны н. с. на гармонические проводимости воздушного зазора, обусловленные зубчатой конструкцией якоря. Эти гармонические вращаются в пространстве также с синхронной электрической угловой скоростью ω или с синхронной механической угловой скоростью $\frac{\omega}{kZ \pm v}$.

Гармонические поля, образующиеся вследствие воздействия волны н. с. на гармонические проводимости воздушного зазора, обусловленные только явнополюсной конструкцией ротора или же совместно зубчатой конструкцией якоря и явнополюсной конструкцией ротора, вращаются в пространстве с асинхронной угловой электрической скоростью или неподвижны³.

Наибольший интерес во многих отношениях представляют гармонические поля, вращающиеся с синхронной угловой электрической скоростью. Поэтому в дальнейшем исследуем именно их.

Существенно важно отметить, что, как это следует из (8), на любую из волн поля, вращающихся с синхронной угловой электрической скоростью (за исключением волны порядка $2p-v$), гармонические проводимости воздушного зазора, обусловленные явнополюсной конструкцией ротора, не влияют. В отношении их анализ магнитного поля синхронной явнополюсной машины ничем не отличается от анализа магнитного поля электрической машины (синхронной или асинхронной) с гладким ротором. При прочих равных условиях амплитуды этих гармонических в явнополюсной машине такие же, как и амплитуды соответствующих гармонических в машине с гладким ротором и зазором, равным $k_{\delta 2}$.

Суммарная v -я гармоническая поля образуется в результате воздействия v -й гармонической н. с. на постоянную составляющую проводимости воздушного зазора и зубцовых по отношению к ней гармонических н. с. порядка $kZ \pm v$ на зубцовые гармонические проводимости порядка kZ . Для некоторой результирующей v -й гармонической поля, не являющейся зубцовой по отношению к главной волне, можно, следовательно, написать выражение:

$$b_v = \mu_0 \left(\frac{F_v}{k_{\delta 1} k_{\delta 2} \delta} - \frac{1}{2k_{\delta 2}} \sum_k A^k \lambda_k F_{kZ \pm v} \right) \cos(\omega t \mp va). \quad (9)$$

Формула образования результирующей гармонической поля, являющейся зубцовой по отношению к главной волне, может быть определена следующим образом: гармоническая поля порядка $kZ \pm p$ возникает в результате воздействия гармонических н. с. порядка $aZ \pm p$ на гармонические проводимости воздушного зазора порядка $|(a-k)Z|$,

³ Среди этих гармонических имеется одна с числом пар полюсов $2p-v$ или $2p+v$, также вращающаяся со скоростью ω .

где $-\infty < a < +\infty$. Имеются два частных случая: при $a=0$ зубцовая гармоническая поля образуется в результате воздействия главной гармонической н. с. на зубцовую гармоническую проводимости порядка kZ ; при $a=k$ гармоническая поля зубцового порядка образуется в результате воздействия гармонической н. с. того же порядка на постоянную составляющую проводимости воздушного зазора (гармоническую проводимости нулевого порядка). Положительные и отрицательные значения a относятся к случаям, когда гармонические поля и возбудившие их гармонические н. с. вращаются соответственно согласно и встречно.

Следовательно, гармоническая поля зубцового порядка, возбуждаемая обмоткой якоря, равна:

$$b_{kZ \pm p} = \mu_0 \left(\frac{F_{kZ \pm p}}{k_{\delta 1} k_{\delta 2} \delta} - \frac{1}{2k_{\delta 2}} \sum_{\substack{a=-\infty \\ a \neq k}}^{a=+\infty} A^{|a-k|} F_{aZ \pm p} \lambda_{a-k} \right) \times \cos[\omega t \mp (kZ \pm p) \alpha]. \quad (10)$$

Согласно или встречно вращающиеся гармонические поля определяются по (10) только соответственно при верхних или нижних знаках. В отношении коэффициентов A в выражениях (9) и (10), а также в дальнейшем в (15) и (16) остаются в силе соответствующие замечания, сделанные к выражению (8).

Теперь рассмотрим гармоническую поля порядка $2p-v$, возбужденную v -й гармонической поля и вращающуюся в пространстве с синхронной угловой электрической скоростью. Эта гармоническая описывается равенством

$$b = \frac{\mu_0}{2k_{\delta 1}} F_v \lambda_{m=1} \cos[\omega t - (2p-v)a + 2\psi], \quad (11)$$

где верхний знак соответствует согласно вращающейся, а нижний — встречно вращающейся возбуждающей гармонической н. с. Если v -я гармоническая н. с. имеет зубцовый порядок $v=kZ \pm p$, то, как это следует из (11), низшая (встречно вращающаяся) волна н. с. какой-либо пары зубцовых гармонических н. с. ($k=\text{const}$) создает гармоническую поля

$$b_{kZ+p} = \frac{\mu_0}{2k_{\delta 1}} F_{kZ-p} \lambda_{m=1} \cos[\omega t - (kZ+p)a + 2\psi], \quad (12a)$$

порядок и направление вращения которой совпадают с порядком и направлением вращения высшей гармонической той же пары зубцовых волн н. с. Высшая (согласно вращающаяся) волна этой пары зубцовых гармонических н. с. создает гармоническую поля

$$b_{kZ-p} = \frac{\mu_0}{2k_{\delta 1}} F_{kZ+p} \lambda_{m=1} \cos[\omega t + (kZ-p)a + 2\psi], \quad (12b)$$

порядок и направление вращения которой совпадают с порядком и направлением вращения низшей гармонической той же пары зубцовых волн н. с.

Обмоточные коэффициенты для гармонических одной пары зубцовых волн н. с. имеют различные знаки. Следовательно, при $45^\circ < \psi < 135^\circ$ высшая (низшая) зубцовая гармоническая н. с. создает гармоническую поля, которая усиливает зубцовую

волну поля, созданную низшей (высшей) зубцовой гармонической н. с., принадлежащей к той же паре зубцовых волн. При $-225^\circ < \psi < 45^\circ$ одна волна поля ослабляет другую.

Магнитное поле обмотки возбуждения. В неподвижных координатах статора н. с. обмотки возбуждения описывается равенством:

$$f_f = \sum_{\epsilon} F_{f\epsilon} \cos(\omega t - p\alpha - \psi), \quad (13)$$

где ψ — угол сдвига между осью полюса и амплитудой н. с. якоря;

ϵ — порядок высших гармонических н. с. обмотки возбуждения по отношению к главной гармонической ($\epsilon = 1$);

$F_{f\epsilon} = \frac{4}{\pi\epsilon} I_f w_f$ — амплитуда ϵ -й гармонической н. с.;
 I_f — ток возбуждения;

w_f — число витков обмотки возбуждения на один полюс.

Магнитное поле, создаваемое в воздушном зазоре обмоткой возбуждения, можно определить, перемножив выражения (5) для проводимости λ_δ и (12) для н. с. f_f . На основании анализа магнитного поля легко прийти к следующим выводам.

1. Гармонические поля, вращающиеся с синхронной угловой электрической скоростью, образуются в результате взаимодействия гармонических н. с. возбуждения и полюсных гармонических проводимости, для которых справедливо равенство $2m = \epsilon \pm 1$; плюс и минус относятся соответственно к согласно и встречно вращающимся гармоническим. Числа пар полюсов гармонических равны p .

Взаимодействие всех других гармонических н. с. возбуждения и полюсных гармонических проводимости приводит к образованию полей, вращающихся с асинхронной угловой электрической скоростью.

2. Воздействие низшей гармонической н. с. возбуждения ($\epsilon = 1$) на постоянную и зубцовые гармонические составляющие проводимости воздушного зазора вызывает появление вращающихся с синхронной угловой электрической скоростью гармонических поля соответственно p -го и зубцовых порядков

$$b_p = \frac{\mu_0}{k_{\delta_1} k_{\delta_2} \delta} F_{f,\epsilon=1} \cos(\omega t - p\alpha + \psi); \quad (14)$$

$$b_{kZ \pm p} = \frac{\mu_0}{2k_{\delta_2}} A^k F_{f,\epsilon=1} \lambda_k \cos[\omega t \mp (kZ \pm p)\alpha + \psi]. \quad (15)$$

Воздействие остальных гармонических н. с. обмотки возбуждения ($\epsilon > 1$) на постоянную и зубцовые гармонические составляющие проводимости воздушного зазора приводит к появлению гармонических поля, вращающихся с асинхронной угловой электрической скоростью.

Результатирующие зубцовые гармонические магнитного поля. Выполненный выше анализ магнитного поля в воздушном зазоре синхронной явнополюсной машины позволяет составить на основе соотношений (10), (13) и (15) следующее обобщенное выражение для результирующих гармонических поля порядка $kZ \pm p$, являющихся зубцовыми по отношению к главной волне:

$$b_{kZ \pm p} = \frac{\mu_0}{k_{\delta_1} k_{\delta_2} \delta} \left\{ (F_{kZ \pm p} - \right. \\ \left. - \frac{k_{\delta_1} \delta}{2} \sum_{\substack{a=-\infty \\ a \neq k}}^{+\infty} A^{|a-k|} F_{az \pm p} \lambda_{a-k} \cos[\omega t \mp (kZ \pm p)\alpha] - \right. \\ \left. - \frac{k_{\delta_1} \delta}{2} A^k F_{f,\epsilon=1} \lambda_k \cos[\omega t \mp (kZ \pm p)\alpha + \psi] + \right. \\ \left. + \frac{k_{\delta_2} \delta}{2} F_{kZ \mp p} \lambda_{m=1} \cos[\omega t \mp (kZ \pm p)\alpha + 2\psi] \right\}. \quad (16)$$

Литература

1. Вольдек А. И., Влияние неравномерности воздушного зазора на магнитное поле асинхронной машины, «Электричество», 1951, № 12.
2. Захаров М. К., Влияние прорезей пазов статора на распределение магнитного поля в воздушном зазоре машин переменного тока, Научные записки Одесского политехнического института, т. III, 1954.
3. Вольдек А. И., Дифференциальное рассеяние обмотки статора явнополюсной синхронной машины, «Электричество», 1953, № 7.
4. Вольдек А. И., Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей, «Электричество», 1966, № 7.
5. Геллер Б. и Гамата В., Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах, Изд-во «Энергия», 1964.
6. Freeman E. M., The Calculation of Harmonics, Due to Slotting, in the Flux-Density Waveform of a Dynamoelectric Machine, Proc. Instn. Electr. Engrs, 1962, v. 109, p. C.
7. Дулькин А. И., Исследование демпферной обмотки синхронной явнополюсной машины в синхронном режиме, Авторефат диссертации, МЭИ, 1965.
8. Дулькин А. И., Магнитное поле демпферной обмотки синхронной явнополюсной машины, «Электротехника», 1965, № 5.
9. Liwschitz M. M., Differential Leakage of a Fractional-Slot Winding, Trans. AIEE, 1946, v. 65.

[21.12.1966]



Теория длинной открытой дуги переменного тока и постоянная времени дуги

Доктор техн. наук, проф. И. К. ФЕДЧЕНКО и инж. О. С. ИЛЬЕНКО

Киевский политехнический институт

В настоящее время при исследовании характеристик электрической дуги наиболее широко используется теория О. Майра [Л. 1], основанная на двух существенных допущениях: отводимая от дуги мощность P_0 считается постоянной, а сопротивление r дуги — экспоненциальной функцией от теплосодержания Q :

$$P_0 = \text{const}; \quad r = k e^{-\frac{Q}{Q_0}}; \quad (1)$$

здесь k и Q_0 — постоянные величины, причем отношение

$$\frac{Q_0}{P_0} = \theta \quad (2)$$

имеет размерность времени и названо постоянной времени дуги.

Известно, что теория О. Майра приближенно описывает характеристики дуги в области малых токов. При этом сопротивление дуги в динамическом режиме определяется с помощью (1) и уравнения динамической дуги вида

$$\frac{dQ}{dt} = P_v - P_0, \quad (3)$$

где t — время;

P_v — выделяемая в дуге мощность.

При больших токах и небольшой длине дуги, когда напряжение дуги намного меньше напряжения источника питания, близка к действительности теория Кэсси [Л. 1]. Таким образом, в настоящее время не существует единой теории, достаточно хорошо описывающей количественные характеристики всех видов дугового разряда.

Проведенные В. В. Бургсдорфом [Л. 2] фундаментальные экспериментальные исследования мощных открытых дуг показали, что при большой длине дуги и больших токах напряжение дуги незначительно отличается от напряжения источника питания. Характеристики такой дуги не описываются ни теорией Майра, ни теорией Кэсси. В настоящей работе произведен приближенный теоретический анализ этого вида дугового разряда.

При исследовании характеристик дуги большое практическое значение имеет вопрос о постоянной времени дуги θ , так как эта величина входит почти во все расчетные формулы [Л. 1 и 3]. Из экспериментов известно, что величина θ не остается постоянной, как это вытекает из теории Майра (2), но изменяется на протяжении периода и зависит от величины тока [Л. 1 и 3]. В работе [Л. 3] приведена следующая формула для определения постоянной времени дуги, из которой как частные случаи вытекают формулы Майра и Кэсси

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{dQ}{dP} \left[1 + \frac{I_0}{U_0} \left(\frac{dU}{dI} \right) \right], \quad (4)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека

где P , I_0 и U_0 — мощность, ток и напряжение дуги, определяемые для статического режима.

В настоящей работе будет получена более общая формула для постоянной времени дуги и показано, что эта величина зависит от скорости изменения теплосодержания дуги.

Исходные положения. Примем допущения, что отводимая мощность и сопротивление дуги являются некоторыми однозначными функциями теплосодержания

$$\begin{cases} P_0 = f_1(Q); \\ r = f_2(Q). \end{cases} \quad (5)$$

Очевидно, что допущение (5), которое не накладывает на указанные функции других ограничений, кроме условия однозначности, ближе к действительности, чем допущения Майра (1). Функции (5) зависят от условий охлаждения столба дуги и в каждом отдельном случае должны быть определены отдельно.

Согласно данным ЭНИН АН СССР [Л. 4], теплосодержание единицы объема воздуха при атмосферном давлении лежит в пределах от 0,5 до 0,9 $\text{дж}/\text{см}^3$ при температурах от 2000° до 20000°K . Приближенно принимая эту величину постоянной и равной $0,7 \text{ дж}/\text{см}^3$, а также учитывая, что радиус открытой дуги постоянного тока пропорционален корню квадратному из тока дуги [Л. 1], приходим к простому соотношению

$$Q_1 = 0,04 I \quad [\text{дж}/\text{см}], \quad (6)$$

где Q_1 — теплосодержание единицы длины дуги;
 I — ток дуги, a .

Используя известную формулу Ноттингема

$$U = A + Bl + \frac{C + Dl}{I^n}, \quad (7)$$

которая при $n=1$ переходит в формулу Айртона, а при $A=B=C=0$ — в формулу Сьютса, функции (5) с учетом (6) получаем в виде

$$\begin{aligned} r &= \frac{0,04 (A + Bl)}{Q_1} + \frac{(0,04)^{1+n} (C + Dl)}{Q_1^{1+n}} \quad [\text{ом}], \\ P_0 &= \frac{(A + Bl) Q_1}{0,04} + \frac{(C + Dl) Q_1^{1-n}}{(0,04)^{1-n}} \quad [\text{вт}], \end{aligned} \quad (8)$$

где U — напряжение дуги;
 A, B, C, D и n — постоянные коэффициенты;
 l — длина дуги.

При большой длине ($A \ll Bl$; $C \ll Dl$) для открытой дуги ($B \approx 15 \text{ в/см}$; $D \approx 70 \text{ вт/см}$; $n \approx 1$) при

токах свыше 25 а ($Q_1 > 1$ дж/см) из (8) получаем приближенные зависимости

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{0,6l}{Q_1} [\text{ом}]; \\ P_0 &= 375 Q_1 l [\text{вт}]. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Согласно допущению (5) зависимости (9) характеризуют открытую дугу как постоянного, так и переменного тока, поскольку условия охлаждения столба дуги принимаются одинаковыми.

Путем анализа дифференциального уравнения столба дуги в динамическом режиме можно убедиться, что в уравнении динамической дуги (3) в общем случае все величины переменны во времени, а само уравнение (3) справедливо только при выполнении двух условий: давление в столбе дуги постоянно и теплосодержание значительно больше энергии электрического и магнитного полей дуги. Можно показать, что для открытой дуги первое условие выполнено при токах до 20 ка, поскольку в этих пределах можно пренебречь «пинч — эффектом», а второе условие — до 10^7 а.

При последующем теоретическом анализе будет использовано уравнение динамической дуги (3) и функции вида (5) или их частный случай — зависимости (9). Подтверждением практической применимости функций вида (5) является хорошо согласующаяся с опытными данными В. В. Бургсдорфа теория длинной открытой дуги переменного тока, приведенная ниже.

Теоретический анализ характеристик длинной открытой дуги переменного тока. Как показали уникальные экспериментальные исследования мощных открытых дуг, выполненные В. В. Бургсдорфом на участке ЛЭП-110 системы «Мосэнерго» [Л. 2], при большой длине дуги (достигающей десятков мегров) напряжение дуги незначительно отличается от напряжения источника питания. Поэтому приближенно можно считать, что напряжение дуги равно напряжению источника питания $U_{\max} \sin \omega t$. При этом уравнение (3) с учетом (9) принимает вид:

$$\frac{dQ_1}{dt} = Q_1 \left(\frac{U_{\max}^2 \sin^2 \omega t}{0,6l^2} - 375 \right). \quad (10)$$

Решая (10) при $l = \text{const}$ и обозначая через r_n сопротивление дуги в начальный момент времени ($t = 0$), получаем:

$$Q_1 = \frac{0,6l}{r_n} e^{-\varphi(t)} [\text{дж/см}], \quad (11)$$

откуда

$$r = r_n e^{\varphi(t)} [\text{ом}], \quad (12)$$

$$i = \frac{U_{\max}}{r_n} e^{-\varphi(t)} \sin \omega t [\text{а}], \quad (13)$$

где

$$\varphi(t) = \frac{U_{\max}^2 \sin 2\omega t}{2\omega l^2} + \left(375 - \frac{U_{\max}^2}{1,2l^2} \right) t. \quad (14)$$

Формулы (12) — (14) дают возможность проследить характер изменения во времени мгновенных значений сопротивления и тока длинной открытой дуги переменного тока, если известны амплитуда напряжения источника питания U_{\max} (а) и длина

дуги l (см) и сопротивление дуги r_n (ом) в момент перехода тока через нуль (ниже будет показано, что величина r_n может быть вычислена теоретически).

Произведем сравнение зависимостей, рассчитанных по предложенным формулам (12) — (14), с экспериментальными зависимостями, полученными В. В. Бургсдорфом [Л. 2]. Рассмотрим дугу при $U_{\max} = \sqrt{2} \cdot 64 \cdot 10^3$ (в) и $I_{k,z} = 225$ (а), что соответствует типичным осцилограммам, приведенным в [Л. 2]. По данным авторов [Л. 5] при этих условиях критическая длина дуги примерно равна 43,5 м. Подставляя указанные величины в (14), при частоте 50 гц получаем:

$$\varphi(t) = 0,57 \sin 2\omega t + 17t. \quad (15)$$

При этом согласно (13) величина r_n связана с амплитудой тока I_m и напряжением U_{\max} соотношением

$$r_n = 1,23 \frac{U_{\max}}{I_m}. \quad (16)$$

Амплитуда тока I_m , входящая в (16), может быть рассчитана теоретически при помощи формул, приведенных в [Л. 5], если известна длина дуги l и напряжение U_{\max} . Таким образом, соотношение (16) позволяет преодолеть трудности, связанные с определением величины r_n , входящей в формулы (11) — (13).

В настоящей работе величина I_m взята по данным экспериментов В. В. Бургсдорфа [Л. 2], согласно которым в первый полупериод $I_m = 115$ а. При этом по (16) получаем $r_n = 970$ ом и формулы (11) — (13) принимают вид:

$$Q_1 = 2,68 e^{-\varphi(t)} [\text{дж/см}], \quad (17)$$

$$r = 970 e^{-\varphi(t)} [\text{ом}], \quad (18)$$

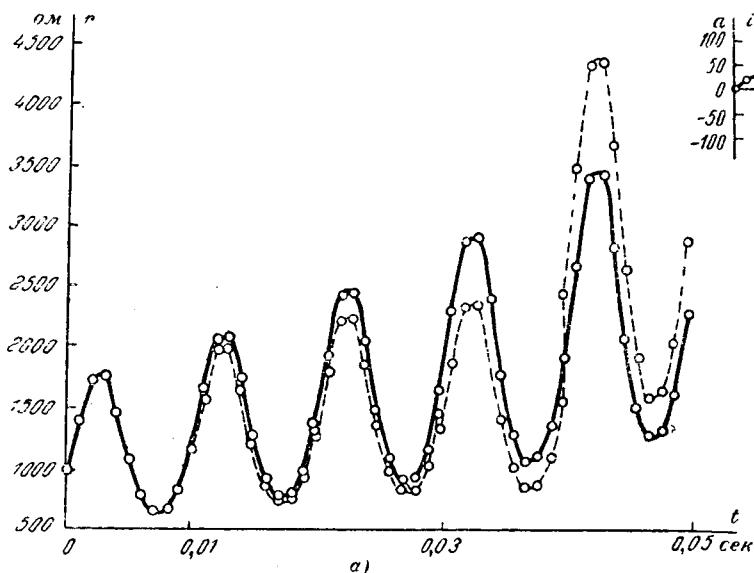
$$i = 93,5 e^{-\varphi(t)} \sin \omega t [\text{а}], \quad (19)$$

где функция $\varphi(t)$ определяется соотношением (15).

Графики изменения сопротивления и тока дуги во времени, которые получены при помощи формул (18) и (19), показаны на рис. 1 сплошными линиями. Пунктирной линией на рис. 1 показаны уточненные зависимости, которые получены по формулам (12) — (16) с учетом изменения амплитуды тока от полупериода к полупериоду. В этом случае величина r_n была определена по (16) для каждого из пяти полупериодов отдельно, при $I_m = 115; 100; 90; 85$ и 45 а. Эти величины I_m соответствуют реальной дуге, исследованной В. В. Бургсдорфом.

Расхождение между теоретическими характеристиками, рассчитанными по (18) и (19), и опытными характеристиками [Л. 2] не превышает 25%, а для уточненных теоретических характеристик (пунктир на рис. 1) — не превышает 10%. Это является подтверждением практической применимости принятых выше допущений.

Теоретическое определение постоянной времени дуги. Понятие «постоянная времени» в электротехнике широко используется при рассмотрении переходных процессов в линейных электрических цепях. При этом она характеризует скорость изменения тока или напряжения во времени при переходном про-



цессе и зависит только от параметров цепи, которые постоянны во времени.

Электрическая дуга является существенно нелинейным элементом, причем ее параметры переменны во времени. Поэтому постоянная времени может характеризовать дугу только при кратковременных переходных процессах, по отношению к которым начальное состояние дуги можно считать статическим, и при малых отклонениях от этого статического состояния, в пределах которых дугу можно считать линейным элементом.

Иными словами, постоянная времени дуги характеризует дугу при малых возмущениях. Однако величина постоянной времени может изменяться во времени вместе с изменением параметров дуги.

Согласно (5) приращению теплосодержания $\Delta Q = Q - Q_0$ соответствуют приращения

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_0 &= \frac{dP_0}{dQ} (Q - Q_0); \\ \Delta r &= \frac{dr}{dQ} (Q - Q_0). \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Учитывая (20) и равенство $P_0 = (r_0 + \Delta r) i^2$, из (3) получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{dQ}{dt} + AQ = B, \quad (21)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{dP_0}{dQ} - \frac{dr}{dQ} i^2; \\ B &= r_0 i^2 - P_0^0 + AQ, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где i — мгновенное значение тока дуги;

P_0^0 — отводимая мощность в статическом состоянии.

Из (21) — (22) вытекает, что при наложении на постоянный ток дуги I_0 небольшой постоянной составляющей ΔI (при $i = I_0 + \Delta I$), теплосодержание, сопротивление и напряжение дуги меняются во вре-

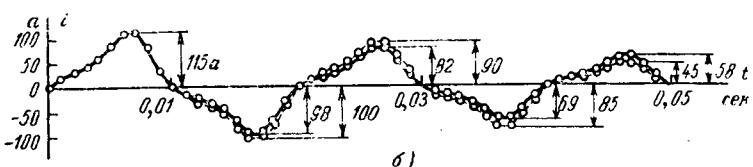


Рис. 1. Расчетные характеристики длинной открытой дуги.

а — $r=f(t)$; б — $i=f(t)$.
Сплошные кривые — по формулам (18) и (19); пунктирные — по формулам (12) — (16).

мени по экспоненциальному закону, причем постоянная времени определяется формулой

$$\theta = \frac{1}{A} = \left(\frac{dP_0}{dQ} - \frac{dr}{dQ} i^2 \right)^{-1}. \quad (23)$$

Можно убедиться, что известная формула (4) вытекает из (23), если входящие в (23) производные определить по статической вольт-амперной характеристике дуги. Формула (2) в свою очередь вытекает из (4) вследствие принятых О. Майром допущений (1).

При наложении на постоянный ток дуги небольшой синусоидальной составляющей $\Delta I = I_m \sin \omega t$ получаем из (21) — (22), что ток и напряжение дуги имеют постоянные составляющие I_0 и $U_0 = r_0 I_0$, а также переменные составляющие

$$\left. \begin{aligned} i_{\sim} &= I_n \sin \omega t; \\ u_{\sim} &= U_m \sin (\omega t - \psi), \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где

$$\left. \begin{aligned} U_m &= \frac{I_0 r_m \sin \alpha}{\sin \phi}; \\ \psi &= \arctg \frac{I_0 r_m \sin \alpha}{I_0 r_m \cos \alpha + I_m r_0}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Здесь r_m — наибольшее отклонение сопротивления дуги от статической величины r_0

$$r_m = 2 \frac{dr}{dQ} r_0 I_0 I_m \theta \cos \alpha, \quad (26)$$

причем величина α связана с постоянной времени дуги θ соотношением

$$\alpha = \arctg \omega \theta. \quad (27)$$

Для этого случая постоянная времени дуги θ определяется по (23) при $i = I_0$.

Для переменных составляющих тока и напряжения динамическая вольт-амперная характеристика представляет собой эллипс, полуоси a_0 и b_0 которого и угол β их поворота по отношению к осям координат определяются формулами:

$$\left. \begin{aligned} a_0^2 &= -\frac{f}{k_1}; \\ b_0^2 &= -\frac{f}{k_2}; \\ \operatorname{tg} 2\beta &= \frac{2b}{a-c}, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где

$$\left. \begin{aligned} k_{1,2} &= \frac{1}{2} (a+c \pm \sqrt{(a-c)^2 + 4b^2}); \\ a &= \left(\frac{U_m}{I_m} \right)^2; \\ b &= -\frac{U_m \cos \phi}{I_m}; \\ c &= 1; \quad f = -U_m^2 \sin^2 \phi. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Определим постоянную времени для конкретного случая длинной открытой дуги переменного тока, используя приведенный выше теоретический анализ этого вида дугового разряда. Для этого воспользуемся формулой (23), полагая, что для малых возмущений каждое мгновенное значение тока дуги при промышленной частоте можно рассматривать как статическое состояние, т. е. как постоянную величину. Ниже будет показано, что постоянная времени дуги на порядок меньше периода переменного тока промышленной частоты. Следовательно, указанное допущение близко к действительности.

Согласно (9) производные, входящие в (23), равны:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_0}{dQ} &= \frac{1}{l} \frac{dP_0}{dQ_1} = 375 \left(\frac{1}{\text{сек}} \right); \\ \frac{dr}{dQ} &= \frac{1}{l} \frac{dr}{dQ_1} = -\frac{0,6}{Q_1^2} \left(\frac{\text{ом}}{\text{вт}\cdot\text{сек}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Подставляя в (23) значения (30) с учетом (11) и (13), получаем:

$$\theta = \left(375 + \frac{U_{\max}^2}{0,6l^2} \sin^2 \omega t \right)^{-1} [\text{сек}]. \quad (31)$$

При $U_{\max} = \sqrt{2} \cdot 64 \text{ кв}$ и $l = 43,5 \text{ м}$ формула (31) дает:

$$\theta = (375 + 725 \sin^2 \omega t)^{-1} = (740 - 360 \cos 2\omega t)^{-1} [\text{сек}]. \quad (32)$$

Согласно (32) постоянная времени длинной открытой дуги меняется на протяжении полупериода от $0,91 \cdot 10^{-3}$ до $2,67 \cdot 10^{-3}$ сек. Интересно отметить, что формула О. Майра (2) дает для этого случая постоянную величину, равную $2,67 \cdot 10^{-3}$ сек.

Для рассматриваемого случая возможно также установить зависимость постоянной времени дуги от величины теплосодержания и скорости его изменения. Согласно (11) с учетом (15) скорость изменения теплосодержания равна:

$$\frac{dQ_1}{dt} = Q_1 \frac{d\varphi(t)}{dt} = -Q_1 (360 \cos 2\omega t + 17). \quad (33)$$

Объединяя (33) с (32), получаем:

$$\theta = \left(757 + \frac{1}{Q_1} \frac{dQ_1}{dt} \right)^{-1} [\text{сек}]. \quad (34)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека

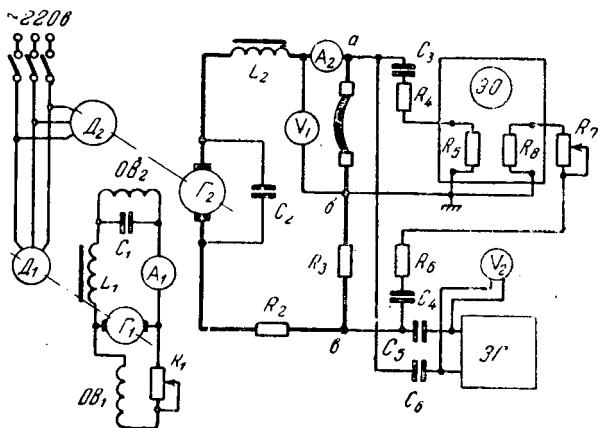


Рис. 2. Электрическая схема экспериментальной установки для наложения на постоянный ток дуги небольшой синусоидальной составляющей.

Таким образом, путем теоретического исследования установлено, что постоянная времени дуги зависит не только от величины теплосодержания, но и от скорости его изменения.

Экспериментальное исследование влияния скорости изменения теплосодержания на постоянную времени дуги. При экспериментальном исследовании малое отклонение параметров дуги от статического состояния осуществлено путем наложения на постоянный ток дуги небольшой (порядка 10 мА) синусоидальной составляющей различной частоты (200—2 000 гц) от генератора звуковой частоты ЗГ (рис. 2).

Исследования проведены при токе дуги до 1 а и длине дуги до 40 мм. Для стабилизации дуги была помещена в вертикальную кварцевую трубку, электроды выполнены из спектрально чистого углерода и во внешней цепи для сглаживания пульсаций напряжения генераторов Γ_1 и Γ_2 (рис. 2) применены большие емкости C_1 (120 мкФ, 250 в) и C_2 (100 мкФ, 3 000 в), а также индуктивности L_1 и L_2 . Высоковольтные конденсаторы C_3 , C_4 , C_5 и C_6 служат для отделения электронного осциллографа ЗО и звукового генератора ЗГ от высоковольтной цепи постоянного тока.

Для обеспечения неискажающей записи явлений в схему включены сопротивления R_4 и R_6 , которые увеличивают постоянную времени цепочек, образованных конденсаторами C_3 , C_4 и входными сопротивлениями усилителей осциллографа R_5 и R_8 . Переменное сопротивление R_7 предназначено для устранения сдвига фаз между напряжениями, подводимыми к вертикальным и горизонтальным пластинаам осциллографа.

Типичные динамические вольт-амперные характеристики, полученные по данной схеме на экране ЗО, приведены на рис. 3 видно, что эти характеристики близки к эллипсоидальным; это соответствует выводам приведенного выше теоретического анализа.

В результате расшифровки большого количества (порядка 500) экспериментальных характеристик установлено, что при постоянной величине теплосодерж-

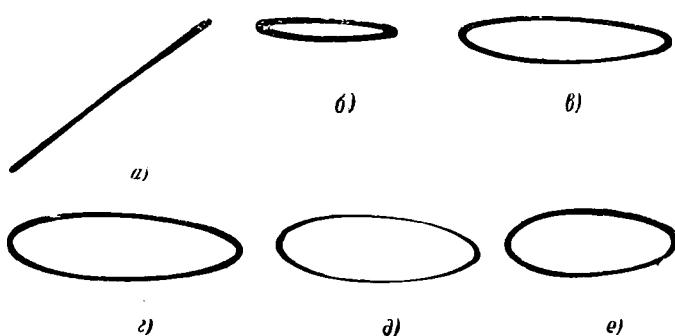


Рис. 3. Типичные экспериментальные характеристики.
а — настроенная прямая; б, в, г, д, е — динамические вольт-амперные характеристики дуги при частотах переменной составляющей тока дуги 400; 800; 1200; 1600; 2000 Гц соответственно.

жания Q производная $\frac{dr}{dQ}$ зависит от скорости изменения теплосодержания $\frac{dQ}{dt}$. Эта эмпирическая зависимость в пределах $1 \text{ вт} \leq \frac{dQ}{dt} \leq 15 \text{ вт}$ имеет вид:

$$\left| \frac{dr}{dQ} \right| = 34,6 r_0^{1,54} \left(\frac{dQ}{dt} \right)^{0,3} [\text{ком/дж}], \quad (35)$$

где r_0 — статическое сопротивление дуги $r_0 = \frac{U_0}{I_0}$, ком.

Используя (35) и формулу (23), для постоянной времени дуги получаем:

$$\theta = \left[34,6 \cdot 10^3 r_0^{1,54} \left(\frac{dQ}{dt} \right)^{0,3} \frac{2r_0 I_0^2}{r_d - r_0} \right]^{-1} [\text{сек}], \quad (36)$$

где динамическое сопротивление $r_d = \frac{dU}{dT}$ выражено в килоомах, а ток I_0 — в амперах.

Согласно (36) при токах дуги от 0,3 до 1 а величина θ лежит в пределах от $1,6 \cdot 10^{-4}$ до $0,4 \times 10^{-4}$ сек при $\frac{dQ}{dt}$ от 1 до 15 вт. Таким образом, экспериментальные исследования стабилизированной дуги при малых токах также подтверждают зависимости постоянной времени дуги от скорости изменения теплосодержания.

Выводы. 1. Допущение (5) об однозначной зависимости отводимой мощности и сопротивления

дуги от теплосодержания позволило создать приближенную теорию длинной открытой дуги переменного тока, хорошо согласующуюся с экспериментальными исследованиями В. В. Бургдорфа для мощных открытых дуг.

2. Созданная авторами приближенная теория дает возможность рассчитать изменение основных параметров (тока, сопротивления, теплосодержания, постоянной времени) длинной открытой дуги на протяжении нескольких периодов. Полученная формула (23) для определения постоянной времени дуги является более общей по отношению к известным формулам (Майр, Рицк).

3. Теоретические исследования мощной длинной открытой дуги и экспериментальные исследования стабилизированной дуги при малых токах привели к обнаружению зависимости постоянной времени дуги не только от величины теплосодержания, но и от скорости его изменения.

4. Практически важное значение имеет возможность рассчитать характер изменения сопротивления дуги во времени при ее горении. Без этого невозможно правильно определить условия устойчивости дуги переменного тока и решить ряд других прикладных вопросов. Найденная аналитическая зависимость для постоянной времени дуги θ (23) позволяет уточнить условия устойчивости дуги. Ранее эта величина θ принималась постоянной или зависящей от амплитуды тока [Л. 1, 3 и 6].

Литература

- Залесский А. М., Электрическая дуга отключения, Госэнергоиздат, 1963.
- Бургдорф В. В., Открытые электрические дуги большой мощности, «Электричество», 1948, № 10.
- Rizk F., Arc instability and timeconstant in air-blast circuit-breakers, CIGRE, 6, 1964, 107/1—107/14; см. также «Экспресс-информация», серия «Электрические машины и аппараты», вып. 43, 1964, реф. 131.
- Ступченко Е. В., Стаканов И. П., Самуйлов Е. В., Плещанов А. С. и Рождественский И. Б., Термодинамические свойства воздуха в интервале давлений от 0,001 до 1 000 атм., сб. «Физическая газодинамика», Изд-во АН СССР, 1959.
- Федченко И. К. и Ильенко О. С., Определение критических параметров открытой дуги переменного тока методом энергетического баланса, Известия вузов, «Энергетика», 1964, № 5.
- Frind G., Über das Abklingen von Lichtbögen, Zeitschrift für angew. Physik, 1960, Bd. 12, N. 5, s. 281; N. 11, s. 515.

[13.6.1967]



Народы Советского Союза! Строительство коммунизма — наш патриотический и интернациональный долг! Все силы на успешное выполнение задач коммунистического строительства, определенных Программой партии и XXIII съездом КПСС!

(Из призывов ЦК КПСС к 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции)

УДК 621.314.652.2:62-523.2

Вентильный преобразователь как элемент системы автоматического регулирования

Канд. техн. наук В. П. ШИПИЛЛО

ВНИИЭлектроаппарат

Одним из наименее исследованных элементов замкнутых систем автоматического регулирования является управляемый вентильный преобразователь. Это объясняется в основном сложностью математического описания процессов в преобразователе, происходящих при изменении сигнала управления. Комплекс вентильного преобразователя может быть представлен, как известно [Л. 1 и 2], в виде трех независимых звеньев: системы импульсно-фазового управления, собственно вентильного преобразователя, и, наконец, силовой схемы. Динамические свойства систем импульсно-фазового управления и силовой схемы хорошо изучены [Л. 1—5]. Что же касается самого вентильного преобразователя, то его динамические свойства исследованы недостаточно. Результаты ряда работ, посвященных этому вопросу, мало согласуются между собой из-за различного рода допущений, принятых авторами. Так, в одних работах [Л. 1 и 2] вентильный преобразователь рассматривается как абсолютно безынерционное устройство, в других [Л. 5—8], как безынерционное устройство в ограниченной полосе частот управляющего сигнала, в третьих [Л. 9—11], как звено с чистым запаздыванием, равным половине периода пульсаций; лишь в немногих работах [Л. 5 и 8] учитывается особенность динамики преобразователя, связанная с невозможностью запереть открытый вентиль по каналу управления.

В настоящей статье делается попытка исследовать с минимумом допущений динамические свойства вентильного преобразователя, а также выявить автоколебательные режимы в системах автоматического регулирования, которые могут возникать благодаря специфике этих свойств.

Входной величиной вентильного преобразователя является угол управления $\alpha(t)$. Непрерывная функция $\alpha(t)$ однозначно определяет дискретные моменты открывания вентилей $a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, \dots$ и, следовательно, э. д. с. преобразователя $e(t)$ (так называемую внутреннюю э. д. с. преобразователя [Л. 2]), которая является выходной величиной. Специфика динамических свойств преобразователя связана с двумя особенностями его работы.

Первая особенность заключается в том, что вентильный преобразователь управляет не непрерывно, а дискретно. При этом интервал между управляющими воздействиями является переменной величиной и определяется не только числом фаз

преобразователя, но и скоростью изменения управляющего сигнала [Л. 5]. Эта особенность проявляется в том, что преобразователь имеет ограниченную полосу пропускания частот управляющего сигнала [Л. 5—8].

Вторая особенность связана с тем, что благодаря «тиратронной» характеристике вентилей преобразователь является полууправляемым устройством: открывание вентиля происходит в моменты подачи управляющих импульсов, а запирание — в моменты уменьшения тока вентиля до нуля (у тиристоров — до некоторого тока, отличного от нуля). Эта особенность проявляется в том, что при значениях производной управляющего сигнала, превышающих некоторую критическую величину, равную круговой частоте питающего напряжения

$$\left[\frac{d\alpha(t)}{dt} \right]_{\text{крит}} = \omega, \quad (1)$$

процессы в преобразователе при увеличении и уменьшении сигнала управления оказываются разными [Л. 5 и 8].

Отмеченные особенности вентильного преобразователя не позволяют представить его как линейное динамическое звено. Метод математического анализа работы преобразователя с одновременным учетом этих особенностей еще не известен. Тем не менее, уже сейчас удалось получить приемлемые результаты при помощи четкого разделения указанных двух особенностей работы преобразователя и учета каждой из них в зависимости от конкретных условий его использования. Это разделение состоит в том, что преобразователь рассматривается, с одной стороны, как дискретно управляемое устройство с заданным числом фаз m в предположении, что скорость изменения управляющего сигнала ниже критической, вследствие чего не проявляется вторая особенность динамики преобразователя. С другой стороны, преобразователь рассматривается как устройство с бесконечно большим числом фаз $m=\infty$, т. е. как непрерывное устройство, но при этом не накладывается ограничений на величину производной управляющего сигнала.

Преобразователь как дискретное устройство. Рассмотрим вентильный преобразователь как дискретно управляемое устройство при условии, что

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} < \omega. \quad (2)$$

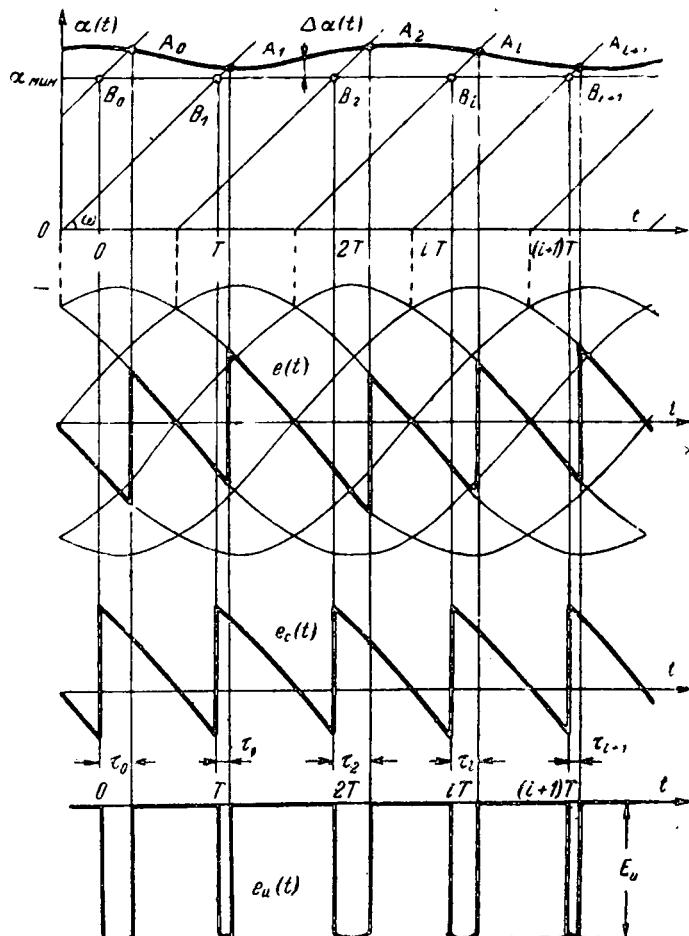


Рис. 1. Процессы в m -фазном вентильном преобразователе при малых отклонениях угла управления.

$\alpha(t)$ — угол управления; $e(t)$ — э. д. с. преобразователя в режиме непрерывного тока; $e_c(t)$ — симметричная составляющая э. д. с. преобразователя; $e_u(t)$ — импульсная составляющая э. д. с. преобразователя.

Вначале исследуем преобразователь при малых отклонениях угла управления, а затем рассмотрим общий случай для любых отклонений этого угла.

Характеристики m -фазного вентильного преобразователя при малых изменениях угла управления иллюстрируются на рис. 1. Моменты открывания вентилей ($A_0, A_1, A_2, \dots, A_i, \dots$) соответствуют точкам пересечения непрерывной функции $\alpha(t)$ с прямыми линиями, имеющими наклон ω , проходящими через точки естественного зажигания и отстоящими одна от другой на интервал времени T , определяемый фазностью преобразователя

$$T = \frac{2\pi}{m\omega}. \quad (3)$$

Выделим в сигнале $e(t)$ некоторую постоянную величину α_{\min} , так чтобы

$$\Delta\alpha(t) = \alpha(t) - \alpha_{\min} > 0. \quad (4)$$

Тогда график э. д. с. преобразователя $e(t)$ можно представить в виде суммы симметричной кривой $e_c(t)$, соответствующей фиктивным точкам открывания вентилей ($B_0, B_1, B_2, \dots, B_i, \dots$), и периодических отрицательных импульсов $e_u(t)$, имеющих форму, близкую к прямоугольной

$$e(t) = e_c(t) + e_u(t). \quad (5)$$

Если принять за начало отсчета времени точку B_0 , то передние фронты импульсов будут соответствовать моментам времени $0, T, 2T, \dots, iT$. Продолжительности импульсов характеризуются текущими значениями $\alpha(t)$ в моменты открывания вентилей:

$$\left. \begin{aligned} \tau_0 &= \frac{1}{\omega} \Delta\alpha_0; \\ \tau_1 &= \frac{1}{\omega} \Delta\alpha_1; \\ \tau_2 &= \frac{1}{\omega} \Delta\alpha_2; \\ \dots &\dots \\ \tau_i &= \frac{1}{\omega} \Delta\alpha_i. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Таким образом, вентильный преобразователь может рассматриваться как параллельное соединение генератора периодической симметричной э. д. с. $e_c(t)$, гармонический состав которой остается неизменным [Л. 12]

$$E_{ck} = \frac{2}{(km)^2 - 1} \sqrt{1 + (km)^2 \tan^2 \alpha_{\min}}, \quad (7)$$

где E_{ck} — амплитуда k -й гармоники;
 E_{co} — постоянная составляющая $e_c(t)$:

$$E_{co} = E_{\phi, \max} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha_{\min}, \quad (8)$$

и генератора однополярных широтно-модулированных импульсов. Если считать, что отклонения $\Delta\alpha(t)$ невелики, то можно принять амплитуду импульсов постоянной и равной

$$E_u = -2E_{\phi, \max} \sin \frac{\pi}{m} \sin \alpha_{\min}. \quad (9)$$

В этом случае вентильный преобразователь может быть представлен звеном с однополярной широтно-импульсной модуляцией второго рода, уравнения которого имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} e_u(t) &= E_u \text{ при } iT < t < (i + \gamma_i)T; \\ e_u(t) &= 0 \text{ при } (i + \gamma_i)T < t < (i + 1)T; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\gamma_i = \gamma [T(i + \gamma_i)], \quad (11)$$

где γ_i — относительная продолжительность i -го импульса;

$$\gamma_i = \frac{1}{\omega T} \Delta\alpha_i. \quad (12)$$

Непосредственное определение частотной характеристики звена с широтно-импульсной модуляцией второго рода встречает затруднение, состоящее в том, что продолжительность i -го импульса, как следует из формулы (11), является неявной функцией дискретного времени iT . Немногочисленные работы, в которых затрагивается этот вопрос, ограничиваются рассмотрением звена с широтно-импульсной модуляцией первого рода, для которого вместо уравнения (11) справедливо такое выражение:

$$\gamma_i = \gamma(Ti). \quad (13)$$

В одной из этих работ [Л. 13] получены выражения частотных спектров звена широтно-импульсной модуляции первого рода, однако, они справедливы

лишь для рациональных соотношений между частотой возмущающего сигнала и частотой повторения импульсного модулятора, а также не учитывают возможности изменения фазы сигнала.

Ниже будет приведена частотная характеристика звена широтно-импульсной модуляции первого рода для общего случая гармонического возмущающего сигнала и затем установлена связь между частотными характеристиками звеньев широтно-импульсной модуляции первого и второго рода.

С учетом выражения (4) примем сигнал, действующий на звено широтно-импульсной модуляции первого рода в форме, изображенной на рис. 2,а:

$$\gamma = \gamma_{\max} [1 + \sin(\Omega t + \varphi)]; \quad (14)$$

тогда

$$\gamma_i = \gamma_{\max} [1 + \sin(2\pi\nu i + \varphi)], \quad (15)$$

где ν — относительная частота управляющего сигнала;

$$\nu = \frac{\Omega}{m\omega}. \quad (16)$$

Комплексный коэффициент для 1-й гармоники выходного сигнала $e_{ii}(t)$ может быть вычислен по следующей формуле:

$$\begin{aligned} C_1 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi n} \sum_{i=1}^{2\pi} \int_{2\pi i}^{2\pi(i+1)} E_u e^{j\Omega t} d\Omega t = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2E_u}{\pi n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{\nu}} \sin \pi\nu \gamma_i e^{j\pi\nu \left(i + \frac{\gamma_i}{2}\right)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Учитывая, что

$$\gamma_i \ll 1, \sin \pi\nu \gamma_i \approx \pi\nu \gamma_i, \cos \pi\nu \gamma_i \approx 1,$$

преобразуем равенство (17) к такому виду

$$\begin{aligned} C_1 &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2E_u}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i (\cos 2\pi\nu i + j \sin 2\pi\nu i + \\ &\quad + j\pi\nu \gamma_i \cos 2\pi\nu i - \pi\nu \gamma_i \sin 2\pi\nu i), \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$N = \frac{n}{\nu}. \quad (19)$$

Подставив равенство (15) в выражение (18), получим:

$$\begin{aligned} C_1 &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2E_u \gamma_{\max}}{N} \sum_{i=1}^N [(1 + j\pi\nu \gamma_{\max}) (\cos 2\pi\nu i + \\ &\quad + j \sin 2\pi\nu i) + (1 + 2j\pi\nu \gamma_{\max}) (\cos \varphi + j \sin \varphi) \sin 2\pi\nu i \times \\ &\quad \times \cos 2\pi\nu i + (1 + 2j\pi\nu \gamma_{\max}) (j \cos \varphi \sin^2 2\pi\nu i + \\ &\quad + \sin \varphi \cos^2 2\pi\nu i) + j\pi\nu \gamma_{\max} \cos \varphi (\cos \varphi + 2j \sin \varphi) \times \\ &\quad \times \sin^2 2\pi\nu i \cos 2\pi\nu i - \pi\nu \gamma_{\max} (\sin \varphi - 2j \cos \varphi) \times \\ &\quad \times \sin 2\pi\nu i \cos^2 2\pi\nu i - \pi\nu \gamma_{\max} \cos^2 \varphi \sin^3 2\pi\nu i + \\ &\quad + j\pi\nu \gamma_{\max} \sin^2 \varphi \cos^3 2\pi\nu i]. \end{aligned} \quad (20)$$

В диапазоне частот $0 \leq v \leq \frac{1}{2}$ справедливы следующие равенства:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin 2\pi\nu i = 0;$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin^2 2\pi\nu i = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{при } v \neq \frac{1}{2}; \\ 0 & \text{при } v = \frac{1}{2}; \end{cases}$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos 2\pi\nu i = 0;$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos^2 2\pi\nu i = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{при } v \neq \frac{1}{2}; \\ 1 & \text{при } v = \frac{1}{2}; \end{cases}$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin 2\pi\nu i \cos 2\pi\nu i = 0;$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin^2 2\pi\nu i \cos 2\pi\nu i = \begin{cases} 0 & \text{при } v \neq \frac{1}{3}; \\ -\frac{1}{4} & \text{при } v = \frac{1}{3}; \end{cases}$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin 2\pi\nu i \cos^2 2\pi\nu i = 0;$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin^3 2\pi\nu i = 0;$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos^3 2\pi\nu i = \begin{cases} 0 & \text{при } v \neq \frac{1}{3}; \\ \frac{1}{4} & \text{при } v = \frac{1}{3}. \end{cases}$$

С учетом равенств (21) получим для $v \neq \frac{1}{2}$:

$$C_1 = E_u \gamma_{\max} (1 + j2\pi\nu \gamma_{\max}) (\sin \varphi + j \cos \varphi), \quad (22)$$

откуда 1-я гармоническая составляющая $e_{ii}(t)$ будет равна:

$$e_{ii}(t) = \frac{E_u \gamma_{\max}}{\cos \delta} \sin(\Omega t + \varphi - \delta), \quad (23)$$

где δ — фазовый сдвиг по отношению к входному сигналу

$$\delta = \operatorname{arctg} 2\pi\nu \gamma_{\max} \approx 2\pi\nu \gamma_{\max}. \quad (24)$$

Запаздывание выходного сигнала с учетом выражений (3) и (16) составит:

$$\tau = \frac{\delta}{\Omega} = T \gamma_{\max}, \quad (25)$$

т. е. будет равно средне-статистической продолжительности импульсов $e_{ii}(t)$.

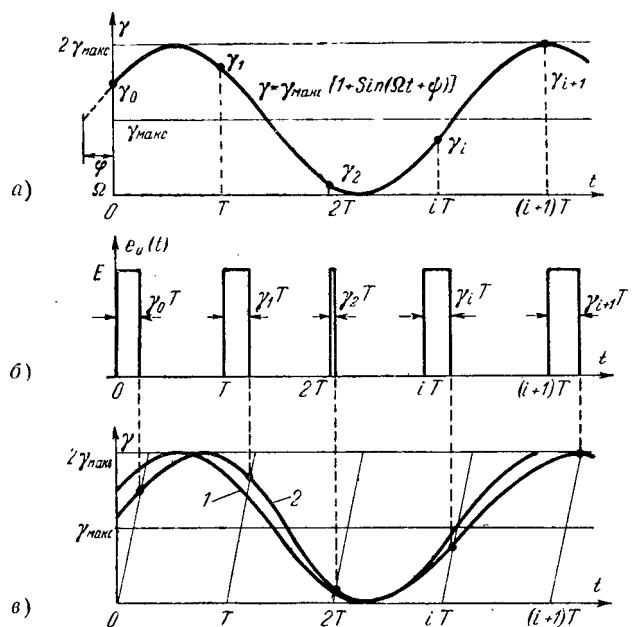


Рис. 2. К определению частотных характеристик звеньев широтно-импульсной модуляции первого и второго рода.

a — входной сигнал звена первого рода; **b** — выходной сигнал; **c** — входные сигналы звена модуляции первого рода (кривая 1) и второго рода (кривая 2), обеспечивающие одинаковые выходные сигналы; γ — относительная продолжительность импульса; $e_{ii}(t)$ — импульсная э. д. с.

При $v = \frac{1}{2}$, что соответствует граничной частоте, на основании равенств (20) и (21) получим:

$$C_1(v = \frac{1}{2}) = 2E_{ii}\gamma_{\max} (1 + j2\pi v \gamma_{\max} \sin \varphi), \quad (26)$$

откуда при $v = \frac{1}{2}$

$$e_{ii}(v = \frac{1}{2})(t) = \frac{2E_{ii}\gamma_{\max} \sin \varphi}{\cos \delta} \sin(\Omega t + \varphi - \delta). \quad (27)$$

Как следует из выражения (27), амплитуда 1-й гармоники выходного сигнала при граничной частоте зависит от фазы управляющего сигнала.

При частоте $v = \frac{1}{3}$ наблюдается особый режим:

$$\begin{aligned} C_1 &= 2E_{ii}\gamma_{\max} \left[\frac{1}{2} (1 + j2\pi v \gamma_{\max}) (\sin \varphi + j \cos \varphi) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{4} j\pi v \gamma_{\max} \cos \varphi (\cos \varphi + 2j \sin \varphi) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} j\pi v \gamma_{\max} \sin^2 \varphi \right] = E_{ii}\gamma_{\max} [(1 + j2\pi v \gamma_{\max}) \times \\ &\quad \times (\sin \varphi + j \cos \varphi) + \frac{\pi v \gamma_{\max}}{2} (\sin 2\varphi - j \cos 2\varphi)], \quad (28) \end{aligned}$$

откуда

$$e_{ii}(t) = \frac{E_{ii}\gamma_{\max}}{\cos \varphi} \sin(\Omega t + \varphi - \psi), \quad (29)$$

где

$$\psi = \varphi - \operatorname{arctg} \frac{\sin \varphi - \frac{2}{3} \pi \gamma_{\max} \cos \varphi + \frac{1}{3} \pi \gamma_{\max} \sin 2\varphi}{\cos \varphi + \frac{2}{3} \pi \gamma_{\max} \sin \varphi - \frac{1}{3} \pi \gamma_{\max} \cos 2\varphi}. \quad (30)$$

В этом режиме значение ψ изменяется в зависимости от фазы входного сигнала φ в пределах от $0,75\delta$ до $1,25\delta$, а среднее его значение, равное $\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\varphi) d\varphi$, по-прежнему определяется на основании равенства (24).

Установив, таким образом, что звено широтно-импульсной модуляции первого рода в диапазоне частот $0 \leq v \leq \frac{1}{2}$ вносит постоянное запаздывание, вычисляемое по формуле (25), найдем связь между частотными характеристиками звеньев широтно-импульсной модуляции первого и второго рода. На рис. 2, в кривая 2, определяемая по выражению

$$\gamma = \gamma_{\max} \{1 + \sin [\Omega(t + \gamma T) + \varphi]\}, \quad (31)$$

характеризует входной сигнал звена широтно-импульсной модуляции второго рода, при котором последовательность выходных импульсов оказывается такой же, как и при воздействии гармонического сигнала вида (14) на звено широтно-импульсной модуляции первого рода. Нетрудно видеть, что поскольку кривая 2 является симметричной функцией относительно точек A и B , первая гармоника этой кривой отстает от гармонического сигнала (кривая 1) на интервал времени $\gamma_{\max} T$, т. е. на такую же величину, как и сдвиг по отношению к этой кривой 1-й гармоники последовательности импульсов $e_{ii}(t)$. Таким образом, преобразователь, как дискретно-управляемое устройство, не дает фазового сдвига, т. е. до граничной частоты $v = \frac{1}{2}$ он является безынерционным.

Полученные результаты имеют определенную физическую интерпретацию. Звено широтно-импульсной модуляции первого рода во время выдачи выходного импульса перестает получать информацию со стороны входного сигнала, чем и объясняется запаздывание этого звена на время, равное среднестатистической продолжительности импульсов. В отличие от этого, у звена широтно-импульсной модуляции второго рода такой потери информации нет, благодаря чему оно и оказывается безынерционным.

Здесь уместно заметить, что в работах [Л. 9, 10, 11 и 14] преобразователь рассматривается не как звено широтно-импульсной модуляции второго рода, а как звено с амплитудно-импульсной модуляцией, причем производится усреднение импульсов за период. Особенно наглядно это видно в работе [Л. 11], где преобразователь представляется в виде фиксирующей цепи нулевого порядка [Л. 15 и 16], т. е. фактический сигнал в преобразователе заменяется ступенчатой функцией с периодом T . Естественно, при таком подходе нельзя ожидать иного результата, кроме запаздывания выходного сигнала на время $\frac{T}{2}$.

Установив, что дискретность управления вентильным преобразователем в режиме малых отклонений угла регулирования не вносит инерции при частотах воздействия ниже граничной, рассмотрим случай гармонического входного сигнала любой

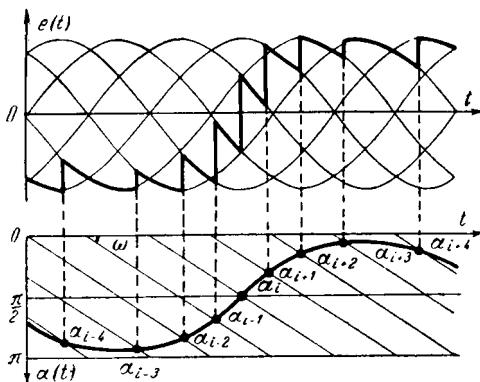


Рис. 3. Процессы в m -фазном вентильном преобразователе при гармоническом входном сигнале большой амплитуды.

$e(t)$ — э. д. с. преобразователя; $\alpha(t)$ — угол управления.

амплитуды и частоты при колебаниях угла регулирования вокруг значения $\frac{\pi}{2}$:

$$\alpha(t) = \frac{\pi}{2} + \Delta\alpha_{\max} \sin \Omega t. \quad (32)$$

Поскольку соотношение между частотами $m\omega$ и Ω произвольно, наступит момент времени, при котором $\alpha_i = \frac{\pi}{2}$, как показано на рис. 3. Приняв этот мо-

мент за начало отсчета времени, можно заметить, что в силу симметрии графика э. д. с. преобразователя относительно этой точки косинусные составляющие при разложении $e(t)$ в ряд Фурье отсутствуют:

$$a_n = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{E_{\Phi, \max}}{2\pi N} \sum_{k=-\frac{2\pi N}{\Omega T}}^{\frac{2\pi N}{\Omega T}} \int_{-\frac{2\pi N}{\Omega T}}^{\frac{2\pi N}{\Omega T}} \sin \omega t \cos k \Omega t d\Omega t = 0. \quad (33)$$

Таким образом, и при больших отклонениях угла регулирования вентильный преобразователь не вносит запаздывания из-за дискретности управления вплоть до граничной частоты.

Резюмируя анализ вентильного преобразователя как дискретного устройства, отметим, что замкнутая система регулирования с преобразователем не может пропустить сигналы с частотами, превышающими граничную. Попытка превзойти эту частоту, приводит к возникновению автоколебаний [Л. 6]*. Таким образом, в замкнутой системе регулирования с вентильным преобразователем и устойчивой линейной частью частота автоколебаний, обусловленных дискретностью управления, не может быть ниже граничной частоты $\frac{m\omega}{2}$.

Преобразователь как непрерывное устройство. Рассмотрев вентильный преобразователь как дискретно управляемое устройство при наличии ограничения (2), проанализируем его вторую особен-

ность, связанную с невозможностью запереть вентиль воздействием на канал управления. Учитывая, что при этом в соответствии с принятой методикой $t = \infty$ и полагая аркосинусоидальность регулировочной характеристики системы управления, получим статическую характеристику преобразователя в следующем виде:

$$\bar{e} = \bar{e}_{\max} \operatorname{sat} \left[\frac{\bar{x}}{\bar{e}_{\max}} \right] = \begin{cases} \bar{e}_{\max} & \text{при } \bar{e}_{\max} < \bar{x} < \infty; \\ \bar{x} & \text{при } -\bar{e}_{\max} < \bar{x} < \bar{e}_{\max}; \\ -\bar{e}_{\max} & \text{при } -\infty < \bar{x} < -\bar{e}_{\max}, \end{cases} \quad (34)$$

где $\bar{e} = \frac{e}{E_{\Phi, \max}}$ — относительная э. д. с. преобразователя;

\bar{e}_{\max} — максимальная относительная э. д. с. преобразователя при симметричном ограничении диапазона управления; \bar{x} — относительный сигнал управления.

Динамическая характеристика преобразователя

$$\bar{e}(t) = f[\bar{x}(t)] \quad (35)$$

описывается следующими выражениями:

$$\bar{e}(t) = \bar{e}_{\max} \operatorname{sat} \left[\frac{\bar{x}(t)}{\bar{e}_{\max}} \right] \quad (36)$$

при

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} \geq -\omega \sqrt{1 - [\bar{x}(t)]^2} \quad (37)$$

и

$$\bar{e}(t) = \cos(\omega t + \arccos \bar{e}_0) \quad (38)$$

при

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} \leq -\omega \sqrt{1 - [\bar{x}(t)]^2} \quad (39)$$

либо при

$$\bar{x}(t) < \bar{e}(t), \quad (40)$$

где \bar{e}_0 — начальное значение выходной величины, при котором происходит нарушение неравенства (37).

Эта особенность динамики преобразователя иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 4. В момент t_1 (или t_3) скорость снижения управляющего сигнала превышает критическую величину

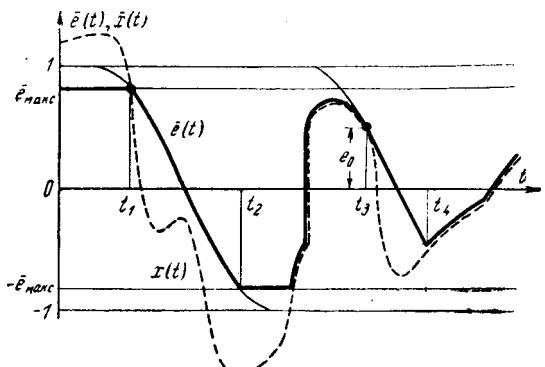


Рис. 4. Процессы в вентильном преобразователе при $t = \infty$.

$\bar{x}(t)$ — относительный сигнал управления; $\bar{e}(t)$ — относительная э. д. с. преобразователя.

(37), и выходной сигнал уменьшается по косинусоидальному закону (38) до момента t_2 (или t_4).

Хотя при этом на отдельных участках характеристики величина $\frac{d\bar{x}(t)}{dt}$ может быть ниже критической (и даже положительной) тем не менее процесс $\bar{e}(t)$ идет вне зависимости от закона изменения управляющего сигнала, поскольку сохраняется условие (40). Очевидно максимальное время несоответствия между $\bar{e}(t)$ и $\bar{x}(t)$ не может превышать полуperiода питающего напряжения (при $\bar{e}_{\max} = 1$), т. е. 0,01 сек.

Отмеченное свойство динамики преобразователя наиболее отчетливо проявляется при включении его в замкнутую систему автоматического регулирования, как показано на рис. 5,а. Если даже положить, что линейная часть $W_L(p)$ соответствует устойчивой системе, тем не менее при определенных условиях в ней могут возникнуть автоколебания, вызванные тем, что преобразователь будет вносить в систему дополнительную инерцию из-за несоответствия на некоторых участках процесса между входным и выходным сигналами.

Используя принцип гармонического баланса, определим условия, необходимые для существования симметричных автоколебаний с частотой Ω в такой системе, предположив, что она является астатической, либо обладает высоким статическим коэффициентом усиления. В этом случае в установившемся режиме автоколебаний постоянная составляющая выходной э. д. с. преобразователя будет отсутствовать. Входной сигнал $\bar{x}(t)$ благодаря фильтрующему действию линейной части системы может быть представлен в виде суммы гармонической и постоянной составляющей \bar{x}_0 , как показано на рис. 5,б. Время τ_1 в соответствии с выражением (38) будет равно:

$$\tau_1 = \frac{\pi - 2 \arccos \bar{e}_{\max}}{\omega}. \quad (41)$$

Учитывая, что амплитуда колебаний $\bar{x}_{\max} \gg 1$, участок CD можно принять линейным, откуда следует равенство интервалов насыщения BC и DE :

$$\tau_3 = \frac{2}{\Omega} \frac{\bar{e}_{\max}}{\bar{x}_{\max}}; \quad (42)$$

$$\tau_2 = \frac{\pi}{\Omega} - \frac{\tau_1 + \tau_3}{2} = \frac{\pi}{\Omega} \left[1 - \frac{\bar{e}_{\max}}{\pi \bar{x}_{\max}} - \frac{\Omega}{2\omega} \left(1 - \frac{2 \arccos \bar{e}_{\max}}{\pi} \right) \right]. \quad (43)$$

Из условия $\tau_2 > 0$ получим:

$$\frac{\Omega}{\omega} < \frac{2 - \frac{2}{\pi} \frac{\bar{e}_{\max}}{\bar{x}_{\max}}}{1 - \frac{2 \arccos \bar{e}_{\max}}{\pi}}, \quad (44)$$

откуда следует, что при любых соотношениях параметров частота этого вида автоколебаний не может превысить 2ω .

Поскольку кривая $\bar{e}(t)$ является нечетной функцией относительно точки M , принимаемой за начало отсчета времени, можно найти сдвиг по фазе θ между 1-й гармоникой $\bar{e}(t)$ и сигналом $\bar{x}(t)$ из соотношения:

Вологодская областная научная библиотека

$$\frac{\theta}{\Omega} + \frac{\tau_2 + \tau_3}{2} = \frac{\pi}{2\Omega}, \quad (45)$$

откуда с учетом выражений (42) и (43) получим:

$$\theta(\Omega, \bar{x}_{\max}) = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\Omega}{\omega} \left(1 - \frac{2 \arccos \bar{e}_{\max}}{\pi} \right) - \frac{2}{\pi} \frac{\bar{e}_{\max}}{\bar{x}_{\max}} \right]. \quad (46)$$

Это выражение является фазо-частотной характеристикой преобразователя. Нетрудно видеть, что предельно возможный фазовый сдвиг, вносимый преобразователем (при $\bar{e}_{\max} = 1$ и $\bar{x}_{\max} \rightarrow \infty$) соответствует фазовому сдвигу звена с чистым запаздыванием, равным $0,25 \frac{\pi}{\omega}$, т. е. 2,5 мсек. При ограничении диапазона колебаний $\bar{e}_{\max} < 1$ эта величина уменьшается в соответствии с выражением (46).

Амплитудно-частотная характеристика преобразователя определяется отношением амплитуды 1-й гармоники $\bar{e}(t)$ к амплитуде колебаний входного сигнала \bar{x}_{\max} :

$$\begin{aligned} A(\Omega, \bar{x}_{\max}) &= \frac{2}{\pi \bar{x}_{\max}} \int_0^{\frac{\Omega}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right)} \bar{e}(t) \sin \Omega t d\Omega t = \\ &= \frac{2}{\pi \bar{x}_{\max}} \left| \int_0^{\frac{\Omega}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right)} \sin \omega t \sin \Omega t d\Omega t + \right. \\ &\quad \left. \pi - \frac{\bar{e}_{\max}}{\bar{x}_{\max}} \right. \\ &+ \left. \int_{\frac{\Omega}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right)}^{\pi} \bar{e}_{\max} \sin \Omega t d\Omega t + \right. \\ &+ \left. \int_{\pi - \frac{\bar{e}_{\max}}{\bar{x}_{\max}}}^{\pi} (\pi - \Omega t) \frac{\bar{e}_{\max}}{\pi - \frac{\bar{e}_{\max}}{\bar{x}_{\max}}} \sin \Omega t d\Omega t \right]. \end{aligned}$$

После преобразований получим:

$$\begin{aligned} A(\Omega, \bar{x}_{\max}) &= \frac{2}{\pi} \left\{ \sin \frac{\bar{e}_{\max}}{\bar{x}_{\max}} + \frac{\bar{e}_{\max}}{\bar{x}_{\max}} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2} \times \right. \\ &\quad \times \left[\cos \frac{\Omega}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) - \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\Omega}{\omega} \frac{\sqrt{1 - \bar{e}_{\max}^2}}{\bar{e}_{\max}} \sin \frac{\Omega}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) \right] \right\}. \quad (47) \end{aligned}$$

Условия существования автоколебаний

$$\left. \begin{aligned} \theta(\Omega, \bar{x}_{\max}) + \beta(\Omega) &= \pi; \\ A(\Omega, \bar{x}_{\max}) B(\Omega) &= 1, \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \beta(\Omega) &= \arg W_L(j\Omega); \\ B(\Omega) &= |W_L(j\Omega)|, \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

дают возможность определить их частоту Ω и ам-

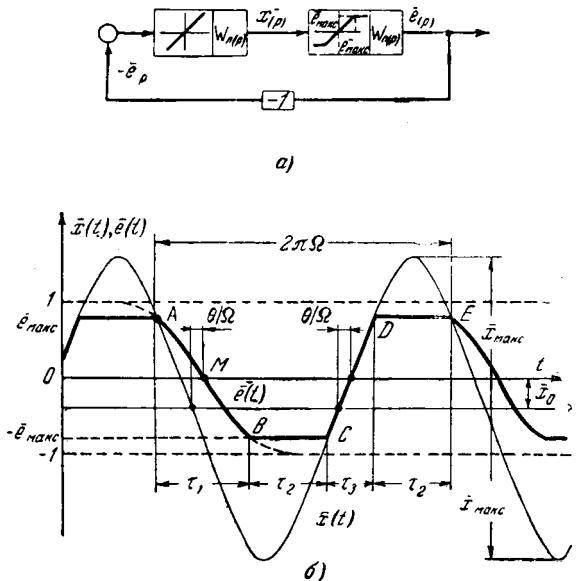


Рис. 5. К определению автоколебаний в замкнутой системе регулирования с вентильным преобразователем.

a — структурная схема замкнутой системы; *b* — автоколебательный процесс в системе; $W_{\text{л}}(p)$ — передаточная функция линейной части; $W_{\text{в}}(p)$ — передаточная функция преобразователя; $\bar{x}(t)$ — относительный сигнал на входе преобразователя; $e(t)$ — относительный выходной сигнал преобразователя.

плитуду \bar{x}_{\max} . Исключив из выражений (46) — (48) \bar{x}_{\max} , получим уравнение относительно Ω

$$\frac{2}{\pi} \left\{ \sin \left[2\beta(\Omega) + \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) \frac{\Omega}{\omega} \right] + \right. \\ + \frac{2\beta(\Omega) + \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) \frac{\Omega}{\omega} - 2\pi}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2} \times \\ \times \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) \frac{\Omega}{\omega} - \frac{\Omega}{\omega} \sqrt{1 - \bar{e}_{\max}^2} \right] \times \\ \left. \times \sin \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) \frac{\Omega}{\omega} \right\} B(\Omega) = 1, \quad (50)$$

графическое решение которого позволяет найти частоту искомых автоколебаний, после чего легко вычисляется и их амплитуда по формулам (48).

Пример.

$$W_{\text{л}}(p) = \frac{4\omega^2}{p(p + \frac{\omega}{2})}; B(\Omega) = \frac{8}{\frac{\Omega}{\omega} \sqrt{1 + 4 \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2}}; \\ \beta(\Omega) = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} 2 \frac{\Omega}{\omega}.$$

В соответствии с выражением (50) получим:

$$\frac{2}{\pi} \left\{ \sin \left[\pi + 2 \operatorname{arctg} 2 \frac{\Omega}{\omega} + \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) \frac{\Omega}{\omega} \right] + \right. \\ + \frac{2 \operatorname{arctg} 2 \frac{\Omega}{\omega} + \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) \frac{\Omega}{\omega} - \pi}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2} \times$$

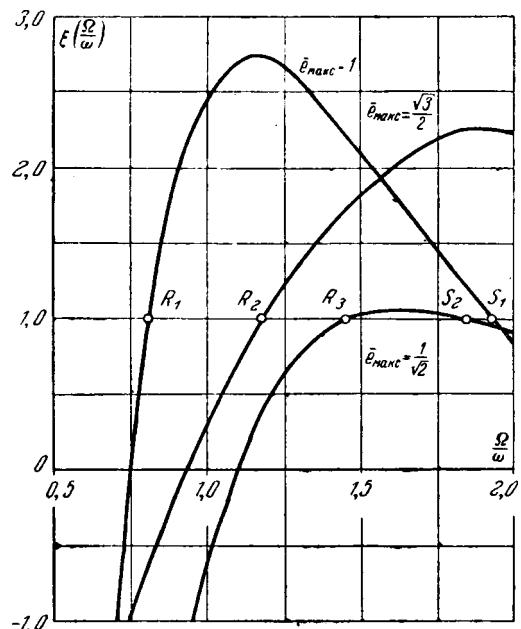


Рис. 6. Графическое определение частоты автоколебаний в замкнутой системе регулирования с вентильным преобразователем при

$$W_{\text{л}}(p) = \frac{4\omega^2}{p \left(p + \frac{\omega}{2} \right)}.$$

$$\times \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) \frac{\Omega}{\omega} - \frac{\Omega}{\omega} \sqrt{1 - \bar{e}_{\max}^2} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \bar{e}_{\max} \right) \frac{\Omega}{\omega} \right] \} \frac{8}{\frac{\Omega}{\omega} \sqrt{1 + 4 \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2}} = 1. \quad (51)$$

Функция $\xi \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)$, представляющая левую часть равенства (51), рассчитана и построена на рис. 6 для трех значений \bar{e}_{\max} , равных 1, $\frac{\sqrt{3}}{2}$ и $\frac{1}{\sqrt{2}}$, соответствующих диапазонам изменения угла регулирования 180, 120 и 90°. Равенство (51) соблюдается при двух значениях частоты. Автоколебания, соответствующие меньшим частотам (точки R_1, R_2, R_3), следовательно, большим амплитудам \bar{x}_{\max} , являются устойчивыми. Наличие точек неустойчивых автоколебаний (S_1, S_2) свидетельствует о том, что система регулирования в режиме малых отклонений устойчива. Лишь при достаточно больших возмущениях, превосходящих неустойчивый внутренний цикл, в системе устанавливаются автоколебания, соответствующие устойчивому внешнему циклу. Процесс возникновения автоколебаний в такой системе иллюстрируется осциллограммой, изображенной на рис. 7.

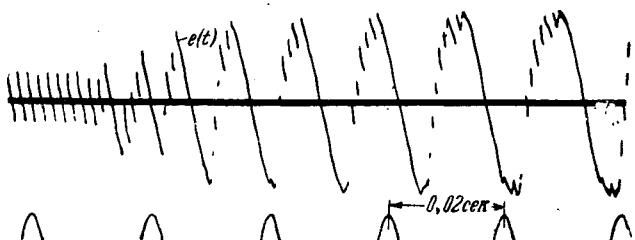


Рис. 7. Процесс возникновения автоколебаний в замкнутой системе регулирования с вентильным преобразователем и устойчивой линейной частью.

Ограничение диапазона изменения напряжения преобразователя (рис. 6) уменьшает склонность системы к автоколебаниям. В данном примере при дальнейшем уменьшении этого диапазона устойчивые автоколебания в системе не смогут возникнуть.

Выводы

1. В режимах малых отклонений угла управления преобразователь является звеном однополярной широтно-импульсной модуляции второго рода, а не звеном амплитудно-импульсной модуляции, как это представляется в некоторых работах.

2. Вентильный преобразователь как дискретно-управляемое устройство является безынерционным звеном вплоть до граничной частоты $\frac{m\omega}{2}$. В замкнутой системе регулирования с вентильным преобразователем и устойчивой линейной частью частота автоколебаний, вызванных дискретностью управления, не может быть ниже этой граничной частоты.

3. Неполная управляемость вентильного преобразователя, связанная с невозможностью запереть открытый вентиль воздействием на цепь управления, приводит при определенных условиях к несоответствию в переходных процессах между входным и выходным сигналами преобразователя и, как следствие этого, к возможности автоколебательных режимов в замкнутых системах регулирования. Частота этого вида автоколебаний не может превысить 2ω .

Литература

- Булгаков А. А., Электронные устройства автоматического управления, Госэнергоиздат, 1958.
- Булгаков А. А., Основы динамики управляемых вентильных систем, Изд-во АН СССР, 1963.

3. Гуткин Б. М., Ионный электропривод постоянного тока, изд-во «Энергия», 1965.

4. Шипилло В. П., Системы сеточного управления ртутными выпрямителями для автоматических электроприводов, Госэнергоиздат, 1961.

5. Шипилло В. П., Сирица В. В. и Булатов О. Г., Электромагнитные процессы в быстродействующем реверсивном ионном преобразователе, Госэнергоиздат, 1963.

6. Вягестен Н. А., The Static Converter as a High-Speed Power Amplifier, Direct Current, 1963, v. 8, № 6, p. 154—165.

7. Каган В. Г., Динамика автоматизированных электроприводов постоянного тока с большим диапазоном регулирования скорости, Диссертация, Новосибирский электротехнический институт, 1964.

8. Лебедев А. М., Общие вопросы динамики широкорегулируемого тиристорного привода, Материалы семинара «Управляемые кремниевые вентили (тиристоры) в электроприводе и промышленной автоматике», Л., 1966.

9. Jotter R., Die Berechnung einfacher und mehrfach integrierender Regelkreise der Antriebstechnik, AEG Mitt., 1962, № 5/6.

10. Данюшевская Е. Ю., Бернштейн И. Я. и Расскин Л. Д., Преобразователи на тиристорах в системах регулируемого электропривода постоянного и переменного тока, Труды IV Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу, изд-во «Энергия», 1966.

11. Seefried E., Zum Übertragungsverhalten des m-pulsigen, gittergesteuerten Gleichrichters, Ztschr. 1965, № 11.

12. Каганов И. Л., Электронные и ионные преобразователи, ч. III, Госэнергоиздат, 1956.

13. Печорина И. Н., Устойчивость импульсных систем автоматического регулирования с широтной модуляцией, Известия АН СССР, ОГН, Энергетика и автоматика, 1960, № 2.

14. Badal J., Porov P., Tyristorový měnič jako impulsní systém, «Elektrotechnický Obzor», 1966, № 8.

15. Цыпкин Я. З., Теория линейных импульсных систем, Физматгиз, 1963.

16. Джурин Э., Импульсные системы автоматического регулирования, пер. с англ., Физматгиз, 1963.

[8.12.1966]



УДК 62-50

Экстремальное управление главным приводом обжимного прокатного стана

К. И. КОЖЕВНИКОВ

Ростов-на-Дону

При проектировании и эксплуатации главных приводов обжимных станов много внимания уделяется разработке способов уменьшения нагрева двигателей с целью увеличения производительности стана [Л. 1—4]. Одним из таких способов является применение экстремального управления. Сущность экстремального управления заключается в том, что перед каждым пропуском регуляторы привода настраиваются при помощи вычислительной машины таким образом, что прокатка выполняется при рациональном режиме, который обеспечивает минимально возможный нагрев двигателей.

В настоящей статье рассмотрена эффективность экстремального управления, приведена блок-схема алгоритма работы вычислительной машины и определены электромеханические характеристики прокатных двигателей, которые обеспечивают реализа-

цию экстремального управления. При этом полагаем заданными: механические данные прокатной клети, номинальные параметры двигателей главного привода, скорость захвата, статический момент прокатки для скорости захвата, длину проката после пропуска, характеристики прокатываемого металла и продолжительность холостого хода клети. Считаем, что скорость выброса равна максимальной скорости прокатки. Благодаря этому представляется возможность оценить влияние скорости выброса на работу двигателей в системе экстремального управления.

В математических выкладках используются относительные единицы и следующие символы:

$$\tau = \frac{t}{B_n} \text{ — время;}$$

$B_n = \frac{GD^2 n_n}{375 M_n}$ — электромеханическая постоянная времени привода, сек;

$\alpha = \frac{A}{A_n}$ — угол, отработанный валом двигателя;

$A_n = \frac{B_n n_n}{60}$ — угловая постоянная привода;

$i = \frac{I}{I_n}$ — ток якоря двигателя;

I_n — номинальный ток, а;

$j = \frac{I_d}{I_n}$ — динамический ток якоря;

$\mu = \frac{M}{M_n}$ — момент;

M_n — номинальный момент, кГ·м;

$v = \frac{n}{n_n}$ — угловая скорость вращения двигателя;

n_n — номинальная скорость, об/мин;

$\Delta \epsilon = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta P_n B_n}$ — потеря энергии в обмотке якоря двигателя;

ΔP_n — потеря мощности в обмотке якоря при номинальном токе, вт.

Используемые ниже индексы п, у, с, о соответствуют периодам прокатки, ускорения, установившегося движения и холостого хода клети. Все величины в двухдвигательном приводе относятся к одному двигателю.

Экстремальное управление напряжением якоря. При этом управлении магнитный поток прокатных деталей остается неизменным и равным номинальному, поэтому $i = \mu$.

Показатели режима работы двигателей. Положим, что диаграмма тока якоря двигателя в период прокатки имеет произвольную форму (рис. 1, а). Для анализа режима работы двигателя воспользуемся известным методом [Л. 5].

Максимальная скорость двигателя v_m . Углы, отработанные валом двигателя, равны:

$$\alpha_y = \int_0^{\tau_y} v d\tau = v_m \tau_y - T_y (v_m - v_{3x});$$

$$\alpha_c = v_m \tau_c;$$

$$\alpha_n = \alpha_y + \alpha_c = v_m (\tau_n - \tau_y) + v_{3x} \tau_y.$$

Из последнего равенства получим:

$$v_m = \frac{\frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{3x} \alpha_y (1 - y)}{1 - \alpha_y (1 - y)}, \quad (1)$$

где

$$\alpha_y = \frac{T_y}{\tau_y},$$

$$y = \frac{\tau_c}{\tau_n},$$

T_y — абсцисса центра тяжести площади фигуры, образованной диаграммой динамического тока якоря;

v_{3x} — скорость захвата.

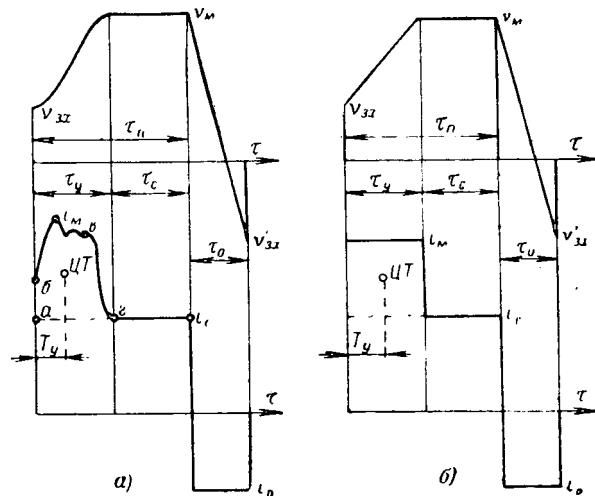


Рис. 1.

Максимальный ток якоря i_m . Из уравнений движения

$$j = i - i_c = \frac{dy}{d\tau}$$

находим:

$$v_m = v_{3x} + \int_0^{\tau_y} j d\tau = v_{3x} + j_m \tau_y \xi_y.$$

Подставив сюда значение v_m из формулы (1) и используя соотношение

$$\tau_y = \tau_n (1 - y),$$

получим:

$$i_m = i_c + j_m = i_c + \frac{\frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{3x}}{\xi_y (1 - y) [1 - \alpha_y (1 - y)] \tau_n}, \quad (2)$$

где ξ_y — коэффициент заполнения диаграммы динамического тока якоря, т. е. отношение между средним и максимальным значениями динамического тока;

i_c — средний за время прокатки статический ток якоря.

Потеря энергии в обмотке якоря. Потеря энергии за время прокатки равна:

$$\Delta \epsilon_n = \int_0^{\tau_n} i^2 d\tau = \int_0^{\tau_n} j^2 d\tau + 2i_c \int_0^{\tau_n} j d\tau +$$

$$+ i_c^2 \tau_n = \frac{(v_m - v_{3x})^2}{\tau_y} \gamma_y^2 + 2i_c (v_m - v_{3x}) + i_c^2 \tau_n.$$

Воспользовавшись соотношениями (1) и (2), получим:

$$\Delta \epsilon_n = \frac{\left(\frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{3x} \right)^2 \gamma_y^2}{(1 - y) [1 - \alpha_y (1 - y)]^2 \tau_n} +$$

$$+ \frac{2i_c \left(\frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{3x} \right)}{1 - \alpha_y (1 - y)} + i_c^2 \tau_n, \quad (3)$$

где γ_y — коэффициент формы диаграммы динамического тока якоря, т. е. отношение между эквивалентным и средним значениями динамического тока.

Потеря энергии за время холостого хода клети составляет:

$$\Delta \varepsilon_0 = \frac{(v_m + v'_{ax})^2}{\tau_0}, \quad (4)$$

где v_{ax} — скорость захвата в следующем пропуске (абсолютное значение).

Таким образом, потеря энергии за время $\tau_n + \tau_0$ будет равна:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_n + \Delta \varepsilon_0.$$

Средний за время прокатки статический момент определяется следующим образом:

$$\mu_c = \frac{\int_0^{\tau_n} \mu_{cv} dt}{\tau_n}. \quad (5)$$

Согласно данным, приводившимся ранее [Л. 6 и 7]

$$\frac{\sigma_{sv}}{\sigma_{sax}} = \left(\frac{v}{v_{ax}} \right)^\phi \approx \frac{\mu_{cv}}{\mu_{c,ax}}, \quad (6)$$

где μ_{cv} и σ_{sv} — статический момент и предел текучести проката, соответствующие скорости v ;

$\mu_{c,ax}$, σ_{sax} — то же, но при скорости v_{ax} ;

ϕ — показатель степени, зависящий от относительного обжатия, марки прокатываемой стали, ее температуры.

При рассматриваемых здесь режимах прокатки отношение $\frac{v}{v_{ax}}$ лежит в пределах от 1 до 6, а по-

казатель степени ϕ значительно меньше единицы¹, поэтому в формуле (5) можно с погрешностью, не превышающей 2—4%, использовать линеаризованную зависимость (6). Учитывая это, получим:

$$\frac{\mu_c}{\mu_{c,ax}} = \left(\frac{v_{cp}}{v_{ax}} \right)^\phi, \quad (7)$$

где $v_{cp} = \frac{a_n}{\tau_n}$ — средняя скорость за время прокатки.

Средний за время прокатки статический ток якоря будет равен:

$$\frac{i_c}{i_{c,ax}} = \frac{\mu_c}{\mu_{c,ax}} = \left(\frac{v_{cp}}{v_{ax}} \right)^\phi. \quad (8)$$

Критический режим прокатных двигателей. Для современных главных приводов, работающих с высокими статистическими моментами [Л. 4 и 8], наиболее выгодная форма диаграммы динамического тока близка к прямоугольной. В связи с этим рассмотрим критический режим и его эффективность для диаграммы тока, представленной на рис. 1,б ($a_y=0,5$; $y_f=1$).

¹ Например, ϕ для хромомарганцевой стали 16MnCr5 при $1100^\circ C$ и $\frac{\Delta h}{h} = 5-20\%$ равно 0,127—0,136 [Л. 6 и 7]; по данным Симса [Л. 7] для малоуглеродистой стали (0,17% С) при $1000-1100^\circ C$ и $\frac{\Delta h}{h} = 10-25\%$, $\phi = 0,06-0,17$.

При помощи формул (1)–(3) найдем:

$$v_m = \frac{2 \frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{ax} (1-y)}{1+y}; \quad (9)$$

$$i_n = i_c + \frac{2 \left(\frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{ax} \right)}{(1-y^2) \tau_n}; \quad (10)$$

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{4 \left(\frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{ax} \right)^2}{(1-y)(1+y)^2 \tau_n} + \frac{4 i_c \left(\frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{ax} \right)}{1+y} + i_c^2 \tau_n. \quad (11)$$

Критический режим двигателей при управлении путем изменения напряжением якоря определим из условия минимума тепла, выделенного в обмотке якоря за период прокатки, полагая, что тепло, выделенное в период холостого хода клети, остается неизменным. Это положение оправдывается тем, что минимизация подвергается главная составляющая тепла (90—95%), а небольшая ее часть (5—10%), соответствующая холостому ходу, при принятых исходных положениях действительно имеет неизменную составляющую. Вносимая таким образом погрешность в определении параметров критического режима не превышает допустимого предела.

Расчет нагрузки двигателей по нагреву выполняется с учетом всего тепла, выделенного в периоды прокатки и холостого хода.

При определении критического режима двигателей в качестве независимых переменных принимаются величины, которые могут изменяться посредством изменения настройки регуляторов привода.

Испытывая на экстремум зависимость $\Delta \varepsilon_n = (y, \tau_n)$, преобразованную при помощи уравнений (11) и (8) в такой вид

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{4 \left(\frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{ax} \right)^2}{(1-y)(1+y)^2 \tau_n} + \frac{4 i_{c,ax} \left(\frac{\alpha_n}{\tau_n v_{ax}} \right)^\phi \left(\frac{\alpha_n}{\tau_n} - v_{ax} \right)}{1+y} + i_{c,ax}^2 \left(\frac{\alpha_n}{\tau_n v_{ax}} \right)^{2\phi} \tau_n,$$

устанавливаем, что критические значения времени прокатки $\tau_{n,k}$ и соотношения y_k можно определить в результате совместного решения уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{(1-g\theta_{n,k})g^b}{\theta_{n,k}^{2-\phi}} &= \frac{(1-y_k)^2(1+y_k)}{3y_k-1} \\ \frac{\theta_{n,k}^{2-\phi}}{g^b} &= \frac{4}{(3y_k-1)\left\{1-\frac{4(1-y_k)^2}{(3y_k-1)^2}-\phi\left[2+\frac{4(1-y_k)^2}{3y_k-1}\right]\right\}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где

$$g = \frac{v_{ax}}{\sqrt{i_{c,ax} \alpha_n}}; \quad (13)$$

$$\theta_{n,k} = \tau_{n,k} \sqrt{\frac{i_{c,ax}}{\alpha_n}}. \quad (14)$$

Как видно, параметр g зависит только от показателей технологического процесса прокатки, а расчетная величина $\theta_{n,k}$ однозначно определяет критическое время прокатки.

Решение системы уравнений (12) упрощается тем, что y_k может принимать значения, лежащие в сравнительно узком диапазоне. Верхняя граница этого диапазона y_k — единица, а нижняя может быть

намечена, если рассмотреть теоретический случай $\psi=0$. Для этого случая определяющим является неравенство

$$\frac{4(1-y_k)^2(1+y_k)}{(3y_k-1)^2 \left[1 - \frac{4(1-y_k)^3}{(3y_k-1)^2} \right]} \leq 1,$$

которое выполняется при $y_k \geq -5 + \sqrt{32}$. Итак, диапазон значений y_k может быть оценен следующим образом: $0,66 \leq y_k \leq 1$.

Показатели критического режима работы двигателей определяются по следующим формулам, полученным в результате преобразования уравнений (9)–(11) после подстановки $\theta_{\text{п}} = \theta_{\text{п.к.}}$, $y = y_k$:

$$\begin{aligned} \frac{i_m}{i_{c,ax}} &= \frac{i_c}{i_{c,ax}} + \frac{i_y}{i_{c,ax}}, \\ \frac{i_c}{i_{c,ax}} &= \frac{1}{(g\theta_{\text{п}})^{\psi}}; \\ \frac{i_y}{i_{c,ax}} &= \frac{2(1-g\theta_{\text{п}})}{(1-y^2)\theta_{\text{п}}^2}; \\ \frac{v_m}{v_{ax}} &= 1 + \frac{(1-y)}{g} \cdot \frac{j_y}{i_{c,ax}} \theta_{\text{п}}; \\ \frac{\Delta e}{\sqrt{i_{c,ax}^3 \alpha_{\text{п}}}} &= \left[\left(\frac{i_m}{i_{c,ax}} \right)^2 (1-y) + \left(\frac{i_c}{i_{c,ax}} \right)^2 y \right] \theta_{\text{п}} + \\ &+ \frac{g^2}{\theta_0} \left(\frac{v_m}{v_{ax}} + \frac{v'_{ax}}{v_{ax}} \right)^2, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\theta_{\text{п}} = \tau_{\text{п}} \sqrt{\frac{i_{c,ax}}{\alpha_{\text{п}}}}; \quad \theta_0 = \tau_0 \sqrt{\frac{i_{c,ax}}{\alpha_{\text{п}}}}.$$

Влияние на работу прокатных двигателей отклонения их режима от критического. Рассмотрим группу пропусков на блюминге, для которых: $g=0,15$ (обычно $g=0,10-0,22$) и $\psi=0,14$. (Хромомарганцевая сталь 16MnCr5, относительное обжатие равно 5–20%, температура проката 1100°, $\theta_0=1,85$; $v_{ax}=v'_{ax}$. Решив систему уравнений (12), получим:

$$\theta_{\text{п.к.}}=2,2; \quad y_k=0,717.$$

На основании формул (15) определим показатели критического режима двигателей:

$$\begin{aligned} \frac{i_{c,k}}{i_{c,ax}} &= 1,168; \quad \frac{i_{m,k}}{i_{c,ax}} = 1,737; \\ \frac{v_{m,k}}{v_{ax}} &= 3,36; \quad \frac{\Delta e_k}{\sqrt{i_{c,ax}^3 \alpha_{\text{п}}}} = 4,23; \\ \tau_{\text{п.к.}} &= 2,2 \sqrt{\frac{\alpha_{\text{п}}}{i_{c,ax}}}. \end{aligned}$$

Работа двигателей при отклонении их режима от критического характеризуется свойствами поверхностей $\Delta e(y, \theta_{\text{п}})$, $i_m(y, \theta_{\text{п}})$ и $v_m(y, \theta_{\text{п}})$. Эти поверхности имеют простую форму, поэтому достаточно рассмотреть только линии пересечения каждой поверхности с двумя взаимно перпендикулярными плоскостями $y=y_k$ и $\theta_{\text{п}}=\theta_{\text{п.к.}}$.

На рис. 2 построены графики, иллюстрирующие влияние отклонения режима от критического на работу двигателей: на рис. 2, а — в зависимости от времени прокатки $t_{\text{п}}$ при $y=y_k$ и на рис. 2, б — в зависимости от соотношения y при $\theta_{\text{п}}=\theta_{\text{п.к.}}$. Работа

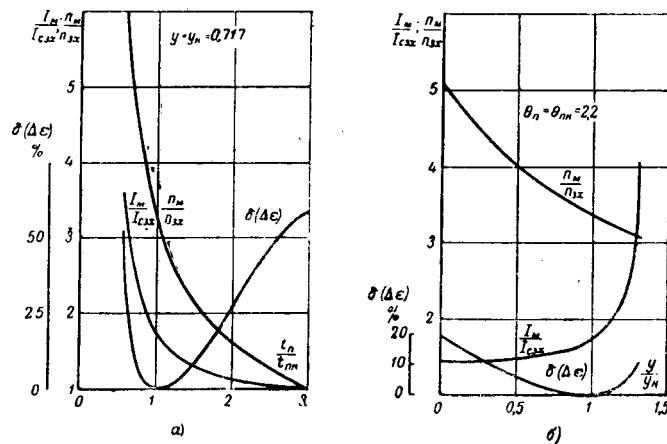


Рис. 2.

двигателей оценивается по следующим показателям:

$$\begin{aligned} \delta(\Delta e) &= \left(\frac{\Delta e}{\Delta e_k} - 1 \right) 100; \\ \frac{i_m}{i_{c,ax}} &= \frac{I_m}{I_{c,ax}}; \\ \frac{v_m}{v_{ax}} &= \frac{n_m}{n_{ax}}, \end{aligned}$$

где $\delta(\Delta e)$ — увеличение потери энергии (или количества тепла) в обмотке якоря, вызванное отклонением режима двигателей от критического.

Вычислительная машина для автоматической настройки регуляторов привода на рациональный режим. На рис. 3 изображена блок-схема алгоритма работы вычислительной машины для расчета рационального режима двигателей с управлением напряжением якоря, разработанная на основании формул (12) и (15). Перед каждым пропуском на вход машины вводятся показатели технологического процесса прокатки (сигналы настройки): статический момент $M_{c,ax}$, соответствующий скорости захвата; длина проката после пропуска $L_{\text{п}}$, катающий диаметр валков $D_{\text{п}}$; скорость захвата n_{ax} ; показатель степени ψ , определяющий закон изменения предела текучести.

Блоки 1, 2, 3 осуществляют пересчет показателей технологического процесса прокатки в относительные единицы с использованием неизменных для данного привода величин ($I_{\text{п}}$, $M_{\text{п}}$, $n_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$). Блоки 4 и 5 производят расчет параметров критического режима $\theta_{\text{п.к.}}$ и y_k . Блоки 6–9 определяют критические значения динамического тока $j_{y,k}$ и максимальной скорости $v_{m,k}$.

В отдельных случаях, когда реализация критического режима встречает препятствия (повышенные значения тока якоря, скорости двигателя, времени прокатки), корректирующее устройство вносит необходимые изменения в сигналы $j_{y,k}$, $v_{m,k}$ с минимальным повышением потери энергии в обмотке якоря. Таким образом, формируются наиболее выгодные сигналы $j_{y,b}$, $v_{m,b}$ настройки регуляторов привода. Программа работы корректирующего устройства устанавливается в результате анализа зависимостей $\Delta e(y, \theta_{\text{п}})$, $i_m(y, \theta_{\text{п}})$, $v_m(y, \theta_{\text{п}})$ (рис. 2).

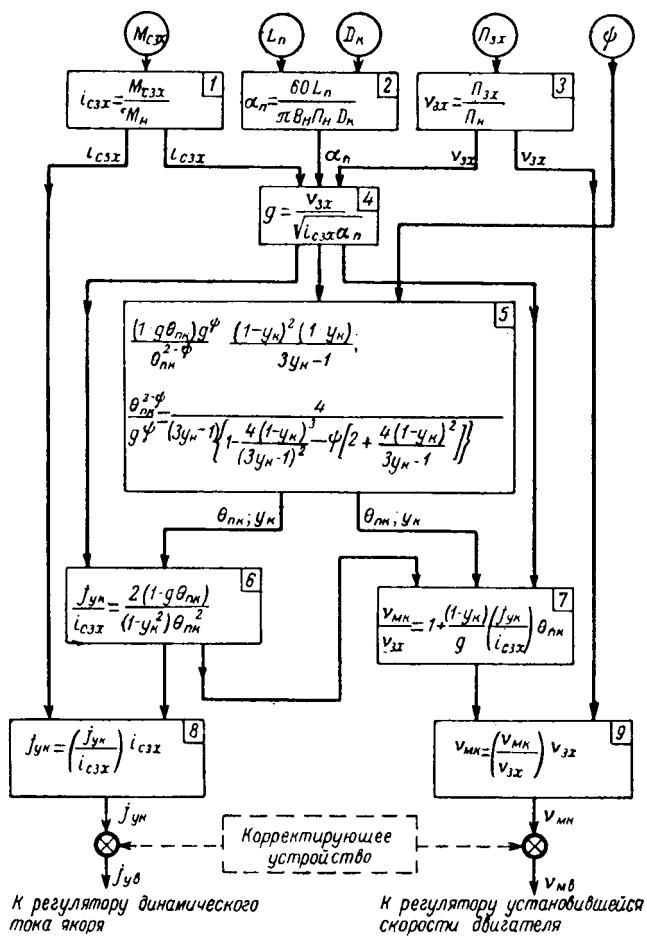


Рис. 3.

Выходные сигналы вычислительной машины j_{yb} , v_{mb} воздействуют на настройку регуляторов динамического тока якоря и установившейся скорости, в результате чего прокатные двигатели отрабатывают задание на пропуск при рациональном (наиболее выгодном) режиме.

Экстремальное комбинированное управление. Экстремальное управление приводом путем изменения напряжения якоря обычно не может быть реализовано в последних пропусках цикла прокатки из-за того, что максимальная скорость двигателей при этом виде управления становится больше номинальной. В этих случаях применяется комбинированное управление двигателями: в диапазоне скорости $n \leq n_n$ — изменением напряжения якоря с номинальным магнитным потоком, а в диапазоне $n > n_n$ — изменением магнитного потока с номинальным напряжением якоря.

Критический режим прокатных двигателей. Применив формулы электромеханики к диаграммам, представленным на рис. 4, получим:

$$v_m = \frac{2\alpha_n}{(1+y)\tau_n} - v_{3x} \frac{1-y}{1+y}; \quad (16)$$

$$\mu_d = \frac{2\alpha_n}{(1-y^2)\tau_n^2} - \frac{2v_{3x}}{(1-y^2)\tau_n}; \quad (17)$$

$$\mu_m = \mu_d + \mu_c; \quad (18)$$

$$i_m = \mu_m v_m (v_m > 1); \quad (19)$$

$$i_c = \mu_c v_m (v_m > 1), \quad (20)$$

где $\mu_d = \mu_m - \mu_c$ — динамический момент двигателя в период прокатки.

Погрешность формул (19) и (20) находится в допустимых пределах, так как мощные двигатели главного привода обжимных станов имеют достаточно жесткую механическую характеристику.

Потеря энергии в обмотке якоря за время $\tau_n + \tau_0$, если принять во внимание, что $v_{3x} \leq 1$ и $v'_{3x} \leq 1$, будет равна:

$$\Delta e = \mu_m^2 \tau_{y1} + \frac{\mu_m^2 + i_m^2 + \mu_m i_m}{3} \tau_{y2} + \\ + i_c^2 \tau_c + \frac{\mu_0^2 + i_{m0}^2 + \mu_0 i_{m0}}{3} \tau_{01} + \mu_0^2 \tau_{02}.$$

Подставив сюда выражения (18) — (20) и учитывая, что

$$\tau_{y1} = \frac{1 - v_{3x}}{\mu_d}, \quad \tau_{y2} = \frac{v_m - 1}{\mu_d};$$

$$\tau_{01} = \frac{v_m - 1}{\mu_0}, \quad \tau_{02} = \frac{1 + v'_{3x}}{\mu_0};$$

$$i_{m0} = \mu_0 v_m,$$

получим:

$$\Delta e = \frac{\mu_m^2}{\mu_d} \left(\frac{2 + v_m^3}{3} - v_{3x} \right) + \mu_c^2 v_m^2 \tau_{y1} + \\ + \frac{(v_m + v'_{3x}) \left(\frac{2 + v_m^3}{3} + v'_{3x} \right)}{\tau_0}. \quad (21)$$

Выразим показатели режима работы двигателей с комбинированным управлением через показатели критического режима работы тех же двигателей с управлением путем изменения напряжения якоря, полагая одинаковыми исходные данные пропуска (α_n , i_{c3x} , ψ , v_{3x} , v'_{3x}) и время прокатки $\tau_n = \tau_{n,k}$, что определяет равную производительность стана.

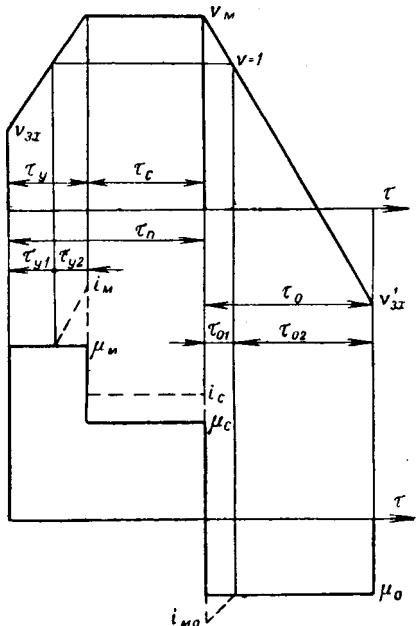


Рис. 4.

Для критического режима двигателей с управлением при помощи изменения напряжения якоря согласно выражениям (7), (9) и (10) найдем:

$$\begin{aligned} v_{m,k} &= \frac{2\alpha_n}{(1+y_k)\tau_{n,k}} - v_{ax}\frac{1-y_k}{1+y_k}, \\ i_{m,k} - i_{c,sx} &= j_k = \frac{2\alpha_n}{(1-y_k^2)\tau_{n,k}^2} - \frac{2v_{ax}}{(1-y_k^2)\tau_{n,k}}, \\ i_{c,k} &= i_{c,sx} \left(\frac{\alpha_n}{\tau_{n,k} v_{ax}} \right)^\phi. \end{aligned}$$

Используя эти соотношения и формулы (16)–(21), а также учитывая, что $i_{c,sx} = \mu_{c,sx}(v_{ax} \leq 1)$, представим показатели режима двигателей с комбинированным управлением в таком виде:

$$\frac{i_m}{i_{c,sx}} = \left(\frac{\mu_d}{i_{c,sx}} + \frac{\mu_c}{i_{c,sx}} \right) v_m;$$

$$\frac{\mu_d}{i_{c,sx}} = \frac{j_k}{i_{c,sx}} \left(\frac{1-y_k^2}{1-y^2} \right);$$

$$\frac{j_k}{i_{c,sx}} = \frac{i_{m,k}}{i_{c,sx}} - \frac{i_{c,k}}{i_{c,sx}};$$

$$\frac{\mu_c}{i_{c,sx}} = \frac{i_{c,k}}{i_{c,sx}};$$

$$v_m = \frac{v_{m,k}(1+y_k) + v_{ax}(y-y_k)}{1+y};$$

(22)

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{\Delta e}{i_{c,sx}^3 \alpha_n}} &= g \frac{\left(\frac{i_m}{i_{c,sx}} \right)^2}{\frac{\mu_d}{i_{c,sx}}} \left(\frac{2+v_m^3}{3v_{ax}} - 1 \right) + \\ &+ \left(\frac{i_{c,k}}{i_{c,sx}} \right)^2 v_m^2 \theta_{n,k} y + \frac{g^2}{\theta_0} \left(\frac{v_m}{v_{ax}} + \frac{v'_{ax}}{v_{ax}} \right) \times \\ &\times \left(\frac{2+v_m^3}{3v_{ax}} + \frac{v'_{ax}}{v_{ax}} \right). \end{aligned}$$

Входящие в формулы (22) показатели критического режима работы двигателей с управлением путем изменения напряжения якоря $\frac{i_{m,k}}{i_{c,sx}}$, $\frac{i_{c,k}}{i_{c,sx}}$, $v_{m,k} = \frac{v_{m,k}}{v_{ax}} v_{ax}$, y_k , $\theta_{n,k}$ зависят от параметра g , показателя степени ϕ и рассчитываются по методу, изложенному выше.

Как следует из формул (22), при комбинированном управлении потеря энергии в обмотке якоря является сложной функцией переменной y , поэтому определение критического значения y_{k1} и экстремума этой функции целесообразно выполнить не классическими методами, а посредством анализа зависимости характеристик двигателей от величины y . Ниже приводится такой анализ для группы пропусков и рассматривается общее решение поставленной задачи на вычислительной машине.

На рис. 5 представлены графики, иллюстрирующие влияние величины y на работу прокатных двигателей, рассчитанные по формулам (22).

Графики, изображенные на рис. 5 сплошной линией, построены для следующих исходных данных: $g=0,17$; $v_{ax}=v'_{ax}=0,4$; $\psi=0,14$; $\theta_0=1,1$. При этом показатели критического режима работы двигате-

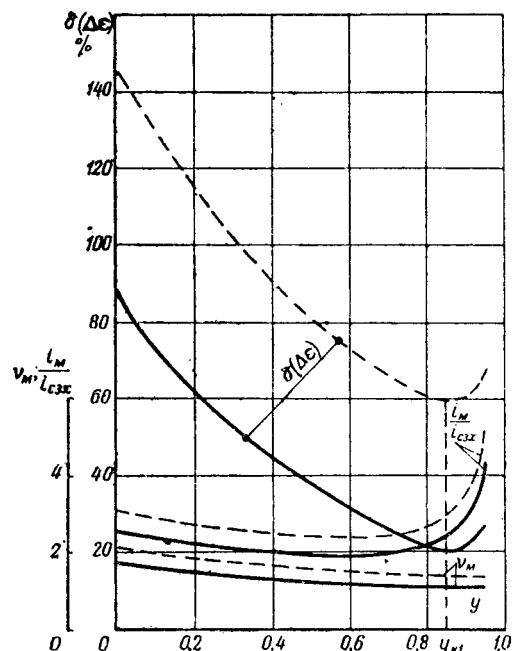


Рис. 5.

лей при управлении путем изменения напряжения якоря равны:

$$\frac{i_{c,k}}{i_{c,sx}} = 1,15; \quad \frac{i_{m,k}}{v_{ax}} = 1,7;$$

$$\frac{v_{m,k}}{v_{ax}} = 3; \quad \sqrt{\frac{\Delta e_k}{i_{c,sx}^3 \alpha_n}} = 4,22; \quad \theta_{n,k} = 2,18.$$

Отсюда максимальная скорость двигателей:

$$v_{m,k} = 3v_{ax} = 3 \cdot 0,4 = 1,2,$$

что свидетельствует о необходимости применить комбинированное управление.

Для оценки влияния на потерю энергии в обмотке якоря не только величины y , но и применения комбинированного управления вместо экстремального управления напряжением якоря, на рис. 5 представлены графики увеличения потери энергии в обмотке якоря

$$\delta(\Delta e) = \left(\frac{\Delta e}{\Delta e_k} - 1 \right) 100.$$

Графики на рис. 5, изображенные пунктирной линией, выполнены для тех же исходных данных, но величина номинальной скорости двигателей здесь понижена в 1,2 раза. В этом случае параметр g не изменяется ($g=0,17$), следовательно, показатели критического режима двигателей при управлении путем изменения напряжения якоря будут такими же, как и в первом случае, однако величина максимальной скорости станет иной $v_{m,k} = 1,2 \cdot 1,2 = 1,44$, а следовательно диапазон регулирования магнитного потока двигателей увеличится.

Вычислительная машина для автоматической настройки регуляторов привода на рациональный режим. На рис. 6 приведена блок-схема алгоритма работы вы-

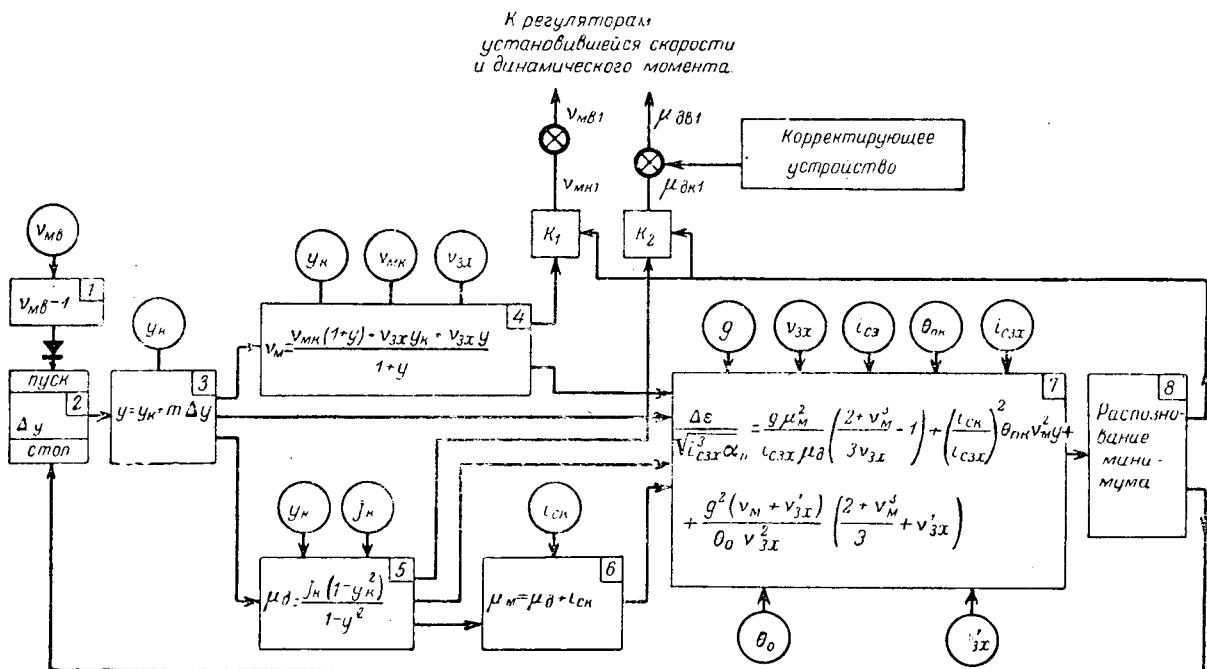


Рис. 6.

числительной машины для расчета рационального режима двигателей с экстремальным комбинированным управлением, разработанная на основании формул (22). Машина получает пусковой импульс и выполняет математические операции в результате обработки информации, полученной от другой вычислительной машины, работающей в системе экстремального управления приводом посредством изменения напряжения на якорях двигателей (рис. 3). Принятый способ поиска критического значения y_{k1} при комбинированном управлении достаточно прост, так как он начинается с ранее рассчитанного другой машиной критического значения y_k для управления напряжением якоря. Соотношение $y_k < y_{k1} < 1$ позволяет фиксировать направление поиска и ограничить его относительно узким диапазоном. Рассмотрим функции элементов блок-схемы.

Блок 1 осуществляет пуск машины, если наиболее выгодная максимальная скорость двигателя при экстремальном управлении изменением напряжения якоря $v_{M\delta}$ больше номинальной скорости двигателей.

Блоки 2 и 3 выполняют дискретное увеличение переменной y на шаг Δy , начиная от критического значения y_k :

$$y = y_k + m \Delta y \quad (m = 1, 2, 3 \dots)$$

Число шагов, которое необходимо выполнить для того, чтобы найти критический режим двигателей с комбинированным управлением, можно оценить, воспользовавшись графиками, изображенными на рис. 5:

$$\frac{y_{k1} - y_k}{\Delta y} = \frac{0.85 - 0.72}{0.015} \approx 8,$$

где $\Delta y = 0.015$ — шаг, обеспечивающий необходимую точность расчета.

Блоки 4—7 являются моделью привода и осущес-

твляют расчет характеристик режима двигателей для текущего значения y .

Блок 8 определяет минимум потерь энергии в обмотке якоря посредством сравнения потерь, рассчитанных для шагов $m-1$ и m .

При наступлении минимума потерь выдаются команды на остановку блока 2 и на включение ключей K_1 и K_2 , которые замыкают цепи настройки регуляторов установившейся скорости и динамического момента.

Выходные сигналы $v_{M\delta k1}$, $\mu_{d\delta k1}$ настраивают регуляторы так, что прокатные двигатели отрабатывают задание на пропуск при критическом режиме с минимальной потерей энергии в обмотке якоря. В тех случаях, когда реализация критического режима встречает препятствия, вступает в действие корректирующее устройство.

Заключение. При экстремальном управлении главным приводом обжимного стана задание на каждый пропуск отрабатывается при минимальном нагреве прокатных двигателей. Этот тип управления имеет высокую эффективность. Положим, что прокатные двигатели с экстремальным управлением обеспечивают заданную производительность обжимного стана. Если в этом случае при управлении приводом путем изменения напряжения якоря время прокатки увеличить в 1,8 раза против критического его значения, то согласно графикам, изображенным на рис. 2 и 5, количество тепла, выделенное в обмотке якоря прокатных двигателей, увеличится на 17%. Увеличится и тепло, выделенное в обмотке якоря двигателей механизма перестановки верхнего вала вследствие сокращения времени, отводимого для работы этого механизма [Л. 9].

Если при комбинированном управлении применить прокатку с параметром $y=0$ вместо критического его значения $y_{k1}=0.85$, тепло, выделенное

в обмотке якоря прокатных двигателей, увеличится на

$$\frac{87 - 21}{100 + 21} \cdot 100 = 54\%.$$

Одновременно с этим увеличится максимальное значение тока якоря и максимальная скорость.

Таким образом, отклонение от законов экстремального управления может привести к необходимости значительного понижения производительности стана.

Заметим, что прокатка с неизменной скоростью, равной скорости захвата, не сопровождается динамической нагрузкой двигателей, однако показатели такого режима хуже, чем показатели критического режима со значительными динамическими нагрузками: повышение количества тепла, выделенного в обмотке якоря, на 58% и увеличение времени прокатки в 3 раза (рис. 2, а).

Экстремальное комбинированное управление главного привода обжимного прокатного стана следует применять в том случае, если максимальная скорость при экстремальном управлении изменением напряжения якоря больше номинальной. Согласно графикам, приведенным на рис. 5, тепло, выделенное в обмотке якоря двигателей при экстремальном комбинированном управлении с относительно небольшим ослаблением магнитного поля, больше, чем при экстремальном управлении изменением напряжения якоря на 21—60%; увеличивается также на 41—70% и максимальный ток якоря.

Реализация экстремального управления возможна лишь в системе с автоматической настройкой регуляторов динамического тока якоря и уставновившейся скорости на рациональный режим работы прокатных двигателей. Настройка регуляторов выполняется при помощи выходных сигналов вычислительной машины, состоящей из блоков для расчета критического режима работы двигателей (модель привода) и корректирующего устройства, которое в случае необходимости вносит в критический режим наиболее выгодные изменения.

Поиск критического режима при комбинированном управлении целесообразно организовать по принципу «шаг за шагом», используя для этой цели информацию, полученную на другой вычислительной машине, предназначеннной для расчета критического режима при управлении путем изменения напряжения якоря двигателя. Сигналы, вводимые в вычислительную машину, следует периодически контролировать по усредненным данным о прокатке предыдущих нескольких слитков. Целесообразность применения такого контроля вытекает из цикличности процесса прокатки и относительно большой частоты повторения циклов. Вычислительная машина может быть использована и как «советчик» оператора или проектировщика главного привода обжимных станов.

Прокатные двигатели в приводах с экстремальным управлением должны иметь высокие электромеханические показатели: перегрузочная способность при скорости до номинальной 250—300%, перегрузочная способность по току якоря при скорости выше номинальной — 200—250%, номинальная скорость не ниже 60 об/мин, динамический показатель

$\frac{M_h}{GD^2}$ примерно 0,4—0,5. При этом статический момент прокатки может достигать: в пропусках с экстремальным управлением напряжения якоря

$$\frac{250 \div 300}{1,737} \cdot 1,168 = 170 \div 200\%,$$

а в пропусках с комбинированным экстремальным управлением

$$\frac{200 \div 250}{2,4} \cdot 1,16 = 95 \div 120\%,$$

номинального; допустимая скорость захвата в пропусках с экстремальным управлением приводом путем изменения напряжения якоря двигателя составит

$$\frac{60 \div 75}{3,36} = 18 \div 22 \text{ об/мин.}$$

Время прокатки в этом случае будет соответствовать производительности современных прокатных станов (приложение).

Электромеханические показатели лучших прокатных двигателей отечественного производства близки к сформулированным выше требованиям.

Приложение. Рассмотрим расчет критического режима двигателей 2×3 970 квт, $n_h=60$ об/мин, $M_h=64,5$ т·м, $GD^2=187$ т·м² главного привода блюминга 1150 при прокатке блюма 350×350×8 500 мм³ из слитка весом 8,5 т.

Технологические показатели пропуска: длина проката после пропуска $L_{\pi}=4,6$ м; $n_{3x}=n'_{3x}=17$ об/мин, $i_{c,3x}=1,2$, $\psi=0,14$; $D_k=1,07$ м, $t_0=1,34$ сек.

По преобразованным формулам получим:

$$g = \frac{n_{3x}}{84,5 \sqrt{\frac{M_h L_{\pi} i_{c,3x}}{GD^2 D_k}}} = 0,15;$$

$$\theta_0 = 4,43 t_0 \sqrt{\frac{M_h D_k i_{c,3x}}{GD^2 L_{\pi}}} = 1,85.$$

В этом случае показатели критического режима двигателей при управлении ими путем изменения напряжения якоря, как было показано выше, будут равны:

$$n_{m,k} = 3,36 n_{3x};$$

$$i_{c,k} = 1,168 i_{c,3x};$$

$$i_{m,k} = 1,737 i_{c,3x};$$

$$\theta_{n,k} = 2,2.$$

Время прокатки согласно выражению (14) определяется по следующей формуле:

$$t_{n,k} = \frac{\theta_{n,k}}{4,43} \sqrt{\frac{GD^2 L_{\pi}}{M_h D_k i_{c,3x}}}.$$

Ниже приводятся результаты расчета:

$$\begin{array}{ll} \text{Максимальная скорость} & n_{m,k} = 57 \text{ об/мин} \\ \text{Статический ток якоря} & I_{c,k} = 1,4 I_h \\ \text{Максимальный ток якоря} & I_{m,k} = 2,08 I_h \\ \text{Время прокатки} & t_{n,k} = 1,6 \text{ сек} \\ \text{Ускорение во время прокатки} & 87,6 \text{ об/мин за 1 сек} \end{array}$$

Таким образом, реализация экстремального управления напряжением якоря не встречает препятствий.

Технологические показатели пропуска: $L_{\pi}=9,58$ м, $n_{3x}=n'_{3x}=24$ об/мин, $M_{c,3x}=58$ т·м, $\psi=0,14$, $D_k=1,07$ м, $t_0=1,34$ сек.

Показатели критического режима двигателей	Управление путем изменения напряжения якоря	Комбинированное управление
Максимальная скорость	72 об/мин	68,5 об/мин
Номинальная скорость	≥ 72 об/мин	60 об/мин
Максимальный ток якоря	1,53 I_n	2,16 I_n
Время прокатки	2,65 сек	2,65 сек
Тепло, выделенное в обмотке якоря за пропуск	100 %	121%

По формулам, приведенным в предыдущем примере, найдем: $g=0,17$, $\theta_0=1,1$.

В таблице приведены показатели критического режима двигателей с управлением ими путем изменения напряжения якоря. В данном случае нельзя применить этот режим, так как максимальная скорость двигателей выше номинальной. Поэтому используем экстремальное комбинированное управление. В таблице приведены также показатели критического режима двигателей с комбинированным управлением, рассчитанные по графикам, изображенным на рис. 5.

Литература

1. Тищенко Н. А., Электрификация и автоматизация обжимных прокатных станов СССР, Доклады к IV Всесоюзному совещанию по автоматизированному электроприводу, 1964.
2. Воронецкий Б. Б. и Святославский В. А., Оптимальные режимы работы главного привода блюминга, «Электричество», 1964, № 7.
3. Воронецкий Б. Б., О комплексной автоматизации промышленных электроприводов, «Электричество», 1965, № 9.
4. Тягунов В. А., Режимы прокатки на реверсивных станах, Металлургиздат, 1954.
5. Кожевников К. И., Выбор передаточного числа редуктора приводов вспомогательных механизмов прокатных станов, «Электричество», 1957, № 7.
6. Lueg W., Müller G., Die Vorgänge im Walzspalt und ihre Rückwirkung auf Walzkraft und Drehmoment beim Warmwalzen, «Stahl und Eisen», 1956, № 21.
7. Бурьянов В. Ф., Рокотян Е. С. и Гуревич А. Е., Расчет мощности двигателей главных приводов прокатных станов, Металлургиздат, 1962.
8. Чекмарев А. П., Павлов В. Л., Клименко В. К. и Пуканов Г. Э., Интенсификация режима обжатий на блюминге 1150, «Сталь», 1955, № 10.
9. Кожевников К. И., Экстремальное программное управление механизмом перестановки верхнего вала обжимного прокатного стана, «Электричество», 1965, № 6.

[17.4.1967]



УДК 621.3

Анализ и синтез транзисторных инверторов, выполненных по схемам колыцевых коммутаторов

Доктор техн. наук Н. Н. ШЕРЕМЕТЬЕВСКИЙ и инж. О. И. ШУСТЕР
ВНИИЭМ

Транзисторные колыцевые коммутаторы на ключевых двухтактных автогенераторах [Л. 1 и 2] широко применяются для образования многофазных систем напряжения в инверторах на полупроводниковых приборах. Автогенераторы указанных коммутаторов переключаются в заданной последовательности под воздействием синхронизирующего переменного однофазного напряжения задающего генератора, имеющего прямоугольную форму и частоту, которая пропорциональна числу автогенераторов и превышает частоту синхронизированного автогенератора коммутатора.

Достоинствами транзисторных колыцевых коммутаторов являются высокая стабильность угла сдвига фаз многофазной системы напряжений в широком диапазоне изменения нагрузки и условий окружающей среды, прямоугольная по полупериодам форма переменных выходных напряжений, наличие трансформаторного выхода, отсутствие частотно-избирательных цепей, высокий к. п. д. и т. п. Высокий к. п. д. позволяет использовать данные коммутаторы не только в качестве фазорасщепителей, но и для непосредственного питания нагрузки. В многофазном коммутаторе, кроме того, возможно получение синусоидального выходного напряжения без применения фильтров, а лишь посредством преобразования числа фаз соединением обмоток выходных трансформаторов в зигзаг [Л. 3]. В послед-

нем случае транзисторный колыцевой коммутатор совмещает в себе функции фазорасщепителя, усилия мощности и фильтра, что значительно упрощает схему инвертора..

Принципиальная схема 6-фазного (3-каскадного) транзисторного колыцевого коммутатора приведена на рис. 1. Коммутатор синхронизируется напряжением задающего генератора, которое подается на базы правых транзисторов первого и третьего автогенераторов и левого транзистора второго автогенератора в одной полярности, а на базы всех остальных транзисторов — в противоположной полярности. Секции выходной обмотки трансформатора задающего генератора и обмотки взаимной связи автогенераторов, включенные последовательно с диодами, образуют логические схемы совпадения, управляющие подачей синхронизирующих напряжений на базы транзисторов. Схемы совпадения в цепях синхронизации первого автогенератора имеют два входных сигнала: напряжения задающего генератора и третьего автогенератора, а для второго и третьего автогенераторов — три входных сигнала: напряжения задающего генератора и двух соседних автогенераторов. Полярность упомянутых напряжений соответствует обозначенным на рис. 1 началам обмоток.

Условием переключения автогенераторов является совпадение положительной относительно базы

открытого транзистора полярности напряжений задающего генератора и обмоток взаимной связи в цепи синхронизации транзистора. В каждом полупериоде напряжения задающего генератора происходит переключение одного из автогенераторов. Изменение полярности напряжения переключившегося автогенератора изменяет состояние одной из схем совпадения так, что в начале следующего полупериода напряжения задающего генератора произойдет переключение автогенератора, на который эта схема совпадения воздействует. Частота переключения автогенераторов, таким образом, в три раза меньше частоты напряжения синхронизации, а угол сдвига фаз напряжений последовательно переключающихся автогенераторов¹ составляет $\pi/3$.

Рассмотрим вопросы рационального выбора логической структуры, логического анализа и синтеза транзисторного кольцевого коммутатора. Напряжение автогенераторов будем считать выходным сигналом коммутатора, а напряжение задающего генератора — его входным сигналом. Полагая коммутации транзисторов коммутаторов мгновенными, можно считать, что каждый из упомянутых сигналов имеет только два значения, условно принимаемые за «1» и «0». Учитывая изложенное, а также то, что в коммутаторах за счет рационального проектирования обеспечивается независимость коммутаций транзисторов от нагрузки, коммутатор можно рассматривать как многотактовое релейное устройство — конечный автомат [Л. 4] с одной входной логической переменной и может быть исследован известными методами. Расчет переходного процесса изменения токов и магнитных потоков на интервалах между коммутациями, последовательность которых определяется в результате исследования коммутатора как релейного устройства, дает возможность проверить и принять необходимые меры с тем, чтобы обеспечить выполнение упомянутого выше условия.

Первоначальным состоянием транзисторного кольцевого коммутатора может быть любое из возможных устойчивых состояний. В этой связи логическая структура коммутатора должна обеспечивать нормальную замкнутую последовательность переключения автогенераторов при любом возможном их начальном состоянии.

Проанализируем транзисторный кольцевой коммутатор, схема которого изображена на рис. 1.

¹ Коммутаторы могут выполняться также на автогенераторах по схеме с коммутирующими дросселями, трансформаторами и т. п.

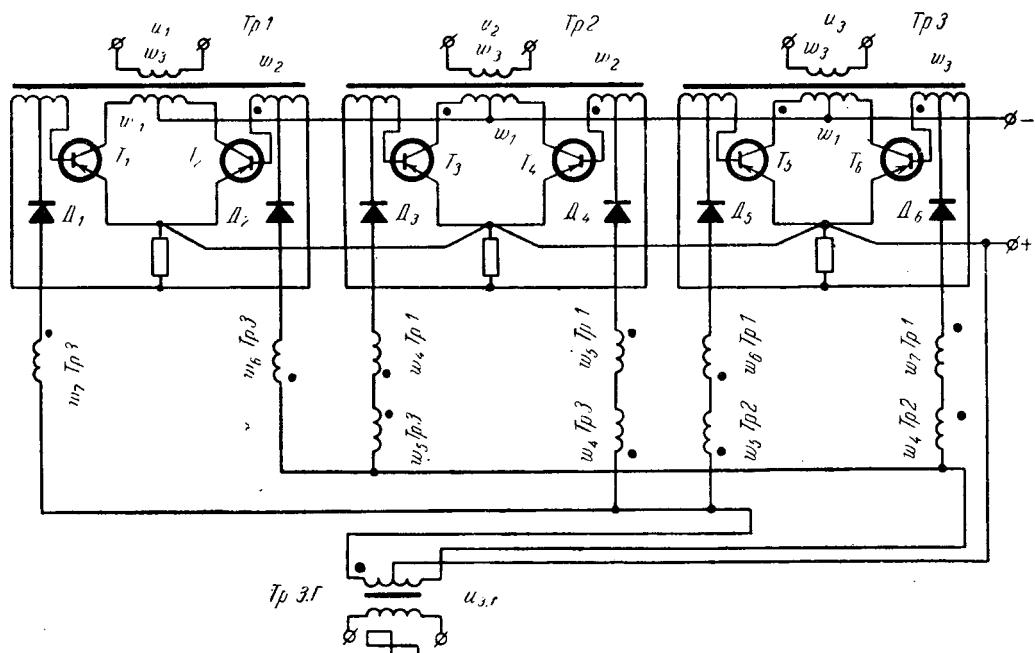


Рис. 1. Принципиальная схема 6-фазного транзисторного кольцевого коммутатора.

Аналитическое выражение логической функции синхронизируемого автогенератора, называемой далее структурной формулой, определяющее значение выходной логической переменной в последующем такте в зависимости от значений входной и выходной логических переменных в предыдущем такте, может быть получено известными способами [Л. 4] в дизъюнктивной или конъюнктивной форме по функциональной таблице, описывающей работу автогенератора.

В рассматриваемом случае, в силу очевидной аналогии между синхронизируемым автогенератором и триггером, естественно принять для автогенератора структурную формулу триггера [Л. 4], имеющую следующий вид²:

$$F(x) = \bar{x}v_1 + xv_2, \quad (1)$$

где x — выходная переменная автогенератора, имеющая значения «0» и «1» соответственно в случаях открытого и запертого состояний левого транзистора автогенератора; v_1 и v_2 — входные переменные, имеющие значения «1», если напряжения цепей синхронизации соответственно левого и правого транзисторов могут обеспечить запирание транзисторов, и значение «0», если запирание не обеспечивается.

Входную переменную для транзисторного кольцевого коммутатора, в целом обозначаемую через « a », примем имеющей значение «1», если напряжение задающего генератора создает положительный потенциал на базе левого транзистора первого автогенератора, и значение «0» в том случае, если указанный потенциал отрицателен.

На основании сформулированного выше условия переключения автогенераторов и в соответствии с принятыми обозначениями величин и принципи-

² Логические функции «ИЛИ» и «И» здесь и далее обозначены соответственно символами суммирования и произведения.

альной или структурной схемами коммутатора можно записать выражения для v_1 и v_2 , а затем и структурные формулы для первого, второго и третьего автогенераторов:

$$\left. \begin{array}{l} F(x_1) = \bar{x}_1 a \bar{x}_3 + x_1 \bar{a} \bar{x}_3; \\ F(x_2) = \bar{x}_2 \bar{a} x_3 x_1 + x_2 \bar{a} \bar{x}_3 \bar{x}_1; \\ F(x_3) = \bar{x}_3 a x_2 x_1 + x_3 \bar{a} \bar{x}_2 x_1. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Анализ возможных последовательностей переключений коммутатора можно произвести при помощи матрицы состояний выходов [Л. 5], которая для транзисторных коммутаторов содержит три столбца, и строки, число которых равно числу возможных состояний выходов коммутатора — 2^n , где n — число автогенераторов.

В первом столбце записываются значения выходов коммутатора x_n, \dots, x_2, x_1 , во втором и третьем — соответствующие значения структурных формул $F(x_n), \dots, F(x_2), F(x_1)$ для значений входной переменной соответственно «0» и «1».

Состояния выходов матрицы, для которых значения выходных переменных и соответствующих структурных формул одного из столбцов совпадают, являются устойчивыми для значения входной переменной, при котором упомянутое совпадение имеет место.

В дальнейшем можно рассматривать матрицу, содержащую только устойчивые состояния коммутатора. Если на такой матрице вместо значений структурных формул во втором и третьем столбцах изобразить белыми кружками устойчивые, а черными — неустойчивые состояния коммутатора при данном значении входного сигнала, а затем провести стрелки, изображающие переходы в соответствии с матрицей, то получим граф кольцевого транзисторного коммутатора, дающий наглядное представление о возможных последовательностях переключений коммутатора. Установившиеся периодические последовательности переключений коммутатора выражаются на графике в виде замкнутых контуров, а переходные процессы — в виде последовательностей состояний коммутатора, входящих в упомянутые замкнутые контуры.

Этот анализ для 6-фазного (3-каскадного) коммутатора, описываемого структурными формулами (2), показал, что обеспечивается нормальная замкнутая последовательность переключений автогенераторов по одному в каждом такте и выход к ней из любого начального состояния.

Транзисторный кольцевой коммутатор, отличающийся тем, что логическая схема совпадения с тремя входами имеется лишь в одном — третьем — каскаде, имеет следующие структурные формулы:

$$\left. \begin{array}{l} F(x_1) = \bar{x}_1 a \bar{x}_3 + x_1 \bar{a} \bar{x}_3; \\ F(x_2) = \bar{x}_2 \bar{a} x_1 + x_2 \bar{a} \bar{x}_1; \\ F(x_3) = \bar{x}_3 a x_2 x_1 + x_3 \bar{a} \bar{x}_2 x_1. \end{array} \right\} \quad (3)$$

Анализ такого коммутатора показывает, что существует такая же, как и в предыдущем случае, замкнутая последовательность переключений коммутатора, соответствующая его правильной работе.

Если начальным состоянием коммутатора является одно из состояний правильной работы, то указанная последовательность переключений устанавливается сразу. Из состояний, не встречающихся в процессе правильной работы, коммутатор также входит в цикл правильной работы. Но в отличие от предыдущего случая этот переход происходит при одновременном переключении двух автогенераторов.

Рассмотрим транзисторный кольцевой коммутатор с синхронизацией всех трех автогенераторов логическими схемами совпадения с двумя входами каждой. Структурные формулы такого коммутатора имеют следующий вид:

$$\left. \begin{array}{l} F(x_1) = \bar{x}_1 a \bar{x}_3 + x_1 \bar{a} \bar{x}_3; \\ F(x_2) = \bar{x}_2 \bar{a} x_1 + x_2 \bar{a} \bar{x}_1; \\ F(x_3) = \bar{x}_3 a x_2 + x_3 \bar{a} \bar{x}_2. \end{array} \right\} \quad (4)$$

Анализ матрицы такого коммутатора показывает, что существуют две замкнутые последовательности переключений коммутатора. Одна из них соответствует правильной работе коммутатора и будет иметь место, если его начальное состояние правильное. Вторая замкнутая последовательность соответствует неправильной работе коммутатора с одновременным переключением в одном такте трех автогенераторов и будет иметь место, если начальными являются состояния 010 и 101.

Указанные переключения в рассматриваемом коммутаторе наблюдались экспериментально.

Структурные формулы рассматриваемого коммутатора могут быть получены известным из теории релейных устройств методом синтеза по таблице включения в таком виде:

$$F(x_i) = \bar{x}_i f(1) + x_i \bar{f}(0), \quad (5)$$

где $f(1)$ и $f(0)$ — условия в тактах, предшествующих переходу x_i соответственно в состояния «1» и «0», определяющие указанные переходы. Для x_1 в рассматриваемом коммутаторе справедливы следующие выражения:

$$\left. \begin{array}{l} f(1) = \bar{a} \bar{x}_3; \\ f(0) = \bar{a} x_3. \end{array} \right\} \quad (6)$$

Синтез транзисторного кольцевого коммутатора может быть выполнен посредством составления матрицы состояний выходов, по которой известными способами [Л. 5] в дизъюнктивной или конъюнктивной формах могут быть получены аналитические выражения структурных формул коммутатора. Принципиальная схема, соответствующая указанным структурным формулам, может, однако, оказаться сложной. В связи с изложенным, более целесообразно вначале произвести по таблице включений синтез «исходной» структуры, обеспечивающей правильную работу коммутатора только из правильных состояний, а затем анализ и коррекцию полученной структуры за счет таких изменений структурных формул, схемная реализация которых известна. Рассмотрим пример синтеза 12-фазного (6-каскадного) коммутатора, получившего широкое распространение в области транзисторных инверторов, благодаря возможности получения синусо-

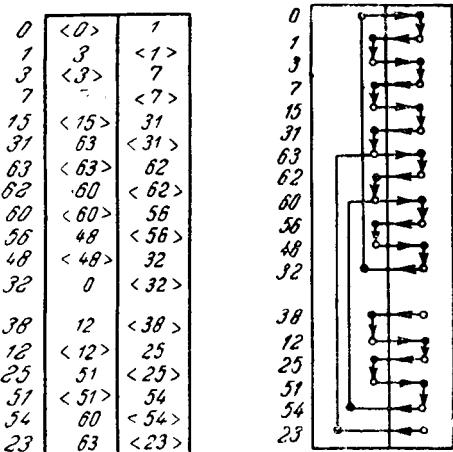


Рис. 2. Матрица устойчивых состояний 12-фазного транзисторного кольцевого коммутатора.

Рис. 3. Граф 12-фазного коммутатора.

иальной формы выходного напряжения без применения фильтров за счет преобразования 12-фазной системы напряжений прямоугольной формы в 3-фазную [Л. 3].

В соответствии с формулой (5) по таблице включений можно получить следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} F(x_1) &= \bar{x}_1 a \bar{x}_6 + x_1 \bar{a} \bar{x}_5; \\ F(x_2) &= \bar{x}_2 \bar{a} x_1 + x_2 \bar{a} \bar{x}_1; \\ F(x_3) &= \bar{x}_3 a x_2 + x_3 \bar{a} \bar{x}_2; \\ F(x_4) &= \bar{x}_4 \bar{a} x_3 + x_4 \bar{a} \bar{x}_3; \\ F(x_5) &= \bar{x}_5 a x_4 + x_5 \bar{a} \bar{x}_4; \\ F(x_6) &= \bar{x}_6 \bar{a} x_5 + x_6 \bar{a} \bar{x}_5. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В соответствии с полученными структурными формулами связь между шестым и первым каскадами отлична от остальных междукаскадных связей и является перекрестной. Произведем анализ полученной исходной структуры, для чего определим матрицу состояний. Состояние в матрице можно записать десятичными числами, соответствующими двоичным числам, образуемым состояниями выходов и структурных формул, записанных соответственно в последовательности

$$x_6, x_5, x_4, x_3, x_2, x_1; \\ F(x_6), F(x_5), F(x_4), F(x_3), F(x_2), F(x_1);$$

12-фазный транзисторный кольцевой коммутатор имеет 64 возможных состояния. Учитывая, что в соответствии с формулами (7) при $a=0$

$$F(x_1) = x_1; \quad F(x_2) = x_1; \quad F(x_3) = x_3; \\ F(x_4) = x_4; \quad F(x_5) = x_5; \quad F(x_6) = x_6,$$

а при $a=1$

$$F(x_1) = \bar{x}_6; \quad F(x_2) = x_2; \quad F(x_3) = x_2; \\ F(x_4) = x_4; \quad F(x_5) = x_4; \quad F(x_6) = x_6,$$

можно получить матрицу состояний коммутатора.

Анализ этой матрицы показывает, что всего имеется только 16 устойчивых состояний коммута-

тора. Остальные 48 состояний неустойчивы и переходят в одно из устойчивых состояний.

Двенадцать устойчивых состояний коммутатора соответствуют правильным переключениям с изменением состояния лишь одного выхода. Остальные четыре устойчивых состояния также образуют замкнутую последовательность переключений, однако при этих переключениях имеет место неправильная работа коммутатора с одновременным переключением трех выходов в одном такте с частотой, втрое большей, чем при нормальной работе. Такие переключения в транзисторном кольцевом коммутаторе наблюдались экспериментально. Произведем коррекцию полученной исходной структуры коммутатора с целью обеспечения его перехода к правильной работе из любого возможного начального состояния.

Для подобной коррекции исходных структур коммутатора необходимо ввести дополнительные связи, запрещающие одно из переключений в каждой из замкнутых неправильных последовательностей переключений коммутатора, но разрешающие его правильные переключения.

В рассматриваемом случае произведем коррекцию введением дополнительной логической связи, запрещающей переключение пятого каскада из состояния «1» в состояние «0», когда второй и четвертый каскады находятся в противофазе. Учитывая, что связь подобного типа имеет место в правом плече третьего автогенератора коммутатора (рис. 1), по аналогии с выражением для $F(x_3)$ в формулах (2) изменим выражение для $F(x_5)$ в формулах (7) с

$$\left. \begin{aligned} F(x_5) &= \bar{x}_5 a x_4 + x_5 \bar{a} \bar{x}_4 = \\ &= \bar{x}_5 a x_4 + x_5 (\bar{a} + x_4) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

на

$$\left. \begin{aligned} F(x_5) &= \bar{x}_5 a x_4 + x_5 \bar{a} \bar{x}_4 \bar{x}_2 = \\ &= \bar{x}_5 a x_4 + x_5 (\bar{a} + x_4 + x_2). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из сопоставления двух последних структурных формул следует, что матрица корректированной структуры может быть получена из исходной матрицы заменой в столбце $a=1$ в строках, для которых

$$x_4 = 0 \text{ и } x_5 x_2 = 1, \quad F(x_5) = 0 \text{ на } F(x_5) = 1.$$

Число, выражющее состояние в клетке матрицы, при этом увеличивается на шестнадцать (2^4). Полученная таким образом матрица устойчивых состояний корректированной структуры коммутатора (эти состояния заключаются в угловые скобки) и соответствующий ей граф коммутатора, приведенные соответственно на рис. 2 и 3, показывают, что коммутатор корректированной структуры выходит к правильной работе из любого начального состояния.

Дальнейшая коррекция коммутатора может быть направлена на оптимизацию его работы — сокращение длительности переходных процессов.

Принципиальная схема 12-фазного коммутатора с двумя вышеуказанными дополнительными связями приведена на рис. 4 [Л. 2]. Заметим, что ма-

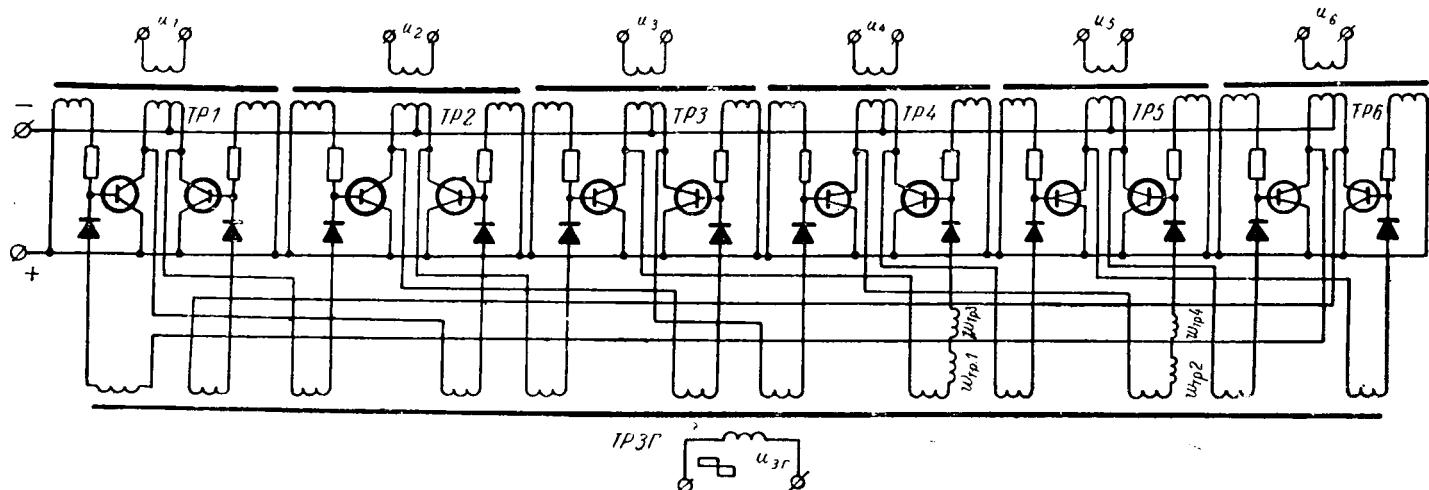


Рис. 4. Принципиальная схема 12-фазного кольцевого коммутатора (полярность обмоток не показана).

ксимальная продолжительность переходного процесса коммутатора с двумя дополнительными связями меньше, чем у рассмотренного коммутатора с одной связью. Возможность сокращения длительности переходных процессов особенно важна для многокаскадных коммутаторов, в которых, как показывает опыт, при некоторых видах нагрузки возможно установление неправильных периодических режимов. Как было установлено при исследовании 24-фазного (12-каскадного) коммутатора, данные режимы вызывались пропуском отдельных переключений транзисторами из-за протекания в их коллекторах инверсного тока и устраивались увеличением числа логических связей, запрещающих неправильные переключения.

Синтез многофазных коммутаторов наиболее целесообразно выполнять путем анализа общих свойств матриц исходных структур коммутаторов. Свойства матрицы, отражающие структурные закономерности коммутатора, устанавливают взаимозависимости между состояниями его матрицы, а также между состояниями матриц коммутаторов с двумя последующими четными или нечетными числами каскадов, и проявляются в соотношениях чисел, выраждающих состояние матриц. В связи с этим по известной матрице исходной структуры коммутатора могут быть определены матрицы коммутатора с большим числом каскадов и аналитические формулы, выраждающие состояния второй матрицы через состояния первой.

По полученным аналитическим формулам и матрице могут быть выполнены анализ возможных изменений состояний коммутатора, выбор дополнительных логических связей, корректировка и оптимизация его структуры и т. п.

Помимо двух рассмотренных выше 6- и 12-фазного коммутаторов с двумя дополнительными логическими связями каждый, изложенная методика была применена для синтеза 24-фазного коммутатора. Матрица исходной структуры 24-фазного коммутатора из общего числа возможных 4 096 состояний содержит 128 устойчивых состояний по 64

в каждом столбце и выявляет пять видов неправильных переключений. Число дополнительных связей, первоначально равное двум в одном автогенераторе, с целью устранения неправильных периодических режимов при некоторых видах нагрузки было доведено до восьми в четырех автогенераторах.

Стремление к обеспечению минимальных весов и габаритов коммутаторов приводит к тому, что частота колебаний автогенератора и его рабочая частота выбираются достаточно близкими и в некоторых случаях, во время переходного процесса в коммутаторе могут иметь место дополнительные переключения автогенераторов, механизм которых тот же, что и при автономной работе автогенераторов. Правильный выбор логической структуры коммутатора во всех без исключения случаях является условием обеспечения его нормальной работоспособности, если рабочая индукция коммутирующего элемента не превышает определенной, зависимой от типа его магнитного материала, величины. Учет влияния дополнительных факторов может быть произведен введением в структурные формулы соответствующих дополнительных входных переменных и совместным их рассмотрением с дифференциальными уравнениями коммутатора.

Изложенные выше методы логического анализа и синтеза позволяют проектировать кольцевые коммутаторы с использованием электронных вычислительных машин.

Литература

1. Шустер О. И., Константинов В. Г., Преобразователь постоянного тока в переменный трехфазный, Авторское свидетельство № 132710. Бюлл. изобр. № 20, 1960.
2. Бордов В. В., Константинов В. Г., Преобразователь постоянного тока в переменный, Авторское свидетельство № 158010. Бюлл. изобр. № 20, 1963.
3. Шустер О. И., Константинов В. Г., Преобразователь постоянного тока в переменный, Авторское свидетельство № 124517. Бюлл. изобр. № 23, 1959.
4. Кобринский Н. Е., Трахтенброт Б. А., Введение в теорию конечных автоматов, Физматгиз, 1962.
5. Колдуэлл С., Логический синтез релейных устройств, Перев. с англ., Изд-во иностр. лит., 1962.

[24.11.1966]

Уменьшение скорости нарастания и амплитуды «всплесков» прямого напряжения на вентилях

Канд. техн. наук М. В. ГЕЛЬМАН

Челябинский политехнический институт

Вопросы надежности работы вентильных преобразователей приобретают в настоящее время все большее значение. Резкие изменения прямого напряжения на вентилях являются одним из основных источников прорывов в схемах инверторов [Л. 1]. Эта причина прорывов наиболее типична для инверторов, собранных по трехфазной мостовой схеме, которая с появлением тиристоров приобретает все большее распространение.

Анализ большого числа осциллографов показал [Л. 1], что основной причиной прорывов в инверторах, выполненных по трехфазной мостовой схеме, является очень быстрое нарастание прямого напряжения на вентилях (рис. 1) при зажигании противофазного вентиля, когда в кривой напряжения появляется первый положительный пик (коммутационная ступенька ΔU_k).

Широко известным методом снижения скорости восстановления обратного напряжения и ограничения амплитуды перенапряжений является применение цепочек rC , шунтирующих вентиль [Л. 2—4]. Рассмотрим возможность применения тех же цепочек для снижения скорости нарастания и амплитуды «всплесков» прямого напряжения¹.

Расчет без учета индуктивностей соединительных проводов. На рис. 2,а приведена трехфазная мостовая схема с указанием всех емкостей, участвующих в переходных процессах. Рассмотрим процесс нарастания напряжения на вентилях 4 при зажигании противофазного вентиля 1 (момент t_1 на рис. 1). Схема замещения для этого момента приведена на рис. 2,б. При этом сделаны следующие допущения: 1) емкость C_n нейтрали трансформатора относительно земли мала, и поэтому не учитывается; 2) индуктивности L_A и L_K — велики и не влияют на быстрые переходные процессы при зажигании; 3) процесс зажигания вентиля 1 не сопровождается погасаниями, что позволяет не учитывать элементы, шунтирующие вентиль 1.

Для схемы на рис. 2,б

$$C_1 = C_{a,k} + C_\Phi + \frac{C_s(C_s + C_K)}{3C_s + C_A + C_K}; \quad (1)$$

$$C_2 = 2C_{a,k} + C_\Phi + \frac{(C_s + C_A)(C_s + C_K)}{3C_s + C_A + C_K}. \quad (2)$$

Начальные напряжения на участках схемы, показанной на рис. 2,б, равны:

$$e_1 = e_B - e_A; \quad e_2 = e_B - e_C. \quad (3)$$

Ввиду высокой скорости установления процессов при зажигании вентиля можно пренебречь изменением фазных э. д. с. за это время.

Если не учитывать индуктивностей соединительных проводов, то при отсутствии шунтирующих вентиль цепочек включение выключателя 1 (рис. 2,б) будет сопровождаться мгновенным перераспределением напряжений на емкостях C_1 и C_2 . При этом изменение напряжения на емкости C_1 от e_1 до U_{C_1} соответствует изменению напряжения на вентилях 4.

«Всплеск» напряжения будет равен:

$$\Delta U_{C_1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} (e_2 - e_1) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} (e_A - e_C). \quad (4)$$

Величина коммутационной ступеньки ΔU_k (рис. 1) без учета переходных процессов, вызванных собственными емкостями схемы, составляет:

$$\Delta U_k = \frac{1}{2} (e_A - e_C). \quad (5)$$

Рассмотрим возможные величины «всплесков» прямого напряжения.

Если анодная система связана с разветвленной сетью, обладающей емкостью C_A , значительно большей, чем C_Φ , $C_{a,k}$, C_s , C_K , а C_K в свою очередь значительно больше, чем $C_{a,k}$, C_s , C_Φ , то из выражений (1) — (5) видно, что $C_2 \gg C_1$, т. е. «всплеск» напряжения в пределе стремится к двойной величине коммутационной ступеньки.

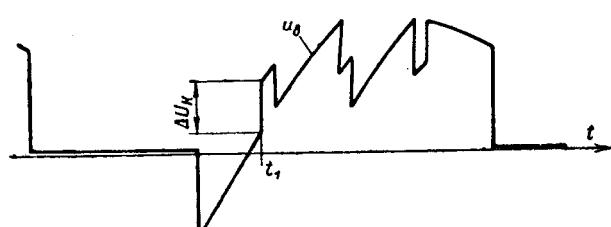


Рис. 1.

¹ «Всплеском» прямого напряжения будем называть амплитуду изменения напряжения при переходных процессах, вызванных зажиганием противофазного вентиля.

Если C_A и C_K существенно меньше остальных емкостей схемы, то в соответствии с (1) и (2) $C_1 \approx C_2$. В этом случае «всплеск» напряжения примерно равен величине коммутационной ступеньки.

В инверторных агрегатах, выпускаемых заводом «Уралэлектротяжмаш» для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог с целью снижения радиопомех на анодной и катодной шинах были установлены помехоподавляющие реакторы РОСВ-320 [Л. 5]. Эти реакторы обладают индуктивностью 0,6 мГн и весьма малой проходной емкостью. Благодаря этому емкости контактной сети и катодных кабелей были отделены относительно большими индуктивностями и перестали участвовать в процессах при зажигании вентилей, что сдало условия зажигания вентилей к случаю $C_1 \approx C_2$. Таким образом, установка помехоподавляющих реакторов улучшила условия работы вентилей.

Если пренебречь емкостями C_1 и C_2 и считать, что начальное распределение напряжений определяется емкостями C и сопротивлениями r , то в момент замыкания выключателя 1 «всплеск» напряжения на вентиле 4 составляет $\frac{2}{3} (e_A - e_C)$.

Расчет с учетом индуктивности соединительных проводов при пренебрежении демпфирующими сопротивлениями. В реальных схемах из-за наличия индуктивностей соединительных проводов не может происходить мгновенных изменений напряжений на вентилях. Следует также отметить, что ни один ионный или полупроводниковый прибор не смог бы работать при мгновенных нарастаниях положительных напряжений на аноде. Так, например, кремниевые управляемые вентили допускают скорость нарастания положительного напряжения не более 20—100 в/мксек.

Поэтому особый интерес представляет фронт нарастания положительного «всплеска» напряжения². Для исследования процессов при нарастании напряжения на вентиле учтем в схеме, изображенной на рис. 2, б, индуктивность соединительных проводов L_a и отбросим часть схемы с индуктивностями L_c , так как $L_a \gg L_c$ и они не могут оказать влияния при быстрых процессах в схеме. Полученная схема замещения приведена на рис. 2, в.

Рассмотрим сначала процессы в схеме при $r=0$, когда

$$C' = C_1 + C; \quad C'_2 = C_2 + 2C. \quad (6)$$

В операторной форме уравнение для напряжения на емкости имеет вид:

$$\Delta U_{C'_1}(p) = \frac{e_2 - e_1}{p^2 L_c C'_1 + k + 1}, \quad (7)$$

где

$$k = \frac{C'_1}{C'_2}.$$

² В [Л. 6] анализируются условия демпфирования колебаний при зажигании противофазного вентиля, но условия демпфирования определяются не для фронта положительного напряжения, а для колебательных процессов, возникающих после выравнивания потенциалов на емкостях C_1 и C_2 .

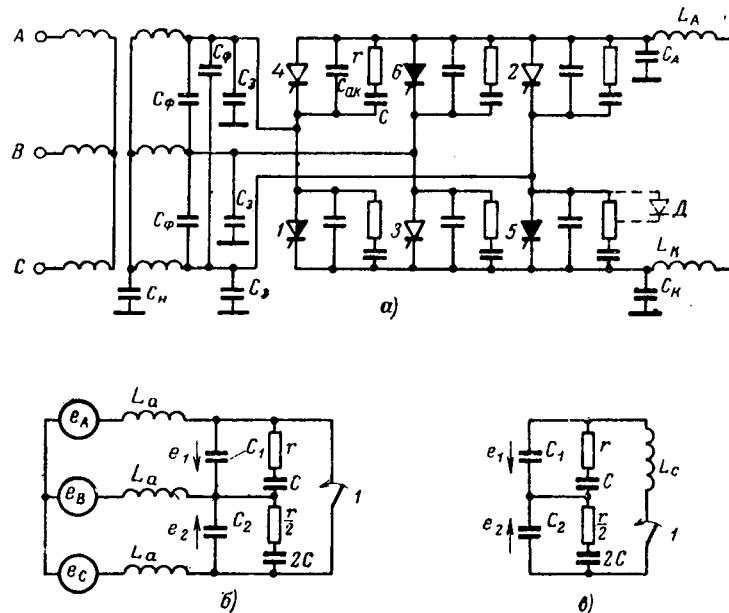


Рис. 2.

Изменение напряжения на емкости C'_1 во времени определяется уравнением:

$$\Delta U_{C'_1} = \frac{e_2 - e_1}{k + 1} (1 - \cos \omega t), \quad (8)$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{k+1}{L_c C'_1}}.$$

Так как обычно $C \gg C_1$ и $C \gg C_2$, то $k \approx 0,5$.

Тогда амплитуда «всплеска» напряжения будет равна:

$$\Delta U_{C'_1, \text{ макс}} = \frac{4}{3} (e_2 - e_1) = \frac{4}{3} (e_A - e_C).$$

При отсутствии емкостей $C \gg C_1$ и $C_2 \gg C_1$ и $k \approx 0$, поэтому

$$\Delta U_{C'_1, \text{ макс}} = 2 (e_A - e_C).$$

Таким образом, с учетом колебательного характера процесса амплитуда «всплеска» восстановливающегося положительного напряжения может в идеальном случае превысить вдвое значения, полученные без учета индуктивности L_c , т. е. теоретически при неблагоприятных условиях перенапряжения могут достигать четырехкратных значений по сравнению с величиной ΔU_k . Практически за счет затухания величина перенапряжений редко превышает $2\Delta U_k$. На рис. 3 в качестве примера приведена осциллограмма первого положительного пика напряжения при «всплеске», равном $2,35 \Delta U_k$.

Отношение частот восстанавливющегося положительного напряжения при отсутствии шунтирующей вентиль емкости и ее наличии определяется выражением

$$\frac{\omega_0}{\omega} = \sqrt{\frac{n+1}{1,5} \left(\frac{C}{C_1} + 1 \right)}, \quad (9)$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{n+1}{L_c C_1}}; \quad n = \frac{C_1}{C_2}.$$

Практически с достаточной точностью можно считать:

$$\frac{\omega_0}{\omega} = \sqrt{\frac{C}{C_1}}. \quad (10)$$

Выражение (10) показывает, во сколько раз можно снизить частоту восстанавливающегося напряжения при данной емкости C .

Расчет с учетом индуктивностей соединительных проводов и демпфирующих сопротивлений. В этом случае изменение напряжения на емкости C_1 выражается уравнением четвертого порядка, поэтому рассмотрим частный случай $n=0,5$, соответствующий средним величинам перенапряжений в схеме. При этом удается понизить порядок операторного уравнения до третьего

$$\Delta U_{C_1}(p) = \frac{2(e_2 - e_1)(prmc_1 + 1)}{2p^3 L_c C_1^2 mr + 2p^2 L_c C_1(1+m) + 3prmc_1 + 3}. \quad (11)$$

В [Л. 3] указаны условия демпфирования при характеристическом уравнении вида, аналогичного знаменателю выражения (11). Условием демпфирования в анализируемой схеме при $m = \frac{C}{C_1} \gg 8$ является выбор r в пределах $r_1 < r < r_2$, где

$$r_{1,2} = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{L_c}{12C_1} [m^2 + 20m - 8 \mp \sqrt{m(m-8)^3}].} \quad (12)$$

Для выбора сопротивления r , обеспечивающего демпфирование колебаний, рассмотрим также приближенный метод расчета. Предположим, что при малых r процесс в основном определяется емкостями C , а влиянием малых емкостей C_1 и C_2 пренебрежем. Условие демпфирования колебаний в такой схеме имеет вид:

$$r \geq \sqrt{\frac{8}{3} \frac{L_c}{C}}. \quad (13)$$

Наилучшие результаты могут быть получены, если r в выражении (13) выбрано из условия равенства левой и правой частей. Проведенный графический анализ показал, что при $m > 10$ значения r , получаемые по формуле (13), отличаются от величин r_1 , полученных по формуле (12), менее, чем на 5%. Таким образом, для случая $n=0,5$ допустимо использование этой приближенной формулы.

Проведенный анализ показал, что невозможно одновременно обеспечить требования полного демпфирования колебаний восстанавливающегося обратного напряжения и «всплесков» прямого напряжения. Демпфирующее сопротивление r_{ob} , определяемое процессом восстановления обратного напряжения, может быть найдено по приближенной формуле [Л. 6]:

$$r_{ob} \approx \sqrt{\frac{18L_a}{C}}. \quad (14)$$

Если сравнить r_{ob} с r , определенным по формуле (13), то видно, что $r_{ob} > r$, так как $L_a \gg L_c$.

Величины сопротивлений, обеспечивающие демпфирование «всплеска» положительного напряжения, весьма малы. Так, в одной мощной инверторной установке напряжением 3 кВ при $C=0,8 \text{ мкФ}$, $m=16$, $L_c \approx 5 \text{ мкГн}$ потребовалось демпфирующее сопротивление $r=4 \text{ ом}$. В той же установке для

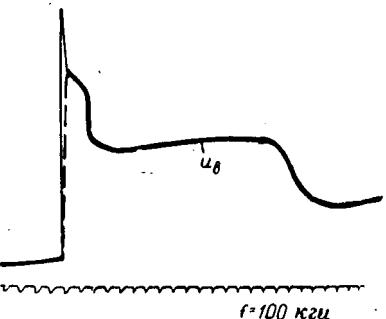


Рис. 3. $f=100 \text{ кГц}$

демпфирования колебаний восстанавливающегося обратного напряжения в соответствии с расчетом по методике, изложенной в [Л. 3], потребовалось $r_{ob} \approx 250 \text{ ом}$. Таким образом, не представляется возможным одновременно демпфировать колебания при восстановлении обратного напряжения и резко снизить скорость нарастания и амплитуду положительных «всплесков» напряжения. Приходится идти на компромисс, обеспечивая лишь частичное демпфирование колебаний. Так, выполнены демпфирующие контуры на работающих и выпускаемых в настоящее время заводом «Уралэлектротяжмаш» инверторных агрегатах для тяговых подстанций. На рис. 3 пунктиром показан фронт первого положительного пика, снятый при наличии демпфирования.

Усовершенствование демпфирующих контуров. Для обеспечения одновременного демпфирования колебаний восстанавливающегося обратного напряжения и «всплесков» прямого напряжения можно шунтировать часть демпфирующего сопротивления диодом D (показан пунктиром на рис. 2, а). В этой схеме при восстановлении обратного напряжения в демпфировании колебаний участвует все сопротивление, а при восстановлении положительного напряжения — лишь его часть. Применение этой схемы целесообразно для преобразователей на тиристорах, которым опасны высокие скорости нарастания прямого напряжения. При этом могут быть применены относительно дешевые диоды на небольшие токи.

В этой схеме при включении вентиля обеспечивается ограничение разрядного тока емкости, шунтирующей вентиль, так как разряд происходит через все сопротивление.

Литература

- Флейшман Л. С. и Гельман М. В. Исследование инверторного режима выпрямителей РМНВ-500×6, «Электричество», 1958, № 11.
- Акодис М. М. Регулирование скорости нарастания обратного напряжения в цепях с ионными вентилями, «Электричество», 1952, № 10.
- Самоделкин В. Б. Демпфирование колебаний восстанавливающегося напряжения в трехфазной мостовой схеме, «Электричество», 1954, № 4.
- Лытав Р. А. Диаграмма для выбора параметров демпфирующих цепей в преобразовательных схемах с ионными вентилями, «Электротехника», 1964, № 4.
- Гельман М. В. и Клейнерман М. И. Выпрямительно-инверторный агрегат, сб. «Новое в электроснабжении электрифицированных железных дорог», Трансжелдориздат, 1960.
- Соколов С. Д. Пути повышения надежности работы инверторных установок, Труды Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, вып. 148, Трансжелдориздат, 1958.

Процесс выключения тиристора

Канд. техн. наук Н. Х. СИТНИК и инж. А. А. РУССКИХ

Мордовский научно-исследовательский электротехнический институт

Основной из главных задач в области силовой полупроводниковой техники является создание инверторов и преобразователей частоты на тиристорах. В этой связи представляет значительный практический интерес установление основных расчетных соотношений для определения параметров дополнительных устройств, ограничивающих перенапряжение на тиристоре, и потерю мощности в них при коммутации, а также мероприятий, направленных на повышение к. п. д. и уменьшение габаритов вентильных блоков.

Поскольку тиристор является неполностью управляемым вентилем, ток через него в большинстве случаев прекращается после приложения обратного напряжения, вызывающего прекращение прямой инжекции эмиттеров. Полный процесс вос-

становления вентильной прочности тиристора может быть разделен на два: процесс восстановления запорных свойств в обратном направлении (восстановление вентильной прочности) и процесс восстановления запорных свойств в прямом направлении (восстановление управляемости) [Л. 1].

Процесс восстановления запорных свойств в обратном направлении. На рис. 1,а приведены осциллограммы анодных напряжений и тока при выключении тиристора в реальном контуре коммутации. Как видно из осциллограмм, ток в контуре в течение интервала времени $t_0 - t_2$ (рис. 1,б) определяется только сопротивлением внешней цепи, так как тиристор находится еще в состоянии высокой проводимости вследствие эффекта накопления неосновных носителей в области базы. Вследствие превалирующего индуктивного сопротивления в контуре коммутации закон изменения тока близок к линейному, поскольку в кратковременном процессе выключения величина коммутирующего напряжения практически неизменна.

В момент времени t_1 область катодного (управляющего) $p-n$ перехода тиристора в результате процесса рекомбинации настолько обедняется неосновными носителями зарядов, что катодный переход восстанавливает свои запорные свойства и напряжение на нем достигает пробивного. Некоторое изменение крутизны нарастания обратного тока в этот момент времени определяется небольшим снижением величины результирующего коммутирующего напряжения.

Дальнейшее восстановление запорных свойств в обратном направлении обусловлено большими временами жизни неосновных носителей зарядов в широкой n -базе и характеризуется амплитудой обратного тока I_0 в момент времени t_2 , когда анодный переход тиристора восстанавливает запорные свойства. Однако восстановление запорных свойств в обратном направлении не означает окончания процесса полного выключения тиристора.

Процесс восстановления запорных свойств в прямом направлении. Этот процесс означает восстановление способности среднего $p-n$ -перехода воспринимать прямое напряжение без возникновения регенеративного процесса, приводящего к повторному включению тиристора. Хотя оба внешних $p-n$ -перехода уже заперты, в области широкой n -базы еще остались избыточные носители, которые вызывают значительный обратный ток через тиристор (момент времени t_3). Наличие этого тока способствует поддержанию прямой инжекции среднего $p-n$ -перехода и, как следствие, сохранению неравновесной концентрации носителей в районе этого перехода. По мере спадания избыточной концентрации носителей зарядов в области широкой n -базы, преимущественно в результате процесса объемной реком-

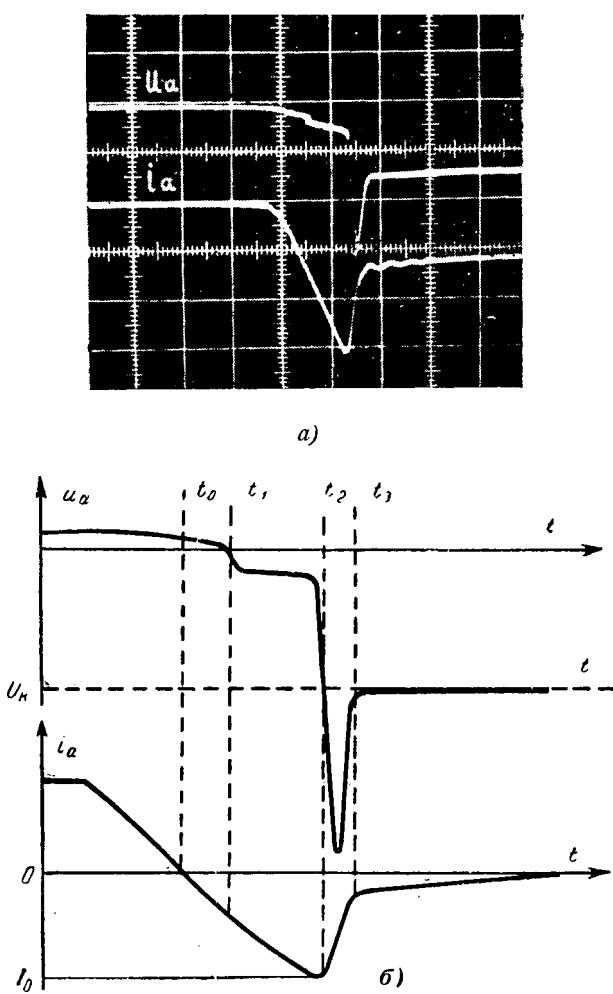


Рис. 1. Осциллограммы (а) и кривые (б) анодных напряжения и тока при выключении тиристора.

Масштабы на осциллограммах: 50 в/дел., 50 а/дел.,

2 мкес/дел. Мордовская областная универсальная научная библиотека

бинации, обратный ток тиристора стремится к установленному значению. В то же время избыточная концентрация носителей стремится к равновесной, определяемой температурой вентильного элемента. Интервал времени от момента перехода прямого тока через нуль до момента установления тока, определяемого равновесной концентрацией неосновных носителей в области широкой *n*-базы, является полным временем восстановления управляемости. Его продолжительность определяется как параметрами вентиля, так и параметрами нагрузочного и коммутирующего контуров [Л. 2].

Не останавливаясь подробно на характерных зависимостях времени восстановления запорных свойств, отметим лишь, что параметры выпускаемых промышленностью тиристоров имеют значительный разброс, в частности, по амплитуде обратного тока и времени восстановления управляемости (рис. 2), вызываемый разбросом параметров кремния и нестабильностью технологического процесса изготовления тиристоров. Поэтому для обеспечения минимальной установленной мощности устройств искусственной коммутации в инверторах необходимо деление тиристоров на группы по времени восстановления.

Определение напряжения на тиристоре в процессе выключения. Даже в простейшем случае применения одного тиристора в плече (фазе) преобразователя необходимы дополнительные устройства для обеспечения его работоспособности. Обязательно вытекающее из процесса выключения тиристора применение шунтирующей его *RC*-цепи, которая ограничивает коммутационные перенапряжения на тиристоре и поэтому уменьшает выделяемые в нем коммутационные потери. Представляет значительный практический интерес анализ процесса выключения тиристора с учетом *RC*-цепи, имеющей цель получение расчетных соотношений для выбора величин *R* и *C*.

Коммутирующий контур в любом преобразователе обладает определенной энергией магнитного поля в момент коммутации, обусловленной индуктивностью этого контура и величиной тока в нем. В связи с наличием в этом контуре тиристора, лавинообразно увеличивающего свое сопротивление в процессе восстановления, энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля в момент восстановления вентильной прочности тиристора, вызывая на нем значительные по величине перенапряжения. В соответствии с физической интерпретацией переходного процесса может быть принята схема замещения для расчета этого процесса (рис. 3), в которой тиристор представлен ключом, размыкающимся в момент времени *t*₂ (рис. 1, б), характеризуемый амплитудой обратного тока *I*₀ через эквивалентную индуктивность.

Пренебрежение в расчетной схеме замещения динамическим сопротивлением тиристора обуславливает определенный запас в величине действительного перенапряжения на нем, приемлемый в большинстве практических случаев. Более точный расчет параметров *RC*-цепи с учетом динамического сопротивления тиристора целесообразен только в специальных случаях.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

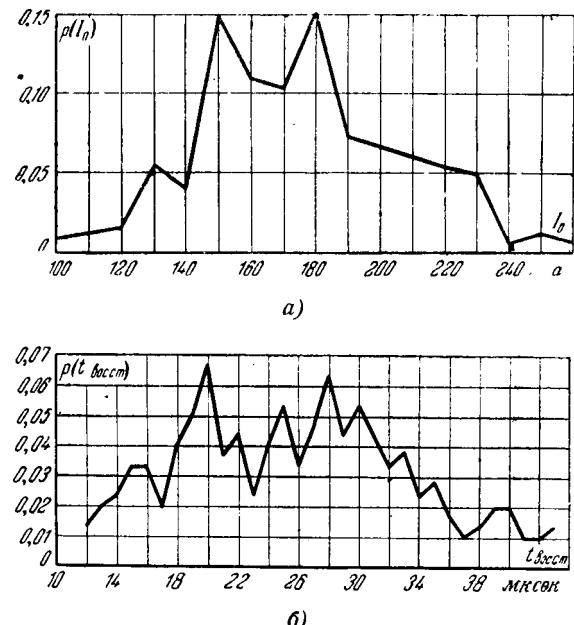


Рис. 2. Распределение амплитуд обратного тока при $\frac{di}{dt} = 70 \text{ а/миксек}$ (а) и времени восстановления управляемости при $U_k = 100 \text{ в}$, $\frac{du}{dt} = 3 \text{ а/миксек}$ (б) для трехсот тиристоров типа ВКДУ-150. Предшествующий анодный ток $I_a = 100 \text{ а}$.

Напряжение на тиристоре (рис. 3), равное

$$u_b = U_k - L \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

где *L* — индуктивность контура коммутации достигает максимума в момент времени, когда скорость изменения тока в контуре, образующемся после восстановления запорных свойств тиристора, будет наибольшей. Этот момент времени определяется из условия

$$\frac{du_b}{dt} = -L \frac{d^2i}{dt^2} = 0. \quad (2)$$

Поскольку переходный процесс в контуре описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка, то в зависимости от степени демпфирования возможны три режима.

В случае апериодического режима работы ток в цепи после восстановления запорных свойств тиристора равен:

$$i_1 = A_1 e^{-p_1 t} + A_2 e^{-p_2 t}, \quad (3)$$

где постоянные

$$A_1 = \frac{I_0(R - Lp_2) - U_k}{L(p_1 - p_2)}, \quad A_2 = -\frac{I_0(R - Lp_1) - U_k}{L(p_1 - p_2)}$$

определяются из начальных условий

$$i_1(0) = I_0 = A_1 + A_2,$$

$$u_L(0) = U_k - I_0 R = -Lp_1 A_1 - Lp_2 A_2.$$

Здесь

$$p_{1,2} = \frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Определив по (2) момент времени, соответствующий максимальному напряжению на тиристоре,

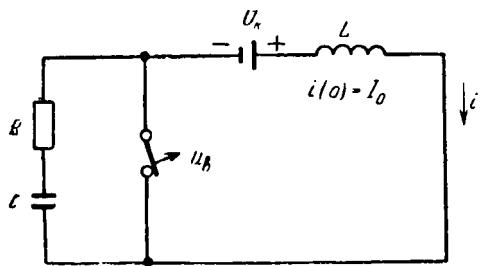


Рис. 3. Схема замещения для расчета параметров RC -цепи.

получим из условия (1) с учетом (3) его относительную величину:

$$x_{m_1} = \frac{U_{\text{вн}} - U_k}{U_k} =$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{n}} - \sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)\left(1 - \frac{B}{2} + \frac{B}{2}\sqrt{1-n}\right)}{2\sqrt{\frac{1}{n}-1}} \times \\ &\quad \times \exp \left[-\frac{\left(\frac{1}{\sqrt{n}} - \sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)}{2\sqrt{\frac{1}{n}-1}} \times \right. \\ &\quad \times \ln \left. \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{n}} + \sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)^2 \left(B - \frac{2}{n} + \frac{2}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)}{\left(\frac{1}{\sqrt{n}} - \sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)^2 \left(B - \frac{2}{n} - \frac{2}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)} \right] - \\ &- \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{n}} + \sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)\left(1 - \frac{B}{2} - \frac{B}{2}\sqrt{1-n}\right)}{2\sqrt{\frac{1}{n}-1}} \times \\ &\quad \times \exp \left[-\frac{\left(\frac{1}{\sqrt{n}} + \sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)}{2\sqrt{\frac{1}{n}-1}} \times \right. \\ &\quad \times \ln \left. \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{n}} + \sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)^2 \left(B - \frac{2}{n} + \frac{2}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)}{\left(\frac{1}{\sqrt{n}} - \sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)^2 \left(B - \frac{2}{n} - \frac{2}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{1}{n}-1}\right)} \right], \quad (4) \end{aligned}$$

где

$$B = \frac{RI_0}{U_k}; \quad n = \frac{1}{\frac{R^2}{4L^2}}$$

В случае граничного режима ток в цепи после восстановления запорных свойств тиристора равен:

$$i_2 = (A_1 + A_2 t) e^{-pt}, \quad (5)$$

где, как легко показать,

$$A_1 = I_0; \quad A_2 = U_k - L(R - Lp); \quad p = \frac{R}{2L}$$

В этом случае относительная величина перенапряжения на тиристоре определяется соотношением

$$x_{m_2} = \left(1 - \frac{B}{2}\right) \exp \left(-\frac{4-3B}{2-B}\right). \quad (6)$$

При колебательном режиме работы ток в контуре равен:

$$i_3 = A_1 e^{-at} \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

где

$$A_1 = \frac{I_0}{\sin \varphi}; \quad \varphi = \arctg \frac{L\omega I_0}{U_k - I_0(R - La)}$$

$$a = \frac{R}{2L}; \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

В этом случае относительная величина перенапряжения на тиристоре определяется из выражения

$$x_{m_3} = \sqrt{1 - B + \frac{n}{4}B^2} \exp \left[-\sqrt{\frac{1}{n-1}} (\alpha - \gamma) \right], \quad (8)$$

где

$$\alpha = \arctg \frac{2\sqrt{n-1}}{2-n}$$

$$\gamma = \arctg \frac{\sqrt{n-1}B}{2-B}$$

На рис. 4 в соответствии с выражениями (4), (6) и (8) построена зависимость коэффициента выброса напряжения на тиристоре x_m от величины n для различных значений параметра B — относительного начального скачка напряжения на тиристоре. Из рис. 4 видно, что в случае апериодического режима ($n < 1$) коэффициент выброса напряжения при $B \leq 1$ невелик и имеет место наименьшее влияние разброса амплитуды обратного тока (рис. 2, а), выраженного параметром B . Уменьшение n может быть достигнуто за счет увеличения либо сопротивления R , либо емкости C . В первом случае возрастает начальный скачок напряжения на тиристоре $I_0 R$, который может стать больше U_k , а во втором — увеличиваются потери в сопротивлении R , что ведет к увеличению его установленной мощности. Поэтому представляют интерес расчет потерь в RC -цепи и разработка мер, направленных на уменьшение этих потерь.

Определение коммутационных потерь в RC -цепи. Энергия потерь в RC -цепи при одном цикле коммутации с достаточной точностью равна:

$$W = R \int_0^{t_k} i^2 dt, \quad (9)$$

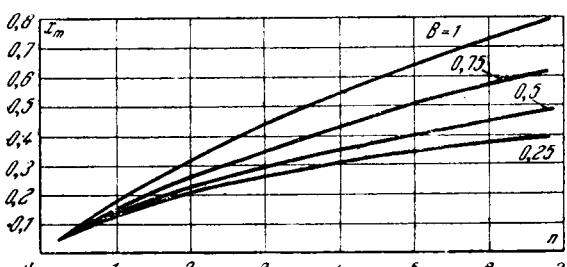


Рис. 4. Зависимость коэффициента выброса напряжения на тиристоре от параметров цепи.

где t_k — продолжительность коммутационного процесса, равная утроенному значению постоянной времени переходного процесса.

В случае апериодического режима работы ($n < 1$) энергию потерь в RC -цепи найдем после подстановки в (9) значений i_1 из (3) и интегрирования

$$W_1 = \frac{LI_o^2}{2} + \frac{C_0 U_k^2}{2} \frac{1}{n}, \quad (10)$$

где C_0 — емкость конденсатора в RC -цепи для граничного режима работы ($n=1$).

В случае граничного режима работы, подставляя i_2 из (5) в (9), находим:

$$W_2 = \frac{LI_o^2}{2} + \frac{C_0 U_k^2}{2}. \quad (11)$$

Для колебательного режима ($n > 1$) энергию потерь определяется после подстановки в (9) i_3 из (7):

$$W_3 = \frac{LI_o^2}{2} + \frac{C_0 U_k^2}{2} \frac{2-n}{n}. \quad (12)$$

Таким образом, энергия потерь во время переходного процесса определяется энергией, запасенной в магнитном поле индуктивности к моменту восстановления запорных свойств тиристора, плюс затраты энергии, связанные с зарядом конденсатора RC -цепи до уровня коммутирующего напряжения. При принятых допущениях потери выделяются на сопротивлении RC -цепи. В действительности, при учете конечного сопротивления выключающегося тиристора часть энергии будет теряться в нем.

Пути снижения потерь при выключении тиристора. Способы подавления коммутационных потерь базируются на снижении амплитуды I_o обратного тока тиристора. На рис. 5, а представлена зависимость I_o от скорости спадания прямого тока, которая определяется линейной индуктивностью в контуре коммутации:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_k}{L}.$$

Из этих данных следует, что при построении схем инверторов с отсеченными от нагрузки конденсаторами необходимо часть коммутирующей индуктивности, обеспечивающей совместно с конденсаторами необходимое для восстановления управляемости тиристоров время, помещать в контур коммутации тока. Если тиристор имеет слабую зависимость времени восстановления управляемости от величины обратного напряжения, то коммутирующая индуктивность должна полностью входить в контур коммутации.

Уменьшению потерь в RC -цепи способствует насыщающийся дроссель, необходимость применения которого определяется процессом включения тиристора [Л. 3]. Влияние времени переключения насыщающегося дросселя на величину амплитуды обратного тока тиристора с большим значением I_o иллюстрируется на рис. 5, б.

Кардинальное решение поставленной задачи может быть достигнуто только комплексным путем при использовании специальных тиристоров с пониженным значением обратного тока в сочетании с рассмотренными схемными решениями.

При постоянной скорости спадания прямого то-

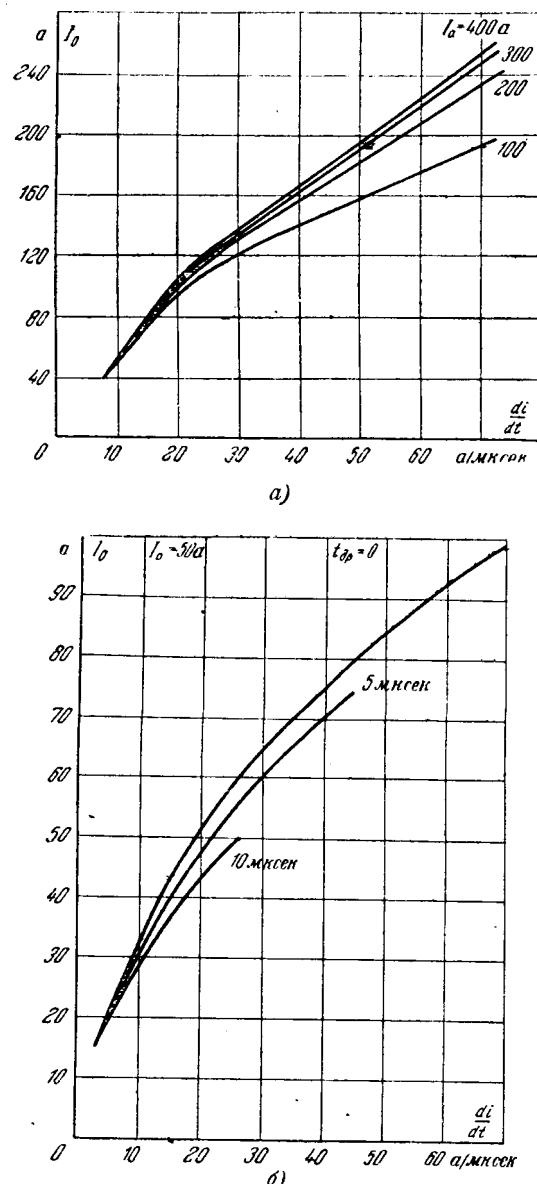


Рис. 5. Зависимость амплитуды обратного тока от скорости спадания прямого тока (а) и влияния времени переключения насыщающегося дросселя t_{dp} на величину амплитуды обратного тока тиристора ВКДУ-150.

ка величина тока I_o определяется концентрацией заряда неосновных носителей в области анодного перехода в момент перехода тока через нуль. В свою очередь эта концентрация обусловлена величиной предшествующего коммутации прямого тока, временем жизни неосновных носителей в указанной области, толщиной p -базы и площадью $p-p$ -перехода. Вместе с тем следует помнить о других не менее важных параметрах тиристора: величине прямого падения напряжения, вентильной прочности, времени включения. В частности, при уменьшении времени жизни неосновных носителей в области широкой p -базы, способствующем снижению времени восстановления управляемости тиристора и амплитуды обратного тока, увеличиваются прямое падение напряжения и время включения [Л. 4]. Поэтому при разработке специальных инверторных тиристоров нужно осуществить оптимальное соче-

тание электрических параметров, в том числе и допустимой амплитуды обратного тока.

В ряде случаев с целью уменьшения габаритов и увеличения к. п. д. тиристорного блока можно пойти на ослабление или полное устранение RC -цепей. В последнем случае при выборе тиристора по обратному напряжению следует учитывать, что всплеск напряжения на тиристорах типа ВКДУ-150 в 2,5—3 раза превышает величину коммутирующего напряжения. Для ограничения напряжения на тиристоре в этом случае может быть использован лавинный вентиль. Рассеиваемая в нем при коммутации мощность равна:

$$P = \frac{LI_0^2}{2T},$$

где T — период повторения коммутаций.

Ограничение величины перенапряжения на уровне допустимого не всегда гарантирует надежную работу тиристора, поскольку вентиль характеризуется определенной предельной концентрацией коммутационных потерь на единицу объема монокристаллической структуры в зависимости от ее дефектов. Изучение мест разрушения вентильного элемента, выполненное на партии тиристоров ВКДУ-150, работавших при высоких значениях скорости нарастания обратного тока (100 а/мксек) и рабочих напряжениях в 2,5—3 раза меньших номинального значения, показало, что 50% тиристоров имеют разрушение монокристалла в объеме вентильного элемента, 37% тиристоров — по фаске вентильного элемента и у 13% тиристоров наблюдается разрушение в окрестности управляющего электрода. Можно предположить, что в идеально выполненной монокристаллической структуре разрушения локализуются вблизи управляющего электрода, однако наличие дефектов в кремнии и несовершенство технологии определяют указанное распределение разрушений.

Для грамотного использования тиристоров необходимо введение дополнительного параметра, характеризующего предельно допустимые потери при их выключении, представленные либо предельной крутизной нарастания обратного тока, либо предельной его амплитудой при номинальных значениях прямого тока и обратного напряжения.

Пример расчета RC -цепи для параллельного однофазного инвертора. Пусть инвертор характеризуется следующими величинами: эффективное напряжение на коммутирующих конденсаторах равно 220 в, частота 400 гц, максимальный угол опережения инвертора 30 эл. град, индуктивность контура коммутации (с учетом остаточной индуктивности насыщающегося дросселя) $L=3,5$ мкгн, прямой ток через тиристор $I_a=100$ а.

Коммутирующее напряжение преобразователя равно:

$$U_k = \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \sin 30^\circ = 150 \text{ в.}$$

При

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_k}{L} = \frac{150}{3,5} = 43 \text{ а/мксек}$$

амплитуда обратного тока равна $I_o=145$ а (рис. 5,а). При использовании тиристоров с большей, чем полученная на рис. 5,а, амплитудой обратного тока на основе распределения тиристоров по указанному признаку (рис. 2,а) расчетное значение тока I_p равно 1,33 I_o .

Применяя коэффициент выброса $x_m=0,15$ и $B=1$, находим $n=0,8$ и определяем параметры RC -цепи:

$$R = \frac{U_k}{I_o} B = \frac{150}{145} \cdot 1 \approx 1 \text{ ом,}$$

$$C = \frac{4L}{nR^2} = \frac{4 \cdot 3,5}{0,8 \cdot 1^2} = 17,5 \text{ мкф.}$$

Потери при коммутациях равны

$$P = f(W_{\text{выкл}} + W_{\text{вкл}}) = 400 \left(\frac{3,5 \cdot 145^2}{2} + \right. \\ \left. + \frac{17,5 \cdot 150^2}{2} + \frac{17,5 \cdot 150^2}{2} \right) \cdot 10^{-6} = 170 \text{ вт,}$$

где $W_{\text{выкл}}$ — энергия потерь при одном цикле выключения;
 $W_{\text{вкл}} = \frac{CU_k^2}{2}$ — энергия потерь в RC -цепи при одном цикле включения.

Такая цепочка практически неприемлема по габаритам. Использование тиристора с вдвое меньшей амплитудой обратного тока $I_o=75$ а позволит применить сопротивление $R=2$ ом и емкость $C=4,5$ мкф, что приведет к снижению потерь до $P \approx 40$ вт, при той же эффективности ограничения напряжения на тиристоре. Для получения такого же эффекта снижения коммутационных потерь в RC -цепи посредством изменения индуктивности контура необходимо увеличение индуктивности в 10—15 раз.

Литература

1. Stumpf A. C., Das Schaltverhalten der steuerbaren Siliziumzelle, ETZ-A, Bd. 83, 1962, H. 9.
2. Somos I., Switching characteristic of silicon power controlled rectifiers, IEEE Transactions on Communication and Electronics, 1964, v. 6.
3. Ситник Н. Х. и Русских А. А., Особенности работы тиристоров при емкостной коммутации, Известия вузов, Электромеханика, 1966, № 8.
4. Hegel A., Bemessung von Siliziumstromtoren für verschiedenartige Anwendungsbereiche, Siemens Zeitschrift, 1964, November.

[10.6.1967]



Из опыта работы

УДК 62-50

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Канд. техн. наук С. А. БАБУШКИН,
инж. Г. З. ИЛЬИН и инж. Л. В. НИКИТИНА
Ленинград

Переходный процесс в линейной системе автоматического управления с постоянными параметрами характеризуется следующим однородным линейным дифференциальным уравнением

$$f(D)y(t) = 0, \quad (1)$$

где

$$f(D) = a_0 D^n + a_1 D^{n-1} + \dots + a_{n-1} D + a_n;$$
$$D = \frac{d}{dt}.$$

Дифференциальное уравнение (1) интегрируется при начальных условиях:

$$\left. \begin{aligned} (y)_{t=0} &= y_0; \\ \left(\frac{dy}{dt} \right)_{t=0} &= D_0^k y_0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При воздействии на систему автоматического управления возмущающих или управляющих воздействий в виде единичного импульса определение переходного процесса может быть сведено к интегрированию дифференциального уравнения (1) при начальных условиях (2) путем соответствующего пересчета возмущений в эквивалентные начальные условия [Л. 1].

Решение уравнения (1) обычно связано с громоздкими вычислениями, большую часть которых составляет процесс определения произвольных постоянных. Покажем, что этот процесс может быть значительно упрощен.

Если все корни характеристического уравнения различны и равны $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$, то решение уравнения (1) имеет такой вид:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{\lambda_i t}. \quad (3)$$

Формулы для определения произвольных постоянных могут быть получены при использовании операционного исчисления [Л. 2]. Применяя преобразование Лапласа к уравнению (1), получим:

$$f(p)\eta(p) - pQ(p) = 0, \quad (4)$$

где

$$\eta(p) \doteq y(t);$$
$$Q(p) = \frac{f(p) - f(D_0)}{p - D_0} y_0.$$

На основании уравнения (4) найдем, что

$$\eta(p) = p \frac{Q(p)}{f(p)} \quad (5)$$

и

$$y(t) = \sum_{i=1}^n e^{\lambda_i t} \left[\frac{Q(p)}{f(p)} \right]_{p=\lambda_i}, \quad (6)$$

где

$$\left[\frac{Q(p)}{f(p)} \right]_{p=\lambda_i} = C_i. \quad (7)$$

Преобразуем выражение (7) следующим образом:

$$\begin{aligned} C_i &= \left[\frac{Q(p)}{f(p)} \right]_{p=\lambda_i} = \\ &= y_0 \left[\frac{\prod_{k=1}^n (p - \lambda_k) - \prod_{k=1}^n (D_0 - \lambda_k)}{(p - D_0) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (p - \lambda_k)} \right]_{p=\lambda_i} = \\ &= y_0 \prod_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^n \frac{(D_0 - \lambda_k)}{(\lambda_i - \lambda_k)} = y_0 \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{\lambda_k - D_0}{\lambda_k - \lambda_i}. \end{aligned} \quad (8)$$

В частности, при $y_0 = 1$ и $y_0^{(k)} = 0$ ($k = 1, \dots, n$) получим формулу [Л. 3]:

$$C_i = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{\lambda_k}{\lambda_k - \lambda_i}. \quad (9)$$

Пример. Дано уравнение

$$(1,5784D^4 + 17,532665D^3 + 53,488476D^2 + 106,75856D + 49,075842)y = 0$$

и начальные условия

$$y_0, \quad \dot{y}_0 = D_0 y_0, \quad \ddot{y}_0 = D_0^2 y_0, \quad \dddot{y}_0 = D_0^3 y_0.$$

Корни характеристического уравнения равны:

$$\lambda_1 = -0,611597; \quad \lambda_2 = -7,8134933;$$
$$\lambda_{3,4} = -1,3413910 \pm j2,1695776.$$

Произвольные постоянные вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} C_1 &= y_0 \frac{(\lambda_2 - D_0)(\lambda_3 - D_0)(\lambda_4 - D_0)}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} = \\ &= 1,34721 y_0 + 0,72791594 \dot{y}_0 + 0,2781536 \ddot{y}_0 + 0,02650022 \dddot{y}_0; \\ C_2 &= y_0 \frac{(\lambda_1 - D_0)(\lambda_3 - D_0)(\lambda_4 - D_0)}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} = -0,01185822 y_0 - \\ &- 0,02427836 \dot{y}_0 - 0,00981716 \ddot{y}_0 - 0,00297997 \dddot{y}_0; \end{aligned}$$

$$C_3 = y_0 \frac{(\lambda_1 - D_0)(\lambda_2 - D_0)(\lambda_4 - D_0)}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} = \\ = (-0,16767591 - j 0,06486466) y_0 - (0,3518188 + \\ + j 0,07182026) \ddot{y}_0 + (-0,13416823 + j 0,06142498) \ddot{\dot{y}}_0 + \\ + (-0,1176013 + j 0,00890182) \ddot{\dot{\dot{y}}}_0; \\ C_4 = y_0 \frac{(\lambda_1 - D_0)(\lambda_2 - D_0)(\lambda_3 - D_0)}{(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} = \\ = (-0,16767591 + j 0,06486466) y_0 - (0,3518188 - \\ - j 0,07182026) \ddot{y}_0 + (-0,13416823 - j 0,06142498) \ddot{\dot{y}}_0 + \\ + (-0,1176013 - j 0,00890182) \ddot{\dot{\dot{y}}}_0.$$

Решение приведенного выше уравнения имеет следующий вид:

$$y = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + C_3 e^{\lambda_3 t} + C_4 e^{\lambda_4 t} = \\ = (1,34721 y_0 + 0,72791594 \dot{y}_0 + 0,27815361 \ddot{y}_0 + \\ + 0,02650022 \ddot{\dot{y}}_0) e^{-0,611597 t} - (0,01185822 y_0 + \\ + 0,02427836 \dot{y}_0 + 0,00981716 \ddot{y}_0 + 0,00297997 \ddot{\dot{y}}_0) e^{-7,8134933 t} -$$

$$- (0,33535182 y_0 + 0,7036376 \dot{y}_0 + 0,26833646 \ddot{y}_0 + \\ + 0,02352026 \ddot{\dot{y}}_0) e^{-1,3413910 t} \cos 2,1695776 t + (0,12972932 y_0 + \\ + 0,14364052 \dot{y}_0 - 0,12284996 \ddot{y}_0 - \\ - 0,01780364 \ddot{\dot{y}}_0) e^{-1,341390 t} \sin 2,1695776 t.$$

Нетрудно проверить, что это решение удовлетворяет начальным условиям. Например, начальные условия для y_0 и \dot{y}_0 будут равны:

$$y(0) = y_0 - 0,00030002 \dot{y}_0 - 0,00000001 \ddot{y}_0 - \\ - 0,00000001 \ddot{\dot{y}}_0 \approx y_0; \\ \dot{y}(0) = 0,00000029 y_0 + 1,00000001 \dot{y}_0 + 0,00000001 \ddot{y}_0 \approx \dot{y}_0.$$

Литература

- Попов Е. П., Динамика систем автоматического регулирования, Гостехиздат, 1954.
- Булгаков Б. В., Колебания, Гостехиздат, 1954.
- Фельдбаум А. А., Электрические системы автоматического регулирования, Оборонгиз, 1957.

[19.6.1967]

УДК 621.313.29:061.3

Хроника

III ВСЕСОЮЗНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО БЕСКОНТАКТНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

18—22 октября 1966 г. в Риге состоялась III Всесоюзная конференция по бесконтактным электрическим машинам, организованная физико-энергетическим институтом АН Латв. ССР. В работе конференции приняли участие 437 представителей от 188 организаций из 59 городов страны. Было заслушано и обсуждено 112 докладов и сообщений по результатам научных исследований и конструкторских разработок в области бесконтактных электрических машин. Доклады были опубликованы до начала работы конференции издательством «Зиннатне» (Рига) в виде трех тематических сборников.

Содержание докладов и сообщений охватывало следующие семь основных направлений.

Вопросы теории поля. С интересом был выслушан доклад Н. Н. Александрова (Харьков) об использовании метода комплексного магнитного потенциала для расчета плоских магнитных полей с гладкими и зубчатыми якорями.

В. В. Аспит (Рига) в своем докладе остановился на методе расчета магнитного поля в зазоре синхронной машины с учетом насыщения. Вопросу расчета поля в зазоре электрических машин с учетом зубчатости и неравномерности зазора были посвящены доклады Б. Е. Коника и М. А. Шакирова (Ленинград).

Метод определения параметров цилиндрического массивного ротора с продольными пазами былложен В. М. Кучевальным (Рига). В докладах Г. Д. Шумилина (Минск) и О. В. Кекота (Львов) были приведены соотношения геометрических размеров и энергетических показателей асинхронных машин с массивными и короткозамкнутыми роторами.

А. Я. Бергер (Ленинград) изложил системы уравнений для определения главных размеров синхронных, асинхронных машин и машин постоянного тока.

Вопросам теории реактивных машин посвятил свой доклад Е. В. Кононенко (Томск).

Аналитический метод определения перегрузочной способности индукторных генераторов и аналитические выражения для веса аксиальных индукторных машин были представлены в докладах Ю. С. Зубкова (Ленинград) и Л. Э. Домбурга (Рига).

Результаты расчетных и экспериментальных исследований магнитных полей в бесконтактных электрических машинах были доложены М. А. Ермиловым (Москва), З. К. Сикой (Рига), А. А. Терзяном (Ереван) и Б. И. Евграфовым (Москва).

Бесконтактные синхронные машины. Вопросам исследования бесконтактных синхронных машин смешанного возбуждения были посвящены доклады Р. Ф. Галтеева и О. Г. Клюкова (Москва), Ю. И. Кронберга (Томск), В. Я. Кукса (Москва), А. М. Довлатяна (Ереван) и П. И. Таличива (Таллин).

Доклады С. П. Кононова (Казань), Л. И. Поляшова (Истра) были посвящены проблеме работы бесконтактных генераторов на импульсную нагрузку.

Новые виды и конструкции синхронных машин были рассмотрены в докладах Л. М. Паластина (Москва), С. И. Логинова (Ленинград), Б. А. Пономарева и Е. Г. Берензона (Москва), А. Ф. Головко (Ростов-на-Дону), В. Г. Еременко (Москва), Г. Н. Лауциса и Ю. Ф. Вайварса (Рига).

О применении бесконтактных синхронных машин на нефтепромыслах, в угольной промышленности и в электрооборудовании тракторов и автомобилей доложили И. Е. Хайкин (Баку) и В. А. Стародубов (Караганда) и С. Л. Мёдовар (Рубцовск).

Асинхронные машины. Специальные виды асинхронных машин рассматривались в докладах В. А. Наталкина (Москва), А. В. Новикова (Киев), Р. И. Зеличенко (Ленинград) и В. Д. Лущика (Конотоп).

Изложение некоторых теоретических вопросов, связанных с бесконтактными системами частотного управления, и анализ схем управляемых инверторов содержалось в докладах В. А. Винокурова (Москва), Н. М. Усманходжаева (Ташкент), Ю. М. Гусяцкого (Москва), П. А. Ровинского (Ленинград), В. М. Чернышева (Харьков), Б. А. Коринева (Донецк) и Р. В. Фильца (Львов).

Преобразователи частоты, каскады, муфты. Новые конструкции одномашинных преобразователей частоты были рассмотрены в докладах Г. А. Шагиняна и В. И. Попова (Горький) и П. В. Петросяна (Ереван). Результаты теоретических и экспериментальных исследований электрических машин каскадного типа были освещены в докладах М. М. Красношапка (Киев) и Р. П. Просуших (Севастополь). С рекомендациями по проектированию электромагнитных муфт выступили Б. А. Ставровский (Киев) и С. М. Герцов (Москва).

Микромашины. Шаговые электродвигатели. Доклады В. В. Хрущева (Ленинград), Д. В. Свечарника (Москва), Л. И. Столова (Казань), В. И. Мельникаса и П. И. Кастраускаса (Каунас), М. А. Ермилова (Москва), В. В. Варлей (Москва), В. П. Паная (Харьков) касались вопросов теории, определения параметров и сравнения различных типов микромашин.

Особенности расчета, режимы работы и области применения шаговых электродвигателей были освещены в докладах Б. Е. Коника (Ленинград), Н. Н. Левина (Рига), А. С. Куракина (Воронеж), Б. К. Карпенко, Ю. К. Васильева и В. И. Ларченко (Киев), М. Д. Лабзина (Ленинград), Д. В. Кофмана, К. В. Капелько и В. А. Игнатова (Москва). О применении различных схем управления шаговыми двигателями

телями доложили Л. В. Садовский (Москва), В. Е. Гизила (Киев) и др.

Вопросы теории, расчета характеристик и параметров гистерезисных двигателей были рассмотрены в докладах Н. З. Мастяева (Москва), О. Б. Певзнера (Ленинград), Р. А. Хуснутдинова и В. И. Ермолина (Казань).

Вентильные бесконтактные двигатели постоянного и переменного тока. Ш. И. Лутидзе (Москва) в своем докладе изложил ряд теоретических вопросов, касающихся электрических машин с управляемым полупроводниковым коммутатором. Теоретические разработки и конструктивные разновидности бесконтактных двигателей постоянного тока были отражены в докладах А. А. Дубенского (Москва) и Э. Р. Гейнца (Томск).

Л. С. Писарик (Минск) и В. К. Лозенко (Москва) ознакомили участников конференции с разработанными бесконтактными вентильными двигателями переменного тока.

Проблема создания высокочастотных супербыстроходных электрических машин. В докладе И. Д. Урусова были обобщены основные научные проблемы, возникшие в связи с разработкой высокочастотных быстроходных бесконтактных электрических машин, и указаны методы исследования и решения этих проблем. Экспериментальные данные по тепловым сопротивлениям супербыстроходной машины были приведены в докладе А. С. Мышкина.

Участники конференции в своем решении отметили необходимость продолжения и расширения научно-исследовательской работы.

тельских и опытно-конструкторских работ в области создания высоконадежных бесконтактных электрических машин.

В решении конференции признается целесообразным организовать IV Всесоюзную конференцию по бесконтактным электрическим машинам в 1970 г. в Риге, а для облегчения подготовки конференции проводить симпозиумы по отдельным актуальным вопросам научно-технического характера, в том числе по вопросам надежности и экономичности бесконтактных электрических машин. Намечено проведение симпозиумов по следующим вопросам:

- частотное регулирование и вентильные двигатели;
- шаговые двигатели;
- бесконтактные двигатели постоянного тока;
- двигатели с катящимся ротором;
- сверхбыстроходные электрические машины;
- магнитоэлектрические машины;
- бесконтактные машины и поворотные трансформаторы;
- бесконтактные электрические машины малой мощности;
- индукционные машины;
- бесконтактные синхронные машины и специальные вопросы теории поля в этих машинах.

В решении отмечается также необходимость улучшения патентной и информационной работы в области бесконтактных электрических машин.

Ю. И. Дикин, В. К. Лапшин, А. А. Свиридов и М. И. Щукин



Новые книги издательства «Энергия»

Берковский А. М. и Лыков Ю. И. **Мощные конденсаторные батареи (шунтовые)**. 1967. 168 с. 49 к.

Баринов Н. В. **Электропривод одноковшовых экскаваторов типов ЭКГ-4 и ЭКГ-4,6**. Изд. 2-е, переработ. и доп. 1967. 152 с. (Б-ка электромонтера. Вып. 231). 32 к.

Бирзинек Л. **Полупроводниковые преобразователи**. Пер. с латыш. 1967. 72 с. (Б-ка электромонтера. Вып. 227). 13 к.

Дубелский А. А. **Бесконтактные двигатели постоянного тока**. 1967. 144 с. 38 к.

Клюев А. С. **Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка**. 1967. 104 с. (Б-ка по автоматике. Вып. 247). 35 к.

Кондюкова Е. И. и Редькин Б. Е. **Аналогоцифровые преобразователи систем автоматического контроля**. 1967. 80 с. (Б-ка по автоматике. Вып. 248). 26 к.

Кузьмин В. А. и Сенаторов К. Я. **Четырехслойные полупроводниковые приборы**. 1967. 184 с. 52 к.

Лопухина Е. М. и Сомихина Г. С. **Асинхронные микромашины с полым ротором. Теория, основы расчета и испытания**. 1967. 488 с. 1 р. 48 к. в перепл.

Метод монтажа накруткой. 1967. 48 с. (Б-ка по автоматике. Вып. 238). 16 к. Авт.: Долкарт В. М., Новик Г. Х., Степанов В. Н., Танаев М. Я., Федосеев А. Н.

Мясникова Е. Н. **Объективное распознавание звуков речи**. 1967. 148 с. (Б-ка по автоматике. Вып. 242). 37 к.

Островский А. С. **Электроприводы поточно-транспортных систем**. 1967. 184 с. 63 к. в перепл.



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. В. Афанасьев, А. И. Бертинов, В. Г. Бирюков, В. А. Веников, Б. Б. Воронецкий, И. С. Ефремов, Л. А. Жекулин, Д. Г. Жимерин, А. М. Залесский, П. М. Ипатов, М. П. Костенко, В. С. Кулебакин, Л. Г. Мамиконянц (зам. главного редактора), Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, Д. В. Разевич (главный редактор), А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2/10. Телефон К 4-24-80.

Почтовый адрес: Москва, Главный почтamt, абонентский ящик № 648.

Адрес для телеграмм: МОСКВА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

СОДЕРЖАНИЕ

П. С. Непорожний — Электрификация СССР за годы Советской власти	поле в воздушном зазоре синхронной явнополюсной машины	53
Г. В. Алексенко — Важнейшие научно-технические проблемы развития отечественной энергетики .	И. К. Федченко и О. С. Ильенко — Теория длинной открытой дуги переменного тока и постоянная времени дуги	58
А. И. Майорец — Основные этапы развития автоматизированного электропривода в СССР	В. П. Шипилло — Вентильный преобразователь как элемент системы автоматического регулирования	63
И. П. Полушкин — Деятельность энергетической общественности в годы Советской власти	К. И. Кожевников — Экстремальное управление главным приводом обжимного прокатного стана	70
В. А. Веников, Н. Д. Анисимова, Р. Мичке и Т. И. Шелухина — Исследование с помощью ЦВМ статической устойчивости сложных автоматически регулируемых электрических систем	Н. Н. Шереметьевский и О. И. Шустер — Анализ и синтез транзисторных инверторов, выполненных по схемам кольцевых коммутаторов	78
Е. П. Фигурнов — Теория полупроводниковых импульсных реле времени	М. В. Гельман — Уменьшение скорости нарастания и амплитуды «всплесков» прямого напряжения на вентиляте	83
Л. А. Жуков и Ч. С. Халилов — Пределы мощности электропередач с промежуточными отборами мощности для железнодорожного транспорта, электрифицированного на переменном токе	Н. Х. Ситник и А. А. Русских — Процесс выключения тиристора	86
И. А. Глебов, В. М. Бобров, Е. Н. Попов, К. В. Лапаев и А. В. Пташгин — Исследование полупроводниковой системы возбуждения мощного турбогенератора	32	IZ OПЫТА РАБОТЫ
Г. В. Михневич и В. М. Фиалков — Об автоматическом регулировании синхронных компенсаторов	С. А. Бабушкин, Г. З. Ильин и Л. В. Никитина — Об определении произвольных постоянных при расчете переходных процессов в линейных системах автоматического управления	91
П. М. Ипатов, А. А. Дукштау и Ф. М. Детинко — Вибрации гидрогенераторов	43	ХРОНИКА
А. И. Дулькин и А. В. Иванов-Смоленский — Магнитное	III Всесоюзная конференция по бесконтактным электрическим машинам	92
	Новые книги издательства «Энергия»	93



CONTENTS

Electrification of the U. S. S. R. During the Years of Soviet Power — П. С. Непородгны	The Magnetic Field in the Air Gap of a Salient-pole Synchronous Machine — А. И. Дулькин, А. В. Иванов-Смоленский	53
The Most Important Scientific and Engineering Problems in the Development of the Soviet Power Industry — Г. В. Алексенко	The Theory of Long Open A. C. Arcs and Their Time Constants — И. К. Федченко, О. С. Ильенко	58
The Development of Automatic Electric Drives During the Years of Soviet Power — А. И. Майорец	The Valve Type Converter as an Element in an Automatic Control System — В. П. Шипилло	63
The Activities of Power Engineering Societies Over the Past 50 Years of Soviet Power — И. П. Полушкин	Extremum Control of the Main Drive in a Blooming Mill — К. И. Кожевников	70
A Digital Computer Study of the Steady-state Stability of Complex Automatically Controlled Power Systems — В. А. Веников, Н. Д. Анисимова, Р. Мичке, Т. И. Шелухина	Analysis and Synthesis of Ring Commutator Type Transistorized Inverters — Н. Н. Шереметьевский, О. И. Шустер	78
Fundamentals of Semiconductor Impulse Type Time Relays — Е. П. Фигурнов	Reducing the Rate of Rise and the Magnitude of «Pips» in the Direct Voltage Across a Valve — М. В. Гельман	83
Transfer Limits for Transmission Lines with Intermediate Power Take-off for Electrified A. C. Railway Transport — Л. А. Джулов, С. С. Халилов	The Process of Disconnecting a Thyristor — Н. Х. Ситник, А. А. Русских	86
A Study of a Semiconductor Excitation System for a Large Turbo-generator — И. А. Глебов, В. М. Бобров, Е. Н. Попов, К. В. Лапаев, А. В. Пташгин	32	FROM OPERATING EXPERIENCE
On Automatic Regulation of Synchronous Condensers — Г. В. Михневич, В. М. Фиалков	36 On Determining the Arbitrary Constants in Linear Automatic Control Circuit Transient Calculations — С. А. Бабушкин, Г. З. Ильин, Л. В. Никитина	91
Vibrations in Hydro-electric Generators — П. М. Ипатов, А. А. Дукштау, Ф. М. Детинко	43	CHRONICLE
	48	92

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО № 11, 1967

Рефераты опубликованных в номере статей

УДК 621.311

Электрификация СССР за годы Советской власти.
Непорожний П. С. «Электричество», 1967, № 11

В статье излагаются основные этапы электрификации СССР за годы советской власти. Подчеркивается основополагающая роль плана ГОЭЛРО, разработанного по инициативе В. И. Ленина. Приводятся цифры, характеризующие рост отечественной энергетики за пятьдесят лет.

Развитие энергетики в 1966—1970 гг. пойдет в соответствии с Директивами по новому пятилетнему плану развития народного хозяйства, утвержденными XXIII съездом КПСС.

К 1970 г. производство электроэнергии в СССР возрастет до 850 млрд. квт·ч. Главным направлением в развитии электрификации на ближайшие годы, подчеркивается в статье, будет дальнейшая централизация электроснабжения и концентрация мощностей на крупных районных электростанциях.

УДК 621.311

Важнейшие научно-технические проблемы развития отечественной энергетики.

Алексенко Г. В. «Электричество», 1967, № 11

В статье излагаются важнейшие научно-технические проблемы развития отечественной энергетики, которые необходимо решить в ближайшем будущем.

Среди этих проблем: разработка методики выбора наиболее рационального построения системообразующей сети и межсистемных связей и методики определения надежности энергосистем; разработка оптимальной системы управления энергообъединениями с широким использованием современных средств вычислительной и управляющей техники, связи и телемеханики; вопросы автоматизации нормальных и аварийных режимов энергосистем, создание электрических машин и аппаратов большой мощности для электрических систем переменного и постоянного тока.

В статье излагаются также проблемы, которые встают перед отечественной электропромышленностью при осуществлении дальнейших планов электрификации нашей страны.

В статье подчеркивается значение таких перспективных методов получения электрической энергии, как атомные станции и МГД-генераторы. Илл. 1.

УДК 621.3

Основные этапы развития автоматизированного электропривода в СССР.

Майорец А. Н. «Электричество», 1967, № 11

В статье описываются этапы развития автоматизированного электропривода в СССР за истекшие 50 лет.

Отмечается ведущее значение металлургического электропривода. Рассматриваются пути дальнейшего развития электропривода и основные направления совершенствования электродвигателей.

Перспективным становится применение преобразователей тока, используемых для питания нереверсивных и реверсивных электроприводов. Важной задачей является внедрение в промышленность в ближайшие годы статических полупроводниковых преобразователей для реверсивных регулируемых электроприводов постоянного тока мощностью до 10 тыс. квт и переменного тока мощностью до 40 тыс. квт при скорости вращения электродвигателей до 3 500 об/мин.

Основным направлением развития низковольтных средств автоматизации является все большее повышение комплексности, блочности в поставках электротехнической промышленности и надежности работы аппаратуры в эксплуатации Табл. 3. Илл. 5. Библ. 7.

УДК 061.22

Деятельность энергетической общественности в годы Советской власти.

Полушкин И. П. «Электричество», 1967, № 11

В статье освещаются основные этапы деятельности энергетической общественности за весь пятидесятилетний период существования Советского государства.

Говорится о заслуге научно-технической общественности, видных специалистов-энергетиков в разработке плана ГОЭЛРО, перенимавшихся организаций, общества, оказавшие большую помощь стране во время Великой Отечественной войны. Освещается послевоенный период деятельности НТОЭП, направленной на ускорение технического прогресса в энергетике.

Читатель узнает об организационной структуре общества в разное время.

В конце статьи автор указывает ближайшие задачи НТОЭП.

УДК 621.3.016.351:681.942

Исследование с помощью ЦВМ статической устойчивости сложных автоматически регулируемых систем.

Беников В. А., Анисимова Н. Д., Мичке Р.,

Шелухина Т. И. «Электричество», 1967, № 11

Основное внимание в статье уделено вопросу исследования статической устойчивости систем в предположении отсутствия самораскачивания. При этом находится статическая характеристика, предельный режим системы, его параметры, а также коэффициент запаса по устойчивости при $\frac{dP}{d\delta} = 0$. Дано краткое описание алгоритмов и

программы для ЦВМ Урал-2, разработанных на основании предлагаемой методики. Приводятся результаты расчетов по программе, дается их сравнительная оценка. Показано, что программы могут быть широко применены в проектных и эксплуатационных расчетах статической устойчивости регулируемых систем, содержащих до 15 электростанций, объединенных сетью любой конфигурации. Библ. 10. Илл. 3.

УДК 621.318.6.315.592

Теория полупроводниковых импульсных реле времени.

Фигуров Е. П. «Электричество», 1967, № 11

Рассматривается теория работы импульсных реле времени с учетом свойств полупроводниковых приборов. Использована кусочно-линейная аппроксимация характеристик диодов и транзисторов. Расчет ведется по предельным состояниям, т. е. при наибольших обратных токах $p-n$ -переходов и падений напряжения в прямом направлении на переходах и наименьшем эксплуатационном коэффициенте передачи тока базы.

Найдены условия и выведены зависимости для определения параметров схемы реле, при которых свойства полупроводниковых приборов и токи утечки практически не влияют на стабильность выдержки времени. Даются оптимальные соотношения напряжений в схеме, обеспечивающие наименьшую нестабильность схемы.

Рассмотрены частные случаи реле без дозирующей емкости и реле без зарядных резисторов. Табл. 1. Библ. 8. Илл. 1.

УДК 621.315

Пределы мощности электропередач с промежуточными отборами мощности для железнодорожного транспорта, электрифицированного на переменном токе.

Жуков Л. А., Халилов Ч. С. «Электричество», 1967, № 11

Разбирается блок-схема расчета предела мощности в двухмашинной схеме замещения системы при учете несимметрии и случайного характера изменения мощности промежуточной нагрузки.

Программа, составленная применительно к этой блок-схеме, предусматривает применение итерационного процесса для определения характеристик режима тяговых подстанций на первом этапе расчета, на котором нагрузка этих подстанций принимается заданной детерминированно. На заключительном этапе расчета используется метод статистических испытаний для получения функции распределения предела мощности. Приведенные результаты расчетов позволяют считать во многих случаях справедливой приближенную оценку пропускной способности электропередач при детерминированном задании промежуточной нагрузке и неучете ее несимметрии. Библ. 6. Илл. 5.

УДК 621.313.322--81+621.315.592

Исследование полупроводниковой системы возбуждения мощного турбогенератора.

Глебов И. А., Борцов В. М., Попов Е. Н., Лапаев К. В., Пташкин А. В. «Электричество», 1967, № 11

Рассматриваются результаты исследований и испытаний в статических и динамических режимах полупроводниковой системы возбуждения турбогенератора ТВВ-200-2, проведенных на мощной ГРЭС. Приведены параметры, технические характеристики и предложен способ оптимальной настройки системы возбуждения совместно с устройствами регулирования. При этом с целью устранения отрицательного влияния на быстродействие были сняты сопротивления, включенные параллельно обмоткам возбуждения высокочастотного возбудителя (последовательной, согласно включенной и противовключенной). Для повышения устойчивости системы регулирования принят перекомпонованный вариант возбудителя.

Эффективность системы возбуждений в аварийных режимах проверена в опытах внесинхронных (трехфазном и несимметричных) коротких замыканий (с различной длительностью) при работе турбогенератора в энергосистеме с активной нагрузкой 164 Мвт. Система возбуждения обеспечивает необходимое быстродействие (более 2 отн. ед/сек) и поглощает напряжение ($2u_{fH}$) как при небольших снижениях напряжения (5%), так и при близких коротких замыканиях. Выявлено положительная особенность действия последовательной обмотки возбудителя при близких коротких замыканиях, которая проявляется главным образом в послевоарийном режиме, а не во время короткого замыкания, как это считалось ранее.

Рассмотрены пути дальнейшего совершенствования полупроводниковой системы возбуждения. Табл. 2. Илл. 5.

УДК 621.313.325+621.316.722

Об автоматическом регулировании синхронных компенсаторов.

Михневич Г. В., Фиалков В. М. «Электричество», 1967, № 11

Освещаются результаты исследования системы автоматического регулирования синхронных компенсаторов и определяется ее рациональная структура.

Рассматривается энергосистема, которая содержит передающую станцию, работающую через линию электропередачи на шины неизменного напряжения, и синхронный компенсатор, включенный в промежуточной точке линии. Исследования проводились с помощью уравнений малых отклонений на электронных вычислительных машинах непрерывного действия.

Приведена структурная схема энергосистемы, позволяющая установить основные особенности автоматически регулируемого синхронного компенсатора. В результате исследований доказано, что увеличение интенсивности регулирования генераторов передающей станции в функции производных оказывает отрицательное влияние на движение ротора синхронного компенсатора в переходном процессе.

Полученные результаты позволяют сформулировать основные требования к структуре закона регулирования синхронного компенсатора. Табл. 3. Библ. 8. Илл. 5.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО № 11, 1967

Рефераты опубликованных в номере статей

УДК 621.313.322—82:62—752

Вибрации гидрогенераторов.

Ипатов П. М., Дукштая А. А., Детинко Ф. М.
«Электричество», 1967, № 11

Повышение вибрации статоров гидрогенераторов объясняется в статье наличием дробных гармонических составляющих н. с. реакции якоря, когда число пазов на полюс и фазу дробное.

На основании большого количества экспериментальных данных сделаны выводы, позволяющие в процессе проектирования более обоснованно подходить к выбору обмотки статора гидрогенератора, чтобы исключить возможность появления субгармонических составляющих в кривой магнитного поля в воздушном зазоре, определить их величину и степень влияния на вибрацию статоров. Табл. 1. Илл. 5. Библ. 9.

УДК 621.313.32:621.3.013

Магнитное поле в воздушном зазоре синхронной явнополюсной машины.

Дулькин А. И., Иванов Смоленский А. В.
«Электричество», 1967, № 11

Выполнен анализ магнитного поля в воздушном зазоре трехфазной синхронной машины с учетом зубчатости статора и явнополюсности ротора.

Составлены обобщенные выражения для гармонических полей зубцовых и незубцовых порядков в воздушном зазоре. Рассмотрены некоторые особенности формирования магнитных полей в случае применения на якоре дробных обмоток. Библ. 9, табл. 1.

УДК 537.523.5:621.3.014.31.025.001

Теория длинной открытой дуги переменного тока и постоянная времени дуги.

Федченко И. К., Ильинко О. С. «Электричество», 1967, № 11

Рассматриваются теоретические исследования авторов, основанные на допущении, что отводимая от дуги мощность и сопротивление дуги являются однозначными функциями теплосодержания. Указанные функции приближенно определены для случая открытой дуги, горящей в воздухе при атмосферном давлении. Отмечая, что постоянная времени дуги характеризует дугу при малых возмущениях, авторы дают формулу для определений постоянной времени дуги, которая является более общей по отношению к известным формулам.

Экспериментальные исследования, выполненные путем наложения на постоянный ток дуги небольшой переменной составляющей различной частоты, также подтверждают факт зависимости постоянной времени дуги от скорости изменения теплосодержания при малых токах дуги. Библ. 6. Илл. 3.

УДК 621.314.652.2:62-523.2

Вентильный преобразователь как элемент системы автоматического регулирования.

Шипилло В. П., «Электричество», 1967, № 11

Исследуются с минимумом допущений динамические свойства вентильного преобразователя, освещаются автоколебательные режимы систем автогрегулирования, которые могут возникнуть благодаря специфике этих свойств. Показано, что динамика собственно вентильного преобразователя полностью определяется связью между нестационарными временными функциями угла управления и внутренней э. д. с., а специфика динамических свойств преобразователя зависит от двух его особенностей: дискретности управления и «тиратронной» характеристики вентилей. Библ. 16. Илл. 7.

УДК 62-50

Экстремальное управление главным приводом обжимного прокатного стана.

Кожевников К. И. «Электричество», 1967, № 11

Освещается сущность экстремального управления, которая заключается в следующем: перед каждым пропуском регуляторы динамического тока якоря и установленнойся скорости прокатных двигателей настраиваются автоматически при помощи вычислительной машины так, что прокатка выполняется при рациональном режиме, который обеспечивает минимально возможный нагрев двигателей.

Применение экстремального управления вместо ручного позволит значительно снизить нагрев установленных двигателей и, как следствие этого, повысить производительность обжимного стана.

Приводятся формулы для расчета рационального режима двигателей, показаны объем информации, необходимой для реализации экстремального управления, и блок-схема алгоритма работы вычислительной машины.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке «советчика» оператора для станов с ручным управлением и при проектировании главного привода. Табл. 1. Библ. 9. Илл. 6.

УДК 621.3

Анализ и синтез транзисторных инверторов, выполненных по схемам кольцевых коммутаторов.

Шереметьевский Н. Н., Шустер О. И. «Электричество», 1967, № 11

Рассматриваются вопросы рационального выбора логической структуры, логического анализа и синтеза кольцевых коммутаторов. Для анализа и синтеза кольцевых коммутаторов в статье используется известный метод матриц состояний выходов. Приведен пример анализа вариантов трехкаскадных коммутаторов. В процессе этого анализа выявлена роль дополнительных связей коммутатора.

Для решения задачи синтеза водится понятие «исходной» структуры коммутатора, обеспечивающей правильную его работу только в случае, когда начальным является одно из состояний правильной работы. Для записи состояний матриц выходов коммутаторов с большим числом каскадов в статье применяется запись состояний выходов двоичными числами. Это упрощает решение задачи синтеза благодаря общим свойствам матриц коммутаторов с четным и нечетным числом каскадов, проявляющимися по взаимозависимости чисел состояний матриц и отражающих структурные закономерности схем коммутаторов.

На базе этих общих свойств предложен способ получения матриц коммутаторов с большим числом каскадов по известной матрице коммутатора с меньшим числом каскадов. Разработаны методы коррекции и оптимизации коммутаторов посредством изменения чисел состояния матрицы коммутатора. Дан пример анализа и синтеза схемы шестикаскадного коммутатора и оптимизация его структуры. Библ. 5. Илл. 4.

УДК 621.314.572.015.2

Снижение скорости нарастания и амплитуды «всплесков» прямого напряжения на вентиле.

Гельман М. В. «Электричество», 1967, № 11

Основной причиной прорывов в инверторах, выполненных по трехфазной мостовой схеме, является очень быстрое нарастание прямого напряжения на вентиле при зажигании противофазного вентиля. Снижение скорости нарастания и амплитуды «всплесков» возможно с помощью цепочек rC , шунтирующих вентиль. Однако величины сопротивлений, требуемых для демпфирования колебаний при восстановлении обратного напряжения и для ограничения «всплеска» прямого напряжения оказываются различными. Возможно лио применение промежуточного значения сопротивления, что обеспечивает лишь частичное демпфирование колебаний, либо шунтирование части сопротивления диодом, что обеспечивает оптимальные условия демпфирования при восстановлении обратного и прямого напряжения на вентиле. Библ. 6. Илл. 3.

УДК 621.314.632.4.014.2

Процесс выключения тиристора.

Ситник Н. Х., Русских А. А. «Электричество», 1967, № 11

Рассматривается определение параметров дополнительных устройств, предназначенных для ограничения величины коммутационного перенапряжения на тиристоре. Анализируются потери мощности, приобретающие в этих устройствах на повышенных частотах значительный удельный вес в объеме общих потерь в вентильном блоке. Основной упор сделан на применение широко распространенных RC -цепей.

В соответствии с физической интерпретацией переходного процесса в контуре коммутации принятая схема замещения для расчета этого процесса, основана на представлении тиристора ключом, размыкающимся в определенный момент времени, характеризуемый определенным током через эквивалентную индуктивность. Произведен анализ всех возможных режимов работы RC -цепей с учетом реальных динамических констант отечественных тиристоров. Даётся инженерная методика расчета параметров RC -цепей, ограничивающих коммутационные перенапряжения на одиночном тиристоре на любом заданном уровне; приведен пример расчета. Библ. 4. Илл. 5.

УДК 62-50

Об определении произвольных постоянных при расчете переходных процессов в линейных системах автоматического управления.

Бабушкин С. А., Ильин Г. З., Никитина Л. В.,
«Электричество», 1967, № 11

Выведены формулы, по которым можно вычислять произвольные постоянные при решении однофазного дифференциального уравнения произвольного порядка через начальные условия и корни характеристического уравнения.

При использовании этих формул упрощается процесс определения произвольных постоянных в процессе расчета переходных процессов в линейных динамических системах. Библ. 3.

ОТКРЫТА ПОДПИСКА

на ЖУРНАЛЫ издательства «ЭНЕРГИЯ» на 1968 г.

«ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Научно-технический журнал
Орган Академии наук СССР,
Государственного комитета
Совета Министров СССР
по науке и технике
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 88-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 9 р. 60 к.,
на 6 мес. — 4 р. 80 к.

Цена одного номера 80 коп.

«ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»

Научно-технический журнал
Орган Академии наук СССР,
Государственного комитета
Совета Министров СССР
по науке и технике
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 15-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 9 р. 60 к.,
на 6 мес. — 4 р. 80 к.

Цена одного номера 80 коп.

«СВЕТОТЕХНИКА»

Научно-технический
и производственный журнал
Орган Министерства
электротехнической промышленности
СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 14-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 3 р. 60 к.,
на 6 мес. — 1 р. 80 к.

Цена одного номера 30 коп.

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

Производственно-технический журнал
Орган Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 39-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 9 р. 60 к.,
на 6 мес. — 4 р. 80 к.

Цена одного номера 80 коп.

«ЭНЕРГЕТИКА»

Производственно-массовый журнал
Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального комитета профсоюза
рабочих электростанций
и электротехнической промышленности

Год издания 16-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 2 р. 40 к.,

на 6 мес. — 1 р. 20 к.

Цена одного номера 20 коп.

«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»

Научно-технический журнал
Министерства электротехнической
промышленности СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 39-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 8 р. 40 к.,

на 6 мес. — 4 р. 20 к.

Цена одного номера 70 коп.

«ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ»

(Приложение к журналу
«Электрические станции»)

Производственно-технический журнал
Орган Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 13-й 6 номеров в год

Подписная цена:

на год — 2 р. 40 к.,

на 6 мес. — 1 р. 20 к.

Цена одного номера 40 коп.

«ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА»

Производственно-технический журнал
Орган Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 23-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 4 р. 80 к.,

на 6 мес. — 2 р. 40 к.

Цена одного номера 40 коп.

«ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»

Научно-технический
и производственный журнал
Министерства энергетики
и электрификации СССР
и Центрального правления
Научно-технического общества
энергетической промышленности

Год издания 38-й 12 номеров в год

Подписная цена:

на год — 7 р. 20 к.,

на 6 мес. — 3 р. 60 к.

Цена одного номера 60 коп.

Произвести подписку на журналы можно у общественных распространителей печати в пунктах подписки
«Союзпечать» по месту работы и учебы, в агентствах «Союзпечати», а также в любом почтамте и отделении связи.