



ISSN 0013-5380

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1980

· ЭНЕРГИЯ ·

12

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

12

1980

ДЕКАБРЬ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

МОСКВА

ЭНЕРГИЯ

В декабре 1980 г. вся энергетическая общественность страны отмечает 60-летие первого в мировой практике единого перспективного плана развития народного хозяйства на базе электрификации — плана ГОЭЛРО.

Осуществление широкой электрификации всей страны — один из главных заветов В. И. Ленина — это единственный возможный путь создания материально-технической базы коммунизма. В электрификации В. И. Ленин видел основу для всестороннего развития производительных сил и ликвидации вековой экономической и культурной отсталости.

В основу плана ГОЭЛРО были положены ленинские принципы электрификации страны. Это прежде всего техническое перевооружение всех отраслей народного хозяйства на базе использования электрической энергии, быстрый рост производительности труда на основе электрификации всех производственных процессов; обеспечение преимущественного развития тяжелой промышленности — основы народного хозяйства и укрепления обороноспособности страны; достижение опережающих темпов роста электроэнергетического хозяйства по сравнению с другими отраслями промышленности; строительство крупных электростанций, которые могли бы снабжать электроэнергией целые районы; использование для выработки электроэнергии местных видов топлива с тем, чтобы свести к минимуму затраты на его перевозку; широкое использование водных ресурсов путем строительства мощных гидроэлектростанций с учетом нужд транспорта и ирригации; строительство высоковольтных линий электропередачи, создание районных энергосистем за счет объединения электросетями мощных районных электростанций, а затем образование единой энергетической системы всей страны. И важнейший принцип — рациональное размещение новых электростанций как фактора для равномерного распределения производительных сил по территории страны. Эти принципы и поныне сохраняют свое основополагающее значение при определении путей дальнейшего развития народного хозяйства страны в целом и электроэнергетики в особенности.

План ГОЭЛРО намечал в течение 10—15 лет сооружение тридцати районных электростанций (20 тепловых и 10 гидравлических) на общую мощность 1750 тыс. кВт, создание на этой базе крупной машинной промышленности, реконструкцию сельского хозяйства и электрификацию железнодорожного транспорта.

Организаторами и активными участниками претворения в жизнь ленинского плана ГОЭЛРО в то время были инженеры-большевики И. И. Радченко, П. Г. Смидович, С. Я. Аллилуев и выдающийся ученый инженер, председатель Комиссии ГОЭЛРО, первый председатель Госплана, впоследствии вице-президент Академии наук СССР Глеб Максимилианович Кржижановский, выдающиеся инженеры Г. О. Графтио, по проекту и под руководством которого строилась Волховская ГЭС, А. В. Винтер, возглавляющий строительство Шатурской ГЭС и Днепровской ГЭС, Б. Е. Веденеев принимавший участие в строительстве Волховской и Днепровской ГЭС, И. Г. Александров, по проекту которого сооружалась Днепровская ГЭС, и многие другие.

Уже к 1928 г. на базе широкой электрификации Советский Союз закончил восстановление народного хозяйства и подготовил переход к социалистической индустриализации.

Последовательно претворяя в жизнь план ГОЭЛРО и пятилетние планы экономического и социального развития страны, советский народ под руководством Коммунистической партии достиг больших успехов в индустриализации, создании надежной электроэнергетической базы, в развитии производительных сил.

Электрификация стала важнейшим фундаментом технического прогресса всех отраслей социалистической экономики и основой постоянного роста материального благосостояния советского народа.

План ГОЭЛРО был успешно выполнен к 1935 г.

Успешное выполнение третьего пятилетнего плана было прервано нападением фашистской Германии на Советский Союз. Фашистские захватчики разрушили свыше 60 крупных электростанций и около 10 тыс. км линий электропередачи. Из районов, находившихся под угрозой оккупации, оборудование электростанций пришлось демонтировать и эвакуировать на Урал, в Сибирь, Казахстан и Среднюю Азию.

Но уже в первые годы войны началось восстановление разрушенных фашистскими захватчиками электростанций.

К концу 1946 г. было восстановлено 58 электростанций. К этому времени мощность электростанций СССР достигла уровня 1940 г.

Победа советского народа в Великой Отечественной войне создала все предпосылки для бурного развития электроэнергетического хозяйства страны и его технического прогресса.

В 1954 г. в Обнинске была пущена первая в мире атомная электростанция мощностью 5 тыс. кВт. Производство электроэнергии в 1975 г. превысило триллион киловатт-часов.

Огромная работа проведена по созданию Единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) СССР.

В настоящее время электростанции, входящие в ЕЭЭС СССР, производят около 90% всей электроэнергии, вырабатываемой в стране.

Сейчас за сутки в стране вырабатывается до 4 млрд. кВт·ч электроэнергии, что составляет половину годовой выработки по плану ГОЭЛРО.

Следует подчеркнуть, что по ряду важнейших технических направлений — по масштабам электрификации, развитию теплофикации, мощности энергообъединений, по уровню применяемых напряжений высоковольтных электропередач, концентрации мощности на электростанциях — СССР занимает передовые позиции в мире.

Сказанное свидетельствует о больших достижениях в развитии советской электроэнергетики. Естественно, что они были бы невозможными без соответствующего развития топливно-энергетической базы и электротехнической промышленности страны, которые в настоящее время полностью обеспечивают потребность электроэнергетики в топливе и электрооборудовании.

Научно-технический прогресс в области электроэнергетики и электротехнической промышленности требовал и требует широкого развития фундаментальных и прикладных исследований и разработок в области учения электричества. С первых лет советской власти и особенно с самого начала работ по реализации плана ГОЭЛРО партия, правительство и лично В. И. Ленин уделяли этому вопросу большое внимание и оказывали большую помощь в развитии и создании научно-исследовательских институтов и экспериментальных баз.

В настоящее время Советский Союз занимает передовые позиции в мире в этом отношении и располагает всем необходимым для проведения исследований и разработок, направленных на дальнейший технический прогресс в области электроэнергетики и электротехники и обеспечение быстрого развития этих отраслей народного хозяйства на передовой научно-технической основе.

В. И. Ленин, говоря о мерах по обеспечению электрификации страны, по выполнению плана ГОЭЛРО, всегда подчеркивал необходимость повседневной широкой научно-технической пропаганды достижений в области учения об электричестве и его практических приложениях. Эту важнейшую задачу успешно выполняет отечественная научно-техническая печать и в том числе старейший русский электротехнический журнал «Электричество», недавно отметивший свой 100-летний юбилей.

Электроэнергетика СССР от плана ГОЭЛРО до наших дней

БОРИСОВ Е. И., первый заместитель министра энергетики и электрификации СССР

Огромные достижения Советского Союза и его динамичное развитие неразрывно связаны с именем В. И. Ленина, вооружившего наш народ программой строительства бесклассового общества. Последовательно претворяя в жизнь ленинские принципы построения социализма, советский народ под руководством Коммунистической партии за короткий исторический срок превратил ранее отсталую аграрную страну в мировую индустриальную державу с передовой промышленностью, мощной энергетической базой, высокоразвитым сельским хозяйством, державу, стоящую ныне на передовых позициях мирового научно-технического прогресса.

В электрификации В. И. Ленин видел путь к коренному переустройству всей экономики и развитию в Советском государстве передовых производительных сил, которые могли бы служить основой нового общественного строя.

В. И. Ленин обосновал необходимость создания экономического фундамента социалистического общества на основе электрификации. Он был инициатором и вдохновителем разработки первого в истории человечества единого народнохозяйственного плана на базе электрификации — плана ГОЭЛРО — и организатором его осуществления.

Научная концепция плана ГОЭЛРО предполагала осуществление электрификации народного хозяйства путем централизованного электроснабжения от крупных электростанций и последовательного объединения их в районные и межрайонные электрические системы. Одновременно для ускорения электрификации народного хозяйства предполагалось и широкое использование децентрализованных источников электроснабжения. С тех пор определяющими принципами развития нашей энергетики являются принципы концентрации производства электроэнергии на мощных тепловых, гидравлических, а ныне и атомных электростанциях и централизации электроснабжения от мощных энергообъединений, связанных общей высоковольтной сетью.

План ГОЭЛРО предусматривал восстановление народного хозяйства страны и дальнейшее его развитие на базе широкого осуществления электрификации страны, перевод хозяйства, в том числе земледелия и транспорта, на новую техническую базу, базу крупного производства. В энергетике планом ГОЭЛРО предусматривалась реконструкция целого ряда дореволюционных энергетических установок, но основным и главным было сооружение в течение 10—15 лет 30 новых по тем временам крупных электростанций суммарной мощностью 1,75 млн. кВт и необходимых электрических сетей. В числе намеченных предусматривалось сооружение 20 тепловых электростанций мощностью 1,11 млн. кВт и 10 гидроэлектростанций мощностью 0,64 млн. кВт.

Создание необходимой энергетической базы должно было обеспечить развитие старых промышленных центров страны (Петроградского, Московского, Приволжского, Донецкого, Урала, Баку), создавать предпосылки индустриального развития

Сибири (в первую очередь Кузбасса), а также национальных районов: Казахстана, Туркестана и др.

В плане ГОЭЛРО были сформулированы основные принципы комплексного использования энергоресурсов страны за счет создания гидроузлов для одновременного решения вопросов энергетики, ирригации, водного транспорта, комбинированной выработки тепла и электроэнергии, совместного режима работы гидроэлектростанций и тепловых электростанций в энергосистемах.

Осуществление плана ГОЭЛРО начиналось в исключительно тяжелых условиях. До революции (в 1916 г.) суммарная мощность электростанций России составляла 1,19 млн. кВт, а выработка электроэнергии 2,58 млрд. кВт·ч. Мощность электростанций общего пользования составляла всего около 300 МВт. Электростанции, как правило, работали изолированно, на них применялись различные напряжения и частоты электрического тока. Развитие линий электропередачи было ничтожно. Протяженность всех линий напряжения выше генераторного составляла всего 100 км. Первая линия электропередачи напряжением 60 кВ была построена в 1914 г. от электростанции мощностью 15 МВт, сооруженной на торфяных болотах в районе г. Богородского (ныне ГРЭС им. Классона). К 1921 г. и без того отсталое энергетическое хозяйство было разрушено гражданской войной, в результате чего производство электроэнергии снизилось до 520 млн. кВт·ч в год.

Создание энергетических систем началось в Москве и Петрограде, где к 1921 г. электростанции были объединены электрическими сетями напряжением 20 и 30 кВ. Началось объединение промышленных и рудничных электростанций сетями 20 кВ в Донбассе, Туле, Баку и ряде других районов страны.

Формирование энергосистем пошло быстрыми темпами после того, как начался ввод в работу намеченных по плану ГОЭЛРО крупных районных электростанций на базе разработок торфа и местных углей, а также ГЭС, для выдачи мощности которых к центрам нагрузок потребовалось сооружение линий более высокого напряжения. В 1922 г. в связи с вводом Каширской ГРЭС на подмосковном угле мощностью 12 МВт была построена первая линия электропередачи 110 кВ Каширская ГРЭС — Москва протяженностью около 120 км.

В 1925—1926 гг. были введены первая очередь Шатурской ГРЭС на торфе мощностью 48 МВт и двухцепная линия 110 кВ длиной свыше 110 км до подстанции при МГЭС-1 в Москве. Этим было положено начало строительства московского кольца напряжением 110 кВ.

В 1926 г. две линии 110 кВ длиной 130 км соединили с Ленинградом Волховскую гидроэлектростанцию мощностью 56 МВт. По ним мощность передавалась в кабельное городское кольцо напряжением 30 кВ. В это же время в районе г. Балахны была сооружена Горьковская ГРЭС мощностью 40 МВт на торфе, для передачи мощности которой

было построено кольцо 110 кВ с подстанциями в Горьком и Дзержинске. В Донбассе от Штеровской ГРЭС мощностью 100 МВт для передачи энергии в промышленный район Кадиевки была сооружена двухцепная линия 110 кВ, а для распределения мощности в ближайших угольных районах была построена сеть 35 кВ большой протяженности. На остальной территории страны шел процесс создания местных энергетических узлов на базе малых электростанций, распределяющих мощность на напряжении 6—10—35 кВ.

К концу первой пятилетки (1932 г.) в энергетическом хозяйстве страны произошли огромные сдвиги. Суммарная мощность электростанций достигла 4,7 млн. кВт, а выработка электроэнергии составила 13,5 млрд. кВт·ч. Почти все новые электростанции работали на местном топливе, при этом на долю районных электростанций, работающих в составе энергосистем и энергоузлов, приходилось свыше 60% общей выработки. Мощность трех тепловых электростанций превысила 100 МВт. Использование мощности электростанций в сравнении с 1916 г. повысилось более чем в 1,5 раза.

Сооружение районных электростанций и их объединение в энергосистемы сопровождалось большим строительством электросетей. Протяженность сетей 110 кВ, которых до 1922 г. не было, к 1930 г. составила 3050 км. Соответственно росли число и мощность понизительных подстанций. В результате на территории страны районные электростанции были объединены в 6 крупных энергосистем, охватывающих Ленинградский, Московский, Донбасский, Приднепровский, Уральский, Бакинский промышленные районы. Эти энергосистемы имели общую мощность более 2 млн. кВт или более 40% мощности всех электростанций страны.

Совместная параллельная работа электростанций в энергосистемах потребовала соответствующей организации оперативного управления ими. Еще в 1926 г. были организованы диспетчерские службы в Московской и Ленинградской энергосистемах, в дальнейшем диспетчерские службы были созданы в Донбасской, Уральской и других энергосистемах. Совместная работа электростанций, объединенных в энергосистемы, дала огромный экономический эффект за счет сокращения резерва мощности и лучшего использования оборудования электростанций. Коренным образом изменилась и надежность электроснабжения потребителей за счет питания их от нескольких параллельно работающих электростанций. Если раньше для обеспечения надежной работы электростанций необходимо было бы иметь резерв установленной мощности в размере 25—30% максимума нагрузки (что соответствовало мощности наиболее крупного агрегата), то при создании энергосистем резерв мог быть снижен примерно до 13—15%.

Создание электрических связей между энергосистемами и образование объединенных систем одновременно сопровождалось прогрессом в энергомашиностроении и строительстве, что обеспечило дальнейшую концентрацию мощностей на электростанциях и увеличение единичной мощности агрегатов.

Электрификация страны шла быстрыми темпа-

ми. К 1940 г. суммарная мощность электростанций СССР возросла в 2,4 раза по сравнению с 1932 г. и достигла 11,2 млн. кВт, а выработка электроэнергии 48,3 млрд. кВт. Коэффициент централизации производства электроэнергии возрос к 1940 г. до 81,2% против 67,4% в 1932 г. Количество электростанций мощностью свыше 100 МВт выросло до 20. Были построены Днепровская гидроэлектростанция мощностью 558 МВт, Свирские ГЭС мощностью 100 МВт и др. Две тепловые электростанции Зуевская в Донбассе и Новомосковская в Центре достигли мощности 350 МВт каждая. Удельный вес электростанций мощностью более 100 МВт в общем производстве электроэнергии по стране составил 42%.

Наряду с укрупнением электростанций росла и мощность агрегатов. Если в 1928 г. средняя мощность агрегатов на районных электростанциях составляла 5,3 МВт, а в 1932 г. — 10,2 МВт, то к 1940 г. она достигла 14,5 МВт. В 1939 г. на Зуевской и Новомосковской электростанциях были введены первые агрегаты мощностью по 100 МВт.

Создание мощных тепловых и гидроэлектростанций потребовало применения более высоких напряжений линий электропередачи. В 1933 г. была построена первая линия 220 кВ длиной 240 км от Нижне-Свирской ГЭС в Ленинград; линии такого же напряжения были сооружены в дальнейшем для передачи в Москву мощности Новомосковской электростанции; для выдачи мощности Днепровской ГЭС было принято напряжение 150 кВ.

Сооружение линий электропередачи значительной пропускной способности позволило перейти к объединению энергосистем и осуществлению параллельной работы электростанций крупных промышленных районов на более обширных территориях. Так, были объединены на параллельную работу Московская, Ивановская, Горьковская энергосистемы в Центре; Пермский, Среднеуральский и Челябинский энергорайоны на Урале. В 1940 г. была осуществлена связь на напряжении 220 кВ Днепровской энергосистемы с Донбасской и Азово-Черноморской энергосистемами, которые работали параллельно еще ранее.

Развивались энергосистемы Ленинграда и Баку, в новом промышленном районе — Кузбассе — возникла Кузнецкая энергосистема. К 1940 г. протяженность электрических сетей 35 кВ и выше превысила 20 тыс. км, в том числе линий 220 кВ — 1,1 тыс. км.

Централизация производства электроэнергии и повышение экономичности электростанций обеспечили снижение удельного расхода топлива на отпущенный киловатт-час до 0,645 кг условного топлива, в то время как в 1932 г. удельный расход топлива на основных районных электростанциях составлял 0,78 кг условного топлива.

Большое строительство электростанций и электрических сетей, осуществленное в Советском Союзе, позволило выполнить первоочередную задачу общей программы электрификации — перевод промышленности на новую техническую базу крупного производства.

Война нанесла нашей энергетике огромный ущерб. В годы войны было разрушено много пред-

приятый, особенно сильно пострадали Ленинградская, Московская, Белорусская и южные энергосистемы. Энергетика потеряла около 60 крупных электростанций суммарной мощностью 6 млн. кВт, в том числе и крупнейшую Днепровскую ГЭС (более половины энерго мощностей). Было уничтожено около 10 тыс. км линий электропередачи напряжением 10 кВ и выше.

В годы войны партия и правительство уделяли особое внимание быстрому развитию энергосистем Поволжья, Урала, Сибири, Казахстана, Средней Азии. К 1943 г. мощность электростанций на Урале и в восточных районах возросла примерно вдвое против уровня 1940 г.

К концу 1946 г. мощность электростанций в стране достигла уровня 1940 г., при этом резко возросла доля электростанций в восточных районах страны.

Уже в 1947 г. Советский Союз по производству электроэнергии вышел на первое место в Европе и второе место в мире и с тех пор прочно удерживает эти позиции.

За первое послевоенное десятилетие выработка электроэнергии увеличилась почти в 4 раза при среднегодовом приросте свыше 14%. В 1955 г. мощность электростанций достигла 37,2 млн. кВт против 11,2 в конце 1940 г. Нарастание мощностей тепловых электростанций производилось в основном крупными агрегатами мощностью 100 МВт с высокими параметрами пара; появились первые агрегаты 150 МВт. В СССР уже работали 10 электростанций мощностью от 400 до 650 МВт.

Продолжалось формирование и развитие объединенных энергосистем (ОЭС) Центра, Урала и Юга. Мощность каждой ОЭС составляла от 3 до 5 млн. кВт, а суммарная выработка электроэнергии трех ОЭС достигла 80,1 млрд. кВт·ч; т. е. более 40% общего производства энергии в стране.

Формирование объединенных систем потребовало дальнейшего совершенствования системы оперативно-диспетчерского управления и, в частности, организации объединенных диспетчерских управлений (ОДУ). Первое в стране ОДУ Урала было создано в 1942 г., позднее в 1944—1945 гг. были организованы ОДУ Юга и Центра страны.

Создание объединенных энергосистем повысило надежность энергоснабжения и дало значительный экономический эффект за счет более рационального использования энергоресурсов и оборудования электростанций, снижения потребности в мощности электростанций и совмещения резервов за счет одновременности наступления максимумов нагрузок объединений.

К 1955 г. развитие энергетики уже вплотную подошло к созданию Единой энергосистемы (ЕЭС) на европейской части территории Советского Союза. Формирование Единой энергетической системы на европейской территории страны определялось возможностью сооружения в районах Куйбышева и Волгограда крупных гидростанций, позволяющих решить наряду с энергетическими также и задачи речного транспорта и орошения засушливых приволжских районов. Расположение этих ГЭС было благоприятно для обеспечения электроснабжения развивающихся нефтяных районов Татарской и

Башкирской автономных республик и Куйбышевской области. Пиковая мощность этих ГЭС могла быть использована для покрытия нагрузок ОЭС Центра, Урала и Юга. Промежуточные подстанции на линиях, связывающих ГЭС с крупными энергообъединениями, должны были послужить пунктами для электроснабжения значительной части территории европейской части страны дешевой электроэнергией.

Формирование Единой энергосистемы на европейской территории страны началось с 1955—1957 гг., когда с пуском Волжской ГЭС им. В. И. Ленина (Куйбышевской) мощностью 2300 МВт были сооружены первые в нашей стране две линии электропередачи напряжением 400 кВ Куйбышев—Москва длиной около 900 км. В дальнейшем оказалось возможным и целесообразным перевести их на напряжение 500 кВ, которое и было принято на ближайший период в качестве высшего напряжения в нашей стране.

В 1958 г. была введена в эксплуатацию вторая крупнейшая электростанция каскада—Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС (Волгоградская) мощностью 2560 МВт. Для передачи ее мощности в Центр были сооружены в 1959—1960 гг. две линии электропередачи напряжением 500 кВ от ГЭС до Москвы протяженностью около 1000 км. Обе электропередачи заканчивались вблизи Москвы, где сооружалось кольцо 500 кВ. В 1959 г. была построена линия 500 кВ от Волжской ГЭС им. В. И. Ленина на Урал. Эти линии, сооруженные для выдачи мощности ГЭС, объединяли на параллельную работу районы Центра, Поволжья и Урала, расположенные на территории, протянувшейся на 2000 км с запада на восток.

Для координации работы объединенных энергосистем в новых условиях в 1957 г. на базе ОДУ Центра в Москве было создано объединенное диспетчерское управление (ОДУ) Единой энергосистемы европейской части страны (ЕЭС). К концу 1960 г. в состав ЕЭС европейской части страны входило уже 27 районных энергосистем суммарной мощностью около 29 млн. кВт. Так был завершён первый этап формирования ЕЭС на базе использования энергии и мощности волжских гидроэлектростанций.

В начале 60-х годов продолжался процесс формирования объединенных энергосистем, для управления которыми были созданы ОДУ Северо-Запада, Средней Волги, Северного Кавказа, Закавказья, Сибири и Средней Азии. К тому времени была решена главная задача электрификации промышленности, ей выделялось около 80% всей отпускаемой потребителям электроэнергии. Электрификация сельского хозяйства только еще начиналась, и доля его составляла 4% полезного электропотребления. От энергосистем получало электроэнергию около 23% сельских населенных пунктов. Еще не решена была задача электрификации железнодорожного транспорта.

Следующий этап формирования ЕЭС был связан с решением задачи сплошной электрификации страны от централизованных источников электроснабжения.

Сооружение линий электропередачи 500 кВ, пересекающих европейскую территорию страны с запада на восток, дало новый мощный толчок развитию централизованного электроснабжения от ОЭС. Подстанции этих электропередач были использованы для присоединения новых энергосистем и электроснабжения промежуточных районов.

Начиная с 1958 г. был взят курс на широкую электрификацию сельского хозяйства от энергосистем. В результате уже к 1970 г. потребление электроэнергии сельским хозяйством увеличилось по сравнению с 1955 г. в 10 раз. Огромное значение для народного хозяйства имела электрификация железных дорог, которая проводилась особенно интенсивно после принятия в 1956 г. генерального плана электрификации железных дорог. В результате в период 1956—1970 гг. протяженность электрифицированных железных дорог возросла с 5,34 до 35 тыс. км. Рост грузооборота электрифицированных железных дорог, составивший около 2/3 общего роста грузооборота, имел огромное народнохозяйственное значение.

Электрификация железных дорог сыграла также важную роль в охвате территории страны централизованным электроснабжением, в формировании и объединении энергосистем. К 1975 г. протяженность электрифицированных железных дорог достигла примерно 39 тыс. км. Почти на всем их протяжении были построены линии электропередачи напряжением 110 и 220 кВ для внешнего электроснабжения. Это обеспечило возможность комплексного электроснабжения тяги и других потребителей. В 1975 г. потребление электроэнергии железнодорожным транспортом достигло 43 млрд. кВт·ч, при этом через тяговые подстанции прочим потребителям было передано около 20 млрд. кВт·ч, из них около трети — сельскому хозяйству.

В период 1960—1975 гг. ввод мощностей на тепловых электростанциях в основном осуществлялся энергоблоками 200 и 300 МВт, а в последние годы также за счет внедрения энергоблоков по 500 и 800 МВт. Мощность крупнейших тепловых электростанций возросла к 1975 г. с 1 до 3 млн. кВт. Были построены самые мощные в мире гидроэлектростанции Братская и Красноярская, развернуто строительство атомных электростанций, на которых были введены энергоблоки мощностью 440—1000 МВт.

Наряду с развитием сетей 500 кВ было внедрено новое напряжение 330 кВ, сети с таким напряжением получили развитие в районах Северо-Запада, Юга и Кавказа. Была внедрена новая более высокая ступень напряжения 750 кВ.

В 60-х годах происходило дальнейшее расширение границ ЕЭС, рост мощности параллельно работающих электростанций, формирование объединенных энергосистем на остальной территории страны.

В 1961 г. была организована ОЭС Северного Кавказа, которая в 1963 г. после сооружения линии 220 кВ Койсуг-Тихорецкая была присоединена к ЕЭС. В 1963 г. была сформирована ОЭС Северо-Запада, и в 1966 г. в связи с электрифика-

цией железной дороги Москва — Ленинград по линиям 110—300 кВ она вошла в состав ЕЭС.

В 1970 г. к ЕЭС была присоединена ОЭС Закавказья, сформированная в 1963 г. Таким образом, в VIII пятилетке было завершено создание Единой энергетической системы европейской части страны, а также мощных энергообъединений Сибири и Средней Азии. В IX пятилетке границы Единой энергосистемы расширились за счет присоединения энергообъединения Северного Казахстана, отдельных районов Западной Сибири и Кольской энергосистемы. В 1978 г. в состав ЕЭС вошла ОЭС Сибири. Таким образом, Единая энергосистема охватила большую часть обжитой территории страны. Для оперативного управления таким огромным энергообъединением создано Центральное диспетчерское управление Единой энергосистемы страны (ЦДУ ЕЭС СССР).

Осуществление параллельной работы энергосистем, расположенных на значительной территории страны, охватывающей несколько временных поясов с различными природными и климатическими условиями, создало предпосылки для реализации межсистемного эффекта в более широких масштабах, уменьшения потребности в резерве при совместной работе большого количества агрегатов, повышения надежности электроснабжения за счет взаимопомощи энергосистем.

Реализация межсистемного эффекта требовала дополнительной пропускной способности электрических сетей. На первом этапе развития объединенных энергосистем повышение пропускной способности для реализации межсистемного эффекта достигалось сравнительно недорогими мероприятиями (сооружением коротких головных участков линий, установкой синхронных компенсаторов и рядом других мероприятий). Выполнение этих мероприятий обходится в 2—2,5 раза дешевле, чем установка дополнительной мощности на электростанциях. На современном этапе формирования ЕЭС страны потребовалось сооружение специальных магистральных линий для увеличения пропускной способности межсистемных связей. К ним относится строительство линии 500 кВ Воронеж—Донбасс, Закавказье—Северный Кавказ—Юг, Чебоксары—Горький, Целиноград—Сарбай, а также линий 750 кВ Донбасс—Днепр—Винница—Западная Украина, Ленинград—Москва и ряд других, значительная часть из которых уже сооружена.

В настоящее время в нашей стране создана Единая электроэнергетическая система СССР, которая охватила территорию более 10 млн. км². В создании ЕЭС СССР отражаются идеи, которые были заложены в плане ГОЭЛРО. Установленная мощность электростанций ЕЭС к началу 1980 г. превысила 210 млн. кВт, что составило 82% установленной мощности всех электростанций страны.

Единая энергетическая система СССР, являющаяся высшей формой организации энергетического хозяйства страны, представляет собой развивающийся по государственному плану в масштабе страны комплекс электростанций и электрических

сетей, объединенных общим технологическим режимом с единым оперативным управлением.

Основную часть мощности ЭЭС СССР составляют тепловые электростанции, на долю которых приходится 77% (в том числе 28% на ТЭЦ) общей установленной мощности электростанций; доля ГЭС составляет 19,3%, в том числе по Сибири — около 8%.

В ЭЭС СССР работают наиболее крупные тепловые электростанции: Углегорская и Запорожская мощностью по 3,6 млн. кВт и атомные электростанции: Ленинградская, Курская и Чернобыльская мощностью по 2—3 млн. кВт. В эксплуатации находятся крупнейшие гидроэлектростанции: Красноярская мощностью 6 млн. кВт, Братская мощностью 4,5 млн. кВт и Усть-Илимская мощностью 3,8 млн. кВт.

Основной системообразующей сетью ЭЭС СССР является сеть 500 кВ; в объединенных энергосистемах Юга и Северо-Запада основной сетью является сеть 330 кВ, развивается сеть 750 кВ. В эксплуатации находятся межсистемные электропередачи 750 кВ Ленинград — Москва, Донбасс — Винница — Западная Украина — Альбертирша (Венгрия), Чернобыльская АЭС — Западная Украина и др. Работает электропередача постоянного тока 800 кВ Волгоград — Донбасс.

Суммарная протяженность электрических сетей объединенных энергосистем напряжением 110 кВ и выше превысила 400 тыс. км, в том числе 2,9 тыс. км — 750 кВ, 25 тыс. км — 400—500 кВ, 22,7 тыс. км — 330 кВ. Общая протяженность электрических сетей всех напряжений превысила 4 млн. км.

Организация в 1979 г. параллельной работы ОЭС СССР и энергосистем стран — членов СЭВ после ввода электропередачи 750 кВ Западная Украина (СССР) — Альбертирша (ВНР) явилась важным этапом социалистической интеграции в области энергетики. С ЭЭС СССР в настоящее время параллельно работают объединенные энергосистемы европейских стран — членов СЭВ — ПНР, ГДР, ЧССР, ВНР, СРР, а на востоке — энергосистема МНР. Образовано крупнейшее международное энергообъединение с установленной мощностью электростанций около 300 млн. кВт, в котором обеспечивается параллельная работа электростанций на территории от Улан-Батора до Берлина.

Из Единой энергосистемы осуществляются поставки электроэнергии и в другие страны — Финляндию, Норвегию, Турцию. Сооружается преобразовательная подстанция постоянного тока для соединения с энергосистемой Финляндии, входящей в энергообъединение скандинавских стран НОРДЭЛ.

Работа объединенных энергосистем в составе ЭЭС СССР дала значительный экономический эффект. Снижение годового максимума нагрузки за счет разновременности наступления максимумов энергосистем в декабре 1979 г. составило более 8 млн. кВт. Общая потребность в установленной мощности электростанций с учетом сокращения необходимой резервной мощности, реализуемой при располагаемой пропускной способности межсистемных связей, снизилась на 12 млн. кВт.

Совместная работа в Единой энергосистеме электростанций создает широкие возможности для внедрения экономичных агрегатов большой мощности, производство которых отечественная промышленность освоила. Это позволяет ускорять энергетическое строительство, уменьшить стоимость установленного киловатта за счет наращивания мощностей путем сооружения крупнейших электростанций, улучшать экономику строительства и эксплуатации. В ЭЭС СССР работает 8 энергоблоков на АЭС мощностью по 1000 МВт и 8 энергоблоков на ТЭС мощностью по 800 МВт. Общее количество энергоблоков ТЭС мощностью от 150 до 800 МВт достигло 360; их суммарная мощность составляет более 52% общей мощности ТЭС.

В ЭЭС наиболее рационально используются топливно-энергетические ресурсы страны и обеспечивается оперативное ими маневрирование. Дальнейшее развитие энергосистем страны и ЭЭС СССР должно осуществляться, исходя из необходимости опережающего роста электроэнергетики, что связано с обеспечением высоких темпов социалистического производства, повышения надежности энергоснабжения и качества отпускаемой энергии, повышения эффективности работы всего народного хозяйства.

Развитие энергетики позволило электрифицировать и значительно теплофицировать быт городов и поселков, электрифицировать сельское хозяйство.

В 1980 г. сельское хозяйство потребит более 100 млрд. кВт·ч электроэнергии. Это в 2,2 раза выше, чем все производство электроэнергии в 1940 г. В стране действует более 65 млн. телевизоров, потребляемая мощность которых превышает мощность всех электростанций 1940 г.

Только за последние 15 лет электровооруженность труда в промышленности возросла в 2 раза, а в сельском хозяйстве в 6 раз.

Все это свидетельствует об огромной заботе партии и правительства о претворении в жизнь ленинских идей электрификации нашей Родины.

В соответствии с условиями формирования топливно-энергетического баланса страны, характеризующимися необходимостью сберегать жидкое топливо, наращивание мощности электростанций ЭЭС СССР в перспективе должно осуществляться за счет усиления темпов развития ядерной энергетики, строительства экономичных гидроэлектростанций, дальнейшего развития теплоэлектроцентралей, обеспечивающих повышение экономичности работы энергосистем за счет экономии топлива, сооружения крупных энергетических комплексов на базе экибастузского, канско-ачинского угля и тюменского газа, строительства гидроаккумулирующих электростанций.

Формирование структуры генерирующих мощностей будет базироваться на использовании трех типов электростанций: высокоэкономичных тепловых и атомных электростанций, используемых преимущественно в базисном режиме, теплоэлектроцентралей и маневренных электростанций различных видов. В качестве энергетических ресурсов основного типа электростанций — базисных электростанций в обозримой перспективе должны использоваться ядерное горючее и дешевые энерго-

ресурсы Северного Казахстана и Сибири. Рациональная структура генерирующих мощностей ЕЭС СССР предполагает максимальное развитие атомных электростанций (АЭС) в европейских районах страны. Развитие конденсационных электростанций на органическом топливе осуществляется в основном в восточных районах страны и сосредоточено в трех крупных энергетических комплексах: Экибастузском, Сургутском и Канско-Ачинском.

Важным направлением развития энергетики является интенсивное сооружение гидроэлектростанций, в первую очередь, в восточных районах страны, где сосредоточена основная часть еще не освоенного потенциала гидроресурсов.

Безусловно должно быть усилено внимание вопросу развития ТЭЦ и централизованного теплоснабжения. Развитие теплофикации является необходимым условием надежного и экономичного централизованного теплоснабжения крупных городов и промышленных узлов и дальнейшего снижения удельного расхода топлива на тепловых электростанциях.

Для решения проблемы покрытия переменной части суточных графиков нагрузки должны использоваться в первую очередь гидроэлектростанции. В ряде районов, богатых гидроресурсами (Сибирь, Кавказ, Средняя Азия, Поволжье), они успешно решают эту проблему. В районах Северо-Запада, Центра и Юга европейской части страны, где возможности сооружения эффективных ГЭС ограничены, должны строиться специальные маневренные гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) и газотурбинные установки, используемые самостоятельно либо в составе парогазовых установок (ПГУ). Наиболее эффективными в этих районах являются ГАЭС, которые выравнивают режим работы базисных электростанций, покрывая пиковую часть нагрузки и увеличивая нагрузку в ночные часы. Кроме того, ГАЭС являются эффективным мобильным резервом при отключениях крупных энергоблоков тепловых и атомных электростанций или межсистемных электропередач. Строительство ГАЭС следует считать важной неотъемлемой частью программы развития атомной энергетики.

В ближайшем десятилетии будет в основном завершено охват ЕЭС СССР всей обжитой территории страны путем присоединения объединений Средней Азии и Дальнего Востока.

Дальнейшее формирование основной сети должно осуществляться с использованием линий напряжением 220, 500, 1150 кВ, в западных и южных районах напряжением 330—750 кВ.

Намеченное увеличение единичной мощности электростанций, возрастание величины и дальности передачи мощности от энергокомплексов восточной части ЕЭС СССР и необходимость повышения надежности и устойчивости ЕЭС СССР в связи с широким использованием АЭС требуют повышения пропускной способности основной сети в 2—3 раза по сравнению с современным уровнем. На основных направлениях (Северо-Запад — Центр — Юг, Центр — Поволжье — Урал — Казахстан — Сибирь) пропускная способность отдельных межси-

стемных связей ЕЭС СССР достигнет 4—6 млн. кВт.

Уже сейчас в ОЭС Юга и между Северо-Западом и Центром сооружены магистрали напряжением 750 кВ; в дальнейшем линии электропередачи этого напряжения будут системообразующей сетью на западе европейской части страны (ОЭС Северо-Запада, Юга и частично Центра). На этом напряжении будет осуществляться выдача мощности крупнейших атомных электростанций и ее распределение.

В восточных районах страны, где должны развиваться мощные энергокомплексы, будут сооружаться линии электропередачи переменного тока наивысшего напряжения 1150 кВ; на этом напряжении будет создаваться магистральная сеть ЕЭС СССР, связывающая восточные и западные районы страны в направлении Сибирь — Северный Казахстан — Урал — Поволжье — Центр.

Для передачи энергии от энергетических комплексов Экибастуза и Итата в европейскую часть страны будет создана электропередача постоянного тока пропускной способностью 6 млн. кВт, а в дальнейшем и более мощные электропередачи.

Дальнейшее развитие ЕЭС, строительство мощных генерирующих узлов, особенно АЭС, требует серьезной заботы и проведения мероприятий по повышению живучести энергосистем, которые связаны с повышением резерва энерго мощностей до 17%, создания в больших объемах регулирующих энерго мощностей, замены устаревшего оборудования, более интенсивного развития линий электропередачи, усиления оснащенности компенсирующими устройствами, усиление внедрения автоматических устройств, непрерывного повышения квалификации персонала.

Успешное развитие энергетики нашей страны требует решения целого ряда сложных научно-технических задач. Первоочередными являются:

разработка и освоение производства нового основного оборудования для АЭС, для электростанций, использующих низкокалорийные угли Северного Казахстана и Сибири, для специальных маневренных электростанций (ГАЭС, ГТУ, ПГУ), а также оборудования и аппаратуры для электропередач напряжением 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока;

обеспечение надежной и экономичной работы ЕЭС СССР и ее живучести;

реализация большой программы развития атомной энергетики и резкого увеличения строительства электрических сетей напряжением 220 кВ и выше.

Необходимо работать также над созданием новых технологий получения, передачи и потребления электро- и теплоэнергии, обеспечивающих экономию материальных ресурсов, финансовых и трудовых затрат, а также существенное улучшение экономических показателей энергетических установок.

Двухмиллионная армия советских энергетиков беззаветно трудится, чтобы достойными трудовыми делами встретить XXVI съезд КПСС и успешно претворять в жизнь решения партии и правительства по дальнейшему развитию важной отрасли народного хозяйства — нашей советской энергетики.

Эквивалентирование схем и режимов электроэнергетических систем

КАЧАНОВА Н. А., ШЕЛУХИН Н. Н., кандидаты техн. наук

Характерной особенностью развития современных электроэнергетических систем является соединение их на параллельную работу, образование сверхмощных объединений, содержащих тысячи генераторов электростанций и линий электропередач. Единая энергетическая система СССР (ЕЭС СССР) является одной из самых крупных в мире. Центральное диспетчерское управление (ЦДУ ЕЭС СССР), объединенные диспетчерские управления (ОДУ), осуществляя планирование и ведение режимов, должны решать задачи для электрических схем очень большого объема. Одним из основных путей, позволяющих облегчить решение технологических задач и ввести их в границы практической реализуемости как с точки зрения возможностей современной вычислительной техники, так и обзорности результатов, является упрощение (эквивалентирование) сложных систем. Поскольку эквивалентирование по смыслу предполагает не строгое решение задачи, критерии и методы эквивалентирования существенно зависят от целей и постановки задачи. При эквивалентировании стремятся сохранить подобие вполне конкретных свойств оригинала и эквивалента.

Применение процедуры эквивалентирования вносит в расчеты определенную погрешность, однако повышает их оперативность, реализуемость и позволяет автоматизировать процесс синтеза расчетной схемы.

Актуальность задачи эквивалентирования возрастает с повышением степени диспетчерской иерархии. На высших ступенях диспетчерской иерархии расчетные модели оперируют главным образом с эквивалентной информацией.

На ЦВМ второго поколения в качестве промышленных методов и программ эквивалентирования были разработаны в основном программы определения обобщенных параметров энергосистемы (собственных и взаимных сопротивлений, коэффициентов распределения, матриц чувствительности и т. п.), которые использовались в отдельных задачах электрического расчета как вспомогательные блоки [Л. 1 и 2]. Реализовано также несколько программ эквивалентирования исследовательского характера [Л. 2—4]. Опыт применения указанных программ на разных территориальных ступенях показывает, что без дальнейшего совершенствования принципов и методов эквивалентирования невозможно повысить эффективность и оперативность использования вычислительной техники при эксплуатации и проектировании сложных энергосистем. Роль эквивалентирования возрастает также в связи с созданием математического обеспечения для автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ). Если в настоящий период подготовка и эквивалентирование расчетной схемы занимают время от нескольких недель до нескольких месяцев, то в программных комплексах АСДУ за это время должно быть соизмеримо со временем расчета по основным технологическим программам. Кроме того, в информационно-вычислительных системах АСДУ на задачу эквивалентирования

возлагаются важные функции по автоматизации синтеза расчетных схем.

В настоящей статье изложены основные принципы эквивалентирования в рамках АСДУ сложных энергосистем для задач электрического расчета. Предложен алгоритм эквивалентирования применительно к расчету стационарных режимов, приведены результаты расчета, выполненного по программе эквивалентирования.

Необходимость эквивалентирования электроэнергетических систем возникает при решении следующих задач диспетчерского управления: планировании суточного графика покрытия нагрузки; расчетах установившихся и утяжеляемых режимов; оптимизации режима сети по реактивной мощности, коэффициентам трансформации и напряжению; определении устойчивости режимов энергосистем; расчетах токов короткого замыкания; разработке плана перспективного развития системы и т. п.

Перечисленные задачи решаются на каждой ступени диспетчерской иерархии в трех временных уровнях: долгосрочное и краткосрочное планирование и оперативное управление. На всех указанных уровнях существует задача эквивалентирования. При планировании режимов энергосистем между различными ступенями и уровнями происходит обмен результатами расчетов и исходными данными, как правило, в эквивалентной форме.

Таким образом, модели и критерии эквивалентирования должны учитываться и отражать следующие факторы: вид задачи, территориальную степень диспетчерской иерархии, временной уровень, необходимую точность описания отдельных элементов энергосистемы.

Решение единого комплекса электроэнергетических задач на различных ступенях диспетчерской иерархии с эквивалентированием характеризуется структурной схемой рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: ступень *I* соответствует уровню энергосистемы, ступень *II* — уровню объединенной энергосистемы, ступень *III* — уровню объединенных энергосистем страны (ЦДУ); Э — эквиваленты данной ступени; ЭН — эквиваленты для передачи на низшую ступень; ЭВ — эквиваленты для передачи на высшую ступень.

Наиболее рациональной представляется следующая организация расчетов на каждой иерархической ступени и обмена информацией между ними. Имеются базовые расчетные схемы каждой ступени, которые содержат 2000—4000, 500—1000 и 100—300 узлов соответственно, формируются на основе банков исходных данных и включают все основные линии электропередач и генераторы электростанций. Здесь эквивалентированию подвержены только тупиковые участки систем, генераторы малой мощности и ВЛ напряжением ниже 110 кВ.

Для проведения оперативных расчетов с целью решения конкретной технологической задачи из базовых моделей систем с использованием соответствующего метода эквивалентирования формируются расчетно-оперативные модели, объем которых не

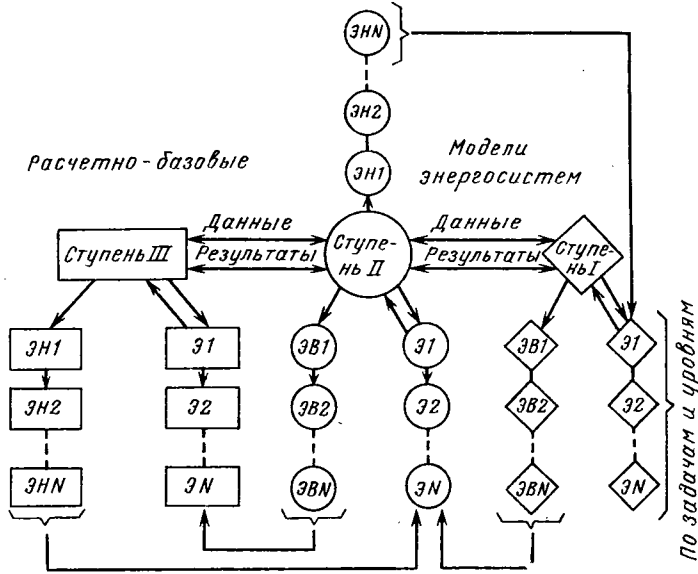


Рис. 1.

превышает 300 узлов и которые взаимодействуют с конкретными программами. При этом на любой территориальной ступени для получения расчетно-оперативных моделей сети требуется привлечение частичных эквивалентов смежных ступеней.

Одновременно на каждой ступени происходит формирование эквивалентов для разных задач и временных уровней. Обычно наиболее общими являются эквиваленты для расчета установившихся режимов при долгосрочном планировании режимов.

Порядок проведения расчетов и участие в них задачи эквивалентирования на отдельных территориальных ступенях следующий.

На ступени I создается расчетно-базовая модель энергосистемы на основе использования банка данных энергосистемы и автономного применения программы эквивалентирования для упрощения, обобщенного представления второстепенных частей энергосистемы. Расчетно-базовая модель может иметь несколько состояний, отражающих характерные режимы энергосистемы (максимальных нагрузок, обратных перетоков, паводковых режимов и т. п.). В течение определенного времени расчетно-базовая модель является неизменной и служит для расчетов всевозможных режимов энергосистемы. Основные эксплуатационные электрические расчеты (установившихся режимов, устойчивости, токов короткого замыкания и т. д.) производятся с использованием указанных выше расчетно-оперативных моделей энергосистемы. Формирование последних осуществляется следующим образом. Указывается район расчетно-базовой модели (сечение А—Б на рис. 2,а), подлежащий исследованию, т. е. входящий в расчет на оперативную модель без изменений, и объекты остальной части модели, которые необходимо сохранить в оригинальном виде (указаны как ветви и узлы на рис. 2,б). Далее, в зависимости от решаемой задачи (вида расчета и временного уровня) выбирается соответствующая программа эквивалентирова-

ния, по которой определяется эквивалент системы по отношению к узлам примыкания P_i и оставляемым объектам (узлам эквивалентирования \mathcal{E}_s). После добавления (как правило, с верхнего уровня) к расчетному эквиваленту привязок к соседним энергосистемам и оперативной корректирующей информации, получаем расчетно-оперативную модель (рис. 2,в).

На ступени I производится также эквивалентирование расчетно-базовой модели по заданию и директивам вышестоящего уровня II. Получаемая в этих случаях эквивалентная схема энергосистемы передается на ступень II.

Формирование расчетно-базовой модели ступени II производится на основе синтеза отдельных схем расчетно-базовой модели, получаемых со ступеней I, с частичным их эквивалентированием. Формирование расчетно-оперативных моделей ступени II и эквивалентов для передачи на верхний и нижний уровни осуществляется аналогично ступени I.

На ступени III формирование эквивалентов и расчетных схем производится аналогично ступени II.

Реализация рассмотренного многообразия требуемых эквивалентов схем энергосистем предполагает наличие трех групп программ эквивалентирования: для расчетов стационарных и переходных режимов, а также токов короткого замыкания.

В свою очередь каждая группа программ может базироваться на методах линейного или нелинейного эквивалентирования и использовать одно из следующих условий:

требуются результаты предварительно рассчитанного установившегося режима полной схемы;

предварительного расчета установившегося режима не требуется;

привлекаются результаты натурального потоко-распределения.

В данной статье излагается методика эквивалентирования, предназначенная для упрощения схем энергосистем при расчетах стационарных режимов. В основе методики лежит принцип предварительного расчета установившегося режима полной схемы, линеаризации ее в расчетной точке, линейных преобразований с получением обобщенных параметров эквивалентируемого района и последующего перехода к нелинейной модели эквивалента за счет частичного выделения нагрузок и генерации.

Постановка задачи. Рассматривается модель энергосистемы, состоящей из n узлов, отдельные элементы которой представляются при обычных для задачи расчета установившегося режима допущениях [Л. 5 и 6].

Задача заключается в том, чтобы уменьшить размер исследуемой системы на m узлов — построить информационную модель с числом узлов $n-m$ для последующего расчета установившегося режима и его оптимизации, аналогичную по структуре данным исходной. Расчет установившегося режима обычно выполняется при следующих условиях. В нагрузочных узлах задается активная и реактивная мощности P_{hi} и Q_{hi} , в генерирующих

узлах — активная генерируемая мощность P_{gi} и модуль напряжения U или P_{gi} и Q_{gi} . В балансирующем узле, который обычно является осью отсчета, задается модуль и фаза напряжения $U_{бал}$ и $\theta_{бал}$ ($U'_{бал}$ и $U''_{бал}$). Расчет эквивалентных параметров должен выполняться без приведения элементов сети к одной ступени напряжения, предусматривается учет неноминальных и комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. В зависимости от цели последующих расчетов задаются условия допустимости:

$$U_i^{min} < U_i < U_i^{max};$$

$$I_{ij}^{min} < I_{ij} < I_{ij}^{max};$$

$$Q_{gi}^{min} < Q_{gi} < Q_{gi}^{max};$$

.....

Как уже отмечалось, помимо информационной модели данная методика использует результаты расчета установившегося режима полной (базовой) схемы. Для расчета базовой схемы, объем которой может достигать до 3000 узлов и 4500 ветвей, используется программа СЕТЬ, разработанная в ЦДУ ЕЭС СССР.

Оценка точности эквивалентирования производилась путем сравнения результатов расчетов в полной и эквивалентной схемах.

Формирование района эквивалентирования. Выделение района эквивалентирования производится пользователем. Задание района эквивалентирования может осуществляться:

перечислением номеров узлов, входящих в район эквивалентирования \mathcal{E}_s ;

указанием ступени напряжения, ниже которой все элементы схемы замещения эквивалентруются;

заданием «линий разреза», по которым базовая схема условно разделяется на исследуемый район и район эквивалентирования и т. п.

Как показала практика расчетов режимов ЕЭС СССР с эквивалентированием части схемы энергосистемы, наиболее удобен последний способ выделения района эквивалентирования. Помимо «линий разреза» пользователь должен задать в районе эквивалентирования (рис. 2, б) узлы (подстанции, электростанции, ВЛ), которые войдут в эквивалентную схему без изменений. На основании указанной информации, которую наиболее целесообразно задавать в режиме диалога, соответствующая подпрограмма комплекса эквивалентирования (см. блок-схему на рис. 3) осуществляет выборку данных и результатов расчета установившегося режима для района эквивалентирования базовой схемы.

Методика и алгоритм эквивалентирования. Выделенная часть базовой схемы, подлежащая эквивалентированию, линеаризуется в точке исходного режима. Линеаризация производится путем пересчета мощностей генерации и нагрузки в проводимости:

$$Y_i = Y'_i - jY''_i = \frac{P_i}{U_i^2} - j \frac{Q_i}{U_i^2}. \quad (1)$$

В преобразовании (1) не участвуют мощности генерации и нагрузки оставляемых узлов s района эквивалентирования (на данном этапе принимаются равными нулю). Полученная таким образом линейная схема выделенного участка легко подвергается упрощению. С математической точки зрения упрощение означает понижение порядка системы линейных уравнений

$$I = YU, \quad (2)$$

где

$$Y = \begin{vmatrix} Y_{ss} & Y_{sm} \\ Y_{ms} & Y_{mm} \end{vmatrix} -$$

матрица узловых проводимостей выделенного участка; Y_{ss} — подматрица собственных и взаимных узловых проводимостей узлов эквивалентирования порядка $s \times s$; Y_{mm} — подматрица собственных и взаимных узловых проводимостей исключаемых узлов порядка $m \times m$; Y_{ms} , Y_{sm} — подматрицы взаимных узловых проводимостей между исключаемыми узлами и узлами эквивалентирования порядка $m \times s$.

С точки зрения электротехники исключение U_k (k -го узла) соответствует трансформации многолучевой звезды с σ -лучами в полный σ -угольник. В результате преобразований получаем эквива-

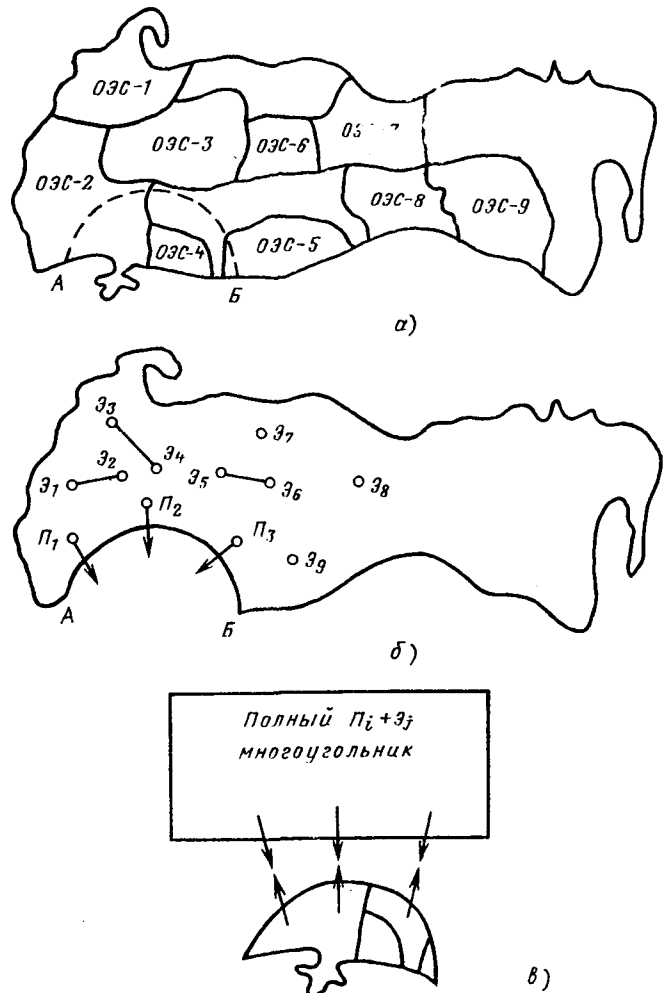


Рис. 2.

лентную матрицу узловых проводимостей для «оставляемых» узлов $\Pi_i + \mathcal{E}_i$.

$$\dot{Y}_{\text{эKB}} = \dot{Y}_{ss} - \dot{Y}_{ms} \dot{Y}_{nm}^{-1} \dot{Y}_{sm}. \quad (3)$$

Некоторые усложнения в алгоритм исключения по сравнению с обычным преобразованием многолучевой звезды в соответствующий многоугольник для проведения схемы вносит учет трансформаторов.

Примем схему замещения трансформатора, состоящую из идеального трансформатора с коэффициентом $K_T = U_2/U'_2$ и проводимости рассеяния \dot{Y}_T , приведенной к ступени напряжения одного из узлов (рис. 4).

Непосредственный учет коэффициентов трансформации при преобразовании многолучевой звезды в многоугольник значительно усложняет расчетные выражения и обычно не применяется в алгоритмах исключения.

Возможны два способа более простого учета коэффициентов трансформации при исключении узлов. Первый способ — предварительное приведе-

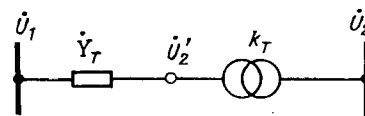


Рис. 4.

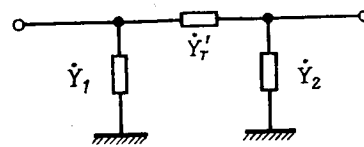


Рис. 5.

ние к одной ступени напряжения. При этом на этапе предварительной обработки информации, когда заданные сопротивления линий и трансформаторов преобразуются в проводимости, для трансформатора записывается величина

$$\dot{Y}_{T,\text{прив}} = \dot{Y}_T / K_T,$$

где K_T — заданный коэффициент трансформации; \dot{Y}_T и $\dot{Y}_{T,\text{прив}}$ — соответственно обычная и приведенная проводимости трансформаторной ветви. Таким образом, при преобразовании многолучевой звезды в многоугольник автоматически учитывается заданный коэффициент трансформации, что позволяет получить эквивалентные взаимные проводимости между узлами с разными уровнями напряжения. Однако эти взаимные проводимости отличаются от взаимных проводимостей в случае приведения схемы замещения сети к одному напряжению, так как напряжения узлов остаются неприведенными.

Второй способ — использование электрической схемы замещения трансформатора (рис. 5), где

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}'_T &= \dot{Y}_T / K_T; \\ \dot{Y}'_1 &= (1 - 1/K_T) \dot{Y}_T; \\ \dot{Y}'_2 &= (1/K_T - 1) \dot{Y}_T. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Такая замена трансформаторной ветви четырехполюсником производится на стадии предварительной обработки информации. Последующее исключение узлов производится по обычным формулам преобразования многолучевой звезды в многоугольник.

В данной работе использован второй способ учета трансформаторов.

Полученная в результате решения (3) эквивалентная матрица $\dot{Y}_{\text{эKB}}$ имеет следующие особенности: параллельно действительным ветвям включены фиктивные, полученные в результате преобразований; есть ветви, соединяющие узлы с разными номинальными напряжениями (например 750 и 110 кВ, 500 и 330 кВ); шунты на землю содержат составляющие от узлов питания, нагрузки, поперечных физических элементов, потерь от токов смещения ВЛ, от преобразования трансформаторов и сети; количество узлов меньше, чем в исходной схеме района эквивалентирования, количество ветвей может быть в несколько раз больше, чем в исходной схеме.

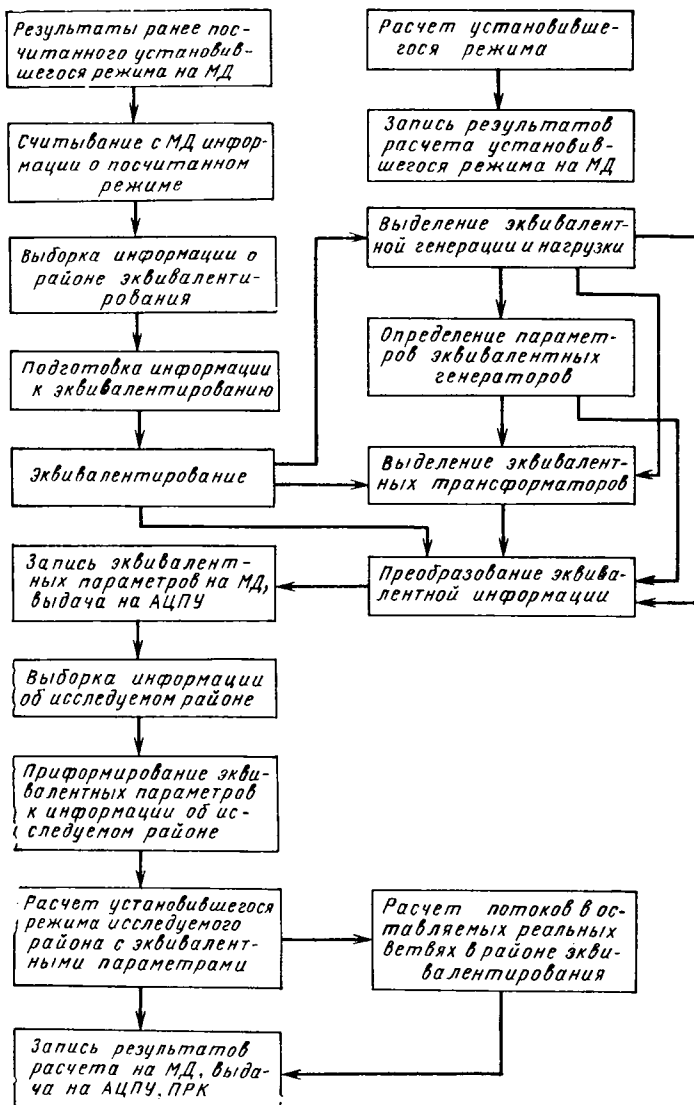


Рис. 3.

Расчеты показывают, что подключение такого эквивалента, дополненного не учтенными на этапе эквивалентирования мощностями генерации и нагрузки «оставляемых» узлов \mathcal{E}_s , к исследуемому району дает режим, близкий к режиму полной схемы. Значения возможных отклонений определяются точностью вычисления $\dot{Y}_{\text{ЭКВ}}$.

Однако в указанном виде район эквивалентирования в оперативных расчетах не используется по следующим причинам: в некоторых задачах требуется сохранение баланса мощностей эквивалентированного района; большое число ветвей требует дополнительных затрат памяти ЦВМ и усложняет процесс решения уравнений установившегося режима (например методом Ньютона); потокораспределение в районе эквивалентирования из-за больших активных и реактивных проводимостей на землю (электрических схем представления трансформаторов) получается непривычным (в некоторых случаях фиктивные потоки активной и реактивной мощности настолько велики, что не входят в отведенные для них размеры слов ЦВМ).

Поэтому в эквивалентной схеме в первую очередь производится замена ветвей, соединяющих узлы с разными уравнениями номинальных напряжений, моделями трансформаторов и выделение из шунтов эквивалентной генерации и нагрузки. Кроме того, после введения в схему эквивалентных трансформаторов появляется возможность исключить ветви, сопротивления которых превышают некоторое значение (задается пользователем).

Выделение эквивалентных трансформаторов в районе эквивалентирования. Эквивалентирование районов системы производится, как отмечалось выше, без приведения элементов сети к одному уровню напряжения. При этом не возникает затруднений, если узлы одного уровня напряжения. Если же уровни напряжения разные, то в результате эквивалентирования получается эквивалентная ветвь (взаимная проводимость) между узлами разных уровней напряжения. В этой ветви выделяется эквивалентный трансформатор, характеризуемый формулами:

$$\left. \begin{aligned} K_T &= \dot{U}_2 / \dot{U}_1; \\ \dot{Y}_{12}^{\text{НОВ}} &= K_T \dot{Y}_{12}; \\ \dot{Y}_1^{\text{НОВ}} &= \dot{Y}_1 + \dot{Y}_{12}(1 - K_T); \\ \dot{Y}_2^{\text{НОВ}} &= \dot{Y}_2 + \dot{Y}_{12}(1 - 1/K_T), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где K_T — коэффициент трансформации эквивалентного трансформатора, $\dot{Y}_{12}^{\text{НОВ}}$, $\dot{Y}_1^{\text{НОВ}}$ и $\dot{Y}_2^{\text{НОВ}}$ — новые значения проводимостей для преобразуемого участка схемы.

Выделение эквивалентной генерации и нагрузки в районе эквивалентирования. Выделение генерации и нагрузки, т. е. превращение эквивалентной схемы в нелинейный объект, осуществляется на основе принципов [Л. 7]. При этом ход расчета следующий.

Определяется $\dot{Y}_{\text{ЭКВ}}$.

Перед линеаризацией выделенного района в последнем отключаются все генерирующие мощ-

ности P_{r_i} и $Q_{r_i} (i \in m)$. При этих условиях производится определение $\dot{Y}_{\text{Г.ЭКВ}}$. Тогда составляющие проводимостей матрицы $\Delta \dot{Y}_{\text{Г.ЭКВ}}$, зависящие от генерирующих мощностей района эквивалентирования, определяются следующим образом:

$$\Delta \dot{Y}_{\text{Г.ЭКВ}} = \dot{Y}_{\text{ЭКВ}} - \dot{Y}_{\text{Г.ЭКВ}} \quad (6)$$

Элементы матрицы $\Delta \dot{Y}_{\text{Г.ЭКВ}}$ преобразуются при напряжениях базисного режима в мощности генерации и разносятся по узлам эквивалентной схемы в соответствии с уравнением

$$(P_i + jQ_i)^r = U_i^2 \Delta \hat{Y}_{ii}^r - U_i \sum_j \Delta \hat{Y}_{ij}^r \hat{U}_j, \quad (7)$$

где $\Delta \hat{Y}_{ii}^r$ и \hat{Y}_{ij}^r — соответствующие элементы матрицы $\Delta \dot{Y}_{\text{Г.ЭКВ}}$, $i, j \in s$.

Полученные из (7) мощности позволяют определить коэффициенты распределения α_i^r и β_i^r суммарных активных и реактивных генерирующих мощностей исключаемых узлов района эквивалентирования по отношению к узлам эквивалентной схемы

$$\alpha_i^r = \frac{P_{r_i}}{\sum_k P_{r_k}}; \quad \beta_i^r = \frac{Q_{r_i}}{\sum_k Q_{r_k}} \quad (8)$$

Коэффициенты (8) можно определять и другим способом, используя линейность преобразованной сети.

Определяется матрица $\dot{Y}_{\text{Н.ЭКВ}}$ при отключении в узлах нагрузки и вычисляется

$$\Delta \dot{Y}_{\text{Н.ЭКВ}} = \dot{Y}_{\text{ЭКВ}} - \dot{Y}_{\text{Н.ЭКВ}} \quad (9)$$

Мощности нагрузки от исключаемых узлов в узлах эквивалентирования

$$(P_i + jQ_i)^n = U_i^2 \Delta \hat{Y}_{ii}^n - U_i \sum_j \Delta \hat{Y}_{ij}^n \hat{U}_j \quad (10)$$

Коэффициенты распределения нагрузки

$$\alpha_i^n = \frac{P_{n_i}}{\sum_k P_{n_k}}; \quad \beta_i^n = \frac{Q_{n_i}}{\sum_k Q_{n_k}} \quad (11)$$

После указанных преобразований в узлах эквивалентирования подключается собственная генерация и нагрузка, которые не участвовали на этапе эквивалентирования и которые равны генерации и нагрузке данного узла в базовом режиме.

В результате баланс эквивалентных узлов будет характеризоваться следующими компонентами мощностей: собственной генерацией и нагрузкой узла; выделенными после эквивалентирования генерацией и нагрузкой узла; нагрузкой собственных нужд. Каждая составляющая нагрузки должна учитываться по отдельной статической характеристике.

Последним этапом преобразования эквивалентной схемы является отключение ветвей с большими сопротивлениями. Значение предельного сопротивления является экспериментальным и задается индивидуально для каждой ступени номинального

напряжения:

$U_{ном}, \text{кВ}$	100	150	220	330	400	500	750
$Z_{ij}^{доп}, \text{Ом}$	200	200	250	200	200	200	300
$Z_{ii}^{доп}, \text{Ом}$	110 ²	150 ²	220 ²	330 ²	400 ²	500 ²	750 ²

В результате всех преобразований получаем эквивалентную схему, аналогичную по структуре исходных данных базовой схеме, но объем которой ограничивается узлами эквивалентирования (см. рис. 2, в). Соединение эквивалентной схемы по линиям разреза с исследуемым районом позволяет получить оперативную расчетную схему для исследования стационарных режимов заданного района ЭЭС (ОЭС).

Повторение расчета базового режима в эквивалентной схеме дает практически совпадающие результаты. Исследовалась также область применимости эквивалента, определенного для базисного режима. Результаты сопоставления (сравнивались результаты расчетов утяжеления режимов в эквивалентной и полной схемах) указывают на наличие для эквивалентной схемы, рассчитанной для исходного режима, достаточно широкой области режимов, где погрешность расчетов не превышает допустимых значений.

Программная реализация. Программная реализация метода и алгоритма эквивалентирования осуществлялась в несколько этапов. На ЦВМ 2-го поколения были разработаны два комплекса программ эквивалентирования на 300 и 640 узлов (программы I-16 и I-17), которые носили экспериментальный характер и предназначались для отработки методики расчетов.

В настоящее время на ЦВМ 3-го поколения завершается внедрение комплекса EKVIS-4.

Для расчета базисного режима использована программа СЕТЬ. Исходная схема сети может содержать до 1000 узлов, отдельный район эквивалентирования — до 500 узлов. Комплекс составлен на языке ФОРТРАН-IV для машин серии ЕС и АСВТ (256 кб, 2 дисковогода); при базовом комплекте (128 кб, 2 дисковогода) соответственно будет уменьшен максимальный объем решаемой задачи.

Общая схема расчета по комплексу приведена на рис. 3. Первая очередь комплекса EKVIS-4 проходит опытно-промышленную проверку в ЦДУ ЭЭС СССР, ОДУ Урала, ПЭО «Донбассэнерго».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие методов расчета потокораспределения в электрической сети/ Горнштейн В. М., Максимов Ю. И., Петухов Д. Г., Тимофеев В. А. — Труды ВНИИЭ. — М.: Энергия, 1970, № 38, с. 39—50.
2. Качанова Н. А., Коробчук К. В. Использование программ эквивалентирования для расчета установившихся электрических режимов и статической устойчивости сложных энергосистем. — В кн.: Проблемы технической электродинамики. — Киев: Наукова думка, 1975, вып. 56, с. 42—47.
3. Алгоритм и программа эквивалентирования электрических сетей/ Грицай М. А., Журавлев В. Г., Резенкранц Е. А., Чиник М. А. — Кишинев: Штиинца, 1976, с. 88.
4. Качанова Н. А., Макаревич Р. А. Комплекс программ эквивалентирования для расчетов установившихся режимов и устойчивости больших энергосистем. — В кн.: Моделирование и расчет на ЦВМ режимов электрических систем. — Киев: Наукова думка, 1977, с. 36—39.
5. Турский Э. В., Чепига В. Я., Шелухин Н. Н. Применение ЦВМ для расчетов стационарных режимов Единой энергетической системы Европейской части Союза ССР. — Электрические станции, 1970, № 7.
6. Качанова Н. А. Электрический расчет сложных энергосистем на ЦВМ. — Киев: Техника, 1966.
7. Цукерник Л. В. Эквивалентирование схемы больших энергосистем при расчетах на ЦВМ устойчивости и переходных процессов. — В кн.: Проблемы технической электродинамики — Киев: Наукова думка, 1974, вып. 47, с. 82—87.

[30.07.79]



УДК 621.311.016.351.001.24

Исследование статической устойчивости электроэнергетических систем методом последовательных приближений

БАРИНОВ В. А., канд. техн. наук

ЭНИИ им. Г. М. Кржижановского

Возможность исследования статической устойчивости электроэнергетических систем методами численного интегрирования рассматривалась в ряде работ. В [Л. 1] было предложено использовать одну и ту же программу численного исследования переходного процесса для анализа статической и динамической устойчивости электроэнергетической системы. В [Л. 2] одно из исследований статической устойчивости тестовой схемы проводилось путем анализа переходного процесса при небольшом начальном возмущении. В [Л. 3] был сделан вывод о том, что в общем случае использование расчетов электромеханического переходного процесса при конкретном возмущении вместо специальных

программ анализа статической устойчивости не правильно и нецелесообразно.

Одним из возражений было то, что проверка статической устойчивости с помощью анализа переходного процесса при определенном конечном возмущении зависит от вида и места обобщенных малых возмущений в отличие от проверки критериев, полученных на основе общей теории устойчивости движения. Другим возражением было то, что для уверенного суждения о затухании переходного процесса и установлении нового установившегося режима необходимо выполнять расчет достаточно длительного переходного процесса. В [Л. 4] подчеркивалось, что расчет процесса изменения пара-

метров режима при его малом произвольном возмущении численными методами интегрирования при учете диссипативных сил системы должен указывать на возвращение к начальному режиму в устойчивой системе и к полному уходу от него в случае системы неустойчивой. В [Л. 4] также высказывались соображения о том, что при снижении величины возмущающего воздействия уменьшается и влияние места приложения возмущения. Таким образом, в рассматриваемой проблеме имеются спорные положения, вопрос о целесообразности разрешения которых поставлен в [Л. 4].

Целью настоящей статьи является рассмотрение условий, при которых возможно строгое исследование статической устойчивости методом последовательных приближений при возмущении начальных условий и при приложении малого постоянного возмущения, а также рассмотрение критериев статической устойчивости, позволяющих провести такое исследование.

Исследование статической устойчивости электроэнергетической системы в процессе установления ее режима. Принципиально вопрос исследования статической устойчивости с помощью процесса последовательных приближений решен в [Л. 5 и 6]. В [Л. 5] рассмотрен случай, когда математическая модель переходных процессов электроэнергетической системы приведена к нормальной форме исключением уравнений связи переменных. В [Л. 6] рассмотрен общий случай динамических систем, соответствующих установившимся движениям, к которым относятся применяемые на практике упрощенные математические модели электроэнергетических систем — Лонглея, Парка — Горева, Жданова, и движение которых описывается системой дифференциальных и алгебраических уравнений.

Исследование статической устойчивости методом последовательных приближений возможно двумя способами: при малом произвольном возмущении начальных условий и при приложении малой возмущающей силы. Хотя организация численного процесса при этих двух способах различна, однако критерии статической устойчивости в обоих случаях одинаковы.

Исследование статической устойчивости методом последовательных приближений при малом возмущении начальных условий рассмотрено в [Л. 5 и 6]. Это исследование предусматривает совмещение процесса установления режима электроэнергетической системы с анализом полной статической устойчивости. Вначале определяется аperiodически устойчивый установившийся режим (с некоторой заданной точностью) с помощью специального итерационного метода [Л. 6]. При этом, если в системе отсутствует самораскачивание, то исследование статической устойчивости заканчивается вместе с нахождением режима, так как сходимость итерационного процесса может иметь место только к аperiodически устойчивому режиму. Если самораскачивание возможно, то проводится дальнейшее исследование статической устойчивости процессом последовательных приближений. При этом полученный на первом этапе режим с малыми отклонениями обобщенных координат от их установившихся значений в состоянии равновесия рас-

сматривается как маловозмущенный. Близость к решению должна быть такой, чтобы сходимость итерационного процесса определялась собственными значениями матрицы коэффициентов системы уравнений первого приближения, соответствующих состоянию равновесия. Численные исследования по программам, реализующим метод [Л. 6], показывают, что эти условия для электроэнергетических систем заведомо выполняются при точности расчета установившегося режима по допустимым невязкам порядка 0,5—1% в относительных единицах.

Шаг интегрирования K по условиям статической устойчивости должен удовлетворять условию [Л. 5 и 6].

$$0 < K < \frac{2 |\operatorname{Re} \mu_j|}{(\operatorname{Re} \mu_j)^2 + (\operatorname{Im} \mu_j)^2}, \quad (1)$$

$$j = 1, 2, \dots, n,$$

где μ_j — собственные значения матрицы коэффициентов системы уравнений первого приближения, n — порядок этой матрицы.

При выборе шага интегрирования, удовлетворяющего условию (1), наличие сходимости процесса последовательных приближений будет означать статическую устойчивость системы.

Связь условий статической устойчивости и сходимости процесса последовательных приближений определяется через соотношение собственных значений матриц [Л. 6]:

$$\eta_j = 1 + K \mu_j, \quad (2)$$

где η_j — собственные значения итерационной матрицы.

Критерии статической устойчивости могут быть выражены на основании (2) через критерий сходимости процесса последовательных приближений — величину наибольшего по модулю собственного значения итерационной матрицы η_{\max} , которая может быть определена в процессе установления режима с помощью степенного метода. Связь критериев статической устойчивости с величиной η_{\max} будет рассмотрена ниже.

Исследование статической устойчивости по реакции электроэнергетической системы на малое постоянное возмущение методом последовательных приближений. При проведении такого исследования необходимо решить ряд вопросов, а именно: выбор критерия статической устойчивости, выбор величины шага интегрирования, выбор места приложения и вида малого возмущения.

Прежде отметим, что речь будет идти о принципиальной возможности исследования статической устойчивости методом последовательных приближений при малом произвольном возмущении электроэнергетической системы. При этом мы не будем рассматривать вопрос о том, в какой степени возможно проведение исследований статической устойчивости существующими программами анализа динамической устойчивости, реализующими упрощенные математические модели электроэнергетических систем. Этот вопрос связан с исследованием возможности применения математических моделей электроэнергетических систем, реализованных в конкретных программах динамической устойчивости,

для анализа статической устойчивости и требует специального исследования, не являющегося целью настоящей статьи. Будем предполагать, что математическая модель электроэнергетической системы адекватно отражает переходные процессы, в том числе и для режима малых отклонений системы от ее состояния равновесия.

Приложение малого возмущения к системе, находящейся в состоянии равновесия, приводит к исследованию устойчивости состояния равновесия при нулевых начальных условиях, но при приложении малой возмущающей силы.

Будем рассматривать общий случай динамических систем, соответствующих установившимся движениям, к которым относятся применяемые на практике упрощенные математические модели электроэнергетических систем. Уравнения движения таких систем запишем в матричном виде

$$\dot{x} + F(x, y) = 0; \quad (3)$$

$$Q(x, y) = 0, \quad (4)$$

где x — инерционные, обобщенные координаты системы; y — вектор дополнительных переменных; $Q(x, y)$ — алгебраические уравнения связи переменных. Будем предполагать, что векторные функции $F(x, y)$ и $Q(x, y)$ допускают разложение в сходящиеся степенные ряды.

Для состояния равновесия справедливы уравнения:

$$F(x, y) = 0; \quad (5)$$

$$Q(x, y) = 0. \quad (6)$$

Система уравнений первого приближения может быть записана в виде:

$$\Delta \dot{x} + \frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial y} \Delta y = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial Q}{\partial y} \Delta y = 0. \quad (8)$$

Исключая переменные Δy , получим систему уравнений первого приближения в нормальной форме:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x, \quad (9)$$

где

$$A = \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial Q}{\partial y}^{-1} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial y}.$$

Статическая устойчивость электроэнергетической системы определяется знаком вещественных частей собственных значений матрицы A . При этом критерием статической устойчивости исследуемого режима является отрицательный знак вещественных частей всех собственных значений матрицы A , т. е. условие $\operatorname{Re} \mu_j < 0$ ($j=1, 2, \dots, n$, где n — порядок матрицы A). Критерием статической неустойчивости является наличие хотя бы одного собственного значения матрицы A с положительной вещественной частью, т. е. условие $\operatorname{Re} \mu_j > 0$.

Исследование статической устойчивости электроэнергетических систем приложении малого возмущения было предложено в [Л. 7] и составляет основу практических критериев статической устойчивости. При приложении малого возмущения в некоторой точке системы ΔN_i реакция на это воз-

мущение i -й координаты системы определяется дифференциальным уравнением:

$$\Delta(p) \Delta x_i = \Delta N_i \Delta_{il}(p) (-1)^{i+l}, \quad (10)$$

где $\Delta(p)$ — характеристический определитель системы уравнений первого приближения; $\Delta_{il}(p)$ — минор, получаемый исключением из матрицы коэффициентов системы уравнений первого приближения i -го столбца и l -й строки. Если ΔN_i — единичное ступенчатое возмущение, то $\Delta x_i(t)$ — переходная функция системы. Отношение $\frac{\Delta_{il}(p) (-1)^{i+l}}{\Delta(p)}$ может рассматриваться как передаточная функция системы, а $\frac{(-1)^{i+l} \Delta_{il}(j\omega)}{\Delta(j\omega)}$ — как амплитудно-фазовая частотная характеристика системы.

В [Л. 7] исследование реакции системы на малое постоянное возмущение рассматривалось для двух моментов времени — начала и конца переходного процесса. Это позволило получить критерий аperiodической устойчивости. Исследование временной реакции системы на возмущение позволяет исследовать дополнительно колебательную устойчивость.

В зависимости от места приложения возмущения ΔN_i будет изменяться $(-1)^{i+l} \Delta_{il}(p)$, а следовательно, реакция системы для компоненты $\Delta x_i(t)$.

Необходимо выбрать такие критерии анализа перехода системы, чтобы эти критерии не зависели от вида и места приложения малого постоянного возмущения. Такими критериями, как будет показано ниже, могут быть численные характеристики сходимости процесса последовательных переходов системы из одного состояния равновесия в другое.

При исследовании статической устойчивости при малом произвольном возмущении используем метод последовательных приближений. На каждом шаге процесса последовательных приближений будем решать систему алгебраических уравнений связи переменных. При приложении достаточно малого постоянного произвольного возмущения

$$\Delta N = \begin{Bmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \end{Bmatrix} \text{ систему уравнений первого приближения}$$

можно записать в виде:

$$\Delta \dot{x} + \frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial y} \Delta y = \Delta N_1; \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial Q}{\partial y} \Delta y = \Delta N_2. \quad (12)$$

Решение уравнения (11) методом последовательных приближений описывается вычислительной схемой:

$$\Delta x^{s+1} = \Delta x^s + K \left[-\frac{\partial F}{\partial x} \Delta x^s - \frac{\partial F}{\partial y} \Delta y^s + \Delta N_1 \right]. \quad (13)$$

Точное решение уравнения (12) относительно Δy^s при заданных Δx^s дает

$$\Delta y^s = \frac{\partial Q}{\partial y}^{-1} \left[\Delta N_2 - \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x^s \right]. \quad (14)$$

Подстановка Δy^s в (13) приводит к итерационному процессу для Δx :

$$\Delta x^{s+1} = \Delta x^s + K A \Delta x^s + K \left[\Delta N_1 - \frac{\partial F}{\partial y} \times \right.$$

$$\times \frac{\partial Q^{-1}}{\partial y} \Delta N_2] = B \Delta x^s + K \Delta N_{\text{экр}}, \quad (15)$$

где $B = E + KA$ — итерационная матрица;

$$\Delta N_{\text{экр}} = \Delta N_1 - \frac{\partial F}{\partial y} \frac{\partial Q^{-1}}{\partial y} \Delta N_2.$$

Решение уравнений переходного процесса для отдельных компонент вектора обобщенных координат будет существенно зависеть от вида и места приложения малого произвольного возмущения. Однако факт сходимости или расходимости итерационного процесса не зависит от вида и места приложения возмущения, а определяется только собственными значениями матрицы B . Существенна для нелинейной системы лишь малость возмущения.

Сходимость итерационного процесса (15) характеризуется величиной собственных значений итерационной матрицы B . Для сходимости итерационного процесса необходимо и достаточно, чтобы все собственные значения η_i итерационной матрицы B были бы по модулю меньше единицы [Л. 8].

Собственные значения итерационной матрицы и матрицы A связаны соотношением (2). Из (2) следует, что для обеспечения сходимости итерационного процесса в статически устойчивой области шаг интегрирования K должен удовлетворять условию (1).

Заметим, что значение коэффициента K , выбранное по условию (1), существенно зависит от расположения и величины собственных значений матрицы коэффициентов системы уравнений первого приближения. Это значение может быть существенно различным для разных электроэнергетических систем и для различных их режимов. Значение шага интегрирования, выбранное по условию (1), может отличаться от значений, выбираемых в расчетах динамической устойчивости по условиям допустимой шаговой погрешности расчетов.

Поскольку сходимость итерационного процесса характеризуется величиной наибольшего по модулю собственного значения η_{max} итерационной матрицы, то критерии статической устойчивости и неустойчивости удобно выразить через η_{max} [Л. 5 и 6].

Из (2) следует, что если $|\eta_{\text{max}}| < 1$, то система устойчива. Если $\eta_{\text{max}} = 1$, то имеет место граница апериодической устойчивости. Если пара наибольших по модулю комплексно-сопряженных собственных значений итерационной матрицы имеет вещественную часть, равную единице, то это соответствует границе колебательной устойчивости. Критерием статической неустойчивости является условие $\text{Re} \eta_{\text{max}} > 1$. Если $|\eta_{\text{max}}| > 1$, но $\text{Re} \eta_{\text{max}} < 1$, это означает, что шаг интегрирования велик и не удовлетворяет условию (1). В этом случае шаг интегрирования необходимо уменьшить. Можно определить по значению η_{max} ему соответствующее μ_i из (2) и для определения требуемого K подставить μ в (1).

Величину η_{max} можно определить в процессе последовательных приближений (15) по формулам степенного метода [Л. 8]. Для приращения $\Delta y^s = \Delta x^{s+1} - \Delta x^s$ итерационный процесс (15) может

быть записан в виде:

$$\begin{aligned} \Delta y^s &= [E + KA] \Delta y^{s-1} = [E + KA]^2 \Delta y^{s-2} = \\ &= \dots [E + KA]^s \Delta y_0. \end{aligned} \quad (16)$$

Выражение (16) представляет последовательность итераций вектора Δy_0 матрицей $E + KA$, т. е. представляет ту самую последовательность итераций, которую строят при использовании степенного метода для вычисления наибольшего по модулю собственного значения матрицы $(E + KA)$. Если η_{max} вещественное, то оно определяется по формуле [Л. 8]:

$$\eta_{\text{max}} \approx \frac{\Delta y^{s+1}}{\Delta y^s}. \quad (17)$$

Если наибольшие по модулю собственные значения итерационной матрицы образуют комплексно-сопряженную пару, то они являются корнями квадратного уравнения

$$\eta^2 + \rho \eta + q = 0, \quad (18)$$

где

$$\rho \approx - \frac{\Delta y_{s-1} \Delta y_{s+2} - \Delta y_s \Delta y_{s+1}}{\Delta y_{s-1} \Delta y_{s+1} - \Delta y_s^2}; \quad (19)$$

$$q \approx \frac{\Delta y_s \Delta y_{s+2} - \Delta y_s^2}{\Delta y_{s-1} \Delta y_{s+1} - \Delta y_s^2}. \quad (20)$$

В (17) ÷ (20) Δy_s — любая компонента вектора Δy_s в s -й итерации.

Наличие пары комплексно-сопряженных собственных значений, наибольших по модулю, может быть обнаружено по характеру итераций, так как в этом случае компонента Δy колеблется по величине и знаку в отличие от монотонного характера итераций в случае вещественного наибольшего по модулю собственного значения матрицы B . Формулы (17) ÷ (20) соответствуют наиболее распространенным случаям, когда наибольшее по модулю вещественное собственное значение простое или когда наибольшие по модулю собственные значения образуют простую комплексно-сопряженную пару. Формулы для других случаев приведены в [Л. 8]. Вычисления η_{max} ведутся для нескольких компонент вектора Δy . Совпадение этих величин для нескольких компонент с некоторой заданной точностью является критерием достаточности числа итераций. Число итераций зависит от расположения собственных значений матрицы коэффициентов системы уравнений первого приближения. Требуемое число шагов интегрирования для исследования статической устойчивости может быть определено как число итераций, необходимое для определения с допустимой точностью степенным методом наибольшего по модулю собственного значения итерационной матрицы. Таким образом, критерии статической устойчивости, допустимый шаг интегрирования, необходимая длительность интервала интегрирования выражаются через один критерий — величину наибольшего по модулю собственного значения итерационной матрицы.

Выводы. 1. Исследование статической устойчивости электроэнергетических систем по реакции системы на постоянное малое возмущение при учете начального и конечного состояний перехода системы дает ответ на вопрос об апериодической

устойчивости системы. При анализе дополнительно промежуточных состояний перехода это исследование дает ответ на вопрос о полной статической устойчивости.

2. Определение статической устойчивости электроэнергетических систем при малом постоянном произвольном возмущении методом последовательных приближений возможно лишь при соответствующем выборе критериев статической устойчивости, величины шага интегрирования и критерия длительности процесса интегрирования.

3. Характер изменения обобщенных координат электроэнергетической системы зависит от места приложения и вида постоянного малого возмущения. Критерии статической устойчивости, основанные на определении величины наибольшего по модулю собственного значения итерационной матрицы процесса установления режима, позволяют исследовать статическую устойчивость электроэнергетической системы по ее реакции на малое возмущение независимо от места приложения и вида малого возмущения.

4. При использовании соответствующим образом построенного метода последовательных приближений с помощью критерия сходимости возможно исследование полной статической устойчивости в процессе установления режима системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоханин Е. К. Общая характеристика комплексной программы расчета и анализа установившегося режима, статической и динамической устойчивости сложной энергетической системы. — Труды ВНИИЭ. — М.: Энергия, 1967, вып. 30, с. 117—121.
2. Сравнительный анализ программ расчета на ЦВМ статической устойчивости энергосистемы/ Савалов С. А., Шелухин Н. Н., Выговская Е. П. и др. — В кн.: Доклады на III Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. — Л.: Энергия, с. 348—367.
3. Авраменко В. Н., Цукерник Л. В. Об анализе статической устойчивости энергосистемы при помощи программ расчета электромеханического переходного процесса. — В кн.: Проблемы технической электродинамики. — Киев: Наукова думка, 1974, вып. 47, с. 14—17.
4. Веников В. А. О возможности единого подхода к статической и динамической устойчивости электрических систем. — Электричество, 1976, № 7, с. 72—73.
5. Баринов В. А. Исследование статической устойчивости электроэнергетических систем по величине и оценкам собственных значений матриц. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1976, № 3, с. 21—31.
6. Савалов С. А., Баринов В. А. Сходимость итерационных процессов установления режимов как критерий статической устойчивости. — Электричество, 1977, № 2, с. 1—7.
7. Маркович И. М., Савалов С. А. Практические критерии статической устойчивости электрической системы. — Электричество, 1945, № 3, с. 17—23.
8. Фадеев Д. К., Фадеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры: М.: Физматгиз, 1960.

[25.02.80]



УДК 621.311.001.57

Метод декомпозиции и коррекции Z -матрицы обобщенных параметров электрических систем

ХАЧАТРЯН В. С., доктор техн. наук, САФАРЯН В. С., инж.

АрмНИИ Энергетики

При исследовании режимов современных сложных электрических систем одним из важных этапов является построение Z -матрицы обобщенных параметров (узловых сопротивлений). С математической точки зрения задача определения Z -матрицы обобщенных параметров сводится к обращению неособенной матрицы узловых проводимостей, порядок которой равен числу независимых узлов системы. При значительном возрастании числа узлов системы обращение матрицы узловых проводимостей практически становится невозможным из-за резкого возрастания количества вычислительных операций.

В настоящее время исследование режимов больших электрических систем развивается на основе идеи предварительного представления их как совокупности радиально связанных подсистем [Л. 1—3].

В статьях [Л. 1 и 2] предложен метод и алгоритм расчета Z -матрицы обобщенных параметров при представлении системы в виде радиально связанных оптимальных подсистем. Так как в данной статье широко используются результаты [Л. 2], поясним вкратце существо декомпозиции. Производится разделение большой системы на отдельные подсистемы при сохранении связывающих линий.

Составляется квазидиагональная матрица узловых проводимостей большой системы как совокупность матриц узловых проводимостей отдельных подсистем.

Путем обращения отдельных подматриц квазидиагональной матрицы узловых проводимостей определяется квазидиагональная матрица Z -обобщенных параметров. С учетом сопротивлений связывающих линий подматрицы квазидиагональной матрицы Z -обобщенных параметров приводятся к базисному узлу. Пустые клетки квазидиагональной матрицы Z -обобщенных параметров заполняются следующим образом. Клетки, находящиеся справа от подматриц, заполняются элементами последнего столбца этой матрицы, а клетки, расположенные ниже ее, — элементами последней строки. Поскольку свободные клетки заполняются известными элементами, то с точки зрения экономии памяти ЦВМ можно хранить данную матрицу в квазидиагональной форме.

Исходя из квазидиагональной матрицы Z -обобщенных параметров определяются две новые матрицы. Каждый столбец первой матрицы определяется разностью двух столбцов Z -матрицы обобщенных параметров разрезанной системы, номера

В первом случае

$$A_{ik, jk} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{M_1, k-1+1; p} & \dots & 0 & \dots & a_{M_1, k-1+1; q} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & a_{pp} & \dots & 0 & \dots & a_{pq} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & a_{qp} & \dots & 1 & \dots & a_{qq} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & a_{M_1 k; p} & \dots & 0 & \dots & a_{M_1 k; q} & \dots & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$M_{1, k-1} + 1 \leq p < M_{1k};$$

$$M_{1, k-1} + 1 < q \leq M_{1k}.$$

В матрице **A** отличны от нуля только элементы столбцов *p* и *q* и главной диагонали.

$$\left. \begin{aligned} a_{ii} &= 1; \quad i \neq p, q; \quad i = \overline{M_{1, k-1} + 1; M_{1k}}; \\ a_{pp} &= \{1 + Y_{pq} [Z'_{ij}(q, p) - Z'_{ij}(q, q)]\} / \text{Det } A^{-1}; \\ a_{qq} &= \{1 + Y_{pq} [Z'_{ij}(p, q) - Z'_{ij}(p, p)]\} / \text{Det } A^{-1}; \\ a_{ip} &= [Z'_{ij}(i, p) - Z'_{ij}(i, q)] Y_{pq} / \text{Det } A^{-1}; \\ a_{iq} &= -a_{ip}; \quad i \neq p, q; \quad a_{pp} + a_{pq} = a_{qp} + a_{qq} = 1; \\ \text{Det } A^{-1} &= 1 + Y_{pq} [2Z'_{ij}(p, q) - Z'_{ij}(p, p) - \\ &\quad - Z'_{ij}(q, q)]; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Y_{pq} — проводимость ветви с вершинами *p* и *q*. Для коррекции симметричной матрицы порядка *n* по вышеизложенному алгоритму требуется выполнять $n^2 + 2n + 8$ арифметических операций с комплексными числами. Сравнение данного алгоритма с алгоритмом, изложенным в [Л. 5], показало, что они по эффективности примерно одинаковы. Замечания: если ветвь с вершинами *p* и *q* не отключается, а добавляется, то в вышеуказанных формулах следует Y_{pq} взять с обратным знаком; если проводимость ветви с вершинами *p* и *q* изменяется частично, на величину ΔY_{pq} , то для формирования матрицы **A** опять воспользуемся вышеприведенными формулами, заменяя Y_{pq} на ΔY_{pq} , причем если проводимость ветви уменьшается, то ΔY_{pq} берем со знаком плюс и минус — при ее возрастании. Нетрудно заметить, что для симметричных матриц Z'_{ij} выполняется равенство

$$a_{pp} + a_{pq} = a_{qp} + a_{qq} = 1.$$

Во втором случае (отключается ветвь с вершинами *БУ* — *q*)

$$A_{ik, jk} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 & \dots & a_{M_1, k-1+1, q} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & \dots & a_{qq} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & a_{M_1 k q} & \dots & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$M_{1, k-1} < q \leq M_{1k}.$$

В матрице **A** отличны от нуля только элементы столбца *q* и главной диагонали:

$$\left. \begin{aligned} a_{ii} &= 1; \quad i \neq q; \quad i = \overline{M_{1, k-1} + 1, M_{1k}}; \\ a_{qq} &= 1 / \text{Det } A^{-1}; \\ a_{iq} &= Y_q Z'_{ij}(i, q) / \text{Det } A^{-1}; \quad i \neq q; \\ \text{Det } A^{-1} &= 1 - Y_q Z'_{ij}(q, q); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Y_q — проводимость ветви с вершинами *БУ* и *q*. После формирования матрицы $A_{ik, jk}$ производится коррекция подматрицы $Z_{ik, jk}$ по формуле

$$\bar{Z}_{ik, ik} = A_{ik, jk} Z_{ik, jk}. \quad (10)$$

Для коррекции подматриц $Z_{il, jl}$, $l = \overline{k+1, N}$ необходимо ко всем элементам этих подматриц прибавить приращение последнего элемента подматрицы $Z_{ik, jk}$:

$$\Delta Z'_{ij}(M_{1k}; M_{1k}) = \bar{Z}'_{ij}(M_{1k}; M_{1k}) - Z'_{ij}(M_{1k}; M_{1k}).$$

Для коррекции подматрицы Z'_{ij} элементы, находящиеся справа от подматрицы $\bar{Z}_{ik, jk}$, заменяются элементами последнего столбца подматрицы $\bar{Z}_{ik, jk}$, а элементы, расположенные ниже $\bar{Z}_{ik, jk}$, — элементами последней строки.

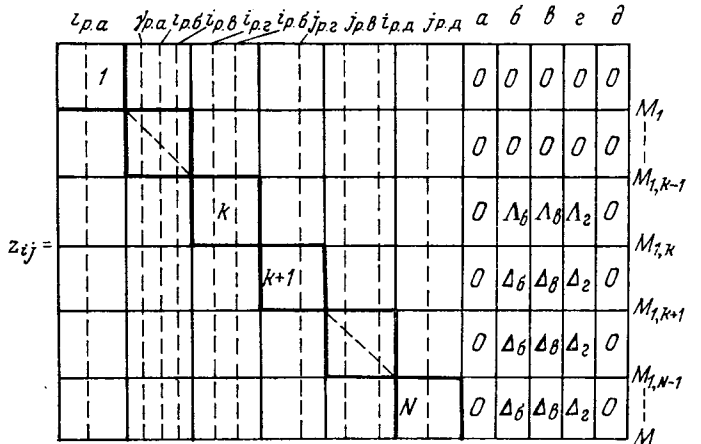
К элементам $Z'_{ij}(i, j)$, $i, j = \overline{M_{1, k+1}, M}$ необходимо прибавить $\Delta Z'_{ij}(M_{1k}; M_{1k})$. Остальные элементы не изменяются.

Для коррекции матрицы $Z_{i\gamma}$ рассмотрим следующие случаи (предполагается, что $i_p < j_p$):

- а) $i_p < M_{1, k-1}$ и $j_p \leq M_{1, k-1}$;
- б) $i_p \leq M_{1, k-1}$ и $M_{1, k-1} < j_p \leq M_{1k}$;
- в) $i_p \leq M_{1, k-1}$ и $j_p > M_{1k}$;
- г) $M_{1, k-1} < i_p \leq M_{1k}$ и $j_p > M_{1k}$;
- д) $i_p > M_{1k}$ и $j_p > M_{1k}$.

Представим индексы вершин разрезанных ветвей как совокупность индексов отдельных случаев:

$$i_p, j_p = (i_{p.a}, j_{p.a}; i_{p.б}, j_{p.б}; i_{p.в}, j_{p.в}; i_{p.г}, j_{p.г}; i_{p.д}, j_{p.д}).$$



Коррекция матрицы $Z_{j\gamma}$ при вышеуказанных случаях производится следующим образом:

а) соответствующие столбцы матрицы $Z_{i\gamma}$ не изменяются

б) элементы соответствующих столбцов изменяются, начиная со строки $M_{1,k-1}+2$ до M [в (11) изменяющиеся элементы обозначены через Λ и Δ], причем элементы в строках от $M_{1,k-1}+2$ по M_{1k} следует пересчитать (как разность соответствующих столбцов матрицы \bar{Z}'_{ij}), а для коррекции остальных элементов достаточно к ним прибавить величину Δ_6 :

$$\Delta_6 = -\bar{Z}'_{ij}(M_{1k}; j_{p,6}) + Z'_{ij}(M_{1k}; j_{p,6}) = -\Delta Z'_{ij}(M_{1k}; j_{p,6}); \quad (12)$$

в) элементы соответствующих столбцов изменяются начиная со строки $M_{1,k-1}+2$ до M , причем элементы с $M_{1,k-1}+2$ по M_{1k} следует пересчитать [Л. 2]. Коррекция остальных изменяющихся элементов производится вычитанием от них величины Δ_6 :

$$\Delta_6 = -\bar{Z}'_{ij}(M_{1k}; M_{1k}) + Z'_{ij}(M_{1k}; M_{1k}) = -\Delta Z'_{ij}(M_{1k}; M_{1k}); \quad (13)$$

г) элементы соответствующих столбцов изменяются начиная со строки $M_{1,k-1}+2$ до M , причем элементы с $M_{1,k-1}+2$ по M_{1k} следует пересчитать, а для коррекции остальных изменяющихся элементов необходимо к ним прибавить величину Δ_7 :

$$\Delta_7 = \Delta Z'_{ij}(M_{1k}, M_{1k}) - \Delta Z'_{ij}(M_{1k}, i_{p,r}); \quad (14)$$

д) соответствующие столбцы матрицы $Z_{i\gamma}$ не изменяются. В (11) через Λ обозначены элементы тех столбцов, которые надо пересчитать, причем

Λ_6 — приращение элементов столбцов $i_{p,6}$ подматрицы $\bar{Z}_{ik, jk}$:

$$\Lambda_6(i, j_{p,6}) = Z'_{ij}(i, j_{p,6}) - \bar{Z}'_{ij}(i, j_{p,6}), \quad i = \overline{M_{1,k-1}+2; M_{1k}}$$

Λ_6 — приращение элементов последнего столбца подматрицы $Z_{ik, jk}$:

$$\Lambda_6(i, M_{1k}) = Z'_{ij}(i, M_{1k}) - \bar{Z}'_{ij}(i, M_{1k}), \quad i = \overline{M_{1,k-1}+2; M_{1k}}$$

Все столбцы матрицы Λ_6 получаются одинаковыми;

Λ_7 — разность приращений столбцов $i_{p,r}$ и последнего столбца подматрицы $Z_{ik, jk}$:

$$\Lambda_7(i, i_{p,r}) = \bar{Z}'_{ij}(i, i_{p,r}) - Z'_{ij}(i, i_{p,r}) - \bar{Z}'_{ij}(i, M_{1k}) + Z'_{ij}(i, M_{1k}), \quad i = \overline{M_{1,k-1}+2; M_{1k}}$$

Исходя из матрицы $\Delta Z_{i\gamma}$ (11) и алгоритма определения $Z_{\delta\gamma}$ [Л. 2] устанавливается матрица $\Delta Z_{\delta\gamma}$ (15), при помощи которой скорректируем матрицу $Z_{\delta\gamma}$:

$$\bar{Z}_{\delta\gamma} = Z_{\delta\gamma} + \Delta Z_{\delta\gamma};$$

	а	б	в	г	д
а	0	0	0	0	0
б	0	$\Delta Z'_{ij}(j_{p,6}, j_{p,6})$	$\Delta Z'_{ij}(j_{p,6}, M_{1k})$	$\Delta Z'_{ij}(j_{p,6}, M_{1k})$ $-\Delta Z'_{ij}(i_{p,6}, i_{p,r})$	0
в	0	$-\Delta_6$	$-\Delta_6$	$-\Delta_7$	0
г	0	$-\Delta Z'_{ij}(i_{p,r}, j_{p,6}) - \Delta_6$	$-\Delta Z'_{ij}(i_{p,r}, M_{1k}) - \Delta_6$	$\Delta Z'_{ij}(i_{p,r}, i_{p,r}) - \Delta_7$ $-\Delta Z'_{ij}(i_{p,r}, M_{1k})$	0
д	0	0	0	0	0

(15)

Нетрудно заметить, что если подматрица $Z_{ik, jk}$ симметричная, то симметричной получается и матрица $\Delta Z_{\delta\gamma}$. После корректировки матриц Z'_{ij} , $Z_{i\gamma}$ и $Z_{\delta\gamma}$ определяем \bar{Z}_{ij} .

Коррекция Z-матрицы обобщенных параметров при изменении сопротивления ветви разрыва. Рассмотрим два случая:

сопротивление ветви разрыва между подсистемами $k-1, k$ изменяется частично; отключается (включается) ветвь разрыва.

При частичном изменении сопротивления ветви разрыва матрицы Z'_{ij} , $Z_{i\gamma}$ не изменяются, а в матрице $Z_{\delta\gamma}$ изменяется только тот диагональный элемент, который соответствует измененной ветви (изменение этого диагонального элемента равно изменению сопротивления ветви разрыва). Коррекция матрицы $Z_{\delta\gamma}^{-1}$ производится следующим образом:

$$\bar{Z}_{\delta\gamma}^{-1} = Z_{\delta\gamma}^{-1} + \Delta Z_{\delta\gamma}^{-1}, \quad (16)$$

где

$$\Delta Z_{\delta\gamma}^{-1} = (\Lambda_{\delta\gamma} - E) Z_{\delta\gamma}^{-1}. \quad (17)$$

Матрица $(\Lambda_{\delta\gamma} - E)$ формируется автоматически (про матрицу Λ было сказано выше).

Согласно [Л. 2] можно записать:

$$\bar{Z}_{ij} = \bar{Z}'_{ij} - \bar{Z}_{i\gamma} \bar{Z}_{\delta\gamma}^{-1} \bar{Z}_{i\gamma}^t \quad (18)$$

или

$$\bar{Z}_{ij} = Z_{ij} + \Delta \bar{Z}_{ij},$$

где

$$\Delta \bar{Z}_{ij} = -\bar{Z}_{i\gamma} \Delta \bar{Z}_{\delta\gamma}^{-1} \bar{Z}_{i\gamma}^t \quad (19)$$

При отключении (включении) ветви разрыва матрица \bar{Z}'_{ij} не изменяется. Матрица $\bar{Z}_{i\gamma}$ получается из матрицы $Z_{i\gamma}$ при исключении (добавлении) соответ-

ствующего столбца. Матрица $\bar{Z}_{\delta\gamma}$ получается из матрицы $Z_{\delta\gamma}$, при исключении (добавлении) соответствующих строки и столбца. Для коррекции матрицы $Z_{\delta\gamma}$ поступаем следующим образом:

$$Z'_{\delta\gamma} = TZ_{\delta\gamma}T, \quad (20)$$

где T — матрица, получаемая из единичной матрицы перестановкой i -й и последней строк.

Матрица $Z'_{\delta\gamma}$, определяемая матричным выражением (20), получается из матрицы $Z_{\delta\gamma}$ перестановкой i -й и последней строк и i -го и последнего столбцов; i — номер исключаемого столбца матрицы $Z_{i\gamma}$.

Из матричного выражения (20) следует:

$$Z'^{-1}_{\delta\gamma} = TZ^{-1}_{\delta\gamma}T, \quad (21)$$

так как $T^{-1} = T$.

Далее методом окаймления сразу определяем $\bar{Z}_{\delta\gamma}^{-1}$, при этом используя известную матрицу $Z'^{-1}_{\delta\gamma}$ [Л. 6], после чего скорректируем матрицу Z обобщенных параметров узловых сопротивлений согласно алгоритму, предложенному в [Л. 2].

Коррекция Z-матрицы обобщенных параметров при изменении сопротивления ветви связи. Рассмотрим два случая:

сопротивление ветви связи между подсистемами $k-1, k$ изменяется частично; отключается ветвь связи.

При частичном изменении сопротивления ветви связи изменяются матрицы Z'_{ij} , $Z_{i\gamma}$ и $Z_{\delta\gamma}$. В матрице Z'_{ij} изменяются лишь элементы $Z'_{ij}(i, j)$, $i, j = \overline{M_{1, k-1}+1; M}$.

Для коррекции матрицы Z'_{ij} необходимо ко всем изменяющимся элементам прибавить приращение сопротивления ветви связи:

$$\bar{Z}'_{ij}(i, j) = Z'_{ij}(i, j) + \Delta Z_{k-1, k},$$

где

$$\Delta Z_{k-1, k} = Z^{n_{k-1, k}} - Z^{m_{k-1, k}};$$

$Z^{n_{k-1, k}}$ — новое значение сопротивления ветви связи между подсистемами $k-1$ и k ; $Z^{m_{k-1, k}}$ — исходное значение сопротивления ветви связи между подсистемами $k-1$ и k .

Для коррекции матриц $Z_{i\gamma}$ и $Z_{\delta\gamma}$ рассмотрим 3 случая:

- а) $i_p < M_{1, k-1}$ и $j_p \leq M_{1, k-1}$;
- б) $i_p \leq M_{1, k-1}$ и $j_p > M_{1, k-1}$;
- в) $i_p > M_{1, k-1}$ и $j_p > M_{1, k-1}$.

Соответствующую матрицу представим в следующем виде (см. выше).

При случаях (а) и (в) соответствующие элементы матриц $Z_{i\gamma}$ и $Z_{\delta\gamma}$ не изменяются. В матрице $Z_{i\gamma}$ в случае (б) элементы соответствующих столбцов изменяются в строках от $M_{1, k-1}+1$ до M . Для коррекции матрицы $Z_{i\gamma}$ необходимо ко всем изменяющимся элементам прибавить $\Delta_6 = -\Delta Z_{k-1, k}$.

$i_p a$	$j_p a$	$i_p b$	$j_p b$	$i_p b$	a	b		
1					0	0	0	M_1
					0	0	0	$M_{1, k-2}$
			$k-1$		0	0	0	$M_{1, k-1}$
				k	0	Δ_6	0	M_{1k}
					0	Δ_6	0	$M_{1, N-1}$
					N	0	Δ_6	M
					a	0	0	
					b	0	$-\Delta_6$	0
					β	0	0	0

Для коррекции матрицы $Z_{\delta\gamma}$ необходимо ко всем элементам, соответствующим случаю (б), прибавить величину $\Delta Z_{k-1, k}$.

После корректировки матриц Z'_{ij} , $Z_{i\gamma}$ и $Z_{\delta\gamma}$ определяем Z -матрицу обобщенных параметров [Л. 2].

При отключении ветви между подсистемами $k-1$ и k необходимо одну из ветвей разрыва между этими подсистемами принимать за ветвь связи (при этом считаем, что ветвь разрыва, которую принимали за ветвь связи, отключается), привести подматрицу k -й подсистемы к новому появляющемуся базисному узлу [Л. 7], после чего привести подматрицу k -й подсистемы к единственному базисному узлу с учетом частичного изменения сопротивления ветви связи и номера вершин в подсистеме $k-1$, с которой соединена ветвь связи. Если среди ветвей разрыва имеется такая, которая в подсистеме $k-1$ имеет общую вершину с отключаемой ветвью связи, то целесообразно в качестве новой ветви связи выбрать данную ветвь разрыва.

Таким образом, отключение ветви связи сводится к следующим изменениям: отключение ветви разрыва; изменение сопротивления ветви связи; изменение подматрицы $Z_{ik, jk}$ (т. е. приведение $Z_{ik, jk}$ к новому базисному узлу). Эти виды изменений нами уже рассмотрены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хачатрян В. С. К методам расчета собственных и взаимных сопротивлений сложных энергосистем. — Электричество, 1964, № 10, с. 47—51.
2. Хачатрян В. С., Суханов О. А. Диакоптика и задача определения обобщенных параметров больших энергосистем. — Электричество, 1973, № 4, с. 1—10.
3. Хачатрян В. С., Балабеян М. А. Автоматизация разбивки больших систем на радиально связанные оптимальные подсистемы. — Электричество, 1977, № 9, с. 15—20.
4. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей. — М.: Энергия, 1972. — 231 с.
5. Гераскин О. Т. Пересчет узловых сопротивлений при изменении схемы замещения электрической сети. — Изв. АН СССР. — Энергетика и транспорт, 1970, № 1, с. 162.
6. Воеводин В. В. Численные методы алгебры. Теория и алгоритмы. — М.: Наука, 1966. — 248 с.
7. Гурский С. К. Алгоритмизация задач управления режимами сложных систем в электроэнергетике. — Минск: Наука и техника, 1977. — 368 с.

Описание энергообъединения как объекта управления режимом по частоте и активной мощности¹

АЛЕКСЕЕВ С. В., КОПЫЛОВ И. Б., МАШАНСКИЙ А. М.

ВНИИЭ

В результате быстрого роста энергосистем, создания и развития ЕЭС СССР увеличивается роль систем автоматического управления режимом энергосистем по частоте и активной мощности (САУ ЧМ), которые являются автоматическими подсистемами автоматизированных систем диспетчерского управления. На САУ ЧМ возлагаются функции автоматического регулирования частоты и суммарных обменных потоков мощности энергообъединений, а также ограничения перетоков мощности по слабым внешним и внутренним межсистемным связям в нормальных режимах из условия сохранения статической и термической устойчивости. Кроме того, в процессе управления САУ ЧМ должна осуществлять приближенное экономичное распределение внеплановых изменений нагрузки энергообъединения между энергосистемами, электростанциями и отдельными агрегатами. Для эффективного выполнения указанных функций САУ ЧМ должна обладать необходимыми статическими и динамическими характеристиками.

Исследованию САУ ЧМ посвящен ряд статей, в которых либо подробно учитываются характеристики отдельной электростанции, участвующей в регулировании, [Л. 1], при упрощенном описании остальной части энергосистемы, либо рассматривается режим регулирования частоты и перетоков мощности в энергообъединении, состоящем из двух или трех энергосистем [Л. 2—4], при упрощенном описании отдельных энергосистем. При этом принимается детерминированный (скачкообразный) [Л. 1, 2 и 4], гармонический [Л. 2] или случайный [Л. 3 и 4] характер действующих в системе возмущений.

В статье дается описание энергообъединения как объекта управления для САУ ЧМ при произвольном числе энергосистем с учетом динамических характеристик различных групп участвующих в регулировании электростанций и описание действующих в системе возмущений. В приложении приводится пример использования предложенного описания для исследования на ЦВМ динамических характеристик систем регулирования частоты и ограничения перетоков мощности в энергообъединении, состоящем из двух энергосистем.

Поскольку энергообъединение как объект управления рассматривается при нормальных условиях работы, т. е. при малых отклонениях параметров режима (частоты, перетоков мощности, мощностей отдельных агрегатов и т. д.) от их начальных значений, то при исследовании могут быть приняты следующие допущения:

вся система рассматривается в линейном приближении;

каждая из энергосистем, входящая в состав энергообъединения, принимается концентрированной,

т. е. не учитывается сдвиг фаз между векторами напряжения в отдельных ее узлах;

все множество генераторов и турбин в каждой из энергосистем представляется в виде одного эквивалентного генератора с несколькими группами эквивалентных турбин;

напряжение на шинах эквивалентного генератора принимается постоянным;

небаланс мощности энергосистемы приводится к нагрузке, которая считается приложенной к валу эквивалентного генератора;

не учитываются потери в сети, условно отнесенные к нагрузке.

При принятых допущениях энергообъединение описывается приведенными ниже группами уравнений, в которых все величины даются в отклонениях и записаны в операторной форме. При этом через j и k обозначены индексы энергосистем ($j, k=1, 2, \dots, n$), через i — индекс группы эквивалентных турбин ($i=1, 2, \dots, m$), за положительное принято направление перетока мощности от энергосистемы j к энергосистеме k .

К первой группе относятся уравнения эквивалентных генераторов балансов активных мощностей и гибких связей:

$$T_{0j} p \Delta f_j(p) = \Delta P_j(p); \quad (1)$$

$$\Delta P_j(p) = \sum_{i=1}^m k_{ji} \Delta P_{\tau ji}(p) + k_{nj} \Delta f_j(p) - \Delta P_{nj}(p) - k_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \Delta P_{\pi jk}(p); \quad (2)$$

$$\Delta P_{\pi jk}(p) = \frac{k_{\pi jk}}{p} [\Delta f_j(p) - \Delta f_k(p)], \quad (3)$$

где $\Delta P_{nj}(p)$, $\Delta P_j(p)$, $\Delta P_{\tau ji}(p)$, $\Delta P_{\pi jk}(p)$ — отклонения соответственно нагрузки, небаланса активных мощностей и мощностей отдельных групп турбин в j -й энергосистеме, а также отклонение перетока мощности по линии связи между j -й и k -й энергосистемами; $\Delta f_j(p)$ и $\Delta f_k(p)$ — отклонения частот в j -й и k -й энергосистемах; T_{aj} — постоянная инерции, обусловленная маховыми массами генераторов, турбин и нагрузки в j -й энергосистеме; k_{nj} — частотный коэффициент нагрузки; $k_{\pi jk}$ — коэффициент жесткости связи; k_j и k_{ji} — масштабные коэффициенты,

$$k_j = \frac{P_{л.баз}}{P_{jбаз}}; \quad k_{ji} = \frac{P_{\tau jiбаз}}{P_{jбаз}}.$$

Здесь $P_{jбаз}$, $P_{\tau jiбаз}$, $P_{л.баз}$ — базисные величины для мощностей энергообъединений, отдельных групп турбин и перетоков мощности соответственно. Рекомендуется принимать в качестве $P_{jбаз}$ установленную мощность j -й энергосистемы, а за $P_{\tau jiбаз}$ — номинальную мощность турбин, входящих

¹ В порядке обсуждения (см. раздел «Дискуссии»).

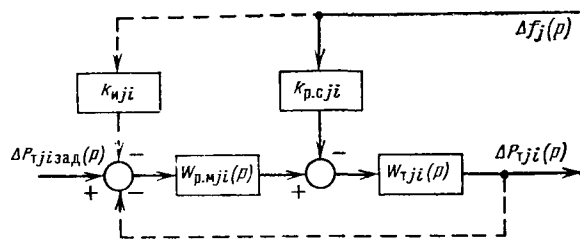


Рис. 1. Упрощенная структурная схема эквивалентной группы турбин.

в j -ю группу турбин. Тогда коэффициенты k_{ji} показывают долевого состав различных групп турбин в энергообъединении.

В перетоке мощности по межсистемной связи учтена только составляющая синхронной мощности, так как асинхронная мощность для случая «слабой» межсистемной связи, к категории которой относятся практически все межсистемные связи, весьма мала, составляет менее 2% синхронной мощности и ею можно пренебречь.

Коэффициент жесткости связи $k_{лjk}$ в уравнении (3) может быть получен путем линеаризации исходного нелинейного уравнения перетока мощности по линии связи

$$P_{лjk} = \frac{P_{предjk}}{P_{л.баз}} \sin \delta_{jk}, \quad (4)$$

где $P_{предjk}$ — предел мощности, передаваемой по jk -й линии связи; δ_{jk} — угол между векторами напряжения по концам линии.

В случае линеаризации при значении угла δ_{jk0} , соответствующем исходному перетоку по линии связи, коэффициент жесткости связи

$$k_{лjk} = \frac{P_{предjk}}{P_{л.баз}} \cos \delta_{jk0}, \quad (5)$$

где ω_0 — синхронная скорость, равная 314 1/с.

Возможна и статическая линеаризация нелинейности (4) [Л. 5], однако для этого необходимо предварительное знание статистических характеристик величины δ_{jk} .

Ко второй группе относятся уравнения отдельных групп эквивалентных турбин, отличающихся своими динамическими характеристиками и наличием систем автоматического управления мощностью (САУМ) различного типа. На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема одной эквивалентной группы турбин, снабженной САУМ и находящейся под воздействием сигнала управления заданной мощностью $\Delta P_{Tjiзад}(p)$. Выходным сигналом является $\Delta P_{Tji}(p)$ — изменение мощности турбины. На этой схеме $W_{Tji}(p)$ — передаточная функция турбины; $k_{p,cji}$ — коэффициент передачи маятника регулятора частоты вращения турбины; $W_{p,mji}(p)$ — передаточная функция регулятора мощности, куда входит и двигатель механизма изменения скорости вращения турбины как исполнительный элемент САУМ; k_{nji} — коэффициент передачи канала коррекции САУМ по отклонению частоты. Если в САУМ обратная связь выполняется по положению регулирующего элемента турбины, то она включается в передаточную функцию САУМ, которая в этом случае обозначается $W'_{p,mji}(p)$. Исключе-

чаемые при этом цепи коррекции по частоте и обратной связи по мощности показаны пунктиром.

Из структурной схемы рис. 1 можно получить следующие уравнения отдельных групп эквивалентных турбин:

для агрегатов, имеющих обратную связь по мощности

$$\Delta P_{Tji}(p) = \frac{W_{Tji}(p)}{1 + W_{Tji}(p) W_{p,mji}(p)} \{ [k_{p,cji} + k_{nji} W_{p,mji}(p)] \Delta f_j(p) + W_{p,mji}(p) \Delta P_{Tjiзад}(p) \}; \quad (6)$$

для агрегатов, имеющих обратную связь по положению регулирующего элемента турбины

$$\Delta P_{Tji}(p) = W_{Tji}(p) [k_{p,cji} \Delta f_j(p) + W'_{p,mji}(p) \Delta P_{Tjiзад}(p)]; \quad (7)$$

для агрегатов, не имеющих САУМ, (нерегулируемых)

$$\Delta P_{Tji}(p) = W_{Tji}(p) k_{p,cji} \Delta f_j(p). \quad (8)$$

Виды групп эквивалентных турбин при моделировании должны соответствовать в общем случае составу турбинного оборудования в энергообъединении. Однако, поскольку невозможно учесть все многообразие типов турбин, то целесообразно в первую очередь использовать следующие типы характерных привлекаемых к регулированию групп турбин с приведенными передаточными функциями, соответствующими $W_{Tji}(p)$:

эквивалентная гидротурбина

$$W_{гэс}(p) = \frac{(1 + T_{np})(1 - T_{wp})}{\{T_d T_{np}^2 + [T_d + T_n(k_r + 1) + 1](1 + 0,5T_{wp})\}}, \quad (9)$$

где T_n — постоянная времени издрорма; T_d — постоянная времени серводвигателя; k_r — коэффициент гибкой обратной связи в регуляторе частоты вращения; T_w — время запаздывания воды в водоводе;

эквивалентная паровая турбина без промежуточного перегрева пара (к этой группе относятся турбины мощностью до 100 МВт)

$$W_{T,т1}(p) = \frac{1}{1 + T_{Tp}}, \quad (10)$$

где T_T — эквивалентная постоянная времени, учитывающая динамические свойства серводвигателя и парового объема в турбине;

эквивалентная паровая турбина с промперегревом пара (турбины мощностью более 100 МВт)

$$W_{T,т2}(p) = k_{цвд} + \frac{1 - k_{цвд}}{1 + T_{п.п} p}, \quad (11)$$

где $k_{цвд}$ и $1 - k_{цвд}$ — величины, соответствующие соотношению мощностей цилиндра высокого давления турбины и цилиндров среднего и низкого давления; $T_{п.п}$ — постоянная времени парового объема промперегревателя.

Паровые турбины, не оснащенные САУМ, можно объединить в одну эквивалентную группу нерегулируемых турбин, передаточная функция которой определяется приближенно из экспериментально снятых характеристик. Как показано в [Л. 3 и 6], при наблюдаемом в течение 10 мин переходном процессе изменения частоты, полученном в нерегу-

Таблица 1

Тип эквивалентной группы турбин	Параметры передаточных функций турбин $W_{Tji}(p)$	Коэффициенты передачи маятников регуляторов частоты вращения $k_{p.c ji}$	Параметры передаточных функций САУМ $W_{p.m ji}(p)$	Коэффициенты усиления по каналу частотной коррекции в САУМ $k_{н ji}$
Гидротурбина	$T_d = 5$ с $T_i = 3$ с $k_i = 10$ с $T_w = 2$ с	25	$T_{p.m} = 2$ с $\beta_{p.m} = 2,5$ $\alpha_{p.m} = 0,1$ 1/с	25
Паровая турбина без промпрегрева пара (мощностью до 100 МВт)	$T_{т} = 0,5$ с	16,6	$\beta_{p.m} = 0,7$ $\alpha_{p.m} = 0,1$ 1/с	16,6
Паровая турбина средней мощности с промпрегревом пара (мощность 200 МВт)	$T_{п.п} = 4$ с $k_{цвд} = 0,5$	16,6	$\beta_{p.m} = 0,5$ $\alpha_{p.m} = 0,1$ 1/с	16,6
Паровая турбина большой мощности с промпрегревом пара (мощность 300 МВт)	$T_{п.п} = 11,3$ (Для турбин ЛМЗ $T_{п.п}(5-8)$ с) $k_{цвд} = 0,32$	16,6	$\beta_{p.m} = 1,0$ $\alpha_{p.m} = 0,0715$ 1/с	16,6
Нерегулируемая группа турбин	$a = 1,6$ $b = 2,2$ $T_f = 180$ с	6,2	—	—

лируемой энергосистеме при отключенных вторичных регуляторах и при скачкообразном изменении баланса мощности [Л. 3], частота первоначально стабилизируется на определенном уровне Δf_1 , определяемом статическими характеристиками регуляторов частоты вращения и нагрузки, а затем по закону, близкому к экспоненциальному с постоянной времени порядка 150—210 с, продолжает изменяться в том же направлении и достигает значения Δf_2 , причем $\Delta f_2/\Delta f_1 \approx 2$. Такому переходному процессу изменения частоты соответствует передаточная функция группы нерегулируемых турбин

$$W_{н.т}(p) = 1 - \frac{a}{b + T_f p}, \quad (12)$$

где T_f — постоянная времени переходного процесса изменения частоты от Δf_1 до Δf_2 ; a и b — коэффициенты, определяемые в результате аппроксимации переходного процесса изменения частоты.

При этом коэффициент передачи регулятора частоты вращения эквивалентной нерегулируемой группы турбин также имеет эквивалентное значение, определяемое по кривой переходного процесса изменения частоты.

САУМ отдельных групп эквивалентных турбин с обратной связью по мощности обычно имеют пропорционально-интегральный закон регулирования [Л. 8], при этом передаточная функция САУМ имеет следующий вид:

$$W_{p.m}(p) = \beta_{p.m} + \frac{\alpha_{p.m}}{p}, \quad (13)$$

где $\beta_{p.m}$ и $\alpha_{p.m}$ — коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих закона регулирования.

Передаточная функция САУМ с обратной связью по положению регулирующего элемента турбины (станционной системы группового регулирования на ГЭС) может быть упрощенно представлена в виде [Л. 2]:

$$W'_{p.m}(p) = \frac{1}{1 + T_{p.m} p}, \quad (14)$$

где $T_{p.m}$ — постоянная времени отработки задания САУМ.

Числовые значения параметров передаточных функций для типовых эквивалентных групп турбин (9) — (12) приведены в табл. 1. Параметры настроек САУМ для различных групп турбин получены на основании экспериментальных данных по настройке САУМ на реальных агрегатах в энергосистеме. Коэффициенты передачи маятников регуляторов частоты вращения соответствуют средним значениям статизма 6% для паровых турбин и 4% для гидротурбин. Коэффициенты усиления по каналу частотной коррекции в САУМ обычно устанавливаются равными коэффициентам передачи маятников регуляторов частоты вращения соответствующих турбин.

К третьей группе относятся уравнения, описывающие системы автоматического управления режимами энергообъединений по частоте и активной мощности, вырабатывающие управляющие воздействия $\Delta P_{Tjiзад}(p)$, которые поступают на входы САУМ привлеченных к регулированию агрегатов электростанций.

В соответствии с выполняемыми функциями в САУ ЧМ имеется несколько подсистем: подсистема регулирования частоты и обменной мощности и подсистемы ограничения перетоков мощности (СОП), осуществляющие ограничение перетока по

одной или нескольким внешним и внутренним связям. При принятых допущениях о концентрированности энергосистем при моделировании возможно учитывать связи только между этими энергосистемами.

Подсистема ограничения перетоков мощности характеризуется несколькими нелинейностями [Л. 7], основной из которых является регулируемая зона нечувствительности, определяемая задаваемыми уставками по величине ограничиваемого перетока. В рассматриваемой модели эта характеристика линеаризуется, и действие СОП рассматривается только на ее рабочем линейном участке, т. е. когда фактический переток превышает уставку. Если система ограничения перетока в рассматриваемом режиме не действует (переток ниже уставки), то СОП рассматривается как неработающая система.

По принципу действия САУ ЧМ, разрабатываемые в СССР, разделяются на два вида. В САУ ЧМ первого вида регулирование внеплановых изменений режима энергосистемы (частоты, перетоков мощности) осуществляется с приближенным экономичным распределением нагрузки; управляющее воздействие формируется в виде суммарного изменения активной мощности привлеченных к регулированию электростанций и распределяется между ними в соответствии с заданными коэффициентами долевого участия, выбором которых приближенно учитываются экономические характеристики и величины регулировочных диапазонов электростанций, а также влияние изменения мощности регулирующих электростанций (групп турбин) на изменение перетока мощности по jk -й линии связи при его ограничении. При моделировании работу САУ ЧМ первого вида при принятых допущениях можно описать следующим уравнением:

$$\Delta P_{\tau j i \text{зад}}(p) = k_{p, \tau j i} \left\{ k_{\Delta, y j i}^p W_{\Delta, m j}(p) [\Delta f_j(p) + \right. \\ \left. + k_{c j} k_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \Delta P_{\Delta j k}(p) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n k_{\Delta, y j i}^{0 j k} W_{0 j k}(p) k_j \Delta P_{\Delta j k}(p) \right\}, \quad (15)$$

где $k_{\Delta, y j i}^p$ и $k_{\Delta, y j i}^{0 j k}$ — коэффициенты долевого участия ji -й электростанции (группы турбин) в регулировании частоты и обменной мощности j -го энергообъединения и в ограничении перетока мощности по jk -й линии связи соответственно; $W_{\Delta, m j}(p)$ и $W_{0 j k}(p)$ — передаточные функции подсистемы регулирования частоты и обменной мощности и подсистемы ограничения перетока мощности по jk -й линии связи соответственно; $k_{c j}$ — коэффициент пропорциональности, который при регулировании частоты и обменной мощности по критерию сетевых характеристик принимается равным величине, обратной частотному коэффициенту j -го энергообъединения; $k_{p, \tau j i}$ — масштабный коэффициент, определяемый отношением базисных величин $P_{\text{рег. } \tau j i \text{ баз}} / P_{\tau j i \text{ баз}}$.

Необходимо отметить, что уравнение (15) может быть использовано при моделировании лишь

в предположении сохранения регулировочных диапазонов на всех участвующих в регулировании электростанциях.

В САУ ЧМ второго вида [Л. 8] регулирование внеплановых изменений режима энергосистемы осуществляется с экономичным распределением нагрузки между регулируемыми электростанциями и отдельными агрегатами по принципу равенства относительных приростов издержек с учетом потерь в сети; управляющее воздействие вырабатывается в виде относительного прироста издержек в балансирующем узле j -го энергообъединения $\Delta p_j(p)$ и уже на электростанциях преобразуется в соответствии с характеристиками относительных приростов (ХОП) отдельных агрегатов в сигналы по заданию мощности этим агрегатам. Управляющее воздействие, обусловленное ограничением перетока по jk -й линии связи формируется с учетом коэффициентов распределения мощности ji -х агрегатов по jk -й линии связи.

Сигнал, приходящий на электростанцию, содержит несколько составляющих, формируемых при работе отдельных систем более высокой степени, в том числе и пропорциональные составляющие законов регулирования, реализуемых в составе этих систем.

Из-за нелинейного характера ХОП и переменного состава участвующих в регулировании агрегатов (последнее обусловлено неодновременной отработкой агрегатами различного типа своих регулировочных диапазонов) объект характеризуется переменным коэффициентом передачи по каналу управления. Для возможности исследования в линейном приближении динамических характеристик системы осуществляется кусочно-линейная аппроксимация ХОП энергосистемы с учетом регулировочных диапазонов отдельных групп турбин таким образом, чтобы на отдельных участках аппроксимированной ХОП состав участвующих в регулировании агрегатов не изменялся и коэффициент передачи объекта по каналу управления оставался постоянным.

Действие САУ ЧМ второго вида при принятых допущениях можно упрощенно описать следующим уравнением:

$$\Delta P_{\tau j i \text{зад}}(p) = k_{p, \tau j i} \frac{1}{k_{\text{ХОП}, \tau j i}} \left\{ W_{\Delta, m j}(p) \left[\Delta f_j(p) + \right. \right. \\ \left. \left. + k_{c j} k_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \Delta P_{\Delta j k}(p) \right] + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n k_{\Delta, y j i}^{j k} W_{0 j k}(p) k_j \Delta P_{\Delta j k}(p) \right\}, \quad (16)$$

где $k_{\text{ХОП}, \tau j i} = \frac{\Delta p_{\tau j i}(p) P_{\text{рег. } \tau j i \text{ баз}}}{\Delta P_{\text{рег. } \tau j i}(p) P_{\tau j i \text{ баз}}}$ — коэффициент наклона линеаризованной ХОП ji -й группы турбин на рассматриваемом участке (в относительных единицах); $k_{\Delta, y j i}^{j k}$ — коэффициент распределения мощности ji -й группы турбин по jk -й линии связи; $\Delta P_{\text{рег. } \tau j i}(p)$ и $\Delta p_{\tau j i}(p)$ — значения регулировочного диапазона по мощности и соответствующего диапазона изменения относительного прироста издержек ji -й груп-

пы турбин; $\rho_{тjбаз}$, $P_{рег.тjбаз}$ — значения относительного прироста издержек и мощности в регулируемом диапазоне, принятые за базисные.

Как правило, САУ ЧМ вырабатывают управляющие воздействия в соответствии с пропорционально-интегральным законом регулирования, т. е. передаточные функции $W_{ч.мj}(p)$ и $W_{офк}(p)$ имеют вид, аналогичный (13). Однако оптимальные числовые значения параметров этих передаточных функций в выражениях (15) и (16) различны из-за разного вида уравнений (15) и (16).

В ряде конкретных случаев может быть различное сочетание отдельных функций САУ ЧМ в зависимости от возлагаемых на эти системы задач. Например, в одном энергообъединении САУ ЧМ осуществляет только регулирование частоты по астатическому закону регулирования, а САУ ЧМ в другом энергообъединении при этом выполняет только ограничение перетока по слабой линии связи и т. д. При этом уравнения (15), (16) соответственно упрощаются.

Энергообъединение как объект управления для САУ ЧМ находится под воздействием различных возмущений, основным из которых в нормальном режиме является изменение нагрузки. Изменение нагрузки во времени является в общем случае нестационарным по математическому ожиданию и по дисперсии случайным процессом. Пренебрегая нестационарностью процесса по дисперсии, этот процесс можно представить в виде суммы центрированной стационарной составляющей ΔP_n^* и получаемой путем осреднения нестационарной составляющей $m_{\Delta P_n}(t)$, относительно которой производится централизация, т. е.

$$\Delta P_n(t) = m_{\Delta P_n}(t) + \Delta P_n^*(t). \quad (17)$$

Величина $m_{\Delta P_n}(t)$ является детерминированной функцией времени и ее максимальное отклонение на интервале времени Δt порядка 10 мин можно приближенно оценить по изменению планового графика нагрузки на этом интервале [Л. 9]. Для этой цели график нагрузки, заданный обычно часовыми значениями, можно разложить в ряд Фурье по следующему выражению:

$$\Delta P_n(t) = \left[1 + \sum_{i=1}^N |A_i| \cos(i\omega t + \arg A_i) \right] \bar{P}_n, \quad (18)$$

где A_i — коэффициенты разложения; \bar{P}_n — среднее за сутки значение графика нагрузки; $\omega = 2\pi/T$; $T = 24$ ч — период функции $P_n(t)$.

В [Л. 9] показано, что при использовании пяти членов разложения ($N=5$) погрешность восстановления графика нагрузки не превышает 1%. Ниже приведены результаты разложения графика нагрузки энергосистемы для характерного зимнего рабочего дня при $\bar{P}_n = 0,835 P_{уст}$.

i	1	2	3	4	5
$ A_i $	0,143	0,115	0,0259	0,0231	0,0152
$\arg A_i$	-245°08'	-288°35'	-170°14'	-215°08'	331°12'

По этим данным можно оценить максимальное отклонение нестационарной составляющей случайного процесса изменения нагрузки на заданном интервале времени Δt :

$$\Delta m_{\Delta P_n}(t)_{\max} = [P_n(t) - P_n(t + \Delta t)]_{\max}. \quad (19)$$

Анализ графиков нагрузки и их разложений в ряд Фурье показал, что максимальный прирост нагрузки приходится на часы утреннего подъема. Для приведенного разложения характерного графика нагрузки максимальное отклонение нестационарной составляющей на 10-минутном интервале равно 1,6% установленной мощности энергосистемы; для других рассмотренных графиков эта величина имеет такой же порядок.

В предположении гауссового распределения процесс $\Delta P_n(t)$ можно полностью охарактеризовать во временной области его корреляционной функцией, а в частотной области — спектральной плотностью. Как показано в ряде работ, корреляционная функция центрированной стационарной составляющей ΔP_n^* достаточно хорошо аппроксимируется следующим выражением:

$$K_{\Delta P_n}(\tau) = D_{\Delta P_n} e^{-\frac{|\tau|}{T}} \cos \beta \tau, \quad (20)$$

где $D_{\Delta P_n}$ — дисперсия изменений нагрузки; T — постоянная затухания корреляционной функции; β — частота гармонической составляющей.

В [Л. 9] установлена эмпирическая связь среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\Delta P_n}$ и дисперсии отклонений нагрузки с помощью энергосистемы P_c :

$$\sigma_{\Delta P_n} = \sqrt{D_{\Delta P_n}} = \sqrt{P_c} \cdot c, \quad (21)$$

где c — коэффициент, принимающий для различных энергосистем значения от 0,5 до 0,88.

Проведенная во ВНИИЭ обработка ряда реализаций перетоков мощности и частоты и определение по ним характеристик нагрузки показали, что наиболее характерными значениями являются $T = 100$ с, $\beta = 0,02$ рад/с.

Корреляционной функции вида (20) в частотной области соответствует выражение спектральной плотности вида:

$$S_{\Delta P_n}(\omega) = \frac{D_{\Delta P_n}}{2\pi} \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \beta)^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega + \beta)^2} \right], \quad (22)$$

где $\alpha = 1/T$.

Таким образом, при моделировании энергосистемы известной мощности можно записать корреляционную функцию и спектральную плотность возмущения в виде изменения нагрузки в соответствии с выражениями (20) — (22) с приведенными выше значениями T и β .

В ряде случаев при определении динамических и статических характеристик САУ ЧМ используется детерминированное (скачкообразное) возмущение по нагрузке, значение которого при моделировании можно принимать равным 1% мощности

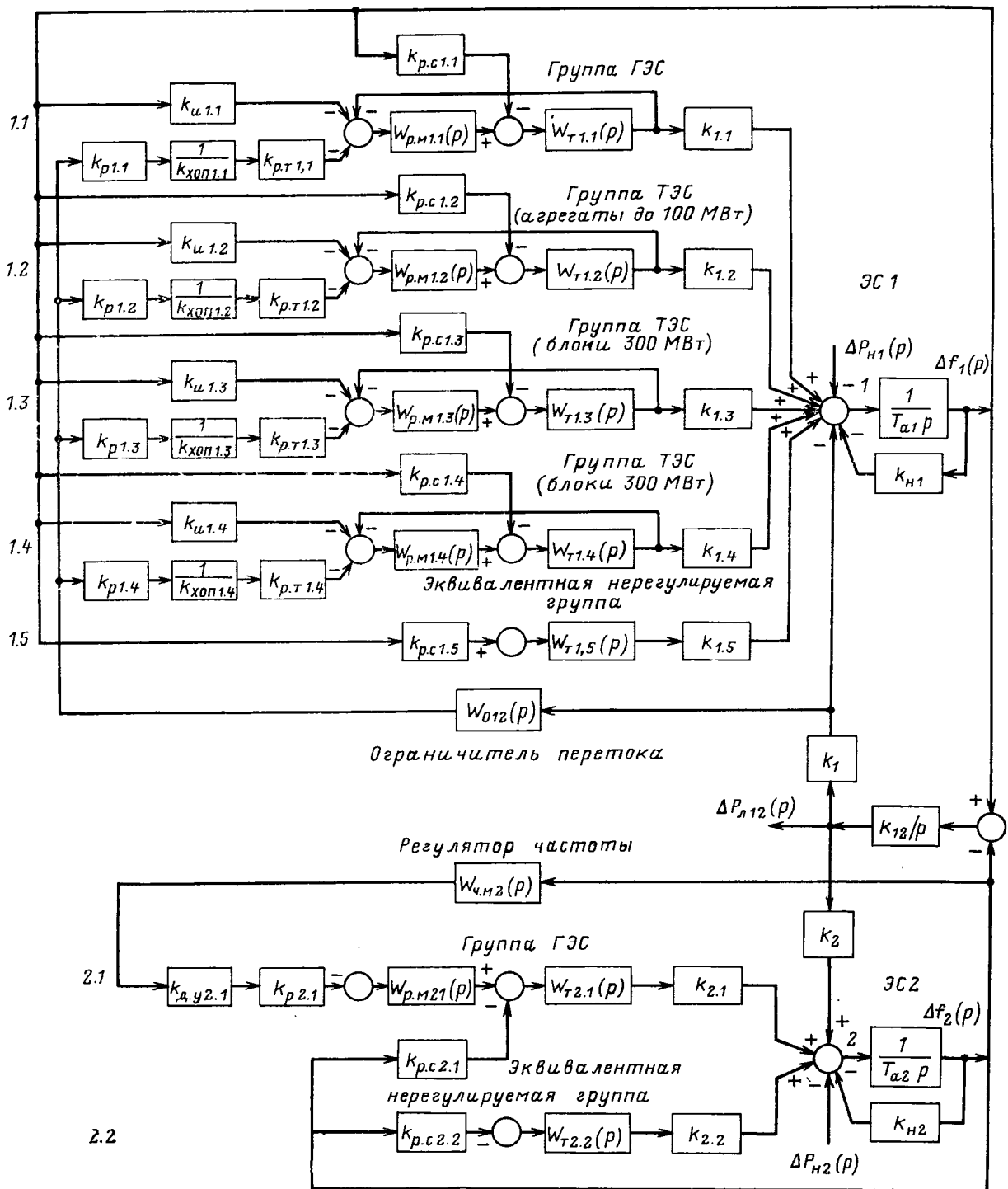


Рис. 2. Структурная схема параллельной работы двух энергосистем при выделении отдельных эквивалентных групп турбин.

энергосистемы. При этом необходимо иметь в виду, что случайный процесс изменения нагрузки, характеризующийся выражениями (17)–(22), имеет место во всех энергосистемах одновременно, а вероятность одновременного возникновения скачкообразного возмущения, вызванного резким набросом или сбросом нагрузки одновременно в нескольких энергосистемах, мала, поэтому целесообразно рассматривать возмущение в виде скачка нагрузки только в одной из объединенных энергосистем.

Приведенное описание энергообъединения как объекта управления для САУ ЧМ использовалось для анализа динамических и статических характеристик САУ ЧМ путем расчетов на ЦВМ.

Приложение. В качестве примера использования изложенного выше описания энергообъединения как объекта управления рассмотрим определение динамических характеристик энергообъединения и САУ ЧМ для случая параллельной работы двух энергосистем через линию электропередач (рис. 2). В энергосистеме ЭС1 выделены пять групп различ-

ных турбин: 1.1 — гидротурбины; 1.2 — тепловые турбины без промпрегрева пара; 1.3 и 1.4 — тепловые турбины с промпрегревом пара соответственно 200 и 300 МВт; 1.5 — нерегулируемые турбины. В энергосистеме ЭС2 выделены две группы: 2.1 — гидротурбины и 2.2 — нерегулируемые турбины.

Исходным режимом является режим передачи мощности из энергосистемы ЭС1 в энергосистему ЭС2 при действии различных возмущений. При этом в ЭС2 действует система регулирования частоты, которая вырабатывает управляющее воздействие в виде изменения задания мощности привлеченных к регулированию электростанций и передаточная функция которой $W_{\text{ч.м2}}(p) = \alpha_{\text{ч.м2}}/p = 2,5/p$.

В ЭС1 работает система ограничения перетока мощности по связи между энергосистемами, управляющее воздействие которой формируется в виде изменения значения относительного прироста издержек регулирующих электростанций и передаточную функцию которой можно записать в виде:

$$W_{o.12}(p) = \beta_{o.12} + \alpha_{o.12}/p = 20 + 3/p.$$

Параметры передаточных функций типовых групп турбин приведены в табл. 1 вместе с передаточными функциями САУМ этих турбин. Числовые значения остальных, используемых в модели параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Индекс энергосистемы / Индекс группы турбины / j	k_{ji}	$\frac{1}{k_{\text{хон } ji}}$	$k_{p.t. ji}$	k_j	k_{nj}	T_{aj}^* , с	$k_{p. ji}$	$k_{д. у. ji}$	$k_{д12}^*$, 1/с
ЭС1	1.1	0,077	0,5	0,77			1		13,5
	1.2	0,093	0	0,30			1		
	1.3	0,179	0,5	0,30	1	2	12		
	1.4	0,125	0,5	0,30			1		
	1.5	0,526	—	—			—		
ЭС2	2.1	0,05	—	0,5			—	1	
	2.2	0,95	—	—	0,65	2	16	—	

Для расчета статических и динамических характеристик использовался частотный метод. На рис. 3 приведены рассчитанные на ЦВМ амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) схемы рис. 2, которые далее используются для расчета переходных процессов и характеристик случайных процессов на выходах системы. Показаны только начальные участки АЧХ в диапазоне частот от 0 до 0,5 рад/с, в котором проявляется влияние систем регулирования. Эти характеристики рассчитаны между принятой за входную координату нагрузкой $\Delta P_{н2}(p)$ и выходными координатами, за которые приняты частоты $\Delta f_1(p)$ и $\Delta f_2(p)$, переток мощности по связи $\Delta P_{п12}(p)$ и управляющие воздействия от системы регулирования частоты $\Delta P_{ч.м2}(p)$ и от системы ограничения перетока $\Delta P_{o.п1}(p)$.

Из приведенных АЧХ системы следует, что в диапазоне частот от 0 до 0,4 рад/с (т. е. при периодах колебаний от ∞ до 15 с) система ограничения перетока мощности при данных параметрах настройки снижает колебания перетока $\Delta P_{п12}$, причем благодаря наличию интегральной составляющей в законе регулирования снижает их до нуля (точка при $\omega=0$). Вместе с тем действие системы ограничения перетока при возмущении по нагрузке $\Delta P_{н2}$ приводит к росту колебаний частоты в диапазоне частот $\omega=0,01-0,2$ рад/с ($T=10-0,5$ мин.) Действие системы регулирования частоты при заданных параметрах настройки сказывается только в диапазоне инфранизких частот $\omega=0-0,01$ рад/с ($T>10$ мин), в котором колебания частоты снижаются.

На рис. 4 приведены полученные путем расчета на ЦВМ графики переходных процессов в энергосистеме для случая, когда система регулирования частоты и система ограничения перетока включены, и для случая, когда эти системы отключены (в последнем случае регулируемые переменные снабжены индексом 0), при возмущении в виде скачкообразного увеличения нагрузки, равного $0,01 P_{уст2}$, действующем в узле 2.

Из этих графиков следует, что отклонение перетока, вызванное возникновением скачкообразного возмущения в узле

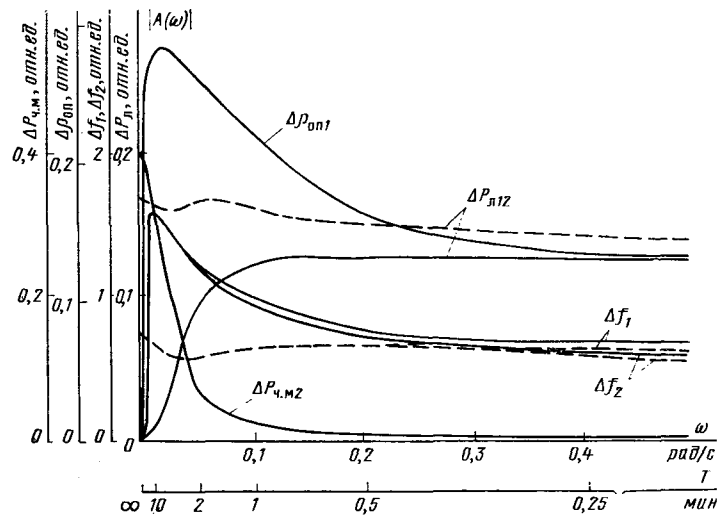


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики объекта по возмущению в узле 2; — — — системы регулирования отключены; — — — системы регулирования включения.

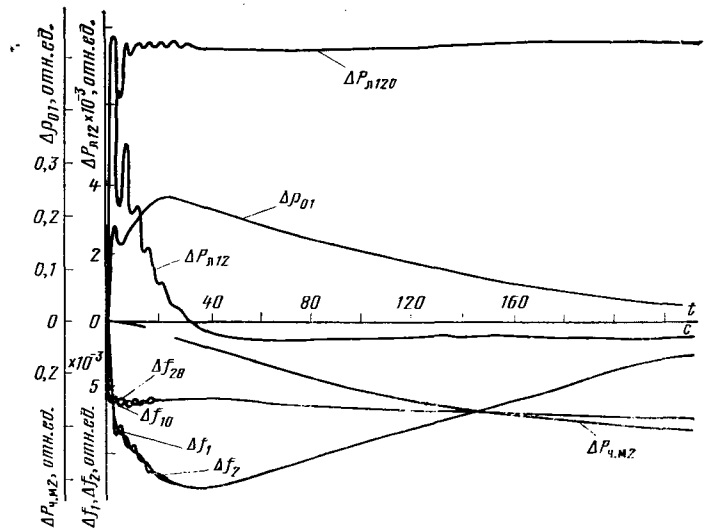


Рис. 4. Графики переходных процессов в системе при возмущении по нагрузке в узле 2 ($\Delta P_{н2} = 0,01 P_{уст2}$).

2, сводится к нулю за время $t=35$ с в результате действия системы ограничения перетока. При снижении частоты приходит в действие система регулирования частоты, которая сводит отклонение частоты к нулю за время $t=240$ с. При этом по мере того, как в результате действия системы регулирования частоты агрегаты в ЭС2, привлеченные к регулированию частоты, компенсируют изменение нагрузки и сводят отклонение частоты к нулю, агрегаты в ЭС1, изменившие свою мощность под действием системы ограничения перетока, возвращаются в исходное положение. Таким образом, характер переходных процессов, полученный на модели, хорошо согласуется с характером переходных процессов, наблюдаемых при испытаниях систем ограничения перетока [Л. 7].

Для случая одновременного действия двух случайных возмущений в обеих энергосистемах схемы рис. 2 приняты следующие значения параметров их статистических характеристик (20) — (22): $D_{\Delta P_{н1}} = 2,12 \cdot 10^{-5}$, $D_{\Delta P_{н2}} = 1,37 \cdot 10^{-5}$, $\alpha = 0,01$ 1/с, $\beta = 0,02$ рад/с. Максимальные отклонения нестационарной составляющей процесса $\Delta m_{\Delta P}(t)$ на 10-минутном интервале, полученные путем расчета по формулам (18), (19), для характерных графиков нагрузки рассматриваемых энергосистем, составляют $\Delta m_{\Delta P_{н1}}(t)_{\text{max}} = 1,6\%$, $\Delta m_{\Delta P_{н2}}(t)_{\text{max}} = 1,38\%$

мощности соответствующих энергосистем.

При действии случайного возмущения, задаваемого, например, его спектральной плотностью $S_{\Delta P_n}(\omega)$ вида (20), спектральные плотности изменений выходных переменных линейной системы определяются следующим выражением:

$$S_y(\omega) = |\Phi(j\omega)|^2 = S_{\Delta P_n}, \quad (\text{П-1})$$

где $|\Phi(j\omega)|$ — модуль АЧХ линейной системы между заданным входом и выходом.

В случае одновременного действия нескольких случайных возмущений в системе при допущении об отсутствии корреляционной связи между ними суммарная спектральная плотность выходной переменной

$$S_{y\Sigma}(\omega) = \sum_{i=1}^n S_{y_i}(\omega). \quad (\text{П-2})$$

Нестационарная составляющая случайного процесса изменений нагрузки $\Delta m_{\Delta P_n}(t)$, представленная рядом Фурье

(18), при прохождении через линейную систему преобразуется в соответствии со следующим выражением:

$$m_y(t) = \left\{ \Phi(0) \cdot 1 + \sum_{i=1}^N |\Phi(ji\omega)| |A_i \cos(i\omega t + \arg A_i + \arg \Phi(ji\omega))| \right\} \bar{P}_n, \quad (\text{П-3})$$

где $\Phi(0)$, $\Phi(ji\omega)$ — значения АЧХ системы при $\omega=0$ и различных значениях i и ω соответственно.

Тогда, аналогично формуле (19),

$$\Delta m_y(t) = m_y(t) - m_y(t + \Delta t), \quad (\text{П-4})$$

где $\Delta t = 10$ мин.

По частотным характеристикам системы в соответствии с выражениями (П-1)—(П-4) находим:

для нерегулируемой энергосистемы (отключена система регулирования частоты и система ограничения перетока)

$$\sigma_{\Delta P_{л12}} = 3,59 \cdot 10^{-3}; \quad \Delta m_{\Delta P_{л12}} = 4,58 \cdot 10^{-3};$$

$$\sigma_{\Delta f_1} = 2,82 \cdot 10^{-4}; \quad \Delta m_{\Delta f_1}(t) = 1,78 \cdot 10^{-3};$$

для энергосистемы при включенных системах регулирования

$$\sigma_{\Delta P_{л12}} = 1,05 \cdot 10^{-3}; \quad \Delta m_{\Delta P_{л12}}(t) = 1,15 \cdot 10^{-5}$$

$$\sigma_{\Delta f_1} = 5,15 \cdot 10^{-4}; \quad \Delta m_{\Delta f_1}(t) = 6,20 \cdot 10^{-5}.$$

Отсюда следует, что в результате действия системы ограничения перетока при данных параметрах настройки среднеквадратичное отклонение случайного процесса изменения перетока $\sigma_{\Delta P_{л12}}$ снижается более чем в 3 раза, а его нестационарная составляющая снижается практически до нуля. Действие системы регулирования частоты проявляется в значительном снижении нестационарной составляющей случайного процесса изменения частоты $\Delta m_{\Delta f_1}(t)$. При этом, однако, среднеквадратичное отклонение частоты несколько увеличивается.

Выводы. 1. Предложенное математическое описание энергообъединения с произвольным числом входящих в него энергосистем может эффективно использоваться при исследовании динамических характеристик аналоговых и цифровых САУ ЧМ как при автономной, так и совместной работе этих систем и входящих в их состав подсистем регулирования и ограничения перетоков.

2. Разработанное математическое описание энергообъединения как объекта управления для САУ ЧМ является наиболее универсальным применительно ко всем используемым в энергосистемах СССР типовым агрегатам, привлекаемым к регулированию и ограничению перетоков мощности, дает возможность исследовать динамику САУ ЧМ как при детерминированном, так и случайном характере возмущений и легко позволяет для любого конкретного энергообъединения получить необходимую структуру его математической модели с учетом схемы межсистемных связей и типа регулирующих агрегатов, входящих в состав отдельных энергосистем.

3. Математическая модель разработана на основе обобщения известных и вновь полученных экспериментальных данных о динамических характеристиках регулирующих агрегатов энергосистем. Эта модель может использоваться как при проектировании новых САУ ЧМ, когда данные об этих динамических характеристиках полностью или частично отсутствуют, так и при исследовании и усовершенствовании уже находящихся в эксплуатации САУ ЧМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стернинсон Л. Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. — М.: Энергия, 1975.

2. Кучкин М. Д., Савалов С. А. Основные режимные требования к регулированию межсистемных перетоков и принципы регулирования. — В кн.: Автоматическое регулирование перетоков мощности по межсистемным связям. — М.: Энергия, 1965, с. 49—97.

3. Андреюк В. А., Левит Л. М. Анализ эффективности систем автоматического регулирования межсистемных перетоков активной мощности с учетом случайного характера колебаний нагрузки объединенных энергосистем. — Изв. НИИПТ. Передача энергии постоянным и переменным током. — Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1968, сб. 14, с. 281—306.

4. Козлобаев А. Г. Упрощенная математическая модель энергетической системы при исследовании качества регулирования частоты и перетоков мощности. — Труды МЭИ, 1972, вып. 93, с. 75—78.

5. Андреюк В. А., Марченко Е. А. Приложение теории случайных функций к расчету стационарного режима и устойчивости объединенных энергосистем со слабыми межсистемными связями. — В кн.: Применение вероятностных и статистических методов к анализу режимов энергосистем, Киев, 1963, с. 84—98.

6. Влияние вида регулирования тепловых электростанций на переходный процесс изменения частоты в энергосистеме/Вонсович М. Я., Петряев Е. И., Родиныш М. А., Левит Л. М. — В кн.: Доклады на II Всес. научно-техн. совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. — М.: Энергия, 1969, с. 313—325.

7. Разработка и испытания систем автоматического ограничения перетоков мощности по линиям электропередачи/Алексеев С. В., Копылов И. Б., Машанский А. М., Эпштейн Р. Б. — Электрические станции, 1971, № 9, с. 9—12.

8. Копылов И. Б., Шуруп В. М., Федоров В. Л. Системы автоматического управления режимом работы электростанций по частоте и активной мощности — Труды ВНИИЭ. — М.: Энергия, 1967, вып. 31, с. 120—140.

9. Тимченко В. Ф. О тенденциях изменения случайных колебаний нагрузки энергосистем и их объединений. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1969, № 1, с. 61—69.

[10.07.79]

Мощные тиристорные преобразователи ультразвуковой частоты с отсекающими диодами

КАЦНЕЛЬСОН С. М., канд. техн. наук, ОЗНОБКИН Ю. В., инж.

Уфимский авиационный институт

Во многих отраслях промышленности все большее распространение получают ультразвуковые методы нагрева, обработки и очистки металлов. Наряду с преобразователями ультразвуковой частоты сравнительно небольшой мощности до 10 кВт, выполненными на тиристорах, появилась необходимость в преобразователях мощностью 50—100 кВт и выше с выходной частотой 22—44 кГц. Создание таких источников с использованием тиристоров в качестве переключающих элементов встречает известные трудности, связанные с очень большими коммутационными перенапряжениями, возникающими на тиристорах, и повышенными коммутационными потерями. Однако применение рациональных схемных решений позволило избежать появления коммутационных перенапряжений и создать мощные преобразователи ультразвуковой частоты с пониженными коммутационными потерями, способные работать при резко переменной нагрузке и повторно-кратковременных режимах с полной стабилизацией напряжения на тиристорах. В статье рассматривается новая схема мощного тиристорного преобразователя ультразвуковой частоты с отсекающими диодами [Л. 1] с указанными выше свойствами. На рис. 1 представлена принципиальная схема двухъячейкового тиристорного инвертора с отсекающими диодами. Каждая ячейка состоит из тиристорного моста, в одну диагональ которого включен коммутирующий конденсатор $C_{к1}$, а в другую последовательно с разделительной емкостью $C_{р}$ включена коммутирующая индуктивность $L_{к1}$ и затем общая нагрузка. Точка соединения коммутирующей индуктивности с разделительной емкостью присоединена к выходной емкости фильтра $C_{ф}$ через отсекающий диод D_1 .

Инвертор работает следующим образом. При включении тиристоров T_1 и T_3 первого инверторного моста происходит колебательный перезаряд коммутирующей емкости $C_{к1}$ через разделительную емкость $C_{р1}$, индуктивность $L_{к1}$ и сопротивление нагрузки. При этом формируется полуволна тока, имеющая форму, близкую к синусоидальной.

Конденсатор $C_{к1}$ в процессе колебательного перезаряда заряжается до напряжения другой полярности, и когда напряжение $u_{Lк}$ на коммутирующей индуктивности $L_{к1}$ в сумме с напряжением $u_{н}$ на нагрузке окажется равным, а затем большим напряжения U_d источника питания, включается отсекающий диод D_1 , соединяющий последовательно конденсаторы $C_{ф}$ и $C_{р1}$.

Поскольку емкости $C_{ф}$ и $C_{р1}$ значительно больше, чем коммутирующая емкость $C_{к1}$, то ее заряд прекращается, тиристоры T_1 и T_3 выключаются, их ток i_{T1} как бы отсекается, но через нагрузку ток не прекращается, а продолжает течь через отсекающий диод D_1 и коммутирующую индуктивность $L_{к1}$, замыкаясь через конденсатор фильтра $C_{ф}$ до тех пор, пока не будет израсходован запас электромаг-

нитной энергии, накопленной в коммутирующей индуктивности. В этом интервале ток i_{d1} , протекающий через входной дроссель L_{d1} , замыкается через отсекающий диод. Когда ток нагрузки станет равным току $i_{d1} + i_{d2}$, диод D_1 выключается, а ток i_{d1} будет замыкаться через индуктивность $L_{к1}$ и нагрузку. Затем включаются тиристоры T_5 , T_7 второго инверторного моста и процесс протекает аналогично. Так же протекают процессы при включении тиристоров T_2 , T_4 первого моста и затем T_6 , T_8 второго моста.

На этом заканчивается полный цикл работы всех вентилях, на протяжении которого на нагрузку получаем четыре полных периода переменного напряжения. На рис. 2 изображены кривые токов i_{T1} и i_{T2} , протекающих соответственно через тиристоры T_1 , T_3 и T_2 , T_4 , токов i_{d1} и i_{d2} , протекающих через отсекающие диоды D_1 и D_2 и напряжения u_T на тиристорах T_2 и T_4 первого тиристорного моста.

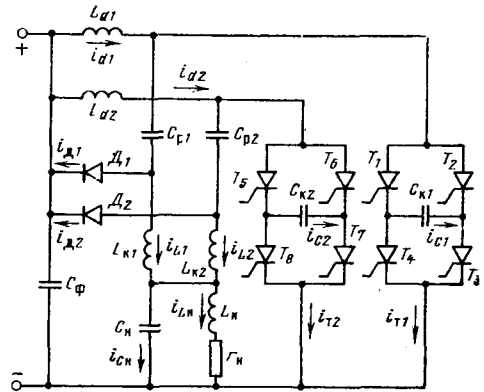


Рис. 1. Принципиальная схема инвертора с отсекающими диодами.

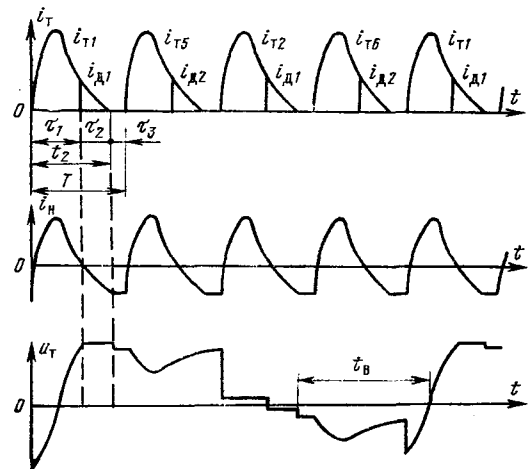


Рис. 2. Временные диаграммы тока i_T тиристоров, тока i_d отсекающих диодов, тока i_n нагрузки и напряжения u_T на тиристорах инвертора.

Интересной особенностью тиристорных преобразователей с удвоением частоты и отсекающими диодами является отсутствие коммутационных перенапряжений на тиристорах инвертора в момент их отключения. Это объясняется тем, что в контуре, образованном одновременно включенными тиристорами и отсекающим диодом, практически отсутствует индуктивность, поэтому перенапряжения не появляются или очень малы, несмотря на сравнительно большую скорость обрыва тока тиристора.

Рассмотрим анализ электромагнитных процессов в инверторе при работе его на параллельный нагрузочный контур. Эти процессы можно разбить на три коммутационных интервала. В первом коммутационном интервале τ_1 — от момента включения тиристора T_1 , T_3 двух синфазных плеч инверторного моста до момента включения отсекающего диода D_1 — система дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы, в соответствии с обозначениями, принятыми на рис. 1, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} i_{d1}^* &= i_{L1}^* + i_{C1}^*; \quad i_{L1}^* + i_{L2}^* = i_{CH}^* + i_{LH}^* = \\ &= i_{d1}^* + i_{d2}^*; \\ L_{d1} \frac{di_{d1}^*}{dt^*} + \frac{1}{C_{к1}^*} \int_0^{\tau_1} i_{C1}^* dt^* + U_{Cк1}^*(0) &= 1; \\ L_H^* \frac{di_{LH}^*}{dt^*} + r_H^* i_{LH}^* &= \frac{1}{C_H^*} \int_0^{\tau_1} i_{CH}^* dt^* + U_{CH}^*(0); \\ L_{d1}^* \frac{di_{d1}^*}{dt^*} + L_{к1}^* \frac{di_{L1}^*}{dt^*} + \frac{1}{C_{п1}^*} \int_0^{\tau_1} i_{L1}^* dt^* + \\ + U_{Cп1}^*(0) + \frac{1}{C_H^*} \int_0^{\tau_1} i_{CH}^* dt^* + U_{CH}^*(0) &= 1; \\ L_{d2} \frac{di_{d2}^*}{dt^*} + L_{к2}^* \frac{di_{L2}^*}{dt^*} + \frac{1}{C_{п2}^*} \int_0^{\tau_1} i_{L2}^* dt^* + \\ + U_{Cп2}^*(0) + \frac{1}{C_H^*} \int_0^{\tau_1} i_{CH}^* dt^* + U_{CH}^*(0) &= 1. \end{aligned} \right\} (1)$$

Все уравнения системы (1) составлены в относительных единицах, и в качестве основных базисных величин приняты: напряжение источника питания U_d , период T выходного напряжения на нагрузке и волновое сопротивление колебательного контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L_{к}}{C_{к}}}. \quad (2)$$

Все остальные величины выражаются через основные, тогда дифференциальные уравнения в абсолютных и относительных единицах имеют идентичный вид [Л. 2].

Во втором коммутационном интервале τ_2 — от момента выключения тиристора до момента выключения отсекающего диода — справедливы сле-

дующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} i_{d1}^* &= i_{L1}^* + i_{d1}^*; \quad i_{L1}^* + i_{L2}^* = i_{CH}^* + i_{LH}^*; \\ L_{d1}^* \frac{di_{d1}^*}{dt^*} + \frac{1}{C_{п1}^*} \int_0^{\tau_2} i_{L1}^* dt^* + U_{Cп1}^*(0) &= 0; \\ L_{к1}^* \frac{di_{L1}^*}{dt^*} + L_H^* \frac{di_{LH}^*}{dt^*} + r_H^* i_{LH}^* &= 1; \\ L_H^* \frac{di_{LH}^*}{dt^*} + r_H^* i_{LH}^* &= \frac{1}{C_H^*} \int_0^{\tau_2} i_{CH}^* dt^* + U_{CH}^*(0); \\ L_{d2}^* \frac{di_{d2}^*}{dt^*} + L_{к2}^* \frac{di_{L2}^*}{dt^*} + \frac{1}{C_{п2}^*} \int_0^{\tau_2} i_{L2}^* dt^* + \\ + U_{Cп2}^*(0) + \frac{1}{C_H^*} \int_0^{\tau_2} i_{CH}^* dt^* + U_{CH}^*(0) &= 1. \end{aligned} \right\} (3)$$

Третий коммутационный интервал τ_3 — от момента выключения отсекающего диода до момента включения очередных тиристора — характеризуют следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} i_{L1}^* + i_{L2}^* &= i_{CH}^* + i_{LH}^*; \quad i_{L1}^* = i_{d1}^*; \quad i_{L2}^* = i_{d2}^*; \\ L_H^* \frac{di_{LH}^*}{dt^*} + r_H^* i_{LH}^* &= \frac{1}{C_H^*} \int_0^{\tau_3} i_{CH}^* dt^* + U_{CH}^*(0); \\ L_{d1}^* \frac{di_{d1}^*}{dt^*} + L_{к1}^* \frac{di_{L1}^*}{dt^*} + L_H^* \frac{di_{LH}^*}{dt^*} + r_H^* i_{LH}^* &= 1; \\ L_{d2}^* \frac{di_{d2}^*}{dt^*} + L_{к2}^* \frac{di_{L2}^*}{dt^*} + L_H^* \frac{di_{LH}^*}{dt^*} + r_H^* i_{LH}^* &= 1. \end{aligned} \right\} (4)$$

Условия перехода:

от первого коммутационного интервала ко второму

$$L_{к1}^* \frac{di_{L1}^*}{dt^*} + L_H^* \frac{di_{LH}^*}{dt^*} + r_H^* i_{LH}^* = 1; \quad (5)$$

от второго коммутационного интервала к третьему

$$i_{d1}^* = 0; \quad (6)$$

от третьего коммутационного интервала к первому

$$\tau_1^* + \tau_2^* + \tau_3^* = 1. \quad (7)$$

Начальные условия для первого коммутационного интервала имеют следующий вид:

$$U_{Cк}^*(0) = 0; \quad U_{CH}^*(0) = 0; \quad U_{Cп}^*(0) = 1, \quad (8)$$

так как пуск инвертора осуществляется при заряженном конденсаторе C_p .

В соответствии с уравнениями связи между параметрами инвертора и нагрузочного контура, приведенными в [Л. 2], коэффициенты в дифференциальных уравнениях, описывающих электромагнитные процессы в инверторе, могут быть выражены через два обобщенных параметра d_o и $d_{н.н.}$, представляющих собой относительные затухания инверторного и нагрузочного контуров в номинальном режиме:

$$d_o = \frac{R_o}{\rho}; \quad d_{н.н.} = \frac{r_{н.н.}}{\rho_H}; \quad \rho_H = \sqrt{\frac{L_{н.н.}}{C_H}}, \quad (9)$$

где R_0 — эквивалентное активное сопротивление нагрузочного контура для первой гармоники тока в номинальном режиме; $r_{н.н}$, $L_{н.н}$ — активное сопротивление и индуктивность нагрузки в номинальном режиме.

В принятой системе относительных единиц

$$L^*_к = C^*_к = \frac{K_{3.0}}{\pi} \sqrt{1 - 0,25d^2_0}; \quad (10)$$

$$K_{3.0} = \frac{\omega}{2\omega_1}, \quad (11)$$

где ω — выходная частота; ω_1 — частота собственных колебаний инверторного контура в номинальном режиме;

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}; \quad \delta = \frac{R_0}{2L_k}. \quad (12)$$

Номинальные параметры нагрузочного контура:

$$\left. \begin{aligned} r^*_{н.н} &= d_0 d^2_{н.н}; \\ L^*_{н.н} &= \frac{d_{н.н} d_0}{2\pi} \sqrt{1 - d^2_{н.н}}; \\ C^*_{н.н} &= \frac{\sqrt{1 - d^2_{н.н}}}{2\pi d_{н.н} d_0}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Если параметры нагрузки являются переменными, то представляющие их коэффициенты в дифференциальных уравнениях записываются в виде соответствующей доли номинальных величин $r^*_{н.н}$ и $L^*_{н.н}$. Что касается коэффициентов L^*_d и C^*_p , то вполне удовлетворительная работа инвертора получается при $L^*_d \geq 10L^*_к$ и $C^*_p \geq 5C^*_к$.

Таким образом, получена система дифференциальных уравнений с известными коэффициентами, что позволяет решать в общем виде любые задачи, связанные с режимом работы инверторов, на ЦВМ или АВМ, если заданы параметры d_0 и $d_{н.н}$. Параметр $d_{н.н}$ определяется заданной нагрузкой, что касается параметра d_0 , то относительное затухание инверторного контура и его постоянные параметры $L^*_к$ и $C^*_к$ должны быть оптимальными и в номинальном режиме обеспечивать максимальную мощность инвертора. При работе на нагрузочный колебательный контур максимальная мощность инвертора обеспечивается, если этот контур работает в режиме, близком к резонансу (когда его эквивалентное сопротивление для первой гармоники тока является активным). Поэтому определение оптимального значения d_0 и постоянных параметров инвертора наиболее целесообразно осуществлять, проводя исследование работы инвертора на чисто активную нагрузку и определяя при этом максимальную мощность и время, предоставляемое на восстановление управляемости тиристоры, как функцию относительного затухания d .

При этом можно допустить, что входные индуктивности L^*_d и емкости C^*_p и $C^*_ф$ достаточно велики и можно пренебречь переменными составляющими токов, текущих через L^*_d , и переменными составляющими напряжений на конденсаторах C^*_p и $C^*_ф$. При принятых допущениях в двухъячейковой схеме при работе одной ячейки через входной дроссель L^*_{d2} второй ячейки протекает постоянный ток $I^*_{d2} = I^*_{d1}$, поэтому ток нагрузки в этом интер-

вале

$$i^*_{н} = i^*_{L1} + I^*_{d1}, \quad (14)$$

где i^*_{L1} — ток, текущий через коммутирующую индуктивность $L^*_{к1}$ первой ячейки.

Система дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс при включении тиристоры одной ячейки в интервале $0 < t < \tau_1$ до момента включения отсекающих диодов, с учетом (14) будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} 2I^*_{d1} &= i^*_{н} + i^*_{\tau_1}; \\ U^*_{ср} &= R^*_3 i^*_{н} + L^*_{к1} \frac{di^*_{L1}}{dt^*} + \frac{1}{C^*_{к1}} \int_0^{\tau_1} i^*_{\tau_1} dt^* + U^*_{ср}(0), \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где напряжение $U^*_{ср}$ за счет работы отсекающих диодов не равно напряжению источника питания U^*_d .

Решая (15) и рассматривая только случай колебательного режима, получаем:

$$i^*_{\tau} = \frac{U^*_{ср} + U^*_{с0} + 2dI^*_{d1}}{\sqrt{1 - 0,25d^2_0}} e^{-\delta t} \sin \omega_1 t. \quad (16)$$

Уравнение (16) справедливо только в первом интервале $0 - \tau_1$, в течение которого отсекающие диоды еще не включены. Начальные условия для этого интервала:

$$\left. \begin{aligned} U^*_{ср} &= 1 + 2dI^*_{d1}; \\ U^*_{с0} &= 2 + 2dI^*_{d1}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где I^*_{d1} — средний ток отсекающего диода.

Тогда (16) переписывается следующим образом:

$$i^*_{\tau} = \frac{3 + 2d(I^*_{d1} + 2I^*_{d1})}{\sqrt{1 - 0,25d^2_0}} e^{-\delta t} \sin \omega_1 t. \quad (18)$$

Для определения величин I^*_{d1} и $I^*_{\tau_1}$ используем интегральное соотношение для интервала $0 - \tau_1$ с учетом двухъячейкового режима работы инвертора:

$$I^*_{d1} 2T^* = 2C^*_к U^*_{с0} = \int_0^{\tau_1} i^*_{\tau} dt^*. \quad (19)$$

Тогда, интегрируя (18) и решая полученное уравнение совместно с (10), находим:

$$I^*_{d1} = \frac{A(\tau^*_1) \sqrt{1 - 0,25d^2_0}}{2A(\tau^*_1) d \sqrt{1 - 0,25d^2_0} + \frac{\pi}{K_{3.0}} [A(\tau^*_1) - 1]}, \quad (20)$$

где

$$A(\tau^*_1) = 1 - e^{-\delta \tau_1} \left(\cos \omega_1 \tau_1 + \frac{\delta}{\omega_1} \sin \omega_1 \tau_1 \right); \quad (21)$$

$$I^*_{d1} = \frac{\pi I^*_{d1}}{4dK_{3.0} \sqrt{1 - 0,25d^2_0}} - \frac{1}{d}. \quad (22)$$

В момент времени τ^*_1 , когда напряжение $u^*_{Lк}$ на коммутирующей индуктивности $L^*_{к1}$ в сумме с напряжением $u^*_{н}$ на нагрузке превысит напряжение «1» источника питания, включается отсекающий диод, а тиристоры отключаются.

Во втором интервале через нагрузку и коммутирующую индуктивность $L^*_{к1}$ протекает апер-

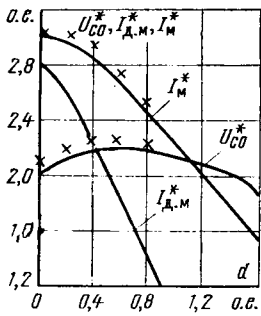


Рис. 3. Зависимости максимальных токов тиристоров I_m^* и диода $I_{д.м}^*$ и начального напряжения $U_{с0}^*$ на конденсаторе C_k от затухания d при $K_{з.о}=0,7$. \times — экспериментальные точки.

дический ток, возникший за счет электромагнитной энергии, запасенной в индуктивности $L_{к1}^*$. Система уравнений, описывающих электромагнитные процессы во втором расчетном интервале, будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{д}^* &= L_{к1} \frac{di_{L1}^*}{dt^*} + R_{с} i_{н}^*; \\ i_{L1}^* &= i_{н}^* - I_{д1}^*. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Решая эти уравнения, получаем

$$i_{н}^* = e^{-2\delta(t-\tau_1)} \left[\frac{1}{d} + i_{н}^*(\tau_1) \right] - \frac{1}{d}, \quad (24)$$

где $i_{н}^*(\tau_1)$ — начальное значение тока нагрузки в момент τ_1^* включения отсекающих диодов.

Условие погасания отсекающих диодов

$$i_{н}^*(\tau_2) = 2I_{д1}^*. \quad (25)$$

Среднее значение тока $I_{д1}^*$, протекающего через отсекающий диод, будет определяться как

$$I_{д1}^* = \frac{1}{2T^*} \int_{\tau_1^*}^{\tau_2^*} i_{н}^* dt^* = \frac{(2dI_{д1}^* - 1)(\tau_2^* - \tau_1^*)}{2d} - \frac{K_{з.о} V \sqrt{1 - 0,25d^2}}{2\pi d} \left[i_{н}^*(\tau_1^*) - \frac{1}{d} \right] [1 - e^{-2\delta(\tau_2^* - \tau_1^*)}]. \quad (26)$$

Момент времени выключения отсекающих диодов t_2^* находим из (24):

$$t_2^* = \tau_1^* + \frac{K_{з.о} V \sqrt{1 - 0,25d^2}}{\pi d} \ln \frac{i_{н}^*(\tau_1^*) d - 1}{2dI_{д1}^* - 1}. \quad (27)$$

Системы уравнений (20)–(22) и (26)–(27) для установившегося режима легко решаются на ЦВМ методом итераций. Результаты расчета представлены в виде зависимостей, приведенных на рис. 3–5. На рис. 3 приведены зависимости (в относительных единицах) амплитуды тока $I_{д.м}^*$, текущего через отсекающий диод, и начального напряжения $U_{с0}^*$ на коммутирующем конденсаторе от затухания d последовательного колебательного контура инвертора при $K_{з.о}=0,7$. При $K_{з.о}>0,7$ происходит отсечка тока диода очередными тиристорами, что связано с возрастанием производной $\frac{di_{н}^*}{dt^*}$. С ростом затухания d ток $I_{д.м}^*$ отсекающих диодов уменьшается, так же как и максимальный ток тиристорov I_m^* . Величина напряжения на коммутирующем конденсаторе $U_{с0}^*$ с изменением d меняется незначительно в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки. Так, при измене-

нии нагрузки от нуля (режим короткого замыкания) до номинальной изменение $U_{с0}^*$ не превышает 10%. Экспериментальные значения амплитуды тока I_m^* и напряжения $U_{с0}^*$ на тиристорах (рис. 3) лежат выше расчетных, что объясняется влиянием индуктивности монтажа и индуктивности бумажных конденсаторов ЭСВ, которые вызывают явление частичной «раскачки» инвертора.

На рис. 4 приведены зависимости (в относительных единицах) момента времени включения τ_1^* и времени выключения t_2^* отсекающих диодов, а также времени $t_{в}^*$, представляемого на восстановление управляемости тиристорov, от затухания d для значений $K_{з.о}=0,6$ и $K_{з.о}=0,7$. Отсчет времени τ_1^* , t_2^* , $t_{в}^*$ ведется от момента включения тиристорov. Величина времени восстановления управляемости тиристорov в рассматриваемой схеме превышает значение периода выходной частоты и изменяется очень незначительно при изменении нагрузки.

Длительность включенного состояния отсекающих диодов $\tau_2^* = t_2^* - \tau_1^*$ сокращается с ростом затухания и при некотором критическом затухании становится равной нулю. Тогда инвертор переходит в режим работы удвоителя частоты без отсекающих диодов.

Входная мощность двухъячейкового инвертора с отсекающими диодами (в относительных единицах)

$$P_{д}^* = 2I_{д1}^* - 2I_{д1}^*, \quad (28)$$

где $I_{д1}^*$ и $I_{д1}^*$ соответственно средние токи каждой ячейки в отдельности с учетом двухъячейкового режима.

Исследования зависимости максимального коэффициента использования мощности тиристорov $K_{и.м}$ от d и $K_{з.о}$ показали, что с ростом затухания d увеличивается коэффициент использования мощности тиристорov:

$$K_{и.м} = \frac{P_{д}^*}{\lambda U_{с0}^* I_m^*}, \quad (29)$$

где λ — число тиристорov в схеме инвертора.

При работе на нагрузочный колебательный контур в режиме резонанса при затухании инверторного контура $d > 0,8$ в многоячейковой схеме инвертора появляется положительное напряжение на тиристорах во время работы соседних ячеек. Это не позволяет получить расчетную частоту. На рис. 5 приведены зависимости предельных значений d затухания инверторного контура от коэффициента заполнения $K_{з.о}$.

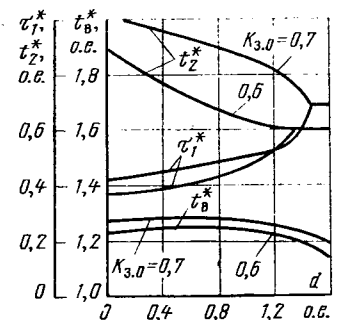


Рис. 4. Зависимости моментов времени включения τ_1^* и выключения t_2^* отсекающих диодов и времени $t_{в}^*$, представляемого на восстановление управляемости тиристорov от затухания d при различных коэффициентах заполнения периода $K_{з.о}$.

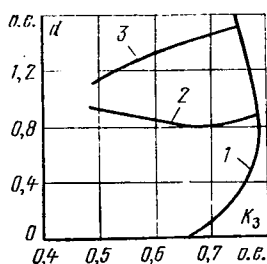


Рис. 5. Зависимости предельного затухания d .
1 — работа на активную нагрузку при отсутствии паузы; 2 — работа на колебательный контур с высокой добротностью без уменьшения времени $t_{*н}$; 3 — граница перехода удвоителя частоты в режим работы без отсекающих диодов.

Таким образом, при работе на нагрузочный колебательный контур оптимальным затуханием инверторного контура следует считать $d_0=0,8$, так как при величине затухания $d>0,8$ появляется положительное напряжение на тиристорах инвертора, генерируемое нагрузочным контуром в интервалах работы смежных ячеек. Оптимальное значение коэффициента $K_{3,0}=0,7$. Зная оптимальные значения $d_0=0,8$ и $K_{3,0}=0,7$, легко найти численные коэффициенты в дифференциальных уравнениях, описывающих электромагнитные процессы при работе инвертора на нагрузочный колебательный контур.

Например, при работе на нагрузочный контур с номинальным затуханием $d_{н.н}=0,07$; $d_0=0,8$ и $K_{3,0}=0,7$ согласно формулам (10) — (13) имеем: $L^*_{н.н}=C^*_{н.н}=0,2046$; $r^*_{н.н}=0,00392$; $L^*_{н.н}=0,00892$; $C^*_{н.н}=2,85$; $L^*_d=2,046$; $C^*_p=1,02$.

По формулам (10) — (13) можно согласовать параметры инвертора с любой заданной нагрузкой.

Для инвертора мощностью 50 кВт, работающего на частоте 22 кГц с выходным напряжением 400 В при питании от сети 380 В и параметрами нагрузки, определяемыми затуханием $d_{н.н}=0,07$, получа-

ем: $L_R=37$ мкГ; $C_R=2,32$ мкФ; $C_p=11,6$ мкФ; $C_n=32,7$ мкФ; $L_d=370$ мкГ. В реальном инверторе той же мощности, работающем на частоте 22 кГц, емкость $C_R=2,5$ мкФ, а индуктивность $L_R=27$ мкГ, так как следует учесть индуктивность монтажа, которая составляет около 6 мкГ.

По рассмотренной схеме на тиристорах типа ТЧ были выполнены преобразователи частоты 22 кГц мощностью 50 кВт, которые в течение трех лет успешно эксплуатируются на машиностроительных заводах для целей диффузионной пайки, стыковой сварки деталей инструмента из быстрорежущей стали, высокочастотной закалки малогабаритных деталей и других технологических процессов. Работа преобразователей осуществляется в непрерывном и повторно-кратковременных режимах, допускающих 120 включений и отключений в час. Преобразователи допускают любые изменения индуктивности и активного сопротивления нагрузки в сторону снижения, вплоть до режима короткого замыкания. Опыт эксплуатации показал надежность схем рассматриваемых преобразователей и отсутствие перенапряжений на тиристорах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 547019 (СССР). Последовательный тиристорный инвертор / С. М. Кацнельсон, Ю. М. Зинин, А. В. Иванов и др. Оpubл. в Б. И., 1977, № 6.
2. Кацнельсон С. М. Обобщенные уравнения связи и численные коэффициенты в дифференциальных уравнениях, описывающих электромагнитные процессы в автономных инверторах. — В кн.: Межвузовский сборник № 8. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. — Уфа, 1978.

[24.09.79]

УДК 621.335.625.2.012.858:538.65

Системы магнитного подвеса для бесконтактного транспорта

БОЧАРОВ В. И., ФРИШМАН Е. М., кандидаты техн. наук, ЛИБЕРМАН В. Л.,
СМОЛЕНЧУК В. С., инженеры

Опыт эксплуатации высокоскоростных железнодорожных магистралей показывает, что увеличение скоростей на традиционном железнодорожном транспорте неизбежно связано с возрастанием расходов на содержание железнодорожного полотна, уменьшением коэффициента сцепления колес с рельсами, ухудшением условий устойчивости движения, увеличением уровня шумов, создаваемых поездом. Кроме того, возникают трудности в регулировании движения на участках, сочетающих высокоскоростное и обычное движение поездов. Поэтому для высокоскоростного наземного транспорта строятся специальные магистрали, расходы на содержание которых весьма высоки в основном из-за быстрого износа контактирующих частей. Таким образом, контактная система традиционного железнодорожного транспорта является основной причиной высоких эксплуатационных расходов и сильного экологического воздействия на окружающую среду.

Перечисленные трудности явились причиной поисков принципиально новых транспортных систем,

3*

не имеющих контактирующих частей. Бесконтактные транспортные системы могут быть пневматическими или магнитными. В первых из них между путевыми устройствами и днищем транспортного средства с помощью мощных компрессоров создается «воздушная подушка», служащая опорой транспортного средства. Однако такие транспортные системы характеризуются большим расходом энергии на создание подъемных сил и недопустимо высоким уровнем шума.

Более перспективны транспортные системы с магнитным подвесом экипажей. В настоящее время известны системы магнитного подвеса четырех типов: электромагнитный подвес (ЭМП), электродинамический подвес (ЭДП), подвес с помощью постоянных магнитов (ПМП) и различные варианты комбинированного магнитного подвеса (КМП). Общим для всех этих систем является использование пондеромоторных сил взаимодействия магнитных полей для осуществления бесконтактного подвеса (левитации) транспортных средств. Значение шума около транспортных магистралей на магнит-

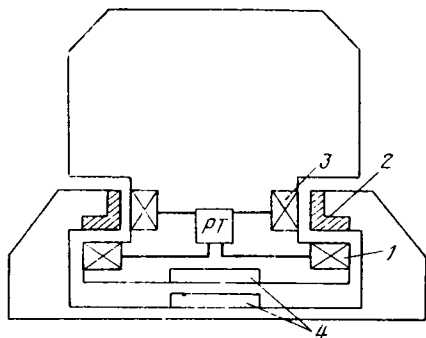


Рис. 1. Электромагнитный подвес.

РТ — регулятор тока; 1 — электромагнит подвеса; 2 — путевая направляющая; 3 — электромагнит направления; 4 — тяговый двигатель.

ном подвесе определяется только аэродинамическими качествами движущегося транспортного средства и может быть снижено до величины, позволяющей строить подобные транспортные магистрали на эстакадах в густонаселенных районах.

Из перечисленных систем магнитного подвеса наибольшее развитие получил к настоящему времени ЭМП. Левитация транспортного средства и его направление при ЭМП осуществляется с помощью сил притяжения электромагнитов постоянного тока, установленных на транспортном средстве, к ферромагнитной путевой направляющей (рис. 1). Электромагниты подвеса компенсируют массу транспортного средства и динамические нагрузки в вертикальной плоскости. Электромагниты направления должны противодействовать боковым возмущениям транспортного средства.

Развиваемая электромагнитная сила без учета выпучивания и рассеивания магнитного потока вычисляется по известной формуле

$$F_{эм} = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \quad (1)$$

где B — индукция в рабочем зазоре; S — площадь полюсов; μ_0 — магнитная постоянная.

Формула (1) является приближенной, однако она позволяет сделать следующий качественный вывод: значение электромагнитной силы определяется индукцией в зазоре и геометрической конфигурацией сердечника электромагнита. Значение индукции в зазоре ограничивается насыщением ферромагнитного материала сердечника и путевой направляющей и выбирается обычно в пределах 0,8—1 Т.

От конфигурации сердечника зависит масса электромагнита и потребляемая им энергия. Определение оптимальной конфигурации сердечника электромагнита является сложной задачей, для решения которой требуются точные формулы расчета электромагнитных сил, учитывающие поля выпучивания и рассеяния, а также влияние вихревых токов, наводимых в ферромагнитной направляющей при движении вдоль нее электромагнита. Наиболее общая постановка задачи об определении пондеромоторных сил взаимодействия движущегося электромагнита с ферромагнитной направляющей и ее решение приведены в [Л. 1]. Выражения для вертикальной, боковой и тормозящей

сил имеют следующий вид:

$$F_z = \int_{V_k} [\delta_x(Q) B_{2y}(Q) B_{2x}(Q)] dV_Q + \frac{1}{\mu_0} \oint_{S_\Phi} \sigma(Q) B_{2z}(Q) dS_Q; \quad (2)$$

$$F_y = - \int_{V_k} \delta_x'(Q) B_{2z}(Q) dV_Q + \frac{1}{\mu_0} \oint_{S_\Phi} \sigma(Q) B_{2y}(R) dS_Q; \quad (3)$$

$$F_x = \int_{V_k} \delta_y(Q) B_{2z}(Q) dV_Q + \frac{1}{\mu_0} \oint_{S_\Phi} \sigma B_{2x}(Q) dS_Q, \quad (4)$$

где V_k — рабочий объем; $\vec{\delta}(Q)$ — вектор плотности тока в обмотке; $\vec{B}_2(Q)$ — вектор магнитной индукции; S_Φ — площадь рабочей поверхности сердечника; $\sigma(Q)$ — плотность фиктивных магнитных зарядов, распределенных по поверхности S_Φ . Эти формулы могут быть использованы при решении задачи об оптимизации электромагнитов.

Результаты численных расчетов оптимальной формы сердечника без учета массы и энергопотребления охлаждающей системы электромагнита, длина которого достаточна, чтобы пренебречь краевыми эффектами, приводятся в [Л. 2]. Расчеты, проведенные для рабочего зазора 15 мм и плотности тока 4 А/мм² показывают, что оптимальной формой сердечника является Ш-образная. Следует отметить, что при плотности тока 4 А/мм² требуется принудительное охлаждение обмоток электромагнита. Плотность тока 2—2,5 А/мм² достижима без принудительного охлаждения. В этом случае отношение массы электромагнита к развиваемой им силе составит около 1/6 [Л. 3].

Реализация силы, компенсирующей массу транспортного средства и динамические воздействия в вертикальной плоскости, недостаточна для достижения левитации. Электромагнитному подвесу присуща неустойчивость. Для поддержания номинального значения воздушного зазора силы притяжения электромагнитов должны быть регулируемы, причем система регулирования должна не только обеспечить устойчивость левитации, но и исключить неприятные ощущения пассажиров, не вызывать упругих деформаций экипажа и т. д.

Установим закон регулирования напряжения электромагнита, обеспечивающий стабильность рабочего зазора одиночного электромагнита.

Уравнение движения электромагнита подвеса:

$$F_{эм} + m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg + \Delta F, \quad (5)$$

где $F_{эм}$ — сила притяжения электромагнита к направляющей; m — приходящаяся на электромагнит масса экипажа; x — рабочий зазор; g — ускорение свободного падения; ΔF — возмущающая сила.

Сила притяжения электромагнита к направляющей

$$F_{эм} = \frac{i^2 \omega^2}{2} \mu_0 \frac{S}{x^2}, \quad (6)$$

где i — ток электромагнита; ω — число витков.

Уравнение электрической цепи электромагнита

$$u = iR + \omega^2 \frac{\mu_0 S}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{i}{x} \right), \quad (7)$$

где R — сопротивление обмотки.

Напряжение u должно таким образом изменяться в зависимости от величины рабочего зазора, чтобы обеспечивалась устойчивая левитация экипажа при незначительных отклонениях рабочего зазора от номинального. Очевидно, возможно множество законов регулирования, из которых нужно выбрать оптимальный. Критерий оптимизации должен учитывать необходимость минимального отклонения от равновесия и быстрейшего затухания переходного процесса, минимального расхода энергии и комфорта пассажиров, т. е. минимума ускорения. Эти требования могут быть учтены критерием

$$J = \int_0^{\infty} (k_1 x^2 + k_2 a^2 + k_3 u^2) dt, \quad (8)$$

где k_1, k_2, k_3 — весовые коэффициенты; x — изменение величины рабочего зазора; a — ускорение; u — управляющее напряжение.

Уравнения (2)–(4) показывают, что система ЭМП является нелинейной. Поскольку величина отклонений системы от положения равновесия устанавливается малой, систему можно линеаризовать. Осуществив преобразования Лапласа для линеаризованных уравнений, получим передаточную функцию по управляющему воздействию:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = - \frac{2\lambda L_0}{mL_0 s^3 + mR s^2 - 2\lambda^2 L_0 R}, \quad (9)$$

где $\lambda = \frac{i_0}{x_0}$ — отношение тока в электромагните при номинальном рабочем зазоре к величине зазора; $L_0 = \frac{\omega^2 \mu_0 S}{2x_0}$ — индуктивность электромагнита при номинальном зазоре.

Согласно критерию Гурвица система, описываемая передаточной функцией (9), неустойчива. Для стабилизации этой системы необходимо ввести обратную связь по величине рабочего зазора электромагнита. Параметры передаточной функции $G(S)$ звена обратной связи определяются из условия минимума критерия (8).

Принимая во внимание, что изображения скорости $V(s)$ и ускорения $A(s)$ описываются уравнениями

$$V(s) = sX(s); \quad (10)$$

$$A(s) = s^2 X(s), \quad (11)$$

перепишем уравнения (5)–(7) для переменных x, v и a :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v; \\ \frac{dv}{dt} &= a; \\ \frac{da}{dt} &= \frac{2\lambda^2 R}{m} x - \frac{R}{L_0} a - \frac{2\lambda}{m} u \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

или в матричном виде

$$\dot{X} = AX + CU, \quad (13)$$

$$\text{где } A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{2\lambda^2 R}{m} & 0 & -\frac{R}{L_0} \end{vmatrix}; \quad C = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{2\lambda}{m} \end{vmatrix}.$$

Так как

$$U = -|C_T|GX, \quad (14)$$

можно записать

$$u = \alpha x + \beta v + \gamma a, \quad (15)$$

где коэффициенты α, β и γ находят численными методами из условия минимума функционала (8).

Таким образом, для осуществления оптимального регулирования значения рабочего зазора электромагнита подвеса необходим регулятор ПДД²-типа. Двойное дифференцирование сигнала датчика зазора представляет собой трудноосуществимую техническую задачу. Поэтому желательно при сохранении прежнего значения критерия качества установить коэффициент γ равным нулю, что приводит к необходимости введения соответствующей обратной связи по току электромагнита. Раздельное регулирование рабочих зазоров электромагнитов рассматриваемой системы левитации приводит к неравномерной нагрузке электромагнитов и нежелательным упругим деформациям экипажа, в результате чего происходит неоправданный перерасход энергии и перегрев обмоток электромагнитов. Устранить эти нежелательные явления можно комбинированной системой регулирования рабочих зазоров, обеспечив минимум избыточных связей в схеме механической части экипажа.

Наряду с контурами регулирования токов отдельных электромагнитов комбинированная система регулирования предполагает наличие регулятора высшего порядка, на вход которого поступают сигналы со всех датчиков величины рабочих зазоров. Анализируя с помощью соответствующего комплекса (аналогового или цифрового) поступающие сигналы, регулятор высшего порядка вырабатывает управляющие воздействия на контуры регулирования отдельных электромагнитов, изменяя нужным образом их параметры. С помощью этих управляющих воздействий система подвеса и направления транспортного средства адаптируется к возможным неточностям укладки ферромагнитных направляющих. Кроме того, регулятор высшего порядка может быть снабжен датчиками загрузки экипажа и аэродинамических воздействий, что позволит достичь равномерной нагрузки электромагнитов при изменении массы экипажа и боковом ветре.

Разработка системы регулирования токов электромагнитов подвеса и направления с регулятором высшего порядка является задачей существенно более сложной, чем создание ЭМП с независимым регулированием рабочих зазоров электромагнитов. Решение этой задачи позволит установить принципиальные границы работоспособности ЭМП, дать обоснованную оценку его технико-экономической эффективности.

Электромагнитный подвес обладает рядом недостатков, ограничивающих область его применения. Принудительное регулирование сил притяжения электромагнитов к путевой направляющей с помощью контуров обратной связи неизбежно с инерционностью. Постоянная времени регулирования затрудняет «вписывание» экипажа в кривые и огибание им неровностей пути. Движение экипажа с большой скоростью сопровождается большими потерями мощности в системе регулирования [Л. 4]. Незначительное значение рабочего зазора электромагнитов предъявляет жесткие требования к неровностям пути.

При высоких скоростях возникает также проблема токосъема. Кроме того, с ростом скорости увеличивается дискомфорт поездки из-за значительных ускорений при огибании неровностей пути, устранить которые можно с помощью вторичного подвешивания. Вторичное подвешивание увеличивает массу экипажа. При движении электромагнитов вдоль ферромагнитных направляющих возникают тормозящие силы, уменьшить которые можно увеличением длины электромагнитов или шихтованием направляющих. В первом случае усложняется технология изготовления электромагнитов и «вписывание» экипажа в горизонтальные и вертикальные неровности пути, во втором значительно дорожается путь.

Наряду с перечисленными недостатками ЭМП имеет и существенные достоинства. Для его реализации используются хорошо изученные достаточно надежные технические средства. Развитие электроники облегчает задачу синтеза надежных систем регулирования сил притяжения электромагнитов к путевой направляющей. Две эти причины в основном и обеспечили достигнутые к настоящему времени успехи в создании транспортных средств на ЭМП. Испытываемые в ФРГ на экспериментальных участках экипажи с ЭМП развивают скорость до 400 км/ч. Система подвеса работает при этом достаточно надежно [Л. 5].

Известен также электродинамический способ подвеса экипажей. В этом способе используется явление сверхпроводимости. Электромагниты со сверхпроводящей обмоткой являются источниками сильного магнитного поля ($B \approx 3$ Т), которое при его движении вдоль проводящей полосы или замкнутых контуров наводит в последних токи индукции. Взаимодействие первичного и индуцированного магнитных полей обеспечивает левитацию транспортного средства (подъемная сила) и препятствует его движению (тормозящая сила). Значение рабочего зазора при скорости движения 400—500 км/ч достигает 15—20 см, т. е. на порядок выше, чем при других способах магнитного подвеса.

Различают три основных направления ЭДП: системы с дискретной структурой пути, с непрерывной структурой пути, с нулевым потоком. Сравнение этих систем производится прежде всего по их левитационному качеству, которое определяется как отношение подъемной силы к тормозящей.

Идея ЭДП впервые была высказана в 1965 г. в [Л. 6], где был разработан вариант ЭДП с дискретной структурой пути.

Авторы [Л. 6] предложили также систему ЭДП с нулевым потоком, которая отличается от других систем ЭДП более высоким левитационным качеством, достигающим 120—150.

В 1968 г. Уипф и Коффи предложили систему ЭДП с непрерывной структурой пути, в которой вместо пассивных замкнутых путевых контуров используется сплошная алюминиевая полоса. Боковая устойчивость обеспечивается соответствующим выбором формы пути. В системе с непрерывной путевой структурой значительно упрощается конструкция пути, но снижается качество левитации.

Определение сил магнитного взаимодействия при любой из перечисленных систем является весьма сложной задачей, решению которой посвящено большое количество работ. Для качественной оценки этих сил можно воспользоваться результатами упрощенного анализа ЭДП, приведенного в [Л. 7]. Силы взаимодействия магнитного поля, движущегося вдоль пути сверхпроводящего магнита с вторичными магнитными полями вихревых токов без учета электрического сопротивления материала пути, вычисляются по формулам:

$$F_z = -\frac{I_0^2}{L_B} \frac{1}{(1 - M^2/L_C L_B)^2} M \frac{\partial M}{\partial z}; \quad (16)$$

$$F_x = -\frac{I_0^2}{L_B} \frac{1}{1 - M^2/L_C L_B} M \frac{\partial M}{\partial x}; \quad (17)$$

$$F_y = -\frac{I_0^2}{L_B} \frac{1}{(1 - M^2/L_C L_B)^2} M \frac{\partial M}{\partial y}, \quad (18)$$

где F_z , F_x , F_y — действующие на сверхпроводящий электромагнит составляющие сил магнитного взаимодействия¹, I_0 — ток в сверхпроводящем электромагните; L_B — индуктивность замкнутого путевого контура; M — взаимная индуктивность между сверхпроводящим электромагнитом и замкнутым путевым контуром; L_C — индуктивность сверхпроводящего электромагнита.

Расчетная схема, соответствующая уравнениям (16)—(18), приведена на рис. 2. Проанализируем эти уравнения.

Взаимная индуктивность уменьшается с увеличением расстояния между путевым полотном и сверхпроводящим электромагнитом, т. е. производная $\frac{\partial M}{\partial z}$ отрицательна. Значение M положительно

при любом z . Такая система устойчива по Ляпунову, F_z направлена вверх и компенсирует массу экипажа.

Сила F_x зависит от структуры пути. Для систем с дискретной структурой пути она изменяется по периодическому закону. При приближении сверхпроводящего электромагнита к рассматриваемому замкнутому контуру пути ($x < 0$) значение M увеличивается. Производная $\frac{\partial M}{\partial x}$ положительная, и

¹ Сила F_z обеспечивает левитацию экипажа; F_x — действует вдоль направления движения и может вызывать ускорение или замедление экипажа; F_y — боковая составляющая силы взаимодействия магнитных полей экипажа и пути.

сила F_x направлена против движения, вызывая его замедление. Когда сверхпроводящий электромагнит проходит замкнутый контур пути ($x > 0$), взаимная индуктивность M уменьшается, знак производной $\frac{\partial M}{\partial x}$ становится отрицательным. Сила F_x

совпадает с направлением движения экипажа и ускоряет его. Такой характер взаимодействия находится в полном соответствии с законом сохранения энергии. Таким образом, на экипаж действует периодически изменяющаяся сила, период и величина которой зависят от скорости движения экипажа и размеров замкнутых контуров пути. В системах с непрерывной путевой структурой F_x всегда равна нулю. Следовательно, с точки зрения реализации тягового усилия система с непрерывной структурой пути предпочтительнее.

Так как взаимная индуктивность уменьшается при любом боковом смещении экипажа относительно оси пути, боковая сила F_y всегда совпадает с направлением первоначального смещения и положение экипажа в боковом направлении устойчиво.

Полученные результаты справедливы для нулевого электрического сопротивления путевого полотна. В действительности сопротивление путевого контура не равно нулю. Это приводит к диссипации энергии и возникновению сопротивления движению (тормозной силы). Сила торможения с ростом скорости увеличивается до некоторого максимального значения (примерно при $v=60$ км/ч), затем падает.

Зависимость подъемной силы F_z и силы торможения F_x от скорости показана на рис. 3 [Л. 7], из которого видно, что качество левитации увеличивается при высоких скоростях, поэтому электродинамический подвес выгоднее для скоростей 400—500 км/ч и выше, когда силами электромагнитного сопротивления движению можно пренебречь по сравнению с аэродинамическими.

При низких скоростях движения сила F_z не обеспечивает левитацию экипажа. Необходимы дополнительные системы опоры, работающие во время разгона и торможения. Для этой цели могут использоваться обычные колеса. Возможно также применение обыкновенных регулируемых электромагнитов, обеспечивающих левитацию экипажа на низкоскоростных участках пути [Л. 8].

В настоящее время недостаточно исследована работа нестационарных криостатных установок, необходимых для поддержания температуры, соответствующей явлению сверхпроводимости. Существующие гелиевые криостаты пока недостаточно надежны и потребляют большое количество жидкого гелия. Открытым остается вопрос оптимизации путевой структуры. Дискретная путевая структура обеспечивает большее количество левитации. Сплошная алюминиевая полоса предпочтительнее с точки зрения плавности хода и малых расходов на строительство пути.

Некоторые зарубежные исследователи указывают, что вертикальная стабильность присуща электродинамическому подвесу только на низких скоростях. В [Л. 9] приводится формула для расчета подъемной силы;

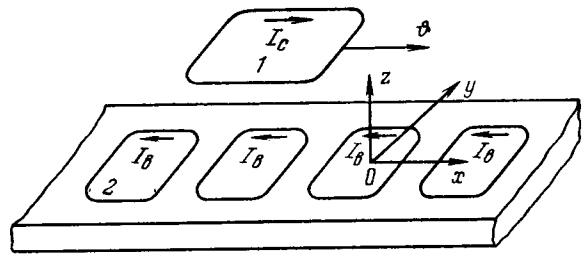


Рис. 2. Упрощенная схема электродинамического подвеса.

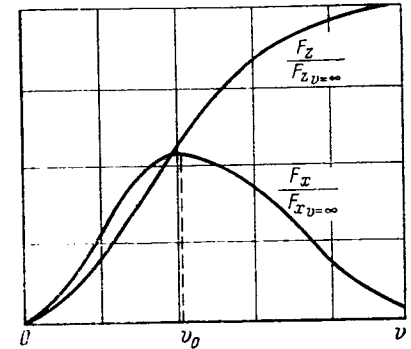


Рис. 3. Зависимость подъемной силы и силы торможения от скорости.

$$F_z = F_{z, v=\infty} \frac{(kv)^2}{1+kv} \left\{ 1 - 2\beta z - \frac{1}{(kv)^2 \tau} \frac{1-(kv)^2}{1+(kv)^2} \beta z \right\}, \quad (19)$$

где k — отношение π к полюсному делению обмоток подвижного состава; τ — постоянная времени путевых контуров; v — скорость; β — постоянная, зависящая от величины взаимной индуктивности.

С ростом скоростей третий член в скобках может обратиться в нуль или стать отрицательным, что соответствует отсутствию демпфирования вертикальных колебаний или даже их возрастанию. Поэтому необходимо принять специальные меры для демпфирования вертикальных колебаний. Демпфирование может осуществляться тремя способами. При пассивном демпфировании между сверхпроводящим магнитом и путевым контуром помещаются короткозамкнутые витки. Индуцированные в них токи приводят к диссипации энергии и гасят вертикальные колебания. Однако установлено, что пассивное демпфирование малоэффективно [Л. 9]. Второй способ предполагает гашение колебаний путем регулирования значения тока в сверхпроводящем магните. Расчеты показывают, что из-за увеличения электрических потерь в криостате, а следовательно и расхода жидкого гелия, этот способ также нецелесообразен [Л. 9]. Наконец, демпфирование может осуществляться за счет размещения между сверхпроводящим магнитом и путем обыкновенных катушек, ток в обмотках которых автоматически регулируется таким образом, чтобы создаваемое ими магнитное поле препятствовало колебаниям экипажа. Такой способ эффективен при небольшом расстоянии между дополнительными обмотками и поверхностью пути. Однако при этом исчезает основное преимущество ЭДП — большое значение рабочего зазора.

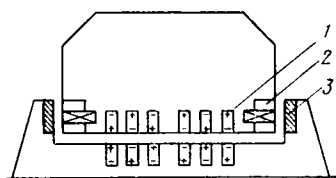


Рис. 4. Подвес с помощью постоянных магнитов с электромагнитным направлением.

1 — постоянные магниты; 2 — электромагнит; 3 — ферромагнитная путевая направляющая.

Таким образом, при разработке сверхскоростного транспорта с ЭДП требуется решить ряд серьезных теоретических и практических задач: обеспечить надежный подвес транспортного средства при разгоне и торможении, а также в случае аварийной ситуации; выбрать наиболее рациональную путевую структуру; создать надежные и экономичные нестационарные криогенные установки; улучшить качество левитации и установить теоретический предел этого улучшения; демпфировать вертикальные колебания; разработать систему аварийного выключения сверхпроводящего магнита и т. д. Решение всех перечисленных задач немыслимо без огромного объема научно-исследовательских теоретических и экспериментальных работ.

Магнитное подвешивание экипажей может также осуществляться за счет сил взаимного отталкивания постоянных магнитов, размещаемых в виде полос на пути и экипаже (рис. 4). Магниты 1 пути и магниты 2 экипажа обращены в сторону рабочего зазора одноименными полюсами. При соответствующих размерах магнитных полос и их количестве можно обеспечить подвес экипажа заданной массы с рабочим зазором 10—15 мм. Экипаж с ПМП неустойчив в горизонтальной плоскости. Для его стабилизации необходимо введение направляющей системы, которая может быть выполнена в виде управляемых электромагнитов, направляющих роликов и т. п.

Одним из основных преимуществ ПМП является отсутствие расхода энергии на создание подъемной силы. В [Л. 10 и 11] показано, что для ПМП могут быть использованы постоянные магниты, изготовленные из феррита бария. Эти магниты обладают сравнительно высокой намагниченностью и большой величиной коэрцитивной силы. Намагниченность сохраняется в течение десятков лет. Удельное электрическое сопротивление феррита бария весьма велико, вследствие чего можно пренебречь влиянием вихревых токов, которые в предыдущих способах подвеса оказывают тормозящее воздействие.

Впервые вопрос использования постоянных магнитов для подвешивания транспортных средств был рассмотрен в [Л. 10], а в [Л. 11 и 12] приведены теоретические исследования в области ПМП.

Основной характеристикой данного способа подвеса является зависимость силы взаимного отталкивания магнитов пути и экипажа (подъемной силы) от величины рабочего зазора. Эта зависимость может быть представлена в виде

$$F_z = -b \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \left[2a \operatorname{arctg} \frac{a}{\delta+h} - (\delta+h) \ln \frac{a^2 + (\delta+h)^2}{1(\delta+h)^2} - a \operatorname{arctg} \frac{a}{\delta} + \frac{\delta}{2} \ln \frac{a^2 + \delta^2}{\delta^2} - a \operatorname{arctg} \frac{a}{\delta+2h} + \right.$$

$$\left. + \frac{\delta+2h}{2} \ln \frac{a^2 + (\delta+2h)^2}{(\delta+2h)^2} \right], \quad (20)$$

где b — общая длина магнитных полос экипажа; I — намагниченность магнитов пути и экипажа; a , h — ширина и высота сечения магнитной полосы; δ — рабочий зазор.

Выражение (20) получено без учета взаимодействия соседних полос магнитов.

При боковом смещении экипажа появляется боковая составляющая силы взаимодействия магнитов пути и экипажа, обуславливающая его неустойчивость в горизонтальной плоскости. Зависимость боковой силы от смещения определяется из выражения

$$F_y = -\frac{\mu_0 I^2 b}{2\pi} \int_{\delta}^{\delta+h} \left(\operatorname{arctg} \frac{y-a}{z} - 2 \operatorname{arctg} \frac{y}{z} + \right. \\ \left. + 2 \operatorname{arctg} \frac{y}{z+h} - \operatorname{arctg} \frac{y-a}{z+h} - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \frac{y+a}{z+h} + \operatorname{arctg} \frac{y+a}{z} \right) dz. \quad (21)$$

Важной характеристикой системы ПМП является отношение F_z/F_y , значение которого может быть выбрано в качестве критерия при оптимизации магнитных систем пути и экипажа. Его величина выбирается в зависимости от назначения разрабатываемой бесконтактной транспортной системой, в частности для экипажей, движущихся со скоростью $v=400-500$ км/ч, можно принять $F_z/F_y \geq 6$, что соответствует технологической точности укладки элементов пути для высокоскоростного транспорта. Лучшей следует считать ту систему, у которой это отношение больше.

При разработке систем ПМП следует стремиться к наилучшему использованию магнитного материала. В случае применения феррита бария марки 2БА можно достичь отношения полной массы экипажа к массе магнитов, равного 6—7, а применение феррита бария марки 3БА позволяет увеличить это отношение до 8. Имеются магнитные материалы с лучшими характеристиками (например, SmCo_5), но в настоящее время они значительно дороже феррита бария и их применение для создания транспортных систем по экономическим соображениям ограничено.

Исследование вопросов боковой стабилизации экипажа с ПМП показало целесообразность использования электромагнитной направляющей системы. Принцип ее работы аналогичен системе электромагнитного подвеса. Расход энергии и масса электромагнитов оказываются сравнительно небольшими, так как боковая сила, компенсируемая электромагнитом, не превышает $1/6-1/8$ массы экипажа при допускаемых боковых смещениях. Отличительной особенностью системы автоматического регулирования токов электромагнитов в данном случае является большая по сравнению с ЭМП жесткость регулирования. Это обусловлено достаточно быстрым возрастанием боковых сил с увеличением бокового смещения экипажа.

Расчеты показывают, что для обеспечения комфортабельности при перевозке пассажиров и улучшения динамических характеристик транспортного средства необходима вторичная ступень подвешивания, связывающая тележку и кузов экипажа. При этом на тележке размещаются несущие магниты и электромагнитная направляющая система. Необходимость жесткой механической связи электромагнитов системы направления с несущими постоянными магнитами значительно усложняет задачу синтеза системы автоматического регулирования токов электромагнита. Решение этой задачи является одной из главных проблем при проектировании реальных транспортных систем с ПМП.

Комбинированные способы магнитного подвеса сводятся к использованию в различных сочетаниях принципов работы трех рассмотренных систем.

В заключение следует отметить, что реализация рассмотренных способов магнитного подвеса находится в тесной связи с возможной сферой применения и технико-экономическими показателями системы. Бесконтактные транспортные системы с магнитным подвесом экипажей могут найти применение не только для высокоскоростного транспорта, но и для местного сообщения типа «город — пригород», «город — аэропорт», а также для нужд промышленного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тозони О. В. Расчет поля электромагнита, движущегося вдоль ферромагнитной пластины. — Энергетика и транспорт, 1977, № 6.
2. Appun P., Ritter G. R. Calculation and optimisation of the magnets for electromagnetic levitation system. — IEEE Trans., Magn., 1975, vol. 11, № 1.
3. Thorton Richard D. Magnetic levitation and propulsion. — IEEE Trans. Magn., 1975, vol. 11, № 4.
4. Нагорский В. Д. Максимальная мощность электромагнита в системе электромагнитного подвеса экипажа. — Гр. МИИТ. Вопросы магнитного подвеса для высокоскоростного наземного транспорта. 1976, вып. 517.
5. Hedrich S. H. Entwicklung einer magnetischen Schnellbahn. — ETR (Eisenbahntechnische Rundschau), 1973, № 1/2.
6. Powell I. R., Danby G. T. High speed transport by magnetically suspended trains. — Presented at the ASME Winter Annu Met., New York, Railroad Div. Techn. Rep. 66—WA/RR—5, 1966, Nov.
7. Сверхпроводящие машины и устройства. / Под ред. С. Фенера и Б. Шварца. — М.: Мир, 1977.
8. Ким К. И., Микиртичев А. А. Магнитное поле в системе левитации гибридного типа. — Изв. вузов. Электромеханика, 1977, № 8.
9. Yamamura Sakae. Present state of research and development of magnetically levitated vehicles. — Volt, 1975, March.
10. Polgreen G. R. Transport possibilities with magnetic suspension. — Electrical Times, 1965, vol. 148, t. 26, August.
11. Фришман Е. М. Силовое взаимодействие пути и экипажа на магнитной подушке. — Электронная техника. Ферритовая техника, 1971, сер. 7, вып. 3.
12. Фришман Е. М. К определению некоторых силовых характеристик экипажа на магнитной подушке. — В кн.: Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта. — Киев: Наукова думка, 1973.

[20.04.80]



УДК 621.33.038.019.3

Оценка параметрической надежности электронных систем тяговых электроприводов методом нелинейного физического моделирования

ЕФРЕМОВ В. И., инж., ТЮРИН В. П., канд. техн. наук

Москва

В тяговом электрическом приводе широкое распространение получили электронные системы. В эксплуатации выходные параметры таких систем могут монотонно изменяться и через определенное время выйти за пределы допусков. Это повлечет за собой изменение характеристик тягового привода в целом.

Для исследования параметрической надежности электронных систем, используемых в тяговых приводах, перспективным является метод физического моделирования [Л. 1]. Исходное уравнение, описывающее реализацию выходного (определяющего) параметра системы, в реальном масштабе времени t_p , имеет вид:

$$z(t_p) = f[\eta_1(t_p); \eta_2(t_p); \dots; \eta_n(t_p)],$$

где $\eta_1(t_p); \eta_2(t_p); \dots; \eta_n(t_p)$ — случайные функции изменения определяющих параметров 1, 2, ..., n элементов системы за время t_p .

При физическом моделировании используется реальная электронная система, которая в процессе работы сама устанавливает взаимосвязь параметров элементов и определяющего параметра систе-

мы. Отказ системы фиксируется при значении определяющего параметра вне пределов допусков.

При моделировании системы ее элементы заменяются соответствующими макетами. Макеты, управляемые исполнительными органами моделирующей установки (электромеханическими интеграторами), принудительно изменяют параметры элементов, т. е. в определенном масштабе времени реализуют случайные функции $\eta(t_p)$. Естественно, что моделированию подлежат только элементы, влияющие на параметрическую надежность системы; они устанавливаются на основании граничных испытаний [Л. 1].

Таким образом, одной из основных задач физического моделирования является достоверное воспроизведение случайных функций $\eta(t_p)$ моделируемых элементов. В [Л. 1] для этой функции предложена линейная модель вида: $\eta(t_p) = \alpha + \beta t_p$,

где α, β — нормально распределенные случайные величины соответственно с математическими ожиданиями M_α и M_β и среднеквадратичными отклонениями σ_α и σ_β .

В указанном уравнении первый член правой части характеризует разброс начальных значений определяющего параметра, второй — его изменения во времени.

Анализ изменения определяющих параметров различных элементов показывает, что зависимости $\eta(t_p)$ часто нелинейны. В большей степени нелинейность проявляется у емкостей и транзисторов, в меньшей — у диодов, стабилитронов, сопротивлений, ферритов. Для некоторых элементов, используемых в электронных схемах, такие сведения имеются в [Л. 1, 2 и 6].

Правомочно предположить, что при учете нелинейности случайных функций $\eta(t_p)$ результаты моделирования систем будут более точными, чем в случае линейных аппроксимаций этих функций. Высказанное положение ниже подтверждено экспериментально.

Для нелинейного отражения зависимости $\eta(t_p)$ предполагается модель вида:

$$\eta(t_p) = \alpha + \beta V(t_p), \quad (1)$$

где $V(t_p)$ — некая детерминированная функция.

Критерием применимости (1) для анализируемого элемента, очевидно, является постоянство всех i -х значений коэффициента вариации случайной величины β , т. е.

$$v_i = v = \frac{V \sigma^2[\eta(t_{pi})] - \sigma^2 \alpha}{M[\eta(t_{pi})] - M_\alpha} = \text{const}, \quad (2)$$

где $M[\eta(t_{pi})]$, $\sigma[\eta(t_{pi})]$ — соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение функции $\eta(t_p)$ для любого значения $t_p > 0$.

В практических расчетах, учитывая возможный разброс значений коэффициента вариации, целесообразно ориентироваться на его среднее значение.

Из (1) следует, что установка для нелинейного моделирования должна предусматривать два этапа работы: первый служит для отработки начальных значений определяющих параметров элементов, второй — для отработки нелинейного приращения параметра во времени. С позиций генерирования и запоминания случайных величин, а также реализации начальных значений установка может быть аналогична имеющимся комплексам для линейного моделирования. Для отражения нелинейности во времени в установке имеется специальный блок. Назначение блока: для каждого моделируемого элемента сформировать на соответствующем электромеханическом интеграторе сигнал в виде произведения случайной величины, пропорциональной β , и функции, пропорциональной производной $V(t_p)$. Введение производной обусловлено интегрирующими свойствами электромеханического интегратора.

В процессе второго этапа работы модулирующей установки необходимо непрерывно сравнивать текущее значение определяющего параметра системы z с нормируемым значением z_n . Момент отказа (совпадение величин z и z_n) удобно фиксировать с помощью блока счетчиков, группирующих отказы по заданным интервалам времени [Л. 1].

Для расчета характеристик элемента представим (1) в виде:

$$\eta(t_p) = \alpha + \beta_1 V_1(t_p). \quad (3)$$

В (3) обозначено:

$$\beta_1 = \frac{\beta k}{M_\beta}; \quad (4)$$

$$V_1(t_p) = \frac{M_\beta V(t_p)}{k}, \quad (5)$$

где k — некая постоянная величина, определяемая возможностями моделирующей установки.

Применяя к (3) теоремы сложения математических ожиданий и дисперсий [Л. 3], с учетом (4) и (5) получаем $M_{\beta_1} = k$ и $\sigma_{\beta_1} = kv$, в частном случае $M_{\beta_1} = k = 1$, $\sigma_{\beta_1} = v$. Из теоремы сложения математических ожиданий также следует, что

$$M[\eta(t_p)] = M_\alpha + M[\beta_1 V_1(t_p)]. \quad (6)$$

С другой стороны, временную зависимость для математического ожидания функции $\eta(t_p)$ можно представить в виде полинома n -го порядка, т. е.

$$M[\eta(t_p)] = A_0 + A_1 t_p + A_2 t_p^2 + A_3 t_p^3 + \dots + A_n t_p^n.$$

Из этого выражения с учетом (6) имеем:

$$M_\alpha = A_0;$$

$$M[\beta_1 V_1(t_p)] = A_1 t_p + A_2 t_p^2 + \dots + A_n t_p^n. \quad (7)$$

Для определения порядка полинома, выражающего временную зависимость для математического ожидания определяющего параметра элемента, исследованы функции $M[\eta(t_p)]$ различных электронных изделий (транзисторов, диодов, стабилитронов, резисторов, конденсаторов, индуктивностей на ферритах). В процессе исследований зависимости $M[\eta(t_p)]$ аппроксимировались полиномами различных порядков. Сопоставление результатов показало приемлемость полинома 3-го порядка. Кроме этого, анализировались аналитические зависимости [Л. 1]:

$$M[\eta(t_p)] = A t_p^B;$$

$$M[\eta(t_p)] = A \left[1 - \exp\left(-\frac{t_p}{B}\right) \right];$$

$$M[\eta(t_p)] = A \exp\left(\frac{t_p}{B}\right),$$

где A , B — постоянные величины, а также зависимость¹ вида:

$$M[\eta(t_p)] = A + B \sqrt{t_p}.$$

Первая из приведенных зависимостей имеет ограниченный смысл, так как, во-первых, не отражает начальных значений определяющего параметра, во-вторых, приемлема только для $B < 0$ (при $B < 0$ и $t_p = 0$ значение $M[\eta(t_p)] = \infty$). Все другие зависимости разлагались в степенные ряды. При числе членов ряда не больше четырех рассматриваемые зависимости допустимо аппроксимировать полиномом 3-го порядка.

С учетом сказанного из (5) и (7) получим

$$V_1(t_p) = \frac{1}{k} (A_1 t_p + A_2 t_p^2 + A_3 t_p^3). \quad (8)$$

¹ Получена кафедрой АСУ МНПТ.

Из (3), (4) и (8) легко видеть, что линейная модель для функции $\eta(t_p)$ является частным случаем нелинейной и получается при $A_2=A_3=0$. Уравнения (3) и (8) позволяют установить функцию напряжения, подаваемого на интегратор при втором этапе моделирования. Для этого выразим в (8) время t_p в масштабе времени моделирования t_n , т. е.

$$V_1(t_n) = \frac{1}{k} (A_1 m t_n + A_2 m^2 t_n^2 + A_3 m^3 t_n^3), \quad (9)$$

где $m = \frac{t_p}{t_n}$.

С другой стороны, очевидно равенство $\beta_1 V_1(t_n) = B \varphi(t_n)$, где B — крутизна макета элемента; $\varphi(t_n)$ — изменение угла поворота интегратора (макета) во времени; отсюда

$$\frac{1}{B} \beta_1 V_1(t_n) = \int_0^{t_{n.об}} \omega(t_n) dt, \quad (10)$$

где $\omega(t_n)$ — изменение угловой скорости интегратора; $t_{n.об}$ — общее время интегрирования.

Частота вращения интегратора связана с подаваемым напряжением зависимостью:

$$n(t_n) = k_n U(t_n),$$

где k_n — крутизна интегратора.

Выражая частоту вращения через угловую скорость, с учетом (9) и (10) получаем:

$$U(t_n) = \beta_1 c(t_n),$$

где

$$c(t_n) = \frac{9,55m}{k_n k B} (A_1 + 2A_2 m t_n + 3A_3 m^2 t_n^2).$$

Исходные данные для расчета характеристик макета элемента и напряжений на интеграторе можно получить из опытных зависимостей $M[\eta(t_p)]$ и $\sigma[\eta(t_p)]$. По ним в соответствии с (2) определяется коэффициент вариации случайной величины β и оценивается приемлемость нелинейной модели элемента. Зависимость $M[\eta(t_p)]$ выравливается по методу наименьших квадратов. Это позволяет установить коэффициенты полинома решением системы уравнений [Л. 3]:

$$\begin{aligned} A_0 N + A_1 \sum_{i=1}^N t_{pi} + A_2 \sum_{i=1}^N t_{pi}^2 + A_3 \sum_{i=1}^N t_{pi}^3 &= \sum_{i=1}^N \eta(t_{pi}); \\ A_0 \sum_{i=1}^N t_{pi} + A_1 \sum_{i=1}^N t_{pi}^2 + A_2 \sum_{i=1}^N t_{pi}^3 + A_3 \sum_{i=1}^N t_{pi}^4 &= \\ &= \sum_{i=1}^N t_{pi} \eta(t_{pi}); \\ A_0 \sum_{i=1}^N t_{pi}^2 + A_1 \sum_{i=1}^N t_{pi}^3 + A_2 \sum_{i=1}^N t_{pi}^4 + A_3 \sum_{i=1}^N t_{pi}^5 &= \\ &= \sum_{i=1}^N t_{pi}^2 \eta(t_{pi}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_0 \sum_{i=1}^N t_{pi}^2 + A_1 \sum_{i=1}^N t_{pi}^3 + A_2 \sum_{i=1}^N t_{pi}^4 + A_3 \sum_{i=1}^N t_{pi}^5 &= \\ &= \sum_{i=1}^N t_{pi}^3 \eta(t_{pi}), \end{aligned}$$

где N — количество пар значений $\eta(t_p)$ и t_p .

Коэффициенты $A_0 = M_\alpha$ и $\sigma[\eta(0)] = \sigma_\alpha$ служат основой для расчетов, связанных с реализацией начальных значений определяющего параметра элемента. Расчетные формулы приведены в [Л. 1].

Для расчета характеристик макета элемента на втором этапе моделирования необходимо знать максимальное изменение определяющего параметра элемента $\Delta\eta_{max}$ за весь исследуемый период t_{pmax} .

Из (3) следует, что $\Delta\eta_{max}$ определяется максимумом случайной величины β_1 , т. е.

$$\beta_{1max} = k + \xi z_{\beta_1},$$

где $\xi = 2-3$ — число, определяющее ширину зоны значений β_1 для заданной вероятности. Или $\beta_{1max} = k + \xi k v$, отсюда с учетом (3) и (9) получим:

$$\Delta\eta_{max} = t_{pmax} (1 + \xi v) (A_1 + A_2 t_{pmax} + A_3 t_{pmax}^2).$$

По $\Delta\eta_{max}$ и соответствующему максимальному углу поворота макета определяется его крутизна. Полученные расчетные соотношения служат основой для практических расчетов параметров макетов, напряжений на интеграторах и настройке моделирующей установки. Последующее моделирование позволяет получить ряд наработок исследуемой электронной системы, сгруппированных счетчиками установки по заданным интервалам времени моделирования. Далее наработки переводятся в реальный масштаб времени t_p .

Экспериментальные исследования показали, что для описания параметрической надежности систем в наибольшей степени приемлемо распределение Вейбулла, плотность вероятности которого имеет вид:

$$f(t_p) = \frac{b}{a} \left(\frac{t_p}{a}\right)^{b-1} \exp \left[-\left(\frac{t_p}{a}\right)^b \right],$$

где a, b — параметры распределения.

В [Л. 4] получено уравнение для оценки параметра распределения b при многократно усеченной выборке. В нашем случае выборка обычно полностью определенная (частный случай многократно усеченной выборки). Отсюда уравнение для оценки параметра с учетом группирования отказов по интервалам времени примет вид:

$$\frac{1}{b} + \frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln t_{pi}}{\sum_{i=1}^n m_i} - \frac{\sum_{i=1}^n m_i t_{pi}^b \ln t_{pi}}{\sum_{i=1}^n m_i t_{pi}^b} = 0,$$

где m_i — число отказов, попавших в i -й интервал времени; t_{pi} — время, соответствующее середине i -го интервала; n — количество интервалов группирования отказов.

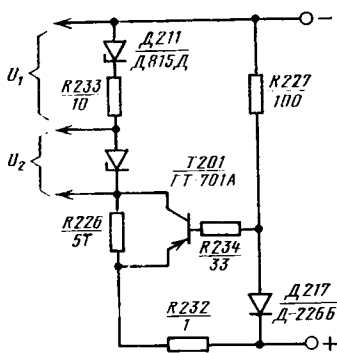
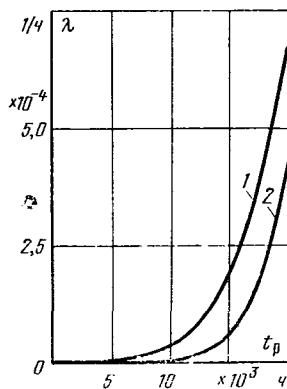


Рис. 1. Электрическая схема блока стабилизации напряжения питания элементов типа «Логика» (трамвайный вагон типа РВЗ-7)

Рис. 2. Зависимость интенсивности параметрических отказов блока стабилизации напряжения питания элементов типа «Логика» (трамвайный вагон типа РВЗ-7)

1 — линейное моделирование; 2 — нелинейное моделирование.



Приведенное уравнение решается численными методами. Его решение относительно несложно, так как общее число интервалов (соответственно и значений t_{pi}) составляет 6—10. Подбор корней также осуществляется в узких пределах $b=1,5 \div 8$. Если в результате обработки экспериментальных данных получено значение параметра b больше 8, то возможно использование нормального распределения [Л. 5].

Для точечной оценки параметра $a_{оп}$ распределения Вейбулла представим

$$y_i = t_{pi}^b$$

В этом случае приходим к известной форме экспоненциального распределения:

$$F(y) = 1 - \exp\left(-\frac{y}{T}\right),$$

где

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n m_i t_{pi}^b}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

Из полученного равенства находим точную оценку параметра $a: a_{он} = \sqrt[b]{T}$.

Интервальные оценки этого параметра (нижние и верхние пределы) [Л. 5]:

$$a_{н} = \sqrt[b]{T r_3}; \quad a_{в} = \sqrt[b]{T r_1},$$

где r_1, r_3 — табличные коэффициенты [Л. 5], зависящие от заданной доверительной вероятности и числа опытов.

При моделировании количество опытов обычно значительное (100—300). Если при этих условиях принять распространенное значение доверительной вероятности 0,8, то в соответствии с [Л. 5] полу-

чим следующие интервалы для коэффициентов r : $r_1=1,09 \div 1,05$; $r_3=0,98 \div 0,95$.

Учитывая, что интервалы малы, возможно интервал характеризовать средним значением, тогда

$$a_{н} = \sqrt[b]{1,07T}; \quad a_{в} = \sqrt[b]{0,975T}.$$

Последующий расчет показателей надежности для любого заданного времени $t_{p.з}$ проводится по формулам [Л. 5]:

вероятность безотказной работы

$$P(t_{p.з}) = \exp\left[-\left(-\frac{t_{p.з}}{a}\right)^b\right];$$

интенсивность отказов

$$\lambda(t_{p.з}) = \frac{b}{a} \left(\frac{t_{p.з}}{a}\right)^{b-1};$$

гамма-процентный ресурс

$$t_{\gamma} = a \sqrt[b]{-\ln \frac{\gamma}{100}};$$

средняя наработка до отказа

$$t_{ср.р} = a \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right),$$

где Γ — знак гамма-функции.

Рассмотренные положения метода нелинейного физического моделирования носят общетеоретический характер и, очевидно, приемлемы не только для электронных систем, используемых в тяговых проводах. Метод может быть распространен на промышленные приводы, устройства автоматики и, возможно, радиоэлектронную аппаратуру. При практической реализации метода в каждом конкретном случае доработка в основном будет касаться конструкции моделирующей установки.

Используя вышеизложенные принципы, во Всесоюзном научно-исследовательском проектно-конструкторском и технологическом институте кранового и тягового электрооборудования разработана и изготовлена моделирующая установка для нелинейного моделирования. Кроме того, разработаны программы для ЦВМ «Минск-32», позволяющие осуществлять все основные расчеты, связанные с подготовкой данных для нелинейного моделирования и обработкой результатов моделирования.

Метод нелинейного физического моделирования использован для оценки параметрической надежности и анализа электронных систем, используемых в большегрузном электрооборудовании типа БелАЗ-549 и на трамвайном вагоне типа РВЗ-7. Применительно к этим системам проанализированы результаты линейного и нелинейного моделирования.

В качестве примера, иллюстрирующего принцип физического моделирования, рассмотрим результаты моделирования стабилизатора напряжения питания элементов типа «Логика» (трамвайный вагон типа РВЗ-7). Электрическая схема блока приведена на рис. 1. Определяющим параметром блока является ток стабилизации с допустимым значением 450 А.

По данным граничных испытаний моделированию подлежат опорный диод типа Д-226 и транзистор типа ГТ-701А. В результате моделирования и

Физико-математическое моделирование асинхронных электроприводов с преобразователями частоты

ПЕТРОВ Л. П., ЛАДЕНЗОН В. А., ПЕЧКОВСКИЙ И. И.

Одесский политехнический институт

При математическом моделировании на ЭВМ асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями частоты (ТПЧ) в большинстве случаев оказывается возможным ограничиться моделированием двигателя (АД) и системы питающих напряжений. Эти напряжения обычно заранее известны и представляются, как правило, обобщенным вектором трехфазной системы, который может быть образован даже в тех случаях, когда напряжения фаз изменяются во времени произвольным образом. Последнее обстоятельство послужило основанием для разработки упрощенных математических моделей системы ТПЧ—АД, в которых обобщенный вектор выходного напряжения преобразователя представляется его проекциями на оси фазных обмоток статора в виде ступенчатых функций времени, отражающих состояние коммутирующих вентиля [Л. 1]. Однако для инверторов, работающих с углом проводимости $\lambda=2\pi/3$, подобное допущение неприемлемо [Л. 1 и 2].

В этом случае, а также при анализе физических процессов в самом преобразователе и его влияния на питающую сеть необходимо моделировать и преобразователь частоты.

Моделирование преобразователей частоты возможно как с применением цифровых (ЦВМ), так и аналоговых (АВМ) вычислительных машин. Математическое моделирование с помощью ЦВМ не представляет принципиальных затруднений, но требует составления достаточно сложных программ, что на данном этапе развития вычислительной техники часто затрудняет непосредственный контакт исследователя с машиной. Поэтому в ряде случаев, когда необходим главным образом качественный анализ электромагнитных процессов в преобразователе и электроприводе в целом моделирование на АВМ может оказаться предпочтительным. При таком моделировании наибольшие трудности возникают при реализации математических моделей инверторов и управляемых выпрямителей. Моделирование можно существенно упростить, применяя вме-

сто математических физические модели инверторов и выпрямителей, выполненные с соблюдением критериев подобия и реализуемые из простых стандартных элементов.

Наиболее просто реализовать физическую модель преобразователя, соизмеримую по мощности с операционными усилителями АВМ. В этом случае отпадает необходимость в преобразователях мощности и можно использовать только преобразователи тока, в качестве которых с успехом применяются так называемые источники тока (ИТ) [Л. 3]. При этом диоды реального преобразователя могут моделироваться маломощными диодами, а тиристоры — либо аналогами тиристора [Л. 4], либо последовательным соединением маломощного диода и контакта быстродействующего реле, иммитирующего включение и отключение тиристора. Выбор способа физического моделирования тиристора зависит от конкретных условий и не имеет принципиального значения.

Маломощные диоды выбираются по критерию подобия их вольт-амперных характеристик с характеристиками реального моделируемого вентиля. Получить полное совпадение вольт-амперных характеристик реальных диодов и тиристоров с характеристиками их физических аналогов практически не удается и поэтому критерий подобия вентиля полностью не соблюдается. Однако погрешность в определении величин токов, возникающая по этой причине, не превышает обычно 2%, что вполне допустимо [Л. 5].

По условиям подобия параметры элементов физической модели преобразователя определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} r_{\psi} &= r m_z, \\ C_{\psi} &= C \frac{m_t}{m_z}; \\ L_{\psi} &= L m_t m_z, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

последующей обработки данных получены показатели надежности блока, приведенные в таблице (при расчетах показателей использовано значение $a_{оп}$, вероятность безотказной работы и интенсивность отказов вычислены для значения 10000 ч, гамма-процентный ресурс — для значения $\gamma=90\%$). Далее надежность рассматривается для возможного срока службы блока стабилизации — 5 лет (20000 ч).

Из таблицы следует, что линейное моделирование дает заметно заниженную надежность. Это также прослеживается при анализе кривых интенсивностей отказов (рис. 2). Из кривой $\lambda(t_p)$, полученной по результатам нелинейного моделирования,

следует, что до 10000 ч отказы блока маловероятны. Вплоть до этого времени, видимо, нецелесообразно проведение каких-либо настроек, ремонтов или замен блока. Катастрофические отказы — резкое возрастание кривой $\lambda(t_p)$ — наступает через 18—20 тыс. ч. По данным линейного моделирования катастрофические отказы наступают через 15 тыс. ч., т. е. при этом методе имеем очевидное занижение надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дружинин Г. В. Надежность устройств автоматики. — М.: Энергия, 1968.
2. Горюнов Н. Н. Свойства полупроводниковых приборов при длительной работе и хранении. — М.: Энергия, 1970.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969.
4. Методические указания. Надежность в технике. Системы сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надежности в случае многократно усеченной выборки. Ротапринт ВНИИИМАШ, 1978.
5. Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надежности. — М.: Советское радио, 1968.
6. Чарная Л. Ф., Красноштанова Л. А. Исследование процессов, протекающих в электролитических конденсаторах при действии электрической нагрузки и повышенной температуры. — Электронная техника, сер. 5. Радиодетали, Вып. 1 (26) — М.: ЦНИИ «Электроника», 1972.

[22.01.80]

Показатели надежности	Значения показателей	
	линейное моделирование	нелинейное моделирование
$P(10\ 000)$	0,931	0,995
$\lambda(10\ 000), 1/\text{ч}$	$0,371 \cdot 10^{-4}$	$0,039 \cdot 10^{-4}$
$t_{\gamma=90}, \text{ ч}$	10 770	14 710
$t_{ср.р.}, \text{ ч}$	15 300	18 600

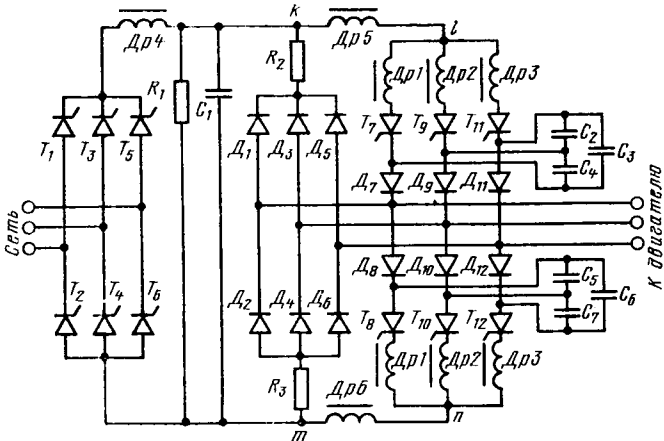


Рис. 1. Схема силовой части статического преобразователя частоты.

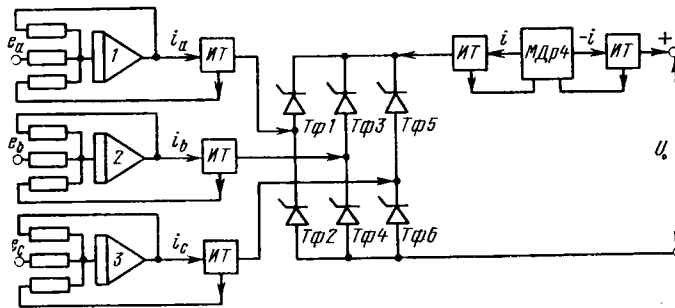


Рис. 2. Структурная схема физико-математической модели выпрямителя.

МДр4 — математическая модель дросселя Др4; индекс «ф» означает, что данный элемент представлен физической моделью.

где r_{ϕ} , C_{ϕ} , L_{ϕ} — параметры элементов физической модели; r , C , L — параметры элементов моделируемого преобразователя; m_t , m_z — масштабы времени и сопротивлений физической модели.

При выборе масштабов времени и сопротивлений приходится учитывать, что обычные АВМ не допускают моделирования режимов с частотами более 5 Гц и поэтому величина масштаба времени составляет 10—10². Масштабы сопротивлений (отношение сопротивлений модели к реальным сопротивлениям) находятся в пределах 10³—10⁴, поскольку из-за малой мощности ИТ, собираемых из операционных усилителей АВМ, токи физической модели преобразователя ограничиваются единицами миллиампер, а напряжения — десятками вольт.

Анализ системы (1) показывает, что физическое моделирование индуктивностей нецелесообразно, так как индуктивность модели должна быть в 10⁴—10⁶ раз больше реальной. Поэтому физическими элементами в модели преобразователя целесообразно представлять только резисторы и конденсаторы.

Основные особенности применения подобных физических моделей можно рассмотреть на примере АД, питаемого от серийного тиристорного преобразователя частоты типа ТПЧ-15, силовая схема которого приведена на рис. 1. Режимы такого преобразователя характеризуются тем, что в анодной и катодной группах вентилей одновременно открыто только по одному тиристоры и, следовательно, угол проводимости вентилей составляет 120°. Схема преобразователя не является совершенной, так как форма выходного напряжения зависит от режима работы АД и его нагрузки. Однако именно это обстоятельство позволяет наиболее полно оценить возможности физико-математического моделирования.

Полную физико-математическую модель тиристорного преобразователя частоты условно можно разбить на две части. Первая включает в себя модели питающей сети, управляемого выпрямителя и сглаживающего дросселя. Ко второй части относятся модели емкостного фильтра, обратного моста, инвертора

напряжения и цепи перезаряда коммутирующих конденсаторов.

Структурная схема первой части модели преобразователя приведена на рис. 2. Электродвижущие силы вторичных обмоток трансформатора e_a, e_b, e_c , представляющих собой систему синусоидальных напряжений, сдвинутых на 120°, подаются на входы интеграторов 1—3, моделирующих токи i_a, i_b, i_c во вторичных обмотках трансформатора. Выходы интеграторов через источники тока подключены к физической модели выпрямителя, катодная группа которого через источники тока подключается к математической модели сглаживающего дросселя Др4 (МДр4). Таким образом, на выходе первой части модели преобразователя формируется напряжение питания второй части. В данном случае источники тока применяются как следящие системы, позволяющие за счет глубокой отрицательной обратной связи по разности токов в физической и математической частях системы поддерживать эту разность практически на нулевом уровне при любых изменениях параметров или режима обеих частей модели.

Структурная схема второй части модели преобразователя частоты приведена на рис. 3. Она получена в предположении, что токоограничивающие дроссели Др1, Др2, Др3 не влияют на режимы нагрузки и коммутация тиристоров инвертора напряжения происходит мгновенно. Это позволяет исключить из рассмотрения указанные дроссели, а тиристоры представить в виде последовательного соединения маломощного диода и контакта реле, время t_p (с) включенного состояния которого определяется реальной частотой f_k коммутации инвертора при угле проводимости тиристора, равном 120°:

$$t_p = \frac{2}{6f_k} \quad (2)$$

Для автоматического управления работой переключающих реле может быть использована схема кольцевого распределителя с межянодными конденсаторами [Л. 6]. При необходимости учета дросселей Др1, Др2, Др3 они представляются математическими моделями.

Математическая модель АД и дросселей Др5, Др6 может быть описана следующими уравнениями [Л. 7]:

$$\left. \begin{aligned} D\bar{\Psi}_s &= k_1 \bar{U}_s - k_2 \bar{I}_s; \\ D\bar{\Psi}_r &= -k_3 \frac{1}{x_m} \bar{\Psi}_m + k_4 \bar{I}_s + j\omega_r \bar{\Psi}_r; \\ \bar{\Psi}_m &= k_5 \bar{\Psi}_r - k_7 \frac{1}{x_m} \bar{\Psi}_m + k_3 \bar{\Psi}_s; \\ \bar{I}_s &= k_9 \bar{\Psi}_s - k_{10} \bar{\Psi}_m; \quad \frac{1}{x_m} = f(\Psi^2 m); \\ M &= \text{Im}(\bar{\Psi}^* \bar{I}_s); \\ D\omega_r &= k_{11} (M \pm M_C); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

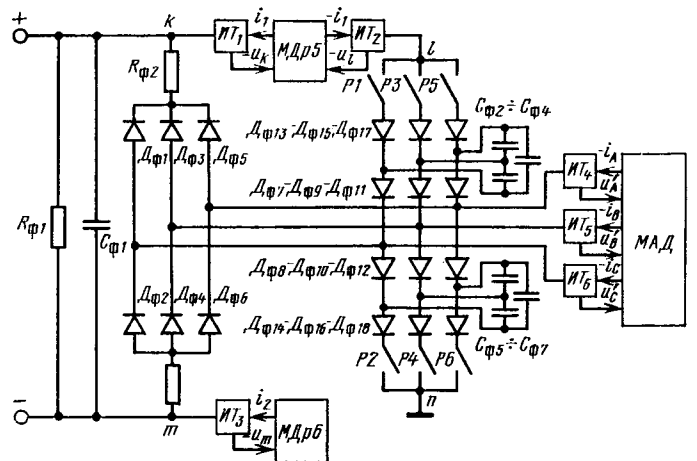


Рис. 3. Структурная схема физико-математической модели инверторной части преобразователя частоты и асинхронного двигателя.

МДр5 и МДр6 — математические модели дросселей Др5 и Др6; МАД — математическая модель АД.

$$Di_1 = k_{12}(U_k - U_l) - k_{13}i_1; \quad (4)$$

$$Di_2 = k_{12}U_m - k_{13}i_2. \quad (5)$$

где k_{11} — k_{13} — коэффициенты, включающие в себя параметры АД, дросселей и масштабы переменных.

С целью стабилизации работы физической модели преобразователя глухо заземлена одна из точек инвертора. Поэтому появляется необходимость вычисления напряжения U_0 между изолированной нейтралью двигателя и заземленной точкой физической модели:

$$U_0 = \frac{1}{3}(U'_A + U'_B + U'_C). \quad (6)$$

Соответственно проекции вектора напряжения \bar{U}_s на координатные оси α и β определяются следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_{s\alpha} &= U'_A - U_0; \\ U_{s\beta} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(U'_B - U'_C). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Если диапазон регулирования выпрямленного напряжения небольшой, что характерно для преобразователя ТПЧ-15, то пульсации не оказывают существенного влияния на работу моделируемой системы. Это позволяет упростить физическую модель тиристорного преобразователя частоты за счет исключения его первой части. При этом напряжение питания U , подаваемое на вход модели (рис. 3) к точкам k и m , принимается «гладким» либо состоящим из суммы «гладкой» и гармонической составляющих. Оно не должно быть электрически связанным с «операционной землей» АВМ.

Сравнительный анализ осциллограмм напряжения и тока АД, полученных с помощью описанной физико-математической

модели, с аналогичными экспериментальными, приведенными в [Л. 2] показывает хорошие возможности предложенного способа моделирования, который относительно просто позволяет получить на выходе инвертора форму выходного напряжения, близкую к реальной, а, следовательно, и правильную картину протекания переходного процесса в АД и системе привода в целом. Данная модель хорошо работает в диапазоне частотного регулирования 5 : 1. При более низких частотах необходимо изменять масштаб времени, а при частотах меньше 1 Гц работа модели практически невозможна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сандлер А. С., Сарбатов Р. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. — М.: Энергия, 1974.
2. Шубенко В. А., Браславский И. Я., Шрейнер Р. Т. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением. — М.: Энергия, 1967.
3. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах/ Под ред. Н. И. Соколова — 2-е изд. — М.: Энергия, 1970.
4. Витковский О. М. Моделирование вентильных преобразователей с применением электронных и физических аналогов. — Изв. вузов. Энергетика, 1974, № 11.
5. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. — М.: Энергия, 1976.
6. Тиристоры (технический справочник)/ Под ред. В. А. Лабунцова, С. Г. Обухова, А. Ф. Свиридова — М.: Энергия, 1971.
7. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением/ Л. П. Петров, В. А. Ладензон, Р. Г. Подзолов, А. В. Яковлев — М.: Энергия, 1977.

[12.05.80]



УДК 62—83:621.3.018.782.3

Исследование и оптимизация динамики многодвигательных унифицированных электроприводов с упругими связями

ШЕСТАКОВ В. М., канд. техн. наук

Ленинград

Исследованию динамики многодвигательных вентильных электроприводов (ЭП) с упругими связями посвящено достаточное количество статей [Л. 1—3]. В этих статьях рассматриваются вопросы построения и оптимизации ЭП с упругими механическими передачами (по терминологии [Л. 1] — с упругими связями 1-го рода) с учетом взаимосвязи приводов через обрабатываемый материал (упругую связь 2-го рода) применительно к непрерывно-поточным агрегатам (бумагоделательным машинам, непрерывным прокатным станам и др.) и к агрегатам циклического действия (продольно-реальным станкам, суперкаландрам и др.). Следует заметить, что в [Л. 1—3] речь идет о многодвигательных ЭП с индивидуальными преобразователями и разомкнутыми упругими связями 2-го рода.

Вместе с тем на ряде непрерывно-поточных агрегатов, например, на бумаго- и картоноделательных машинах имеются многоприводные секции с питанием двигателей как от общего, так и от индивидуальных вентильных преобразователей; при этом валы двигателей соединены с секцией через упругие связи 1-го рода, а рабочие валы секции связаны натянутой замкнутой лентой (сукном, металлической или синтетической сеткой), образующей замкнутые упругие связи 2-го рода. Системы регулирования таких ЭП строятся по принципу подчиненного регулирования как по цепи якорей, так и по цепи возбуждения двигателей. Трудности и оптимизация рассматриваемых ЭП заключаются во взаимосвязи электрических, механических и технологических факторов и в необходимости обеспечить как нормальное ведение технологического процесса обработки бумажного полотна, так и оптимальные режимы работы механического и электрического оборудования (по-

давление упругих колебаний 1-го и 2-го рода, автоматическое распределение нагрузок двигателей секции, устойчивую работу многосвязной системы регулирования в условиях естественной вариации электромеханических параметров). В соответствии с изложенными задачами настоящая статья посвящена созданию математического описания многодвигательных ЭП с замкнутыми упругими связями 2-го рода при питании двигателей как от общего, так и от индивидуальных вентильных преобразователей, разработке принципов построения и оптимизации взаимосвязанных ЭП с учетом заданных технологических требований и обеспечения рациональных режимов работы оборудования.

При исследовании многосвязных систем ЭП непрерывно-поточных агрегатов допустимо использование линеаризованных нормированных структурных схем (НСС), составленных для относительных отклонений переменных величин от их значений в статике [Л. 4]. При математическом описании вводятся следующие допущения: крутильные механические системы с упругими связями 1-го рода считаются двухмассовыми, упругие связи 1-го и 2-го рода полагаются невесомыми, однородными и обладающими постоянной жесткостью; отсутствует проскальзывание упругой ленты по валу секции в зоне сцепления [Л. 5].

Электропривод с общим преобразователем. На рис. 1,а представлена НСС n -двигательного привода при параллельном подключении двигателей к общему преобразователю ТП₀. Автоматическая система регулирования содержит датчик скорости ДС (тахогенератор с фильтром) на валу основного двигателя D_1 , регулятор скорости РС, ПИ-регулятор РЯ₀ и дат-

чик $D_{Я_0}$ общего тока двигателей. С целью поддержания соотношения нагрузок введены системы регулирования потоков вспомогательных двигателей D_2, \dots, D_n , содержащие замкнутые контуры токов возбуждения K_{B_1}, \dots, K_{B_n} , ПИ-регуляторы $P_{Я_1}, \dots, P_{Я_n}$ и датчики $D_{Я_1}, \dots, D_{Я_n}$ токов якорей двигателей. На рис. 1 введены следующие обозначения: $W_{PC}(p)$, $W_{ДС}(p)$, $W_{К}(p)$ — передаточные функции РС, ДС и корректирующего звена (РС-коррекции); β , $\tau_2, K_{ЛЮ}, T_{ТП}, K_T, T_{ДЯ}, K_{ТВ}$ — коэффициенты передачи и постоянные времени РЯ, ТП, датчиков тока якоря и возбуждения двигателей; $K_{В}$ — коэффициенты пропорциональности между током и потоком возбуждения; K_e, K_1, K_{α} — коэффициенты э. д. с. нагрузок по токам и жесткости механических характеристик двигателей; T_{π}, T_{π} — постоянные времени якорных цепей двигателей и силовой цепи ТПО; $T_{МД}, T_{М}$ — механические постоянные времени двигателей и валов секции; T_c, T_d — постоянные времени, характеризующие жесткость и демпфирование упругих связей 1-го рода; $K_v, K_{\varphi}, T_{\delta}$ — коэффициенты передачи и постоянные времени, характеризующие свойства упругих связей 2-го рода [Л. 4].

Представленная НСС дает возможность исследовать динамику ЭП при произвольном количестве приводных двигателей. Механическая система (обведена на рис. 1,а пунктиром) в общем случае является $2n$ -массовой и имеет $2n$ частот свободных упругих колебаний, причем n частот обусловлены упругими связями 1-го рода, а другие n частот — упругими связями 2-го рода. Для практических случаев можно ограничиться рассмотрением двухдвигательного привода, поскольку отдельные секции имеют чаще всего два крупных двигателя и несколько двигателей относительно малой мощности. Преобразуем НСС к виду, удобному для исследования частотными методами.

$$\text{Считая } K_{v12} = K_{v21} = K_v, K_{\varphi 12} = K_{\varphi 21} = K_{\varphi}, T_{\delta 12} = T_{\delta 21} = T_{\delta}$$

вследствие близости параметров ветвей упругой ленты, можно с помощью теоремы Мэсона получить передаточные функции между основными переменными механической системы:

$$\Phi_{oi}(p) = \frac{y_{di}}{i_{\alpha i}} \Big|_{i_{\alpha k}=0} = \frac{B_i(p) C_k(p)}{T_{\Sigma} p A_i(p) D(p)}; \quad (1)$$

$$\Phi_{ik}(p) = \frac{y_{dk}}{i_{\alpha i}} \Big|_{i_{\alpha k}=0} = \frac{1}{T_{\Sigma} p A_i(p) A_k(p) D(p)}, \quad (2)$$

где $i, k = 1$ или 2 , причем $i \neq k$;

$$A_i(p) = q_i T_{mi} T_{ci} p^2 + T_{di} p + 1,$$

$$B_i(p) = T_{mi} T_{ci} p^2 + T_{di} p + 1;$$

$$C_k(p) = \frac{T_{\Sigma k} T_{\delta}}{2K_v K_{\varphi}} p^2 + \frac{T_{\Sigma}}{2K_v K_{\varphi}} p + 1,$$

$$D(p) = \frac{q_{\Sigma 1} T_{\Sigma \Sigma 2} T_{\delta}}{2K_v K_{\varphi}} p^2 + \frac{q_{\Sigma 1} T_{\Sigma \Sigma 2}}{2K_v K_{\varphi}} p + 1;$$

$$q_i = \frac{T_{Mdi}}{T_{\Sigma i}}, T_{\Sigma i} = T_{Mdi} + T_{mi},$$

$$q_{\Sigma 1} = \frac{T_{\Sigma \Sigma 1}}{T_{\Sigma}}, T_{\Sigma} = T_{\Sigma 1} + T_{\Sigma \Sigma 2}.$$

При пренебрежении обратными связями по э. д. с. двигателей, что допустимо при высоком быстродействии токового контура (жесткой электромеханической связи [Л. 2]), передаточная функция между э. д. с. ТПО, $\epsilon_{ТП}$ и током i_{α}

$$W_o(p) = \sum_{i=1}^2 W_i(p), \quad (3)$$

где

$$W_i(p) = [A_o(p)]^{-1} \left[1 - \frac{K_{\alpha k} K_{\alpha ki} (T_{\pi} p + 1)}{(T_{\alpha k} p + 1)} \right] \frac{K_{\alpha i}}{(T_{\alpha i} p + 1)};$$

$$A_o(p) = 1 - \frac{K_{\alpha 1} K_{\alpha 2} K_{\alpha 12} K_{\alpha 21} (T_{\pi} p + 1)^2}{(T_{\alpha 1} p + 1) (T_{\alpha 2} p + 1)}.$$

С учетом выражений (1), (2) и (3) на рис. 1,б построена преобразованная НСС двухдвигательного ЭП (без учета системы регулирования потока вспомогательного двигателя), на которой контур суммарного тока выделен в «чистом» виде и проведена развязка перекрестных связей в механической части привода.

Оптимизация контура суммарного тока производится аналогично [Л. 4] для многодвигательных ЭП с прижимом рабочих валов (прессовых секций агрегатов). При этом передаточная функция замкнутого токового контура

$$W_{\Sigma, T}(p) \approx \frac{T_{ДЯ} p + 1}{K_{\Gamma 0} (n_0) T_{\Sigma 2}^2 p^2 + n_0 T_{\Sigma 2} p + 1}, \quad (4)$$

где $T_{\Sigma 2} = T_{ТП} + T_{ДЯ}$; n_0 — коэффициент настройки.

Передаточная функция объекта регулирования скоростного контура в соответствии с рис. 1,б

$$W_{OC}(p) \approx W_{\Sigma, T}(p) W_{ДС}(p) [\Phi_{o1}(p) + \Phi_{o2}(p)], \quad (5)$$

или, с учетом (1) и (2),

$$W_{OC}(p) \approx W_{\Sigma, T}(p) W_{ДС}(p) \frac{2B_1(p) C_o(p)}{T_{\Sigma} p A_1(p) D(p)}, \quad (6)$$

где

$$C_o(p) = \frac{T_{\Sigma \Sigma 2} T_{\delta}}{4K_v K_{\varphi}} p^2 + \frac{T_{\Sigma \Sigma 2}}{4K_v K_{\varphi}} p + 1.$$

С целью выявления принципов оптимизации ЭП проанализируем характеристики механической системы. Сомножители $A_1(p)$ и $B_1(p)$ определяют влияние на систему упругих связей 1-го рода (частоту ω_{y1} и коэффициент демпфирования ξ_1 , а выражение

$$W_{y,3}(p) = \frac{C_o(p)}{D(p)} \quad (7)$$

характеризует влияние упругости 2-го рода. Параметры свободных упругих колебаний 2-го рода определяются характеристическим уравнением (7)

$$T^2 y,3 p^2 + 2\xi_3 T y,3 p + 1 = 0,$$

где

$$T_{y,3} = \sqrt{\frac{q_{\Sigma 1} T_{\Sigma \Sigma 2} T_{\delta}}{2K_v K_{\varphi}}}, \xi_3 = \left(\sqrt{\frac{8K_v K_{\varphi} T_{\delta}}{q_{\Sigma 1} T_{\Sigma \Sigma 2}}} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Частота свободных упругих колебаний

$$\omega_{y,3} = \frac{\sqrt{1 - \xi_3^2}}{T_{y,3}} = \frac{1}{2T_{\delta}} \sqrt{\frac{8K_v K_{\varphi} T_{\delta}}{q_{\Sigma 1} T_{\Sigma \Sigma 2}}} - 1. \quad (9)$$

Анализируя (8) и (9), нетрудно заметить, что $\omega_{y,3}$ и ξ_3 зависят не только от механических и технологических факторов, но и от скорости движения v замкнутой ленты. При $\frac{8K_v K_{\varphi} T_{\delta}}{q_{\Sigma 1} T_{\Sigma \Sigma 2}} > 1$ свободное движение валов, связанных лентой,

носит колебательный характер, причем колебательность механической системы снижается пропорционально увеличению скорости ЭП, и при превышении некоторой критической скорости v_k , когда $\frac{8K_v K_{\varphi} T_{\delta}}{q_{\Sigma 1} T_{\Sigma \Sigma 2}}$ становится равным 1, свободное дви-

жение валов будет монотонным, что может быть объяснено быстрой заменой участков деформированной ленты при движении, приводящей к выравниванию натяжений ее ветвей.

Степень влияния на динамику системы регулирования упругих связей 1-го и 2-го рода определяется рядом факторов: соотношением частот ω_{y1} , $\omega_{y,3}$ и $\omega_{\Sigma 1} = 1/T_{\Sigma 1}$, где $T_{\Sigma 1}$ — суммарная малая постоянная времени контура скорости, величиной $q_{\Sigma 1}$, коэффициентами демпфирования ξ_1 и ξ_3 , а также частотой среза системы ω_{c1} . В частности, при $q_{\Sigma 1} = 0,5$, как это сле-

Таблица 1

Значение $q_{\Sigma 1}$	Соотношение частот	Доминирующее (взаимное) влияние	Условие несущественности влияния
$q_{\Sigma 1} < 0,5$	$\omega_{y.3} < \omega_{\Sigma 1} < \omega_y$	1-го рода	$\omega_{c1} \leq 2q_{\Sigma 1} q_1 \omega_y^2 \xi T_{\Sigma 1}$
	$\omega_{\Sigma 1} < \omega_{y.3} < \omega_y$	при $\xi_3 < \xi$, $\omega_{y.3} < \sqrt{q_1} \omega_y$ 2-го рода	$\omega_{c1} \leq 2q_{\Sigma 1} \omega_{y.3}^2 \xi_3 T_{\Sigma 1}$
		при $\xi_3 \approx \xi$ взаимное	$\omega_{c1} \leq 2q_{\Sigma 1} q_1 \omega_y^2 \xi_3 T_{\Sigma 1}$
$q_{\Sigma 1} > 0,5$	$\omega_{y.3} < \omega_{\Sigma 1} < \omega_y$	1-го рода	$\omega_{c1} \leq 2q_{\Sigma 1} q_1 \omega_y^2 \xi T_{\Sigma 1}$
	$\omega_{\Sigma 1} < \omega_{y.3} < \omega_y$	при $\xi_3 < \xi$, $\omega_{y.3} < \sqrt{q_1} \omega_y$ 2-го рода	$\omega_{c1} \leq \omega_{y.3}^2 \xi_3 T_{\Sigma 1}$
		при $\xi_3 > \xi$ взаимное	$\omega_{c1} \leq q_1 \omega_y^2 \xi_3 T_{\Sigma 1}$

дует из (6), влияние упругих связей 2-го рода практически отсутствует, что может считаться оптимальным, хотя и не всегда выполнимым случаем при проектировании привода. В табл. 1 приведены условия доминирующего или взаимного влияния упругостей 1-го и 2-го рода, а также приближение оценки несущественности такого влияния, полученные на основании анализа (6) частотным методом.

Экспериментальные исследования секций в «общей одежде» бумаго- и картоноделательных машин позволили установить доминирующее влияние упругих связей 1-го рода, что соответствует случаю $\omega_{y.3} < \omega_{\Sigma 1} < \omega_y$. Параметры упругих колебаний 1-го и 2-го рода составили $\omega_{y1} = 40 \pm 80 \text{ с}^{-1}$, $\xi_1 = 0,03 \pm 0,1$ и $\omega_{y.3} = 5 \pm 10 \text{ с}^{-1}$, $\xi_3 = 0,1 \pm 0,5$, причем упругие колебания 2-го рода были более заметны на нижних скоростях приводов.

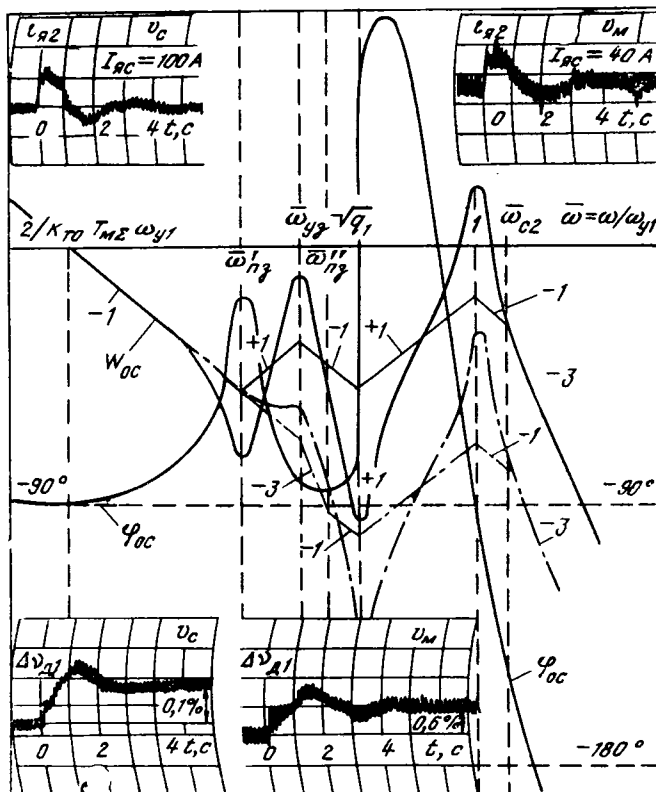


Рис. 2. Логарифмические частотные и переходные характеристики системы.

На рис. 2 представлены логарифмические частотные характеристики объекта регулирования, построенные по (6). При этом сплошными линиями показаны характеристики для $q_{\Sigma 1} < 0,5$, а штрихпунктиром — для $q_{\Sigma 1} > 0,5$. При $q_{\Sigma 1} < 0,5$ характеристика W_{OC} имеет два резонансных провала и пика, причем резонансные всплески на частотах $\bar{\omega}'_{п.3}$ и $\bar{\omega}_{y.3}$ ($\bar{\omega} = \omega/\omega_{y1}$), возрастающие при снижении скорости привода, обусловлены влиянием замкнутой упругой связи 2-го рода, а резонансные всплески на частотах $\bar{\omega} = \sqrt{q_1}$ и $\bar{\omega} = 1$ обусловлены влиянием упругости 1-го рода. Следует заметить, что аналогичные явления наблюдаются и в ЭП с разомкнутыми упругими связями 2-го рода [Л. 1].

При оптимизации динамики ЭП необходимо обеспечить заданное по технологическим условиям быстродействие системы регулирования при условии подавления упругих колебаний, в первую очередь на частоте ω_{y1} , во избежание появления автоколебаний. Быстродействующие контура скорости, характеризуемое частотой среза ω_{c1} , должно быть выбрано исходя из допустимого удлинения δ_{max} обрабатываемого материала (бумажного полотна) при типовых для данного агрегата возмущениях по моменту сопротивления $\mu_{c.о}$. Для бумаго- и картоноделательных машин, где типовым считается экспоненциальное изменение $\mu_{c.о}$,

$$\omega_{c1} \geq \frac{\mu_{c.о} K_0}{\delta_{max} T_{M\Sigma}}, \quad (10)$$

где K_0 — коэффициент, учитывающий характер изменения $\mu_{c.о}$ и параметры межсистемного промежутка [Л. 4].

Исходя из этого, параметры ПИ-регулятора скорости с передаточной функцией

$$W_{PC}(p) = \beta_1 \frac{\tau_1 p + 1}{\tau_1 p} \quad (11)$$

выбираются по условиям:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= 0,25 K_{T.о} T_{M\Sigma} \sqrt{2q_{\Sigma 1} \omega_{y.3}}; \\ \tau_1 &= \frac{4}{\sqrt{2q_{\Sigma 1} \omega_{y.3}}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

при значении $T_{\Sigma 1} = (\sqrt{2q_{\Sigma 1} \omega_{y.3}})^{-1}$, что обеспечивает характеристики взаимосвязанной системы, близкие к настройке на симметричный оптимум. Данная настройка контура скорости является рациональной для ЭП непрерывно-поточных агрегатов. Если при этом наблюдается заметное влияние упругости 1-го рода, то для его снижения следует ввести на выход РС активный полосовой фильтр, настроенный на частоту ω_{y1} , или РС-коррекцию по скорости основного двигателя [Л. 4], показанную на рис. 1,а пунктиром.

Аналогично выбираются параметры PC и при $q_{\Sigma 1} > 0,5$.

Необходимо заметить, что при изменении момента сопротивления механизма $\mu_{с.01}$ наблюдается нарушение установленного соотношения нагрузок двигателей, что нежелательно. Уравнения статики, составленные по структурной схеме рис. 1,а, позволяют найти соответствующие параметры:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ТПС} &= \frac{\mu_{с.01} [K_{Я2}K_{e2} + K_v K_{\varphi} (1 - K_{Я1}K_{Я2}K_{Я12}K_{Я21})] +}{K_v K_{\varphi} (K_{Я1} + K_{Я2}) + K_{Я1}K_{Я2} [K_{с2} -} \\ &+ \mu_{с.02} [K_{Я1}K_{Я2}K_{Я21}K_{e2} + K_v K_{\varphi} (1 - K_{Я1}K_{Я2}K_{Я12}K_{Я21})]}; \\ \nu_{д2с} &= \frac{K_{Я2} (\varepsilon_{ТПС} - K_{Я12}\mu_{с.01}) - \mu_{с.02}}{K_v K_{\varphi} (1 - K_{Я2}K_{Я12}) + K_{Я2}K_{e2}}; \\ \varphi_{12с} &= -\varphi_{21с} = \frac{K_v \nu_{д2с}}{2}; \\ i_{Я1с} &= \mu_{с.01} - 2K_{\varphi} \varphi_{12с}; \\ i_{Я2с} &= \mu_{с.02} + 2K_{\varphi} \varphi_{12с}. \end{aligned} \quad (13)$$

При абсолютно жесткой ленте ($K_v = \infty$) $\nu_{д2с} = 0$, что соответствует прижму рабочих валов. Из (13) также следует, что более мощный двигатель с датчиком скорости на валу имеет больший процент изменения тока, т. е. $i_{Я1с} > i_{Я2с}$. Для поддержания соотношения нагрузок двигателей необходимо ввести автоматическое регулирование потока вспомогательного двигателя (рис. 1,а). При этом контуры тока возбуждения и тока якоря настраиваются на оптимум по модулю.

С целью более полного изучения динамики автоматической системы регулирования проводилось моделирование на АВМ двухдвигательного ЭП прессовой секции «в общей одежде» высокопроизводительной бумагоделательной машины. Схема набора на АВМ компоновалась по НСС рис. 1,а в соответствии с известными правилами структурного моделирования. Исследования взаимосвязанной системы проводились на верхней и нижней рабочих скоростях (диапазон регулирования 1:3) при $q_{\Sigma 1} = 0,2$, что является наиболее неблагоприятным

сочетанием параметров привода с точки зрения влияния упругих связей. На рис. 3,а представлены осциллограммы переходных процессов скоростей двигателей при ступенчатых управляющем $\nu_y = 0,15\%$ и возмущающем $\mu_{с.01} = 10\%$ воздействиях на нижней скорости ЭП. На этом рисунке видно остаточное отклонение скорости $\nu_{д2с}$ вспомогательного двигателя при действии возмущения, что соответствует уравнениям статики (13). Благодаря действию RC -коррекции упругие колебания 1-го рода основного двигателя (с датчиком скорости) полностью подавлены. Ввиду отсутствия обратной связи по скорости вспомогательного двигателя его упругие колебания весьма заметны. Общий характер переходных процессов соответствует настройке на симметричный оптимум при достаточном быстродействии системы.

Экспериментальные исследования вентильных ЭП прессовых секций «в общей одежде» проводились на бумагоделательных машинах № 9 и 10 Сегежского целлюлозно-бумажного комбината. Структурная схема ЭП исследуемых секций фактически соответствовала рис. 1,а. Исследования проводились как на рабочей скорости $v_c = 500$ м/мин, так и на вспомогательной $v_m = 35$ м/мин.

Параметры объекта на рабочей скорости составили: $T_{мЭ} = 20$ с, $K_v = 100$, $K_{\varphi} = 2$, $T_{\delta} = 0,5$ с, $q_1 = 0,06$, $q_2 = 0,02$, $q_{\Sigma 1} = 0,6$. Настройки регуляторов соответствовали расчетным;

для подавления упругих колебаний 1-го рода в контур скорости основного двигателя был введен полосовой фильтр. На рис. 2 показаны осциллограммы изменения тока якоря $i_{Я2}$ вспомогательного двигателя («сукномойки») и скорости $\Delta \nu_{д1}$ основного двигателя («пикап-вала») при ступенчатых управляющих воздействиях на рабочей и вспомогательной скорости бумагоделательной машины. Переходные процессы близки к настройке на симметричный оптимум при времени регулирования около 2с, что соответствует теоретическим расчетам и обеспечивает требуемое качество динамики многосвязной системы.

Электропривод с индивидуальными преобразователями. На рис. 1,в представлена НСС n -двигательного ЭП секции с инди-

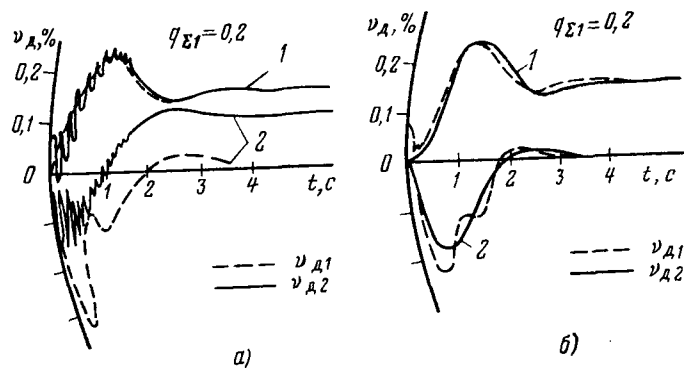


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов скоростей двигателей.

а — в ЭП с общим преобразователем; б — в ЭП с индивидуальными преобразователями; 1 — управляющее воздействие; 2 — возмущающее воздействие.

видуальными тиристорными преобразователями. Механическая часть привода в рассматриваемом случае соответствует рис. 1,а. Автоматическая система регулирования скорости каждого двигателя состоит из контуров и тока якоря. Контуры тока настраиваются на возможно большее быстродействие, чаще всего на оптимум по модулю. При этом передаточные функции замкнутых контуров $W_{з.тi}(p)$ аналогичны (4).

Передаточная функция объекта регулирования каждого контура скорости двухдвигательного ЭП, полученная по НСС рис. 1,б,

$$W_{ОСi}(p) \approx W_{з.тi}(p) W_{ДСi}(p) \frac{B_i(p) C_k(p)}{T_{мЭi} p A_i(p) D(p)}. \quad (14)$$

Как и в системе с общим преобразователем, степень влияния упругих связей на динамику системы регулирования определяется соотношением электромеханических параметров объекта и выбранным быстродействием системы. На основании анализа (14) в табл. 2 сведены условия доминирующего (или взаимного) влияния, а также незначительности влияния упругостей 1-го и 2-го рода.

Таблица 2

Соотношение частот	Доминирующее (взаимное) влияние	Условие незначительности влияния
$\omega_{y.з} < \omega_{\Sigma 1} < \omega_y$	1-го рода	$\omega_{с1} \leq q_{\Sigma 1} q \omega^2 \xi T_{\Sigma 1}$
$\omega_{\Sigma 1} < \omega_{y.з} < \omega_y$	2-го рода	$\omega_{с1} \leq q_{\Sigma 1} \omega^2 \omega_{y.з} \xi T_{\Sigma 1}$
	при $\xi_3 \approx \xi$ взаимное	$\omega_{с1} \leq q_{\Sigma 1} q \omega^2 \xi T_{\Sigma 1}$

Оптимизация ЭП сводится к достижению заданного по технологическим условиям быстродействия многосвязной автоматической системы регулирования при определении оптимальных режимов работы электрического и механического оборудования. Требуемая частота среза контуров скорости $\omega_{с1}$ определяется формулой (10), причем выбор одинакового быстродействия контуров предотвращает возникновение нежелательных изменений натяжения ветвей замкнутой ленты при управляющих воздействиях и сводит к минимуму влияние упругой связи 2-го рода. С учетом этого параметры ПИ-регуляторов скорости с передаточной функцией (11) выбираются по условиям:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= 0,5 K_{Ti} T_{мЭi} \sqrt{q_{\Sigma 1}} \omega_{y.з}; \\ \tau_1 &= \frac{4}{\sqrt{q_{\Sigma 1}} \omega_{y.з}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

при значении $T_{\Sigma 1} = (\sqrt{q_{\Sigma 1}} \omega_{y.з})^{-1}$, что обеспечивает настройку

системы на симметричный оптимум. Если при этом имеет место заметное влияние упругости 1-го рода, то на выходах РС можно включить полосно-задерживающие фильтры или ввести РС-коррекцию по скоростям двигателей, что не вызывает затруднений в системе с индивидуальными преобразователями.

Для поддержания соотношения заданных нагрузок двигателей секции могут быть применены дополнительные связи, показанные на рис. 1, в штрихпунктиром, с коэффициентами передачи $K_{с1i}$ и $K_{с1j}$ [Л. 6].

Предложенные рекомендации по оптимизации многосвязной автоматической системы регулирования были апробированы при моделировании на АВМ двухдвигательного ЭП секции «в общей одежде» быстроходной машины. Схема набора соответствовала НСС рис. 1, в. Исследование динамики ЭП проводилось на верхней и нижней рабочей скоростях при диапазоне регулирования 1–2,5. На рис. 3, б показаны осциллограммы переходных процессов скоростей двигателей при ступенчатых управляющем $v_y = 0,15\%$ и возмущающем $\mu_{с.01} = \mu_{с.02} = 10\%$ воздействиях на нижней скорости ЭП. Общий вид переходных процессов соответствует настройке на симметричный оптимум при достаточном быстродействии системы и подавлении упругих колебаний.

Вывод. При применении разработанных рекомендаций по построению и оптимизации многодвигательные ЭП как с общим, так и с индивидуальными вентилями преобразова-

телями обеспечивают заданное по технологическим условиям качество динамики систем регулирования. Вместе с тем система с индивидуальными преобразователями имеет большие возможности для борьбы с упругими колебаниями 1-го и 2-го рода. Ее применение целесообразно для мощных ЭП, в особенности в случаях значительного влияния упругих связей на динамику системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. — М.: Энергия, 1979.
2. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. — М.: Энергия, 1971.
3. Дружинин Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. — М.: Металлургия, 1975.
4. Шестаков В. М. Автоматизированные электроприводы бумаго- и картоноделательных машин. — М.: Лесная промышленность, 1978.
5. Brandenburg G. Ein mathematisches Modell für durchlaufende elastische Stoffbahn in einem System angetriebener, umschlungener Walzen. — Regelungstechnik und Prozess — Datenverarbeitung, 1973, Bd 21, H. 3, 4, 5.
6. Шестаков В. М., Далидович Л. В. Коррекция динамики взаимосвязанных электроприводов с упругими механическими передачами. — ЭП. Электропривод, 1979, вып. 8 (79). [31.01.80]



УДК 62—83:621.314.1.016.35

Устойчивость замкнутой системы с тиристорным широтно-импульсным преобразователем в режиме прерывистого тока

ШИПИЛЛО В. П., доктор техн. наук, ЧИКОТИЛО И. И.

Харьковский политехнический институт

В [Л. 1] рассмотрена методика анализа устойчивости на основной субгармонике замкнутой системы с тиристорным широтно-импульсным преобразователем (ШИП), основанная на представлении ШИП при малых отклонениях как звена амплитудно-импульсной модуляции с учетом фактора пульсаций. Анализ был ограничен режимом непрерывного тока преобразователя.

В ряде случаев тиристорный ШИП работает на цепь нагрузки с источником встречной э. д. с. (двигательная нагрузка, зарядное устройство и т. п.) (рис. 1, а). Если при этом э. д. с. E в цепи нагрузки не превышает среднего значения напряжения преобразователя, определяемого амплитудой выходного импульса U и его относительной длительностью γ , т. е.

$$E < U\gamma, \quad (1)$$

то полученные в [Л. 1] соотношения справедливы и для нагрузки с э. д. с. При нарушении неравенства (1) наблюдается режим прерывистого тока, иллюстрируемый рис. 1, б.

В статье рассматриваются внешние характеристики ШИП в режиме прерывистого тока, импульсная модель преобразователя для малых отклонений, соотношения для фактора пульсаций и методика определения границы устойчивости замкнутой системы к автоколебаниям на основной субгармонике. В качестве базовой схемы рассматривается однополярный ШИП с аперiodической нагрузкой, имеющей источник э. д. с.

Внешние характеристики ШИП в режиме прерывистого тока. При анализе режима прерывистого тока ШИП вначале целесообразно воспользоваться простой аппроксимацией, основанной на пренебрежении активным падением напряжения в цепи нагрузки по сравнению с э. д. с. самоиндукции $Ri \ll \ll L \frac{di}{dt}$ ввиду малости активного сопротивления и тока

в этом режиме. В заключение раздела будет дана методика строгого учета конечного значения Ri и его влияния на внешние характеристики.

При кусочно-линейной аппроксимации тока (рис. 1, б) его амплитудное значение определяется соотношением

$$i_m = \frac{U - E}{L} \gamma T, \quad (2)$$

где L — индуктивность нагрузки; T — период дискретности преобразователя.

С учетом времени спада тока нагрузки $\bar{t}_{сн} = i_m L / E$ суммарная относительная продолжительность протекания тока

$$\lambda = \gamma + \bar{t}_{сн} \frac{U}{E} \gamma. \quad (3)$$

Условие $\lambda > 1$ равноценно неравенству (1).

Среднее значение тока нагрузки за период

$$I_d = \frac{i_m}{2} \lambda = \frac{U - E}{2L} T \lambda \gamma E. \quad (4)$$

На границе прерывистого и непрерывного режимов $\lambda = 1$, $U\gamma = E$ и тогда

$$\left. \begin{aligned} I_{dгр} &= \frac{U - E}{2L} \gamma T = \frac{U(1 - \gamma)}{2L} \gamma T; \\ U_{dгр} &= U\gamma \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

или в относительных единицах

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_{dгр} &= (1 - \gamma) \gamma; \\ \bar{U}_{dгр} &= \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\bar{U}_{dгр} = U_{dгр} / U$; $\bar{I}_{dгр} = \frac{I_{dгр}}{UT/2L}$.

Исключив γ из (6), получим в относительных единицах уравнение границы прерывистого и непрерывного режимов тиристорного ШИП:

$$I_{dгр} = (1 - \bar{U}_{dгр}) \bar{U}_{dгр}, \quad (7)$$

соответствующее в плоскости выходных координат \bar{U}_d и \bar{I}_d параболе (рис. 2).

Внешние характеристики ШИП в непрерывном режиме при принятых допущениях располагаются параллельно оси токов \bar{I}_d и однозначно определяют относительную продолжительность выходных импульсов γ . В режиме прерывистых токов зависимость между \bar{U}_d и \bar{I}_d носит нелинейный характер

и оказывается функционально связанной как с γ , так и с величиной э. д. с. E . В этом режиме среднее значение выходного напряжения U_d равно E :

$$U_d = E = U\gamma/\lambda \text{ или } U_d = \bar{E} = \gamma/\lambda. \quad (8)$$

Для анализа нелинейной зависимости между U_d и I_d воспользуемся понятием фиктивного сопротивления преобразователя

$$R_\Phi = -\frac{dU_d}{dI_d} = -\frac{dU_d/d\lambda}{dI_d/d\lambda}. \quad (9)$$

Выполнив операции дифференцирования по параметру λ с учетом (3) и (8), окончательно получим:

$$R_\Phi = 2L/T\lambda^2; \quad \bar{R}_\Phi = 1/\lambda^2, \quad (10)$$

где за базовое значение принимается величина $R_{\Phi.б} = 2L/T$.

При принятых допущениях внешние характеристики имеют специфический характер в двух режимах: при $I_d = 0$ и при $\lambda \rightarrow 1$, т. е. при подходе слева к границе прерывистого и непрерывного режимов. Из (4) видно, что $I_d = 0$ и $U_d = 1$ только при $\lambda = \gamma$, и в этом случае $R_\Phi = 1/\gamma^2$, т. е. наклон касательной к внешней характеристике в точке $U_d = 1, I_d = 0$ определяется величиной γ . В граничном режиме наклон касательной к внешней характеристике определяется выражением (10) при $\lambda \rightarrow 1$ и равен $\bar{R}_\Phi = 1$, т. е. внешние характеристики ШИП на границе прерывистого и непрерывного режимов претерпевают излом.

В тех случаях, когда в цепи нагрузки тиристорного ШИП допускаются большие пульсации тока (например, при работе на двигатель с гладким якорем), необходим учет падения напряжения на активном сопротивлении цепи нагрузки. При этом в отличие от диаграммы, показанной на рис. 1, б, ток изменяется не по линейному, а по апериодическому закону, вследствие чего связь между длительностью протекания тока λ и параметрами цепи нагрузки будет отличаться от (8). Вводя постоянную времени цепи нагрузки $T_0 = L/R$, получаем амплитудное значение тока:

$$i_m = \frac{U - E}{R} (1 - e^{-\gamma T/T_0}). \quad (11)$$

На участке спадания ток нагрузки изменяется по закону

$$i(t) = i_m e^{-t/T_0} - \frac{E}{R} (1 - e^{-t/T_0}). \quad (12)$$

Из (12) с учетом того, что при $t = (\lambda - \gamma)T$ ток нагрузки равен нулю, получим выражение, связывающее относительную величину э. д. с. E с относительной длительностью протекания тока λ :

$$\bar{E} = \frac{e^{\gamma T/T_0} - 1}{e^{\lambda T/T_0} - 1}. \quad (13)$$

Среднее значение выходного напряжения при апериодической нагрузке определяется соотношением

$$U_d = \gamma + (1 - \lambda) \bar{E} = \gamma + (1 - \lambda) \frac{e^{\gamma T/T_0} - 1}{e^{\lambda T/T_0} - 1}, \quad (14)$$

а среднее значение выходного тока

$$\bar{I}_d = \gamma - \lambda \bar{E} = \gamma - \lambda \frac{e^{\gamma T/T_0} - 1}{e^{\lambda T/T_0} - 1}. \quad (15)$$

При $R \rightarrow 0$ выражение (14) совпадает с (8), т. е. это равенство справедливо при любых T_0 . В отличие от этого равенство (15) справедливо для всех значений T_0 , кроме $T_0 \rightarrow \infty$. Граница прерывистого и непрерывного режимов преобразователя при апериодической нагрузке соответствует $\lambda = 1$ и определяется соотношениями

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_{dгр} &= \gamma; \\ \bar{I}_{dгр} &= \gamma - \frac{e^{\gamma T/T_0} - 1}{e^{\lambda T/T_0} - 1} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

показанными для различных постоянных T_0 на рис. 2 сплошными линиями. Здесь же приведены рассчитанные согласно (14) и (15) внешние характеристики преобразователя в режиме прерывистого тока нагрузки, из рассмотрения которых видно, что на границе прерывистого и непрерывного режимов крутизна внешних характеристик изменяется скачком.

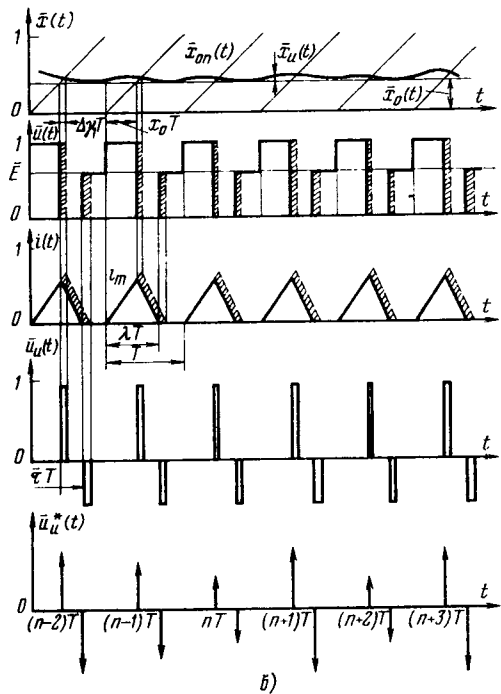
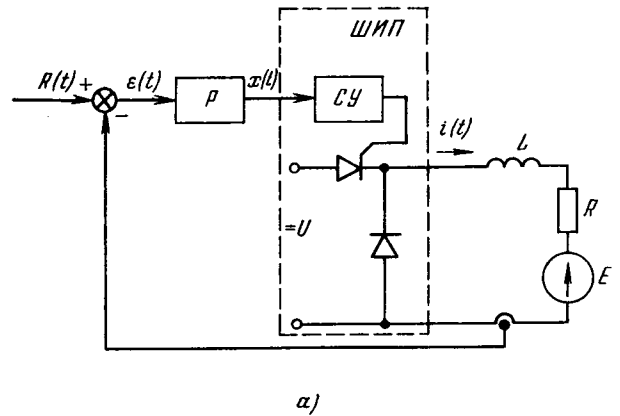


Рис. 1. Широтно-импульсный преобразователь постоянного тока.

а — блок-схема замкнутой системы с ШИП (P — регулятор, $СУ$ — система управления, U — источник питания, E — источник встречной э. д. с.); б — диаграммы сигналов в прерывистом режиме.

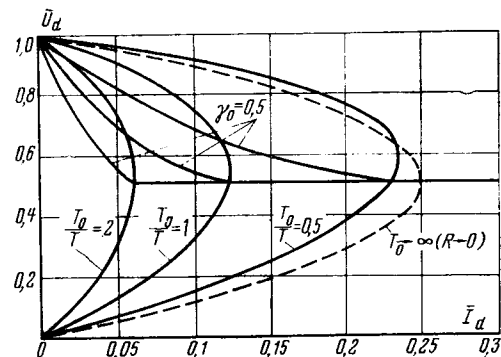


Рис. 2. Внешние характеристики ШИП.

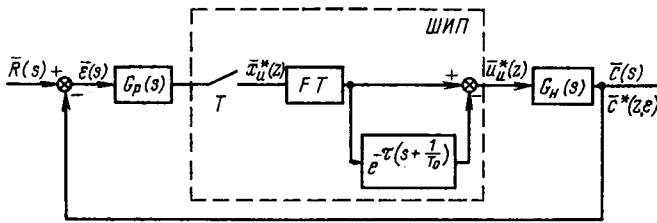


Рис. 3. Импульсная модель замкнутой системы с ШИП.

Импульсная модель замкнутой системы с ШИП в режиме прерывистого тока. Временные диаграммы работы ШИП в динамическом режиме приведены на рис. 1, б. Вводя, как и в [Л. 1] относительные значения входной $\bar{x}(t)$ и выходной $\bar{u}(t)$ координат и разделяя их на симметричные $\bar{x}_c(t)$, $\bar{u}_c(t)$ и импульсные (информационные) $\bar{x}_n(t)$ и $\bar{u}_n(t)$ составляющие, можно получить составляющую $\bar{u}_n(t)$ в виде последовательности положительных $\bar{u}_n^+(t)$ и отрицательных $\bar{u}_n^-(t)$ импульсов, сдвинутых во времени на переменную величину $\tau = (\lambda - \gamma)T$. При наличии в цепи нагрузки аperiodического звена с постоянной времени T_0 в общем случае площади положительного и отрицательного импульсов не равны друг другу. В относительных единицах при $\Delta\gamma_i \rightarrow 0$ импульсы $\bar{u}_n(t)$ могут быть аппроксимированы δ -функциями, модулированными импульсной составляющей входного сигнала $\bar{x}_n(t)$, причем при единичной положительной δ -функции отрицательная δ -функция имеет амплитуду в e^{τ/T_0} раз меньшую вследствие аperiodического затухания.

Симметричная составляющая выходного напряжения $\bar{u}_c(t)$ вызывает изменение динамического коэффициента усиления по замкнутому контуру, что учитывается фактором пульсации F . Предложенная аппроксимация и рассмотрение ШИП как звена с единичным коэффициентом передачи (коэффициент передачи реального преобразователя учитывается в приведенной к нему передаточной функции системы автоматического регулирования), позволяют прийти к структурной схеме рис. 3, содержащей идеальный амплитудно-импульсный модулятор и звено запаздывания. В частном случае интегрирующего звена в нагрузке при $T_0 \rightarrow \infty$ ($R \rightarrow 0$) площади положительной и отрицательной δ -функций равны, при этом передаточная функция звена запаздывания определяется как $e^{-\tau s}$. Тактовые моменты $[nT]$, как и при рассмотрении непрерывного режима, соответствуют моментам окончания реальных импульсов ШИП.

Границы устойчивости замкнутой системы с ШИП в режиме прерывистых токов. В устойчивой замкнутой системе с ШИП корни характеристического уравнения

$$1 + z^{-1}FTW_{п.н}^*(z, 1) = 0 \quad (17)$$

должны находиться внутри круга единичного радиуса с центром в начале координат z -плоскости. Приведенная передаточная функция для контура прохождения импульсной составляющей при аperiodической нагрузке имеет вид:

$$\begin{aligned} W_{п.н}(s) &= W_n(s) \left[1 - e^{-\tau \left(s + \frac{1}{T_0} \right)} \right] = \\ &= W_n(s) - e^{-\tau \left(s + \frac{1}{T_0} \right)} W_n(s). \end{aligned} \quad (18)$$

Так как время запаздывания τ не превосходит периода дискретности T преобразователя, то модифицированное z -преобразование $W_{п.н}(s)$ определяется выражением [Л. 2]:

$$\begin{aligned} W_{п.н}^*(z, \epsilon) &= \\ &= \begin{cases} W_n^*(z, \epsilon) - z^{-1}e^{-\tau/T}W_n^*(z, 1 + \epsilon - \bar{\tau}), & 0 \leq \epsilon \leq \bar{\tau}; \\ W_n^*(z, \epsilon) - e^{-\tau/T}W_n^*(z, \epsilon - \bar{\tau}), & \bar{\tau} \leq \epsilon \leq 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

где $\bar{\tau} = \tau/T = \lambda - \gamma$.

Условие устойчивости замкнутой системы с тиристорным ШИП в режиме прерывистого тока с учетом (18) и (19) приводится к виду

$$\{1 + z^{-1}FTW_{п.н}^*(z, 1)\}_{z=-1} > 0 \quad (20)$$

или

$$FTW_{п.н}^*(-1, 1) < 1.$$

Определим условия устойчивости к автоколебаниям на основной субгармонике при аperiodической нагрузке ШИП и единичной отрицательной обратной связи при различных передаточных функциях регулятора.

Одной из особенностей замкнутых систем с тиристорными ШИП является возможность реализации в них переходных процессов конечной длительности, принципиально заканчивающихся за конечное число интервалов дискретности преобразователя, и реализация таких процессов соответствует системам, оптимальным по быстродействию. Для получения процессов конечной длительности необходимо совмещение всех корней характеристического уравнения (17) с началом координат z -плоскости.

Пропорциональный регулятор. Передаточная функция регулятора $G_p(s) = K$, передаточная функция приведенной к ШИП системы

$$W_n(s) = \frac{K}{T_0 s + 1}, \quad (21)$$

а ее модифицированное z -преобразование при $\bar{\tau} \leq \epsilon \leq 1$ по (19) имеем вид

$$\begin{aligned} W_{п.н}^*(z, \epsilon) &= W_n^*(z, \epsilon) - e^{-\tau/T}W_n^*(z, \epsilon - \bar{\tau}) = \\ &= \frac{K}{T_0} \frac{ze^{-\epsilon T/T_0}}{z - e^{-T/T_0}} - e^{-\tau/T} \frac{K}{T_0} \frac{ze^{-(\epsilon - \bar{\tau})T/T_0}}{z - e^{-T/T_0}} = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Из (20) с учетом (22) следует, что при любом K система с пропорциональным регулятором в режиме прерывистого тока устойчива, а сам пропорциональный регулятор не оказывает влияния на процесс регулирования, т. е. обратная связь фактически оказывается разомкнутой. Действительно, сигнал рассогласования изменяется лишь внутри такта, а к началу следующего такта восстанавливается до значения сигнала задания, так как сигнал обратной связи отсутствует. Для системы с пропорциональным регулятором в режиме прерывистого тока из (20) с учетом (22) следует, что процесс конечной длительности в такой системе устанавливается с первого такта при любом значении коэффициента усиления регулятора.

Интегральный регулятор. Астатический регулятор такого типа имеет передаточную функцию $G_p(s) = 1/T_1 s$, а приведенная к ШИП передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$W_n(s) = \frac{1}{T_1 s (T_0 s + 1)}. \quad (23)$$

Подвергая $W_n(s)$ модифицированному z -преобразованию согласно (19)

$$\begin{aligned} W_{п.н}^*(z, \epsilon) &= \frac{1}{T_1} \frac{z}{z-1} - \frac{1}{T_1} \frac{ze^{-\epsilon T/T_0}}{z - e^{-T/T_0}}; \\ W_{п.н}^*(z, \epsilon - \bar{\tau}) &= \frac{1}{T_1} \frac{z}{z-1} - \frac{1}{T_1} \frac{ze^{-(\epsilon - \bar{\tau})T/T_0}}{z - e^{-T/T_0}}, \end{aligned}$$

находим

$$W_{п.н}^*(z, \epsilon) = \frac{1}{T_1} \frac{z}{z-1} (1 - e^{-\tau/T_0}). \quad (24)$$

Подставив полученное выражение в (20), найдем условие устойчивости системы с интегральным регулятором в прерывистом режиме

$$\frac{FT}{T_1} < \frac{2}{1 - e^{-\tau/T_0}}. \quad (25)$$

Для нахождения фактора пульсаций F воспользуемся общим выражением:

$$F = \frac{1}{1 + T \left[\frac{dx_c(t)}{dt} \right]_{t=nT-0}}, \quad (26)$$

где $\left[\frac{dx_c(t)}{dt} \right]_{t=nT-0}$ — значение производной слева сигнала управления в установившемся режиме при заданной относитель-

ной продолжительности выходных импульсов $\bar{u}(t)$ в точке равновесия системы $\gamma = \frac{t_{и}}{T}$ и длительности протекания тока в нагрузке λ , с учетом которого для данного регулятора

$$F = \frac{1}{1 + \frac{T}{T_1} \left[\frac{e^{\lambda T/T_0} (1 - e^{-\gamma T/T_0})}{e^{\lambda T/T_0} - 1} \rightarrow \frac{-(1-\lambda)(e^{\gamma T/T_0} - 1) - \gamma}{-} \right]} \quad (27)$$

Подставляя (27) в (25), после преобразований получаем аналитическое выражение границы устойчивости системы к автоколебаниям на основной субгармонике:

$$\frac{T}{T_1} < \frac{2}{1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}} \times \frac{1}{1 - \frac{2}{1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}} \left[\frac{e^{\lambda T/T_0} (1 - e^{-\gamma T/T_0})}{e^{\lambda T/T_0} - 1} \rightarrow \frac{-(1-\lambda)(e^{\gamma T/T_0} - 1) - \gamma}{-} \right]} \quad (28)$$

Рассчитанные согласно (28) области устойчивости для фиксированных значений λ показаны на рис. 4. Из приведенных графиков видно, что в подавляющей части рабочего диапазона ШИП режим непрерывного тока более критичен к возникновению субгармонических автоколебаний по сравнению с режимом прерывистого тока. Исключение составляет лишь область при $\gamma < 0,3$ и $\lambda > 0,8$, в которой при прерывистом токе нагрузки могут возникнуть автоколебания на основной субгармонике при меньших значениях T/T_1 , чем в непрерывном режиме.

Специфической особенностью замкнутой системы с тиристорным ШИП при наличии интегрального регулятора в режиме прерывистого тока является возможность реализации переходных процессов конечной длительности, что принципиально невозможно в такой системе в непрерывном режиме.

Из (17) с учетом (24) условие процесса конечной длительности может быть получено в виде

$$\left(\frac{FT}{T_1}\right)_{\text{ПКД}} = \frac{1}{1 - e^{-\tau/T_0}}, \quad (29)$$

откуда следует, что запас устойчивости системы при ее настройке на оптимальное быстродействие в общем случае (без учета самовыравнивающего действия фактора пульсаций F) равен двум. Подставив в (29) значение F из (27), получим аналитическую зависимость контурного коэффициента усиления быстродействующей системы с интегральным регулятором в режиме прерывистого тока:

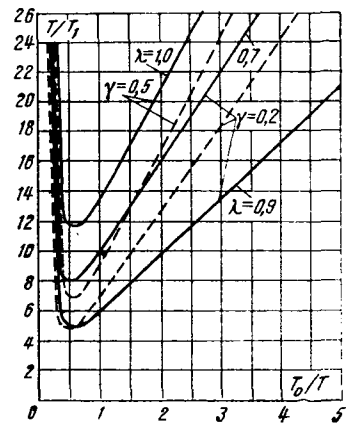
$$\left(\frac{T}{T_1}\right)_{\text{ПКД}} = \frac{1}{1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}} \times \frac{1}{1 - \frac{1}{1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}} \left[\frac{e^{\lambda T/T_0} (1 - e^{-\gamma T/T_0})}{e^{\lambda T/T_0} - 1} \rightarrow \frac{-(1-\lambda)(e^{\gamma T/T_0} - 1) - \gamma}{-} \right]} \quad (30)$$

Расчеты, проведенные по (30), показывают, что система обладает минимальным запасом устойчивости при малых γ и больших λ , однако этот запас всегда больше двухкратного. По мере увеличения γ запас устойчивости увеличивается, что объясняется ярко выраженным самовыравнивающим действием фактора пульсаций.

Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор. Передаточная функция регулятора $G_p(s) = (T_2 s + 1)/T_1 s$, приведенная передаточная функция замкнутой системы

$$W_n(s) = \frac{T_2 s + 1}{T_1 s (T_0 s + 1)} \quad (31)$$

Рис. 4. Диаграммы областей устойчивости замкнутой системы с ШИП.
— в прерывистом режиме; - - - - в непрерывном режиме при $\gamma=0,5$ и $\gamma=0,2$.



или

$$W_n(s) = \frac{1}{T_1 s} + \frac{1}{T_1} \left(\frac{T_2}{T_0} - 1\right) \frac{1}{s + 1/T_0} \quad (32)$$

Модифицированное z-преобразование приведенной передаточной функции согласно (19) для $\tau \leq \epsilon \leq 1$:

$$W_n^*(z, \epsilon) = \frac{1}{T_1} \frac{z}{z-1} + \frac{1}{T_1} \left(\frac{T_2}{T_0} - 1\right) \frac{ze^{-\epsilon T/T_0}}{z - e^{-T/T_0}}$$

$$W_n^*(z, \epsilon - \bar{\tau}) = \frac{1}{T_1} \frac{z}{z-1} + \frac{1}{T_1} \left(\frac{T_2}{T_0} - 1\right) \frac{ze^{-(\epsilon-\bar{\tau})T/T_0}}{z - e^{-T/T_0}}$$

откуда согласно (22)

$$W_{\text{п.и}}^*(z, \epsilon) = \frac{1}{T_1} \frac{z}{z-1} (1 - e^{-\tau/T_0}), \quad (33)$$

что совпадает с (24) для случая системы с интегральным регулятором. Это соответствует тому, что пропорциональная часть ПИ-регулятора не влияет непосредственно на общие соотношения границы устойчивости и условия реализации переходных процессов конечной длительности, которые совпадают по форме с (25) и (29).

Влияние пропорционального канала регулятора сказывается через фактор пульсаций F , значение которого может быть найдено по соотношению (26) с учетом производной

$$\left[\frac{dx_c(t)}{dt}\right]_{t=nT-0} \text{ в виде}$$

$$F^{-1} = 1 + \frac{T}{T_1} \left[\frac{\lambda (e^{\gamma T/T_0} - 1) + (e^{\lambda T/T_0} - e^{-\gamma T/T_0})}{e^{\lambda T/T_0} - 1} \rightarrow \frac{-(1-\lambda)(e^{\gamma T/T_0} - 1) + \left(1 + \frac{T_2}{T_0} e^{-\gamma T/T_0}\right) + 1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}}{-} \right] \quad (34)$$

Подставив полученное соотношение (34) в условие устойчивости (25) системы в режиме прерывистого тока, после соответствующих преобразований получим:

$$\frac{T}{T_1} < \frac{2}{1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}} \times \frac{1}{1 - \frac{2}{1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}} \left[\frac{\lambda (e^{\gamma T/T_0} - 1) + (e^{\lambda T/T_0} - e^{-\gamma T/T_0})}{e^{\lambda T/T_0} - 1} \rightarrow \frac{-(1-\lambda)(e^{\gamma T/T_0} - 1) + \left(1 + \frac{T_2}{T_0} e^{-\gamma T/T_0}\right) + 1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}}{-} \right]} \quad (35)$$

При настройке постоянной времени T_2 по соотношению для реализации переходных процессов конечной длительности в непрерывном режиме

$$T_2 = T_0 (1 - e^{-T/T_0})$$

расчеты по (35) показывают, что замкнутая система управления тиристорным ШИП с ПИ-регулятором в режиме прерывистого тока во всем диапазоне регулирования является устойчивой к автоколебаниям на основной субгармонике.

Условие получения процессов конечной длительности в системе с ПИ-регулятором в соответствии с (29) в этом случае определяется выражением:

$$\left(\frac{T}{T_1}\right)_{ПКД} = \frac{1}{1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}} \times$$

$$\times \frac{1}{1 - \frac{1}{1 - e^{-(\lambda-\gamma)T/T_0}} \left[\frac{\lambda(e^{\gamma T/T_0} - 1) + (e^{\lambda T/T_0} - e^{\gamma T/T_0})}{e^{\lambda T/T_0} - 1} \right]}$$

$$\rightarrow \frac{1}{-e^{\gamma T/T_0} \left(1 + \frac{T_2}{T_0} e^{-\gamma T/T_0}\right) + 1 - e^{(\lambda-\gamma)T/T_0}} - \gamma \quad (36)$$

Расчеты по (36) показывают, что от постоянной времени пропорциональной части регулятора T_2 зависят выходные параметры системы только на первом такте переходного процесса, при этом со второго такта эти параметры принимают установившееся значение.



УДК 621.315.615

К выбору оптимальных форм изоляторов высоковольтных импульсных устройств с водяной изоляцией

УШАКОВ В. Я., доктор техн. наук, МУРАТОВ В. М., канд. техн. наук,
ЛОПАТИН В. В., канд. физ.-мат. наук, КАПИШНИКОВ Н. К., КУХТА В. Р.,
ШЕМЯКИН А. И., инженеры

НИИ высоких напряжений при Томском политехническом институте

Очищенная вода как изоляция емкостных накопителей энергии мощных импульсных устройств [Л. 1] обладает рядом преимуществ перед другими диэлектриками: высокая диэлектрическая проницаемость, химическая стабильность в электрическом поле и при воздействии искры, негорючесть, дешевизна и др. В то же время ее высокая диэлектрическая проницаемость (ϵ) и электропроводность (γ) создают ряд специфических трудностей в проектировании и эксплуатации изоляционных конструкций, содержащих воду в качестве основной изоляции, и твердые диэлектрики — в качестве несущих элементов. Значительные различия значений ϵ и γ воды и твердых изоляционных материалов ведут к сильному искажению поля на границе между твердым диэлектриком и водой и, как следствие, к низким значениям разрядных напряжений. Попытки перенести традиционные приемы конструирования маслонаполненных аппаратов на устройства с водяной изоляцией приводят к конструкциям с недопустимо низкой надежностью либо с неоправданно низкими рабочими градиентами. Разработчики ищут способы повышения разрядных напряжений высоковольтных конструкций с водяной изоляцией в основном за счет оптимизации их форм. С этой целью применялся метод математического моделирования полей для определения оптимальных форм некоторых изоляционных элементов в накопителе с водяной изоляцией, в частности, разделительных диафрагм. Однако такое моделирование не позволило заметно повысить надежность работы элементов из твердых диэлектриков.

Кроме этого, предпринимались неоднократные попытки найти оптимальные формы изоляторов методом физического моделирования (с применением электролитических ванн). Однако физическое моделирование дает весьма приближенную картину поля из-за значительного различия ϵ и γ твердого диэлектрика и воды. Поэтому, несмотря на большую трудоемкость поиска оптимальных форм изоляторов методом непосредственного измерения разрядных градиентов по поверхности, его следует признать на сегодня наиболее достоверным. При этом измерения желательно выполнять в условиях, вос-

Таким образом, из сравнения границ устойчивости системы с ШИП в непрерывном [Л. 1] и прерывистом режимах тока нагрузки следует:

1. При переходе через границу прерывистого и непрерывного режимов область устойчивости к автоколебаниям на основной субгармонике изменяется скачком, вызванным изменением структуры замкнутой системы авторегулирования тиристорным ШИП.

2. Система авторегулирования с ШИП и пропорциональным регулятором в режиме прерывистого тока эквивалентна разомкнутой системе с конечной памятью.

3. Применение интегрального регулятора позволяет реализовать в системе с ШИП в прерывистом режиме переходные процессы конечной длительности, которые принципиально невозможно получить в такой же системе в непрерывном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шипило В. П., Чикотило И. И. Устойчивость замкнутой системы с широтно-импульсным преобразователем. — Электричество, 1978, № 1, с. 50—53.
2. Кузин Л. Т. Расчет и проектирование дискретных систем управления. — М.: Машгиз, 1962. — 683 с.

[07.06.79]

производящих условия работы изоляции мощных высоковольтных импульсных устройств с водяной изоляцией. Опубликованные на сегодня исследования перекрытия изоляции в воде [Л. 2—4] выполнены, в основном, применительно к установкам электронимпульсной технологии.

Целью статьи являлось определение эффективности методов регулирования поля выбором конфигурации изоляторов и электродов и материала изоляторов, как способа повышения напряжения перекрытия в воде.

Исследовалось перекрытие в воде с $\rho = 2 \cdot 10^6$ Ом·см изоляторов различной формы из полиэтилена, капролона, оргстекла в однородном поле и в поле коаксиальных цилиндров. Эксперименты выполнены в емкостном накопителе энергии с волновым сопротивлением 4,6 Ом и рабочим напряжением до 1 МВ, подробно описанном в [Л. 5]. Исследуемые образцы помещались между электродами Роговского диаметром 12 см либо между коаксиальными цилиндрами формирующей линии (центральный электрод отрицательный). Форма и размеры образцов и электродов и соответствующие им значения разрядных напряжений ($U_{пер}$) и среднеквадратических отклонений (σ) для первого случая приведены в табл. 1, для второго в табл. 2.

При перекрытии в однородном поле напряжение на образце увеличивалось ступенями по 20—30 кВ, начиная с 60—70% ожидаемого $U_{пер}$. На каждой ступени подавался один импульс и разрядным напряжением считалась амплитуда импульса, вызвавшего перекрытие. В поле коаксиальных цилиндров эксперименты проводились при 100% вероятности разряда на фронте одиночного импульса напряжения с амплитудой, заведомо большей ожидаемого напряжения перекрытия образца. Последняя предварительно определялась на пробных образцах. Времена запаздывания разряда лежали в области $(0,9—1) \times 10^{-6}$ с. Если за это время не происходило перекрытия образца, осуществлялся срез импульса управляемым разрядником. Результаты обрабатывались методом наименьших квадратов по 10 значениям разрядных напряжений. Относительно малое количество измерений для каждого типа изолятора вызвано

Таблица 1

Форма изолятора и электродов

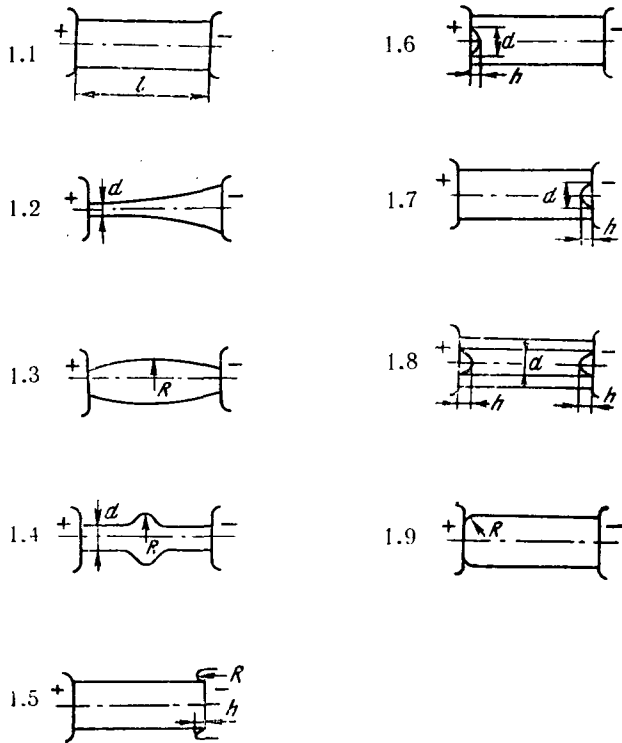
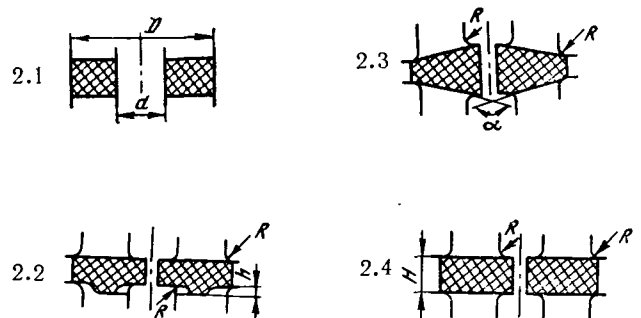


Таблица 2

Форма изолятора и электродов



тем, что вследствие больших габаритов образцов и сложности форм некоторых из них, их изготовление трудоемко и требует большого расхода материала; кроме того, поскольку эксперименты выполнялись не на моделях, а в реальном накопителе с водяной изоляцией, замена образцов требовала практически полной разборки линий.

Образцы вытачивались из блоков, их поверхности дополнительной обработке не подвергались. Контакт изоляторов с электродами осуществлялся тугой посадкой, как это делается в реальных установках с водяной изоляцией.

Для решения поставленной задачи были испытаны следующие типы изоляторов:

- 1) изоляторы, минимально искажающие поле, т. е. изоляторы с поверхностью, параллельной силовым линиям поля (1.1, 2.1);
- 2) изоляторы со сложной поверхностью, обеспечивающие нормальную к поверхности составляющую поля и увеличенную длину пути перекрытия (1.2, 1.3, 1.4, 2.2, 2.3);
- 3) изоляторы, у которых уменьшена напряженность поля в области контакта с электродом:
 - а) внешним экранированием (1.5, 2.2, 2.3, 2.4);
 - б) внутренним экранированием (1.6, 1.7, 1.8);
 - в) защитой края скруглением (1.9).

При выборе формы и размеров изоляторов и электродов учитывались также следующие ранее установленные закономерности импульсного электрического пробоя воды и перекрытия изоляции в воде.

1. Разряду в очищенной воде присущ ярко выраженный эффект полярности, поэтому искажение поля в области анода приводит к значительному уменьшению разрядного напряжения, тогда как при усилении поля у катода оно уменьшается незначительно (сравнение приводится со случаем однородного поля).

2. Разряд в жидкости при отсутствии в межэлектродном промежутке твердого диэлектрика всегда начинается с поверхности электродов.

3. Электрическая прочность диэлектриков, использованных для изготовления испытываемых изоляторов, выше прочности воды при временах воздействия напряжения около 1 мкс на 250%.

Исследования показывают, что разрядные градиенты по поверхности изоляторов простейших форм (1.1, 2.1) составляют 70—90% от средних пробивных напряженностей воды и по абсолютной величине уступают лишь изоляторам с внутренним экранированием (1.6).

Вынос максимальной напряженности поля в глубину промежутка на границу раздела «вода — твердый диэлектрик» (1.9, 1.3, 1.4, 2.2), несмотря на увеличение пути перекрытия, ведет к снижению разрядных градиентов по сравнению с изоляторами (1.1) и (2.1). Это можно объяснить тем, что при перераспределении поля наряду с тангенциальной составляющей появляется нормальная к поверхности составляющая поля, приходящая к увеличению напряженности на границе раздела сред за счет значительного различия диэлектрических проницаемостей воды и твердого диэлектрика. Для изоляторов (1.3) и (1.4) разряд начинается не с электродов, а с той точки на границе раздела, где наименьший радиус скругления (вблизи плоскости симметрии электродной системы). Разряд в дальнейшем развивается от этой точки по поверхности изолятора к катоду и аноду.

Уменьшение напряженности поля на поверхности изолятора в области его контакта с электродом применением экранирования или приданием кромке изолятора специальной формы не дало положительного эффекта. Наилучший результат был получен на изоляторах с внутренним экраном (1.6, 1.7, 1.8). Однако и в этом случае не достигнуто существенного увеличения напряженности перекрытия, так как при выносе области максимальной напряженности вглубь образца на границе раздела сред появляется составляющая поля, ослабляющая действие первого фактора. Поэтому увеличение напряжения $U_{пер}$ наблюдается до определенного заглубления электрода в тело изолятора. Дальнейшее увеличение заглубления усиливает влияние нормальной составляющей поля. Наиболее эффективно экранирование в области анода.

Из приведенных данных следует также, что напряжение перекрытия изоляторов из трех различных материалов примерно одинаковое. Лишь у полиэтиленовых изоляторов оно несколько меньше, чем у изоляторов из оргстекла и капролона. (Вследствие больших разбросов этот вывод обосновывается статистической обработкой результатов по критерию Вилькоксона). Такая закономерность может быть объяснена большим искажением поля изоляторами из полиэтилена, имеющего наименьшую диэлектрическую проницаемость.

Поскольку образцы (1.9) и (2.1), несмотря на простоту форм, показали высокие разрядные градиенты, для них были исследованы зависимости $U_{пер}$ от межэлектродного расстояния. Такая характеристика необходима для переноса результатов на изоляционные конструкции другого уровня напряжения.

Разрядные градиенты по поверхности цилиндрического изолятора (1.1) уменьшаются при увеличении межэлектродного расстояния (l) по закону, аппроксимируемому уравнением типа (рис. 1):

$$E_{пер} = Kl^{-1/3},$$

где $E_{пер}$ — средние разрядные градиенты по поверхности, кВ/см; K — постоянная, зависящая от материала изолятора и длительности импульса t_d . При $t_d = 10^{-6}$ с для полиэтилена $K = 250$, для капролона $K = 270$.

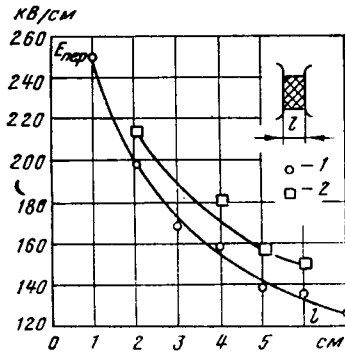


Рис. 1. Зависимость разрядных градиентов по поверхности полиэтиленовых (1) и капролоновых (2) цилиндрических изоляторов от их длины.

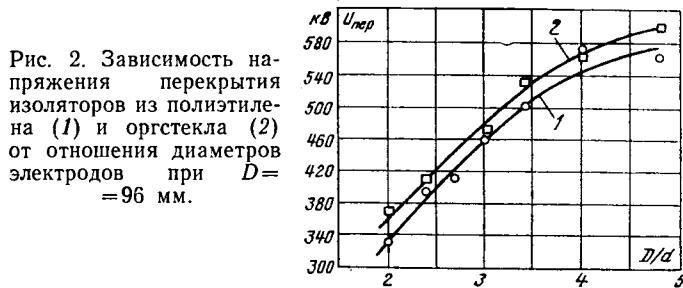


Рис. 2. Зависимость напряжения перекрытия изоляторов из полиэтилена (1) и оргстекла (2) от отношения диаметров электродов при $D = 96$ мм.

Аналогичные характеристики для изолятора (2.1) представлены в табл. 3.

В системе коаксиальных электродов напряженность $E_{пер}$ в большей мере, чем от межэлектродного расстояния, зависит от диаметра внутреннего электрода d . Увеличение d в 2,5 раза при одновременном уменьшении l в 1,5 раза ведет к увеличению $E_{пер}$ почти в 2 раза (рис. 2).

При перекрытии изоляторов (2.1) в ряде случаев разряд проходил в воде, не оставляя на поверхности изолятора видимых следов. При развитии разряда по поверхности изоляторов всех испытанных форм напряжение последующего перекрытия на 40—50% ниже, и на поверхности видны следы разряда как результат обугливания (полиэтилен, капролон) либо оплавления (оргстекло). Изоляторы из оргстекла и капролона при этом растрескивались.

Анализ полученных материалов и результатов [Л. 2—4, 6] показывает, что основные закономерности перекрытия диэлектриков в воде сохраняются при изменении условий эксперимента в широких пределах.

Выводы. 1. Регулирование поля, как способ повышения разрядных напряжений изоляционных конструкций, примени-

Таблица 3

l , см	D , см	d , см	$U_{пер}$, кВ
5,25	21	10,5	837
3,00	12	6,0	584
2,75	11	5,5	540
2,00	8	4,0	360

тельно к изоляторам, работающим в воде, является малоэффективным. Регулирование поля вызывает появление нормальной к поверхности изолятора составляющей электрического поля, снижающей напряжение перекрытия. Поэтому в большинстве случаев оптимальной формой изоляторов является простейшая (цилиндр, плоская шайба и т. п.), при которой поверхность изолятора параллельна силовым линиям поля.

2. Разрядные градиенты по поверхности изоляторов в воде в меньшей степени, чем в газах и неполярных жидкостях, зависят от свойств материала изоляторов и в значительной мере определяются электрической прочностью самой воды.

3. Выбор материала для изоляторов, работающих в воде, должен определяться механической прочностью, стойкостью поверхности к воздействию разрядного канала, электрической прочностью при сквозном пробое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В. П. Получение сильноточных пучков электронов. — ПТЭ, 1977, № 2.
2. Ушаков В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск: Изд-во ТГУ, 1975.
3. Дашук П. И., Емельянов А. С., Иванова Г. А. Скользящий разряд по поверхности твердых диэлектриков в воде. — Изв. вузов. Физика, 1968, № 2.
4. Куртенок Г. Е. Перекрытие твердых диэлектриков в воде в коаксиальной системе электродов на импульсном напряжении. — ЭОМ, 1973, № 6.
5. Установка для исследования разрядников с водяной изоляцией на 1 мВ/ Бабинцев В. С., Коротков М. Г., Муратов В. М., Ушаков В. Я. — В кн.: «Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков». — Новосибирск, 1976.
6. Импульсная электрическая прочность дистиллированной воды и минерального масла. Влияние поверхности твердого диэлектрика/ Вычужин Н. А., Калентьев Ю. П., Кучинский Г. С. и др. — В кн.: «Электрофизические характеристики канальной стадии разряда применительно к проблеме коммутации». — Караганда: Изд-во КПИ, 1976.

[05.12.78]

УДК 621.372.62.011.3

Синтез пассивных обратимых цепей с трансформаторными элементами

СИНЕВ В. С., канд. техн. наук

Наро-Фоминск

В процессе синтеза или преобразования пассивных обратимых многоконтурных цепей с заданными свойствами возникает необходимость решения различных частных задач: минимизации количества, суммарной установленной мощности, массы или стоимости элементов цепи, реализации отрицательных параметров или передаточных функций с отрицательными коэффициентами полиномов, преодоления каких-либо топологических ограничений. Эффективному решению перечисленных и подобных им задач может способствовать рациональное применение магнитной связи, осуществляемой специальными трансформаторами [Л. 1—3].

В общем случае синтезируемая или преобразуемая цепь может быть задана Z -матрицей функций комплексной частоты p . Каждая из функций разлагается на элементарные функции вида a , ap , a/p , $ap/(p+b)$, $ap/(p^2+\omega^2)$ и т. д. Совокупность функций одинакового типа, отличающихся друг от дру-

га только значением коэффициента a , образует матрицу подцепи соответствующего типа. Таким образом, первый этап синтеза многополюсника заключается в разложении матрицы цепи на матрицы подцепей [Л. 1]:

$$Z = \sum_{i=1}^s f_i(p) A_i, \quad (1)$$

где Z — исходная симметричная матрица комплексных сопротивлений порядка n ; $f_i(p)$ — элементарная функция комплексной частоты; A_i — симметричная вещественная матрица порядка n ; s — общее количество элементарных функций и подцепей соответствующего типа.

Второй этап синтеза — разложение симметричных вещественных матриц A на матрицы элементов цепи. Матрица элек-

трического элемента имеет только одинаковые коэффициенты, кроме нулевых. Коэффициенты матрицы трансформаторного элемента (ТЭ) могут быть разными, но ранг ее равен единице, как и электрического элемента [Л. 3]. Таким образом, второй этап синтеза заключается в нахождении разложения

$$A_i = \sum_{j=1}^N C_j, \quad (2)$$

где C_j — матрица ранга 1, описывающая один обобщенный (электрический или трансформаторный) элемент цепи; N — число обобщенных элементов i -й подцепи.

Процесс синтеза заканчивается тем, что элементы различных подцепей соединяются последовательно в каждой из ветвей всей цепи [Л. 1 и 2].

Условием физической реализуемости цепи является принадлежность всех вещественных матриц A к классу неотрицательных (т. е. все определители и главные миноры должны быть неотрицательными). В частном случае, при фиксированной частоте вместо p имеем мнимую единицу и число подцепей сокращается до двух — активной и реактивной, причем для последней указаный критерий физической реализуемости не является обязательным.

Статья посвящена способам выполнения второго этапа синтеза — разложения симметричных вещественных матриц на симметричные матрицы ранга 1. Характерные особенности возможных способов разложения удобно рассмотреть на простейшем примере синтеза, допустим, активной двухконтурной цепи (четыреполюсника), матрица сопротивлений которой в относительных единицах

$$A = \begin{vmatrix} 9 & 3 \\ 3 & 6 \end{vmatrix}.$$

Если цепь реализуется без применения взаимной индукции, возможно разложение простейшим способом:

$$A = \begin{vmatrix} 3 & 3 \\ 3 & 3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Схема полученной цепи из трех элементов показана на рис. 1,а. Следует заметить, что реализация с помощью только пассивных обратимых элементов без взаимной индукции возможна лишь в том случае, когда каждый из коэффициентов исходной матрицы не превышает по абсолютной величине коэффициент главной диагонали той же строки [Л. 2], иначе один из параметров оказывается отрицательным. Это ограничение отсутствует при использовании трансформаторных элементов цепи. Например, при выборе коэффициентов трансформации ТЭ по первой строке исходной матрицы [Л. 3] получим:

$$A = \begin{vmatrix} 9 & 3 \\ 3 & 1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 5 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Соответствующая схема приведена на рис. 1,б.

Можно также предложить способ разложения, основанный на выделении матрицы электрического элемента в общей ветви цепи таким образом, чтобы после вычитания ее из исходной остаточная матрица имела пропорциональные строки, т. е. описывала ТЭ:

$$C = A - B,$$

где $B = \begin{vmatrix} b & b \\ b & b \end{vmatrix}$ — матрица электрического элемента в общей ветви.

Коэффициенты матрицы C пропорциональны, поэтому

$$\frac{a_{11} - b}{a_{21} - b} = \frac{a_{12} - b}{a_{22} - b},$$

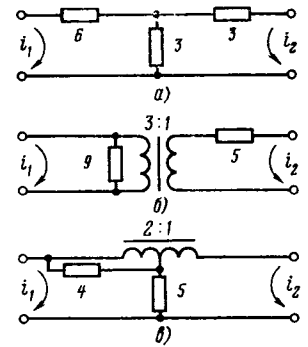
откуда получаем выражение для сопротивления электрического элемента, общего для двух контуров:

$$b = \frac{\Delta}{a_{11} + a_{22} - a_{12} - a_{21}}, \quad (5)$$

где Δ — определитель матрицы A .

Рис. 1. Эквивалентные схемы двухконтурной цепи.

а — без взаимной индукции; б — при выборе ТЭ по строке исходной матрицы; в — при наличии ТЭ и электрического элемента в общей ветви.



Для данного примера

$$b = \frac{9 \cdot 6 - 3 \cdot 3}{9 + 6 - 3 - 3} = 5;$$

$$A = \begin{vmatrix} 5 & 5 \\ 5 & 5 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 4 & -2 \\ -2 & 1 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Схема цепи, соответствующей разложению (6), изображена на рис. 1,в. Обе схемы с ТЭ (рис. 1,б и в) равноценны по количеству и типу элементов, но может оказаться, что в конкретном диапазоне режимов одна из них имеет преимущество по суммарной установленной мощности элементов. Например, можно ожидать, что вторая цепь имеет меньшую мощность элементов, поскольку трансформатор первой цепи должен быть рассчитан на всю передаваемую четырехполюсником мощность.

Рассмотрим методы синтеза цепей с любым числом контуров, основанные на двух способах разложения матриц с применением ТЭ.

Выбор ТЭ по строкам исходных матриц. При этом способе относительно числа витков ТЭ приравниваются коэффициентам выбранной строки исходной матрицы, а остальные коэффициенты матрицы ТЭ определяются пропорциональным пересчетом [Л. 3]. Матрица ТЭ вычитается из исходной и полученная разность, имеющая меньший порядок по сравнению с исходной, служит для аналогичного выбора второго ТЭ. Эта операция соответствует известному алгоритму исключения одного неизвестного в системе уравнений [Л. 2]:

$$A^{(n-1)} = A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21}, \quad (7)$$

где $A^{(n-1)}$ — остаточная матрица пониженного порядка; A_{11} — квадратная подматрица исходной матрицы без выбранной строки и соответствующего столбца; A_{22} — подматрица 1-го порядка — коэффициент главной диагонали выбранной строки исходной матрицы; A_{12} — подматрица-столбец, соответствующая выбранной строке без коэффициента главной диагонали; A_{21} — подматрица-строка — выбранная строка без коэффициента главной диагонали.

Операция (7) повторяется до получения матрицы порядка 1, описывающей электрический элемент необщей ветви. Если ранг исходной матрицы $r < n$, т. е. в исходной системе имеются линейно зависимые уравнения, то одна операция (7) понижает порядок предыдущей матрицы более чем на единицу, в результате количество обобщенных элементов цепи равно рангу исходной матрицы. Согласно известной лемме [Л. 4], это число является минимальным количеством симметричных вещественных матриц ранга 1, на которые можно разложить исходную матрицу. Отсюда вытекает, что строчный выбор ТЭ ведет к минимально возможному количеству элементов синтезируемой цепи. В общем случае каждый ТЭ состоит из электрического элемента, сопротивление которого трансформируется, и связывающего трансформатора, поэтому минимальное количество конструктивных элементов цепи

$$N_k = r + N_T, \quad (8)$$

где N_T — количество связывающих трансформаторов; для индуктивной матрицы оно равно нулю, так как ТЭ реализуется одним конструктивным элементом — совершенным трансформатором; для других типов цепей оно равно количеству слагаемых матриц с неравными коэффициентами, т. е. в любом случае меньше n .

Для сравнения напомним, что в цепи без взаимной индукции минимально необходимое количество элементов $N_0 = \frac{n(n+1)}{2}$, так что при $n > 2$ применение ТЭ ведет к со-

кращению количества конструктивных элементов цепи тем в большей степени, чем больше число контуров цепи n .

Не менее важным свойством разложения по строкам служит то обстоятельство, что все слагаемые матрицы и их суммы в любом неполном сочетании неотрицательны, если неотрицательна исходная матрица. Поскольку это свойство матрицы совпадает с критерием физической реализуемости цепи, можно заключить, что при вычитании из физически реализуемой матрицы цепи матрицы ранга 1 с одинаковой строкой полученная матрица оставшейся цепи также является физически реализуемой. Свойство свидетельствует об универсальности строчного способа разложения матриц при синтезе цепей.

Выделение матриц электрических элементов в общих ветвях. Если условием задачи в синтезируемой цепи допускается наличие ветвей, общих для всех или нескольких контуров, можно рекомендовать выбор матриц общих электрических элементов, ведущий в ряде случаев к сокращению количества трансформаторов, упрощению схем или снижению суммарной установленной мощности элементов цепи. Пусть m контуров цепи не требуют электрической изоляции друг от друга и позволяют иметь общую ветвь. В исходной матрице A порядка m можно выбрать неглавный минор 2-го порядка. Для определенности будем считать, что выбранный минор расположен в правом верхнем углу матрицы A и все контурные токи в общих ветвях направлены в одну сторону (оба условия обеспечиваются соответствующим выбором нумерации и положительных направлений контурных токов).

По алгоритму (5) выбранный минор можно разложить на два, один из которых имеет равные коэффициенты, другой — пропорциональные. Соответственно вся матрица A представляется в виде суммы матриц порядка m :

$$A = B_1 + A_1, \quad (9)$$

причем матрица B_1 содержит только равные коэффициенты, определяемые в соответствии с формулой (5) для правого верхнего минора 2-го порядка Δ_1 :

$$b_1 = \frac{\Delta_1}{a_{1(m-1)} + a_{2m} - a_{2(m-1)} - a_{1m}}, \quad (10)$$

а в матрице A_1 коэффициенты соответствующего минора получаются пропорциональными.

Чтобы обеспечить пропорциональность коэффициентов следующего, $(m-2)$ -го столбца 1- и 2-й строк, нужно выбрать второй общий элемент для первых $m-2$ контуров с матрицей

$$B_2 = b_2 \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

из условия

$$\frac{a_{1(m-2)} - b_2}{a_{2(m-2)} - b_2} = \frac{a_{1m}}{a_{2m}}$$

или

$$b_2 = \frac{\Delta_2}{a_{2m} - a_{1m}}, \quad (12)$$

где Δ_2 — минор матрицы A_1 на пересечении 1-, 2-й строк и $(m-2)$ -го, m -го столбцов.

Теперь исходная матрица A представляется в виде суммы:

$$A = B_1 + B_2 + A_2,$$

причем в новой матрице A_2 получились пропорциональными коэффициенты трех последних столбцов двух первых строк.

Далее аналогично выбирается матрица B_3 элемента, общего для $(m-3)$ контуров по коэффициентам матрицы A_2 с помощью формулы (12). Процесс выбора элементов общих вет-

вей по (12) производится до получения матрицы порядка 1, описывающей электрический элемент в необщей ветви первого контура. В результате в остаточной матрице первые две строки оказываются подобными, и по ним можно выбрать ТЭ, после вычитания матрицы которого получим матрицу порядка $m-2$.

Таким образом, процесс понижения порядка исходной матрицы на 2 путем выделения матриц общих элементов записывается в виде разложения:

$$A^{(m)} = B_1^{(m)} + B_2^{(m-2)} + \dots + B_{m-2}^{(2)} + B_{m-1}^{(1)} + C^{(m)} + A^{(m-2)}. \quad (13)$$

Верхние индексы в скобках обозначают порядок матриц без учета нулевых строк и столбцов. Дальнейшее разложение матрицы $A^{(m-2)}$ производится аналогично или строчным выбором ТЭ.

Из выражения (13) видно, что вместо двух ТЭ, которые необходимы для понижения порядка исходной матрицы на 2 при строчном способе разложения, получается один ТЭ и $m-1$ электрических элементов. Учитывая, что электрический элемент реализуется одним конструктивным, а ТЭ — двумя (кроме индуктивных матриц), можно заключить, что вместо четырех конструктивных элементов получается $2+m-1 = m+1$. Следовательно, выбор общих электрических элементов по минорам приводит к минимальному количеству конструктивных элементов только при $m=3$. Однако и при $m>3$ его применение может быть полезным за счет замены трансформаторных элементов электрическими, которая в некоторых случаях позволяет снизить мощность или массу элементов цепи.

Отметим, что рассмотренный способ в отличие от строчного выбора ТЭ требует проверки физической реализуемости матриц, получаемых при каждом вычитании слагаемых, кроме случая синтеза реактивной цепи в синусоидальном режиме с фиксированной частотой.

Получив несколько вариантов разложения исходной матрицы, можно выбрать оптимальный из условия минимума мощности, массы или другого критерия конкретной задачи.

Пример. Требуется синтезировать пассивную обратную цепь с тремя парами внешних зажимов по заданной симметричной матрице функций комплексной частоты p (в относительных единицах):

$$Z = \begin{pmatrix} \frac{4p^4 + 30p^2 + 12}{p^3 + 2p} & \frac{2p^4 - p^2 + 6}{p^3 + 2p} & \frac{6p^4 + 2p^2 + 12}{p^3 + 2p} \\ & \frac{3p^4 + 19p^2 + 10}{p^3 + 2p} & \frac{p^4 + 8p^2 + 4}{p^3 + 2p} \\ & & \frac{11p^4 + 64p^2 + 20}{p^3 + 2p} \end{pmatrix}.$$

Первым этапом решения является разложение заданной матрицы на матрицы подцепей по виду (1). При этом каждая из функций матрицы раскладывается на элементарные известным способом. В результате разложения получим:

$$Z = p \begin{pmatrix} 4 & 2 & 6 \\ 2 & 3 & 1 \\ 6 & 1 & 11 \end{pmatrix} + \frac{1}{p} \begin{pmatrix} 6 & 3 & 6 \\ 3 & 5 & 2 \\ 6 & 2 & 10 \end{pmatrix} + \frac{4p}{p^2 + 2} \begin{pmatrix} 4 & -2 & -4 \\ -2 & 2 & 1 \\ -4 & 1 & 8 \end{pmatrix}.$$

Первая из составляющих матриц описывает индуктивную подцепь, вторая — емкостную, третья — LC-подцепь, каждый из элементов которой представляет собой параллельную цепь из индуктивности и емкости с резонансной частотой $\sqrt{2}$.

Переходим ко второму этапу синтеза — разложению каждой из вещественных матриц на матрицу ранга 1.

1. Индуктивная подцепь. Исходная вещественная матрица имеет ранг 2, поэтому реализуется при строчном разложении двумя совершенными трансформаторами:

$$A_1 = \begin{vmatrix} 4 & 2 & 6 \\ 2 & 3 & 1 \\ 6 & 1 & 11 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 4 & 2 & 6 \\ 2 & 1 & 3 \\ 6 & 3 & 9 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{vmatrix}$$

Можно также использовать выбор общего электрического элемента по формуле (10):

$$b_1 = \frac{2 \cdot 1 - 3 \cdot 6}{2 + 1 - 3 - 6} = \frac{8}{3}$$

После вычитания матрицы B_1 из A_1 получим матрицу ранга 1, описывающую второй элемент цепи — трансформаторный. В результате подцепь будет содержать, как и в предыдущем случае, два элемента, но двухобмоточный совершенный трансформатор заменен индуктивным элементом, что говорит о преимуществе в данном конкретном случае выделения общего элемента по минору перед строчным выбором ТЭ:

$$A_1 = \frac{8}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} + \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 4 & -2 & 10 \\ -2 & 1 & -5 \\ 10 & -5 & 25 \end{vmatrix}$$

2. Емкостная подцепь. При строчном разложении исходной матрицы получим три обобщенных элемента (ранг равен 3), т. е. три емкостных элемента и два идеальных трансформатора — трех- и двухобмоточный. При разложении по минору 2-го порядка получим также пять конструктивных элементов, но двухобмоточный трансформатор заменяется емкостным элементом, что является определенным преимуществом.

По емкостной матрице с помощью формулы (10) определяем сопротивление электрического элемента, общего для трех контуров:

$$b_2 = \frac{3 \cdot 2 - 6 \cdot 5}{3 + 2 - 6 - 5} = 4.$$

Вычитаем матрицу электрического элемента общей ветви из исходной матрицы подцепи и получаем остаточную матрицу:

$$A_2 = A_1 - B_2 = \begin{vmatrix} 6 & 3 & 6 \\ 3 & 5 & 2 \\ 6 & 2 & 10 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & -1 & 2 \\ -1 & 1 & -2 \\ 2 & -2 & 6 \end{vmatrix}$$

Согласно (11) следующий электрический элемент должен быть общим для $m-2$ контуров, т. е. в данном случае только для первого контура. Следовательно, вторая строка матрицы A_2 уже может служить для выбора ТЭ, и в расчете по (12) нет необходимости. Сопротивление элемента необщей ветви первого контура определяем с помощью обычного пропорционального пересчета:

$$b_3 = 2 - \frac{(-1) \cdot 2}{-2} = \frac{2 \cdot (-2) - (-1) \cdot 2}{-2} = 1.$$

Новая остаточная матрица, полученная после вычитания матриц элемента B_3 и ТЭ, описывает элемент в необщей ветви третьего контура, так что разложение матрицы подцепи на матрицы элементов имеет вид:

$$A_2 = \begin{vmatrix} 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & -1 & 2 \\ -1 & 1 & -2 \\ 2 & -2 & 4 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}$$

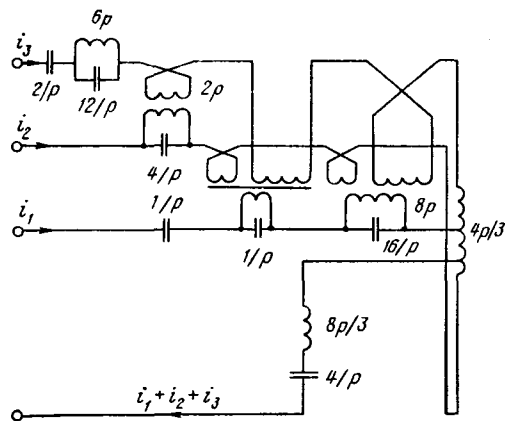


Рис. 2. Схема трехконтурной цепи с ТЭ, состоящей из трех подцепей.

3. LC — подцепь. Для этой вещественной матрицы выбор элементов общих ветвей не дает результата, отвечающего условию физической реализуемости. Действительно, по правому верхнему минору имеем:

$$b = \frac{(-2) \cdot 1 + 4 \cdot 2}{-2 + 1 + 4 - 2} = 6,$$

и после вычитания матрицы полученного элемента из исходной получаем остаточную матрицу с отрицательными коэффициентами главной диагонали, т. е. физически не реализуемую. При выборе других неглавных миноров второго порядка получим отрицательные значения сопротивлений, что также говорит о невозможности реализации.

Поэтому для данной подцепи применяем строчный выбор ТЭ и получаем разложение:

$$\begin{vmatrix} 4 & -2 & -4 \\ -2 & 2 & 1 \\ -4 & 1 & 8 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 4 & -2 & -4 \\ -2 & 1 & 2 \\ -4 & 2 & 4 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{vmatrix}$$

В итоге для LC-подцепи имеем три обобщенных элемента, каждый из которых состоит из параллельно включенных конденсатора и катушки. При этом две катушки представляют собой совершенные трансформаторы, так что вся подцепь содержит 6 конструктивных элементов.

Вся цепь получается в результате последовательного соединения трех подцепей, т. е. в каждой ветви соединены последовательно электрические элементы и соответствующие обмотки трансформаторов всех подцепей. На полученной схеме, изображенной на рис. 2, сопротивления указаны в относительных единицах, а коэффициенты трансформации соответствуют условно обозначенному числу витков. Идеальный трансформатор в отличие от совершенных снабжен линией, обозначающей ферромагнитный сердечник. Всего цепь содержит 13 конструктивных элементов.

Для сравнения отметим, что при синтезе цепи без ТЭ должно получиться 24 элемента, так как трехконтурная цепь содержит 6 ветвей, в каждой из которых включены последовательно конденсатор, катушка и параллельная цепь из конденсатора и катушки. Кроме того, при численных данных рассмотренного примера получаются отрицательные параметры, для устранения которых потребовалось бы введение новых внутренних контуров и, следовательно, еще большее число элементов.

Выводы. 1. Применение трансформаторных элементов при синтезе пассивных обратимых цепей позволяет снизить количество элементов цепи, реализовать отрицательные параметры и в определенных случаях получить дополнительный положительный эффект.

2. В процессе синтеза многоконтурной цепи возникает задача разложения исходной вещественной матрицы на симметричные неотрицательные вещественные матрицы ранга 1, описывающие обобщенные элементы цепи. Рассмотрены два способа разложения — по строкам и минорам второго порядка.

3. Минимальное число слагаемых и, следовательно, элементов цепи получается при использовании строчного выбора ТЭ, соответствующего последовательному исключению неизвестных при решении систем уравнений. Способ не имеет ограничений применимости по условиям физической реализуемости цепи.

4. Для увеличения числа вариантов решения с целью выбора оптимального по различным критериям можно использовать способ выделения матриц электрических элементов в общих ветвях цепи по неглавным минорам второго порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сагер В. Synthesis of linear communication networks.— New York: McGraw — Hill Book Company, 1958.—866 p.
2. Карни Ш. Теория цепей. Анализ и синтез: Пер с англ./ Под ред. С. Е. Лондона.— М.: Связь, 1973.— 368 с.
3. Синев В. С. Синтез магнитно-связанных цепей при установленном режиме.— Электричество, 1977, № 12, с. 66—70.
4. Оноо Y. Synthesis of a finite 2n-terminal networks by a group of networks each of which contains only one ohmic resistance.— Journal of Mathematics and Physics, 1950, vol. 29, № 1.

[07.01.80]



УДК 621.315.5:541.64:678.742:539.107

Исследование долговечности политетрафторэтилена в среде жидкого азота

АБАСОВ С. А., КУРБАНОВ М. А., ВЕЛИЕВ Т. М., КАБУЛОВ У. А.,
ЭЛЬМИРА ДЖАЛАЛ КЫЗЫ, БЕДИРХАНОВА С. Ш.

Баку

Повышение электрических и механических свойств изоляции, применяемой в криоэлектротехнике, открывает пути к существенному улучшению эффективности электротехнических криогенных устройств. Многообещающие перспективы в этом направлении заключаются в применении полимерных диэлектриков в криоэлектротехнике [Л. 1], что привело к резкому возрастанию интереса к исследованиям электрических и механических свойств диэлектриков при криогенных температурах.

В статье излагаются результаты исследования долговечности τ_m политетрафторэтилена (ПТФЭ) в сильном электрическом поле, а также τ_a в среде жидкого азота при одновременном наложении механической нагрузки.

Методика экспериментов. Испытание проводилось на разрывной машине, позволяющей поддерживать постоянные значения механического напряжения в образце. При определении τ_m к металлическим электродам острее — плоскость прикладывалось переменное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц и амплитудой до 4 кВ. Для определения τ_m и τ_a образцы на пленке ПТФЭ (типа «конденсаторная») толщиной 30 мкм вырезались в форме двойной лопатки. Значение электрического напряжения подбиралось так, что оно не привело бы к пробое образца и инициированию разряда в жидком азоте. Чувствительность системы регистрации частичных разрядов при проведении экспериментов практически была равной 10^{-12} Кл.

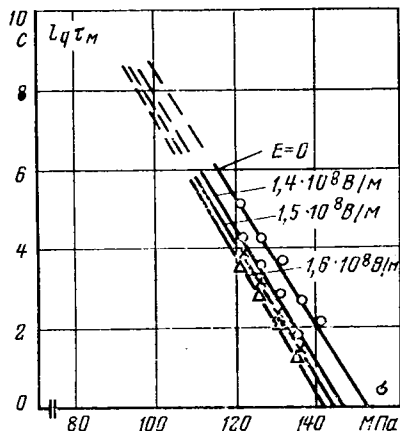


Рис. 1.

Определение времени жизни при одновременном наложении механического напряжения (0—60 МПа) проводилось при приложении к электродам синусоидального напряжения частотой 50 Гц. Один из электродов представлял собой диск (с необходимыми закруглениями) диаметром 55 мм, на который помещался образец из пленки ПТФЭ, а второй — цилиндр диаметром 10 мм с закругленной торцевой частью. Надежный контакт между пленкой и электродами обеспечивался специальной системой и грузом, создававшими механическое напряжение на пленке, равное 10 МПа.

Результаты исследований. На рис. 1 приведена зависимость логарифма долговечности $\lg \tau_m$ ПТФЭ от механического напряжения σ в сильном электрическом поле. При испытаниях вектор напряженности электрического поля был направлен перпендикулярно вектору механической силы. Из рис. 1 видно, что при приложении к образцу электрического поля τ_m заметно уменьшается, причем с увеличением напряженности E степень снижения долговечности возрастает. Из рис. 1 также видно, что при температуре жидкого азота зависимость долговечности ПТФЭ от механического напряжения при различных значениях E выражается формулой

$$\tau_m = A \exp(-\alpha_E \sigma),$$

где коэффициенты A и α_E зависят от свойств диэлектрика и температуры испытания.

Из рис. 2, на котором представлена зависимость $\lg \tau_m$ от E при $\sigma = 130$ МПа видно, что при $\sigma = \text{const}$ значение $\lg \tau_m$ до определенного значения E не изменяется, а затем с ростом E происходит заметное уменьшение долговечности ПТФЭ.

На рис. 3 приведена зависимость логарифма времени жизни $\lg \tau_a$ ПТФЭ в жидком азоте от напряженности электрического поля при одновременном наложении механического напряжения. Экспериментальные исследования показывают, что при наложении механического напряжения зависимости $\lg \tau_a = f(E)$ имеет сложный характер: в случае больших значений E влияние σ незначительно, а при относительно малых значениях E механическое напряжение заметно снижает τ_a по сравнению со значениями при $\sigma = 0$ и с дальнейшим уменьшением E время жизни резко возрастает.

Укажем вероятные причины, обуславливающие изменения τ_m и τ_a при воздействии электрического и механического поля. Наблюдаемое уменьшение τ_m при наложении электрического поля можно связать с развитием объемных вторичных процессов (ионизационные явления в микродефектах, инжекция зарядов с электродов вглубь образца и т. д.) в пленке ПТФЭ под действием напряженности E [Л. 2 и 3]. Образовавшиеся за счет указанных вторичных процессов электроны приведут к дополнительному возмущению макромолекулы ПТФЭ и тем

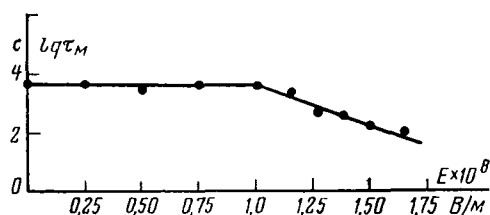


Рис. 2.

самым будут способствовать термофлуктуационному разрыву химических связей, что проявляется в уменьшении долговечности образца [Л. 4].

Следует отметить, что не все образовавшиеся электроны будут участвовать в процессе возмущения макромолекулы, так как часть электронов может быть захвачена ловушками — свободными радикалами, низкомолекулярными примесями, растворенными в полимере молекулами кислорода и фтора, являющимися сильными акцепторами электронов, и т. д., образуя при этом связанные заряды [Л. 5]. Поэтому в зависимости от E , σ , температуры, концентрации свободных радикалов и примесей в образце число эффективных, т. е. возмущающих макромолекулы электронов будет изменяться и, следовательно, изменится концентрация разорванных химических связей, определяющая долговечность пленки.

Неизменность $\lg \tau_m$ до определенного значения напряженности приложенного электрического поля (рис. 2) может быть связана с тем, что при этой напряженности вообще невозможно инициирование в объеме ПТФЭ вторичных процессов или же интенсивность таких процессов настолько мала, что образовавшиеся в результате этих явлений электроны практически полностью захватываются ловушками, т. е. идет заполнение ловушек носителями заряда, следовательно, отсутствует процесс возмущения макромолекул за счет ударов частиц и долговечность определяется в основном воздействием механической нагрузки.

Исходя из вышесказанного, формулу для долговечности в условиях действия электрического поля можно записать в виде

$$\tau_m = A \exp [-(\alpha + kE)\sigma],$$

где k — степень снижения энергетического барьера при приложении к образцу электрического поля.

В [Л. 6] было показано, что процесс электрического разрушения полимерных диэлектриков имеет кинетически-активационный характер, имеет термофлуктуационную природу и включает в себя элементарные акты разрыва химических связей. При этом предполагалось, что при приложении к образцу электрического поля заряды, образовавшиеся в объеме за счет ионизационных процессов, возмущают межатомные связи, в результате чего снижается начальный энергетический барьер и происходят разрывы химических связей под действием тепловых флуктуаций.

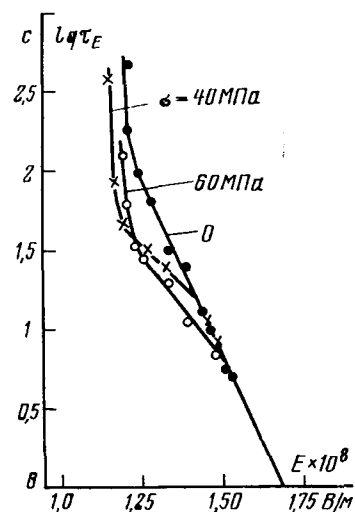


Рис. 3.

С образованием различных дефектов в полимерной пленке тесно связана интенсивность вторичных процессов при приложении к образцу электрического поля. Полагаем, что механическое нагружение образца ПТФЭ в среде жидкого азота приводит к изменению условия возникновения микродефектов, и, следовательно, развитию объемных вторичных процессов, а это, в свою очередь, проявляется в изменении времени жизни τ_a пленки при криогенных температурах. Резкое увеличение τ_a ($\sigma = \text{const}$) при уменьшении напряженности E опять-таки связано, как в случае τ_m , с практическим прекращением вторичных процессов, инициирующих процесс электрического разрушения образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перепечко И. И. Свойства полимеров при низких температурах. — М.: Химия, 1977.
2. Kosaki M., Shimizu N., Horii K. Treeing of polyethylene at 77K. — IEEE Conf. Rec. Int. Symp. Elec. Insul., Montreal, 1976. — New York, 1976.
3. Charlesby A., Owen G. P. Luminescence enhancement in irradiated polyethylene. — Int. J. Radiat. Phys. and Chem., 1976, vol. 8, № 344.
4. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974.
5. Радиационная химия макромолекул/ Под ред. М. Доула. — М.: Атомиздат, 1978.
6. Исследование электрической прочности полимерной пленки под действием заряженных частиц разряда в постоянном поле/ М. А. Багиров, С. А. Абасов, П. Н. Джафарова, М. А. Курбанов — Ученые записки АзПИ им. Ч. Ильдрыма, 1977, сер. X, № 1.

[26.09.79]



О значениях некоторых параметров тепломеханического оборудования электростанций и их влиянии на длительные переходные процессы в энергосистемах

СТЕРНИНСОН Л. Д.

Поставленная в статье «Описание энергообъединения как объекта управления режимом по частоте и активной мощности»¹ задача актуальна для сложных энергосистем в связи не только с управлением режимом по частоте и мощности, но и с устойчивостью таких энергосистем, поскольку при исследовании устойчивости приходится учитывать длительные переходные процессы изменения частоты и, главным образом, перетоков мощности. Описание энергообъединения рассматривается в этой статье для достаточно общего случая, что нашло отражение в одновременном учете тепловых (ТЭС) и гидравлических (ГЭС) станций, учете разнотипности ТЭС, а также динамических свойств котельной части ТЭС (процесса изменения давления), которые при подобных расчетах обычно не учитывались. Следует отметить, что указанные свойства учитываются только для группы нерегулируемых ТЭС (т. е. без вторичного регулирования частоты и мощности), и причина этого не указывается. Однако это может быть обосновано тем, что на регулируемых ТЭС предусматривается такая система автоматического управления мощностью энергоблоков (типа САУМ-2), при которой изменение давления мало влияет на процессы изменения частоты и мощности.

При рассмотрении задачи для общего случая естественно ожидать, что и в приведенном расчете используются типичные или обобщенные исходные данные, включая численные значения параметров. Использование обобщенных значений параметров в подобных расчетах часто оказывается неизбежным, так как, во-первых, выяснение конкретных их значений не всегда возможно, во-вторых, практически в любой расчетной схеме энергосистемы обычно представляются только эквивалентированные элементы (котлы, турбины, генераторы и т. д.); к тому же рассматриваемые параметры изменяются обычно в сравнительно нешироких пределах.

Поэтому весьма вероятно, что значения параметров, приведенные в обсуждаемой статье, могут использоваться читателями «Электричества» в своих исследовательских или практических расчетах. Между тем, значения параметров, входящих в передаточные функции турбин, а также описание переходного процесса изменения частоты в нерегулируемой энергосистеме, вызывают замечания, являющиеся предметом дальнейшего изложения.

Постоянная времени сервопривода направляющего аппарата гидротурбины T_c . Эта величина обозначена в обсуждаемой статье через T_d и принимается равной 5 с. Для сервопривода регуляторов частоты вращения турбин характерной величиной является время перемещения, соответствующего изменению мощности от нуля до номинальной, при максимальной скорости перемещения, т. е. при полном открытии окон главного золотника. Иногда [Л. 1] эту величину называют собственным временем сервопривода $T_{c.соб}$. Значение $T_{c.соб}$ соответствует, следовательно, определенному ходу главного золотника, выражаемому в миллиметрах. В отличие от этого постоянная времени T_c является относительной величиной, и ее значение должно соответствовать единичному (базисному) значению регулируемой величины — частоты вращения турбины или частоты электрической системы. Если за единицу принята номинальная частота 50 Гц, то

$$T_c = T_{c.соб} \frac{\Delta k_{p.c}}{50},$$

где Δ — отклонение частоты, при котором достигается полное открытие золотника; $k_{p.c}$ — коэффициент передачи (крутизна

характеристики) регулятора, т. е. величина, обратная статизму.

Величина Δ в свою очередь зависит от коэффициента передачи между измерительным органом регулятора и главным золотником и от хода золотника, соответствующего его полному открытию. На гидротурбинах при принятом в $k_{p.c} = 25$ указанные величины характеризуются следующими значениями [Л. 2]. Коэффициент передачи между измерительным органом и золотником с развитием регуляторостроения имеет тенденцию к увеличению: от приблизительно 5 у старых регуляторов до 60 мм/Гц у некоторых новых. Типичным значением в настоящее время можно считать 20 мм/Гц. Ход золотника, соответствующий полному открытию, напротив, имеет тенденцию к уменьшению: от приблизительно 10 у старых до 1—2 мм у некоторых современных регуляторов. За типичное значение может быть принято 5 мм.

Значение $T_{c.соб}$ составляет обычно 5—10 с и ограничивается снизу во избежание увеличения гидроудара. Таким образом, в общем случае постоянная времени сервопривода направляющего аппарата гидротурбин $T_c = (0,6—1,2)$ с, что почти на порядок отличается от принятого в обсуждаемой статье.

Некоторое увеличение T_c при упрощенном моделировании регулирования поворотной-лопастных гидротурбин может быть обосновано учетом процесса разворота лопастей, протекающего медленнее, чем перемещение направляющего аппарата. Вместе с тем в сторону уменьшения T_c действует нелинейность зависимости мощности от открытия направляющего аппарата.

Следует заметить, что с преувеличением T_c для гидротурбин приходится встречаться часто, и объясняется это, по-видимому, невниманием к различию T_c и $T_{c.соб}$.

Коэффициент передачи (крутизна характеристики) эквивалентного регулятора частоты вращения группы турбин. Как уже неоднократно освещалось в литературе, для энергосистемы или ее части с достаточно большим числом турбоагрегатов крутизна характеристик эквивалентного регулятора всего меньше, а статизм — больше нормируемого для отдельных турбин значения. При малых изменениях частоты это объясняется прежде всего наличием у регуляторов зоны нечувствительности. Кроме того, как при малых, так и при больших изменениях влияют неисправность части регуляторов, нелинейность их характеристик, предельный или нерасчетный режим части агрегатов и другие причины, так или иначе препятствующие нормальной работе регуляторов или их работе с нормальными характеристиками. В значительно меньшей, чем к паровым турбинам, степени сказанное относится к гидротурбинам, так как на них регуляторы более чувствительны, и меньше причин, препятствующих нормальной работе.

Изложенное относится к любой группе турбин независимо от того, есть или нет на них вторичное регулирование. Поэтому практически невозможно принятое в обсуждаемой статье положение, когда на всех трех группах регулируемых ТЭС крутизна характеристики регулятора частоты вращения $k_{p.c} = 16,6$ (что близко к нормируемому для паровых турбин значению 20—25), а на нерегулируемой группе $k_{p.c} = 6,2$.

Испытания и наблюдения показывают, что крутизна характеристики в энергосистеме может изменяться в широких пределах, примерно от 4 до 15. В частности, она изменяется в течение суток вследствие изменения нагрузки турбоагрегатов. Однако для большинства энергосистем в СССР в настоящее время характерны малые значения (примерно 5—7).

Параметры передаточной функции турбины с промежуточным перегревом пара. Передаточную функцию, характеризующую изменение мощности при ступенчатом изменении положе-

¹ См. «Электричество», 1980, № 12, с. 23—30.

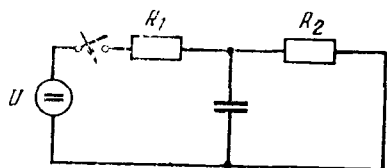


Рис. 1. Схема-аналог турбины с промпрегревом.

ния клапанов турбины, запишем в виде

$$W(p) = \frac{CT_{п.п}p + 1}{T_{п.п}p + 1},$$

лишь по форме записи отличающемся от соответствующего выражения в обсуждаемой статье. Она имеет два параметра: постоянную времени промежуточного пароперегревателя $T_{п.п}$ и коэффициент C , равный начальному ступенчатому изменению мощности в долях установившегося изменения.

Величина $T_{п.п}$ хотя и входит в передаточную функцию турбины, однако при данных параметрах энергоблока (номинальные мощность и параметры острого и промежуточного перегретого пара) мало зависит от турбины, а в основном от компоновки блока и типа котла, конструктивной частью которого является промпрегреватель. Говоря конкретно, $T_{п.п}$ определяется объемом пароперегревателя и паропроводов, связывающих его с турбиной. В таблице приведены рассчитанные по формуле [Л. 3] значения $T_{п.п}$ для некоторых типов блоков, охватывающих примерно 75% всех установленных блоков 300 МВт.

Значение $T_{п.п}$ зависит от принятого единичного значения расхода пара. Обычно принимается расход при номинальной мощности турбины. Соответствующие числа в таблице представлены в числителях. При рассмотрении процесса с небольшими (около 20%) изменениями вблизи номинальной мощности, т. е. в большинстве нормальных режимов энергосистемы, целесообразно учесть нелинейность зависимости расхода турбины от мощности. Значения $T_{п.п}$ для этого случая приведены в таблице под чертой. Заметим, что при таком расчете влияние турбины несколько увеличивается.

Тип котла	Завод-изготовитель турбины	$T_{п.п}$, с	Тип котла	Завод-изготовитель турбины	$T_{п.п}$, с
ТП-210	ХТГЗ	7,85	ТГМП-314	ХТГЗ	7,45
		6,85			7,15
ТП-312	ХТГЗ	7,6	П-50	ХТГЗ	9,25
		7,35			8,2
ТГМП-114	ЛМЗ	7,8	ТГМП-324	ЛМЗ	10,7
		7,1			9,75
ТГМП-314	ЛМЗ	7,45	П-59	ЛМЗ	11,15
		6,75			10,15

Для блоков 200 МВт с котлом ТП-100 (около половины всех блоков 200 МВт) $T_{п.п}$ равна соответственно 7,25 и 6,9 с; для блоков, перемаркированных на 210 МВт, — 6,6 и 6,3 с.

Рассмотрение приведенных данных подтверждает, что значение $T_{п.п}$ для блоков 300 МВт практически не зависит от типа турбины. Если исключить два последних столбца таблицы (на сегодня установлено всего 7 блоков с котлами этих типов) и присоединить сюда указанную часть блоков 200 МВт, то для значительного большинства всех блоков 200 п 300 МВт область изменения составит 6,6—9,2 с (6,3—8,2 с). Таким образом, ранее встречавшаяся обобщенная оценка $T_{п.п} \approx (5-8)$ с ближе к действительности, чем значения, указанные в обсуждаемой статье, и может использоваться в расчетах практически для всех энергоблоков.

Параметр C в обсуждаемой статье считается равным $k_{цвд}$, т. е. доле части (цилиндра) высокого давления в общей мощности турбины в установившемся режиме. Значение $k_{цвд}$ несколько изменяется в зависимости от режима (нагрузки) турбины, но практически одинаково для всех турбин с промпрегревом: 0,31—0,33 для турбин 300 и 800 МВт; 0,30—0,34 для турбин 200 МВт. Поскольку с принятием равенства $C = k_{цвд}$ приходится встречаться довольно часто, уместно остановиться на вопросе подробнее.

В первом (довольно грубом) приближении электрическим аналогом турбины с промпрегревом является схема рис. 1. Положим полезный эффект схемы пропорциональным напряжением на R_1 и R_2 с коэффициентами пропорциональности k_1 и k_2 . В установившемся режиме доля R_1 в суммарном «эффекте» (аналог $k_{цвд}$) равна

$$\frac{k_1 R_1}{k_1 R_1 + k_2 R_2}.$$

В первый же момент после замыкания ключа отношение «эффекта» в R_1 к суммарному установившемуся (аналог C)

$$\frac{k_1 (R_1 + R_2)}{k_1 R_1 + k_2 R_2}.$$

Следовательно, для схемы — аналога

$$C_{ан} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} k_{цвд ан} > k_{цвд ан}.$$

Возвращаясь к турбине, в том же приближении, в каком она моделируется рассмотренной электрической схемой, можно записать

$$C = k_{цвд} \frac{p_0}{p_0 - p_{п.п}},$$

где p_0 и $p_{п.п}$ — давления пара соответственно перед турбиной и в промпрегревателе. Для турбин 300 МВт $p_0 = 2,4 \cdot 10^7$ Па, $p_{п.п} = 4 \cdot 10^6$ Па, $k_{цвд} = 0,32$ и $C = 0,384$; для турбин 200 МВт $p_0 = 1,3 \cdot 10^7$ Па, $p_{п.п} = 2,6 \cdot 10^6$ Па, $k_{цвд} = 0,32$, $C = 0,4$.

Более точные (но тоже приближенные) расчеты показали, что C не является постоянным, а изменяется в зависимости от нагрузки турбины согласно приближенной зависимости

$$C = k_{цвд} (1 + kP^*),$$

где P^* — относительная установившаяся нагрузка турбины после окончания переходного процесса или при малых отклонениях относительная нагрузка, вблизи которой происходит отклонение. Для турбин 300 МВт $k \approx 0,6$, и в диапазоне нагрузок 50—100% коэффициент C изменяется примерно от 0,4 до 0,5.

Имеющиеся, хотя и немногочисленные, экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с изложенными соображениями и позволяют для всех турбин с промпрегревом принимать, как правило, $C = 0,4-0,5$.

Характер переходного процесса изменения частоты в нерегулируемой энергосистеме. Как уже указывалось, под нерегулируемой здесь понимается энергосистема без вторичного регулирования частоты и мощности, но в общем случае с регулированием частоты вращения турбин, регулированием паропроизводительности котлов и, следовательно, производительности энергоблоков в целом. До известного времени при изучении характеристик энергосистем, связанных с изменением частоты и мощности, влиянию изменения давления и регулирования котлов на ТЭС не уделялось внимания. Наличие такого влияния в общих чертах не вызывало сомнений, однако оно не обнаруживалось в достаточно многочисленных экспериментах, проводившихся до середины 60-х гг.

Переломными явились проведенные в середине 60-х гг. НИИПТ и ОДУ Северо-Запада эксперименты, в которых было обнаружено, что процесс изменения частоты после ступенчатого возмущения (переходная характеристика) в энергосистеме с преобладанием ТЭС имеет два этапа: первый, быстрый, соответствующий процессам, изучавшимся ранее, и второй, медленный в том же направлении, связанный с изменением давления на ТЭС и ранее не обнаружившийся. Изменение на первом этапе в опытах НИИПТ и ОДУ Северо-Запада ока-

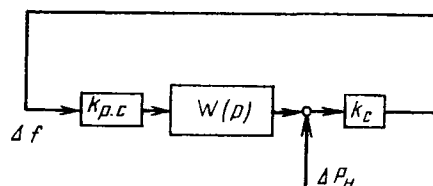


Рис. 2. Структурная схема к расчету процесса изменения частоты.

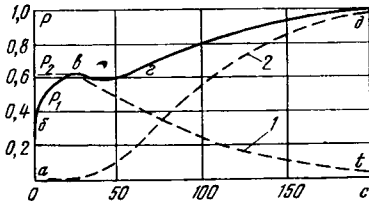


Рис. 3. Переходная характеристика энергоблока котел — турбина.

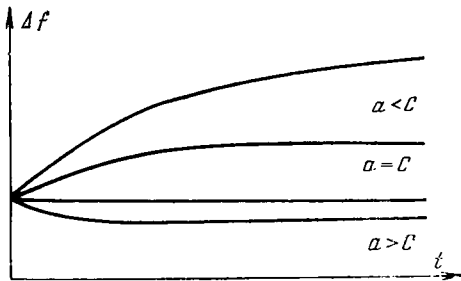


Рис. 4. Процессы изменения частоты.

залось равным половине полного изменения. Результаты этих опытов были качественно подтверждены и в других энергосистемах (работы ВНИИЭ, СибНИИЭ и др.), получили широкое признание и сейчас иногда используются без необходимого применения в конкретных случаях. Между тем условия регулирования давления на энергоблоках в разных энергосистемах могут существенно различаться, главным образом, по соотношению регулируемых и нерегулируемых по давлению котлов. Рассмотрим приближенно, как это будет влиять на характер процесса изменения частоты.

Для этого воспользуемся простейшей структурной схемой (рис. 2), на которой k_c — величина, обратная регулирующему эффекту нагрузки (потребителей) энергосистемы; $k_{p.c}$ — крутизна характеристики эквивалентного регулятора частоты вращения турбин; $W(p)$ — передаточная функция эквивалентного энергоблока котел — турбина, соответствующая переходному процессу изменения его мощности при ступенчатом открытии клапанов турбины. От передаточной функции турбины с пром-перегревом $W(p)$ отличается учетом изменения давления перед турбиной и переходного процесса в котельной части блока. Достаточно типичная экспериментальная кривая указанного процесса изменения мощности блока приведена на рис. 3. Она представляет сумму двух процессов: изменения мощности за счет аккумулированного тепла (1) и изменения, связанного с регулированием котла, т. е. изменением подачи топлива (2), и состоит из четырех характерных участков. На первом (ab) мощность изменяется практически ступенчато (за 1 с) при одновременном весьма быстром изменении давления. Вследствие изменения давления скачок мощности по отношению к установившемуся его изменению меньше рассмотренного выше значения C и может быть представлена в виде:

$$\frac{P_1}{P_{уст}} = \frac{C}{1 + K_R},$$

где K_R — характеризует относительную величину указанного изменения давления в линеаризованной модели энергоблока. Эта величина сравнительно мало изменяется для блоков разных типов, составляя при номинальной нагрузке 0,25—0,3, но квадратично зависит от нагрузки блока.

На втором участке (bc) мощность изменяется примерно по экспоненте с постоянной времени $T_{п.н}$ приблизительно до значения

$$\frac{P_2}{P_{уст}} = \frac{0,8}{1 + K_R}.$$

Множитель 0,8 вместо единицы появляется в связи с дополнительным снижением давления на участке bc.

Регуляторы турбин 300 МВт и более Ленинградского металлургического завода имеют так называемый канал началь-

ной коррекции неравномерности. Для них (при наличии запаса хода клапанов) на первом участке

$$\frac{P_1}{P_{уст}} = \frac{C}{C + K_R},$$

а второй участок практически сливается с третьим. Используя численные значения C и K_R , найдем при изменениях вблизи номинальной нагрузки: $P_1 \approx 0,3—0,4$ или $P_1 \approx 0,55—0,65$ (при наличии канала начальной коррекции неравномерности); $P_2 \approx 0,6—0,65$.

Ход процесса на третьем и четвертом участках (cd и ed) полностью определяется динамическими свойствами котла и его систем регулирования. На участке cd мощность изменяется мало и часто временно снижается. Его продолжительность определяется в основном топочной частью котла: на газомазутных блоках он короче, на пылеугольных с прямым дутьем пыли — наиболее длинный. На участке ed процесс близок к экспоненте с постоянной времени котла (пароводяной части), изменяющейся для разных современных котлов в пределах примерно от 80 до 200 с и также зависящей от нагрузки блока.

При отсутствии регулирования производительности котла кривая 1 на рис. 3 характеризует весь процесс изменения мощности. Последняя снижается с той же постоянной времени котла.

В дальнейшем примем упрощенное представление переходной характеристики энергоблока: для блока с регулируемой производительностью котла — в виде скачка, составляющего долю от установившегося значения, и последующего экспоненциального подъема до единицы с постоянной времени T ; для блока с нерегулируемым котлом — в виде такого же скачка с последующим спадом до нуля с той же постоянной. Значение C_2 будем полагать соответствующим значению P_2 на рис. 3, т. е. считать скачкообразным весь участок abv. В таком приближении пренебрегаем различием между блоками с промперегревом и без него; если при этом считать также скачкообразным процесс изменения мощности ГЭС при изменении частоты, то влияние ГЭС может быть учтено изменением значения k_c .

С учетом всего сказанного, обозначив через a долю энергоблоков с регулированием производительности котлов, получим следующую передаточную функцию эквивалентного энергоблока:

$$W(p) = a \frac{C_2 T p + 1}{T p + 1} + (1 - a) \frac{C_2 T p}{T p + 1} = \frac{C_2 T p + a}{T p + 1}.$$

Основываясь на рис. 2, найдем передаточную функцию изменения частоты при ступенчатом возмущении ΔP_H :

$$\Delta f(p) = - \frac{k_c T p + 1}{(1 + k_{p.c} k_c C_2) T p + a k_{p.c} k_c + 1} \Delta P_H.$$

Из полученного выражения следует (рис. 4), что второй этап изменения частоты протекает в том же направлении, что и первый, при $a < C_2$. При $a > C_2$ направление изменения на втором этапе противоположно направлению на первом, т. е. частота частично восстанавливается. При $a = C_2$ второй этап отсутствует, т. е. имеет место только процесс быстрого изменения частоты. Изменение частоты на втором этапе процесса происходит с постоянной времени

$$\tau = T \frac{1 + k_{p.c} k_c C_2}{1 + a k_{p.c} k_c},$$

которая при данном T зависит от a и $k_{p.c}$, так как C_2 и k_c изменяются мало. При большом $k_{p.c}$ и малом a значение τ может значительно превосходить T .

При оценке процесса изменения частоты в энергосистеме в общем случае необходимо обязательно учитывать степень оснащения ТЭС автоматическим регулированием паропроизводительности котлов.

Изложенное поясняет, почему именно с середины 60-х гг. стал обнаруживаться двухступенчатый характер процесса изменения частоты. Дело в том, что к этому времени энергоблоки котел — турбина составили уже значительную долю мощности энергосистем. На энергоблоках, в особенности с прямоточными котлами, по ряду причин обычно не включались регуляторы давления на котлах, и получило распространение поддержание давления воздействием на турбины; нередко так-

Научно-техническая конференция «Электробезопасность в народном хозяйстве»

В декабре 1979 г. в Москве состоялась научно-техническая конференция, организованная секцией электробезопасности Московского Правления НТО энергетики и электротехнической промышленности, Госэнергонадзором и Всесоюзным государственным научно-исследовательским институтом ВНИИ-Проектэлектромонтаж Минмонтажспецстроя СССР. В конференции приняли участие более 100 специалистов по электробезопасности, было заслушано около 40 докладов и сообщений.

Во вступительном слове начальник Госэнергонадзора С. И. Веселов определил главное направление деятельности Научно-технического общества энергетики и электротехнической промышленности — мобилизация усилий научно-технической общественности на ускоренное внедрение новой техники и использование в народном хозяйстве результатов исследований, создание безопасной техники.

Председатель секции электробезопасности МП НТО ЭиЭП Р. Н. Карякин в обобщающем докладе изложил итоги и основные задачи исследований и разработок, направленных на повышение электробезопасности при эксплуатации электроустановок в народном хозяйстве. В этом докладе было показано, что повсеместное внедрение разработанных в 1979 г. защитных устройств и новых технических решений в области электробезопасности в практику проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации электроустановок позволит уже в ближайшие годы обеспечить оптимальный уровень электробезопасности во всех основных отраслях народного хозяйства.

Статистике электрогазотравматизма в электроустановках потребителей и среди населения, а также его профилактике был посвящен доклад Л. И. Вайнштейна (Госэнергонадзор). В докладе было отмечено неблагоприятное положение с уровнем электрогазотравматизма как в целом по народному хозяйству, так и по ряду отраслей: в жилищно-коммунально-бытовом и сельском хозяйстве, на транспорте, в ряде министерств.

В докладе В. А. Антонова и Л. К. Коноваловой (ВНИИ-Проектэлектромонтаж) были рассмотрены вопросы совершенствования нормативно-технической документации по электробезопасности и унификации государственных стандартов, технических условий и правил СССР со странами СЭВ.

Большой интерес вызвало выступление А. Р. Ливенсона (ВНИИ медицинского приборостроения) об особенностях условий применения медицинской техники, создающих повышенную опасность электропоражения, и недостатках действующих правил эксплуатации электрооборудования медицинских учреждений и типовых проектов. Проблеме развития и стандартизации защитного отключения изложил А. И. Ревякин (МЭИ). Им сделаны обобщения и аналогии, выявлены тенденции и особенности построения схем устройств защитного отключения у нас в стране и за рубежом.

же выводились из нормальной работы регуляторы частоты вращения турбин. Кроме того, в условиях возросшей мощности энергосистем уменьшились отклонения частоты (в том числе при испытаниях) и увеличилось влияние зоны нечувствительности регуляторов. Все это привело к уменьшению значений a и $k_{p.c.}$, т. е. увеличению величины и скорости изменения частоты на втором этапе, и облегчению его наблюдение. Однако рассмотренное положение в энергосистемах являлось ненормальным и в настоящее время постепенно исправляется. Поэтому сейчас особенно важно при оценке характеристик энергосистем правильно учитывать реальное положение в них.

В заключение отметим, что переходную характеристику вида, представленного на рис. 3, энергоблоки имеют, как при наличии на турбине только регулятора частоты вращения, а на котле регулятора давления (часто именуемого главным регулятором), так и в случае оснащения блока системой автоматического управления мощностью типа САУМ-1, преиму-

А. А. Кукушкин (Сибирский металлургический институт) сформулировал требования к разработке ограничителей напряжения холостого хода сварочных установок горных предприятий. Серия докладов была посвящена проблемам электробезопасности электроустановок промышленных предприятий в условиях Крайнего Севера. В докладе Г. А. Симоновского (Ухтинский индустриальный институт) были приведены статистические данные об электрогазотравматизме на предприятиях нефтегазовой промышленности. Э. Б. Альтшулер (Норильский вечерний индустриальный институт) сделал анализ условий электробезопасности при эксплуатации электроустановок в районах Крайнего Севера. В сообщении В. Б. Карпунна (Министерство химической и газовой промышленности) были рассмотрены вопросы совершенствования заземляющих устройств промышленных установок в зонах многолетнемерзлых грунтов. В. И. Солнцев (ВНИИПроектэлектромонтаж) привел результаты измерений распределения потенциалов по земле снаружи промышленных и жилых объектов в районах многолетнемерзлых грунтов. Анализ этих измерений позволяет на стадии проектирования оценить напряжение прикосновения при использовании железобетонных фундаментов и каркасов зданий в качестве заземлителей и заземляющих проводников.

В докладе М. И. Верхоглядова (ВИЭСХ) была обоснована методика оценки системы заземления по уровню электробезопасности в рамках вероятностной концепции. Вероятностному моделированию при оценке условий электробезопасности был посвящен доклад В. И. Щуцкого и А. А. Бурлакова (Московский горный институт). На основе вероятностной оценки условий электробезопасности определено, что при изолированной нейтрали с защитным отключением обеспечиваются лучшие условия электробезопасности. В. Д. Шаматава (ВИЭСХ) предложил метод оценки электрозащитной эффективности устройств защитного отключения. В докладе А. Н. Стрёмовского (Академия коммунального хозяйства) были приведены результаты измерения токов утечки бытовых электрических сетей в условиях эксплуатации. Доклад М. В. Тарнижевского, Н. И. Былины (АКХ) и Ю. В. Демина (СибНИИЭ) был посвящен вопросам прогнозирования опасности коррозии заземляющих устройств городских электрических сетей. Ю. Г. Сибаров (МИИТ) представил результаты экспериментальных исследований пороговых значений фибрилляционных токов при одно- и двухполупериодном выпрямлении синусоидального тока промышленной частоты. Интерес у участников конференции вызвал доклад Я. А. Зельвянского (МИИТ) о применении дистанционного контроля состояния контактной сети, который успешно прошел эксплуатационную проверку.

Вопросам электро- и пожаробезопасности при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью на-

стественно внедряемого в настоящее время. В случае применения системы типа САУМ-2 и при наличии запаса хода клапанов турбины процесс изменения мощности, как уже указывалось, мало зависит от давления и динамических свойств котла, а практически полностью от системы управления турбиной и протекает значительно быстрее, чем это следует из рис. 3. Однако в случае системы САУМ-2 ухудшается качество регулирования давления и ее внедрение встречает определенные трудности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах/ Под ред. Соколова Н. И. — М.: Энергия, 1970.
2. Эксплуатация гидроэлектростанций. Под ред. Серкова В. С. — М.: Энергия, 1977.
3. Профос П. Регулирование паросиловых установок. — М.: Энергия, 1967.

пряжением до 1000 В на предприятиях с пожароопасной пылью был посвящен доклад Б. А. Князевского, П. В. Шпунюнова и В. П. Ларионова (МЭИ). П. О. Петри и В. В. Жихарский (МЭИ) рассмотрели состояние проблемы контроля изоляции в сетях с глухозаземленной нейтралью и привели результаты исследования эффективности импульсного безземного способа измерения сопротивления изоляции в сетях с глухозаземленной нейтралью под нагрузкой.

Группа сотрудников МГИ подготовила ряд докладов: по результатам исследований электрических параметров тела человека на переменном токе промышленной и повышенной частот; по измерениям сопротивления тела человека методом реографии, оценкам действия на человека электрического тока с фазовыми отсечками; по вопросам состояния изоляции электроустановок с изолированной нейтралью напряжением 0,5 кВ при строительстве метрополитенов и расчета сети заземления при строительстве метрополитенов и туннелей; по принципам построения систем автоматического контроля заземления нестационарных горных машин и установок, а также защиты от токов утечки направленного действия для сетей до 1000 В с различным режимом нейтрали.

Анализ материалов конференции позволяет сделать следующие выводы. За последние годы проведены серьезные теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию средств защиты от поражения электрическим током, по установлению норм на допустимые величины напряжения прикосновения и тока, по определению параметров тела человека. Имеется опыт нормирования заземлителей электроустановок по напряжению прикосновения, дающий большой экономический эффект. Следует отметить повсеместный интерес к учету и использованию естественных заземлителей на промышленных предприятиях и промыслах, что также приводит к большой экономии металла и трудозатрат. Получили дальнейшее развитие исследования электромагнитных полей заземлителей больших размеров и инженерных методов расчета протяженных заземлителей в грунтах с различным удельным сопротивлением. Отмечен значительный прогресс в проектиро-

вании заземляющих устройств электроустановок в условиях многолетнемерзлых грунтов.

Большое значение в настоящее время придается повышению уровня научно-технической документации по вопросам электробезопасности и унификации государственных стандартов, технических условий и правил СССР со странами СЭВ. Подготовлена к утверждению новая редакция глав 1—7 ПУЭ «Заземление и защитные меры безопасности», предусматривающая наряду с нормированием заземляющих устройств по сопротивлению нормирование по напряжению прикосновения.

Однако повсеместное внедрение норм на напряжение прикосновения в практику проектирования и сооружения тормозится из-за отсутствия измерительной аппаратуры и методов эксплуатационного контроля параметров заземляющих устройств.

Недостаточное развитие получили вопросы разработки и внедрения устройств защитного отключения. Важнейшими причинами электротравматизма в народном хозяйстве признаны: незнание правил электробезопасности, нарушение технологии и трудовой дисциплины, отсутствие надежных средств защиты, что в свою очередь является следствием слабого внедрения разработок, отсутствие координации работ по всем вопросам электробезопасности, а также нормативной базы для оценки уровня электробезопасности.

Участниками конференции решено обратиться в ГКНТ СССР с просьбой об организации временной научно-технической комиссии для разработки предложений о повышении уровня электробезопасности в народном хозяйстве на основе внедрения законченных результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Комиссия должна провести анализ уровня электробезопасности в электроустановках напряжением до 1000 В и выше 1000 В, рассмотреть причины, снижающие уровень электробезопасности, разработать научно-технические и организационные мероприятия, способствующие повышению уровня электробезопасности.

КОНОВАЛОВА Л. К.

НИКОЛАЙ ДМИТРИЕВИЧ ПАПАЛЕКСИ

(К 100-летию со дня рождения)

Николай Дмитриевич Папалекси родился 2 декабря 1880 г. Еще будучи гимназистом, он увлекся физикой и регулярно посещал занятия кружка любителей физико-математических наук. Для получения высшего образования Папалекси избрал Страсбургский университет. Позднее Николай Дмитриевич писал: «В то время в Страсбургском университете собрались крупные научные силы, в частности в области физико-математических наук. Лекции читали выдающиеся математики... Кафедру физики занимал Ф. Браун. Он состоял также директором образцового для того времени физического института. Браун уже тогда был известен своими работами в области термодинамики и электрических явлений... Все эти обстоятельства, а также исключительные условия для научных исследований в Страсбургском физическом институте привлекли туда в свое время наших выдающихся физиков Б. Б. Голицына, П. И. Лебедева, А. А. Эйхенвальда, П. П. Лазарева и др.»

Н. Д. Папалекси встретился в Страсбурге с другим будущим выдающимся ученым — Леонидом Исааковичем Мандельштамом. Дружба Папалекси и Мандельштама была весьма плодотворной. Они счастливо дополняли друг друга в повседневной жизни и в науке.



Первая научная работа, выполненная Н. Д. Папалекси в 1904 г., была посвящена исследованию электродинамометра, предназначенного для измерения мощности и тока на высокой частоте. Эта работа была защищена в качестве первой диссертации для получе-

ния Н. Д. Папалекси ученой степени доктора натурфилософии. После этого Н. Д. Папалекси работал под руководством Ф. Брауна около 10 лет. Для выполнения второй диссертации Николай Дмитриевич в 1911 г. стал работать в Кембриджском университете под руководством Дж. Дж. Томсона. Представленная к защите в конце 1911 г. диссертация была посвящена исследованию роли нелинейной индуктивности (дресселя с магнитной цепью) в цепи переменного тока. Это была крупная для того времени научная работа с широким использованием математического анализа. Результатами исследования, включая расчетные формулы, и ясным физическим представлением о характере воздействия индуктивности на форму кривой выпрямленного тока пользуются во всем мире и поныне. Успешная защита этой диссертации дала Н. Д. Папалекси право получить ученое звание приват-доцента и читать лекции по физике и прикладным вопросам электротехники.

В годы работы Николая Дмитриевича в Германии им совместно с Л. И. Мандельштамом были разработаны методы измерения частоты и логарифмического декремента затухания колебательных контуров. В основу этих работ был положен «динамометрический эффект». Дальнейшее развитие этих ра-

бот позволило Папалекси построить волномер с непосредственным отсчетом длины волны и широко внедрить его в радиоаппаратуру. В содружестве с Л. И. Мандельштамом была выполнена и разработка «слабая связь», в которой доказывалась необходимость слабой связи между первичным и вторичным контуром в радиотехнических устройствах.

Мировая война прервала работу Николая Дмитриевича в Германии, и в июле 1914 г. он возвратился на родину. В 1914 г. Н. Д. Папалекси занял должность научного консультанта и заведующего лабораторией Русского общества беспроволочных телеграфов и телефонов в Петрограде. Здесь он начал активную деятельность по конструированию и изготовлению усилительных и генераторных радиоламп, радиоприемных и радиопередаточных устройств относительно малой мощности. Эта работа Н. Д. Папалекси увенчалась успехом: уже в конце 1914 г. были серийно изготовлены первые русские радиолампы. На этих лампах были построены первые ламповые усилители низкой частоты, гетеродины и приемники для армии и авиации. «Лампы Папалекси» наполнялись парами ртути при небольшом давлении и имели прямонакальный оксидный катод. Эти лампы впервые были использованы в 1915 г. для создания первой линии радиосвязи между Петроградом и Царским Селом. Несколько позднее на этих лампах была разработана аппаратура военной радиосвязи. Впервые в мире Н. Д. Папалекси ввел в 1914 г. высокочастотный индукционный вакуумный нагрев металлической арматуры ламп при их изготовлении с целью дегазации электродов. Этот метод и поныне лежит в основе всей мировой электровакуумной технологии.

Великую Октябрьскую революцию Николай Дмитриевич воспринял с чувством гордости патриота. После революции его пригласил для работы в Одессе Л. И. Мандельштам. Здесь Папалекси совместно с Мандельштамом начал деятельность по созданию Политехнического института, одновременно развивая исследовательскую работу на Одесском радиозаводе. В Политехническом институте Н. Д. Папалекси стал доцентом кафедры физики, а с 1920 г. — профессором и заведующим кафедрой теоретической электротехники. Одновременно Папалекси читал лекции по радионизмерениям и теории колебаний. В этот период Николай Дмитриевич опубликовал первую часть своих исследований по теории лампового генератора.

Вокруг Николая Дмитриевича в Одесском политехническом институте сгруппировались преподаватели и научные сотрудники, ставшие впоследствии известными деятелями советской науки. Среди них были И. Е. Тамм, К. Б. Романюк, К. В. Стахорский, Е. Я. Шеголев, Я. М. Кравец и многие другие. Н. Д. Папалекси организовал в Политехническом институте вакуумную лабораторию и наладил в ней производство приемно-усилительных ламп, которые по своим параметрам соответствовали широко распространенным позднее лампам типа Р-5.

Летом 1922 г. Николай Дмитриевич совместно с Мандельштамом был при-

глашен руководить лабораторией Треста заводов слабого тока в Москве, но, когда в 1923 г. по инициативе В. П. Вологодина в Петрограде была организована Центральная радиолaborатория ТЗСТ (ЦРЛ), туда были откомандированы Папалекси и Мандельштам; они стали научными руководителями ЦРЛ. Вскоре ЦРЛ завоевала большую известность, а работы, выполненные Папалекси и Мандельштамом, стали важнейшими в ее тематике. В первые годы существования ЦРЛ Папалекси и Мандельштам вели всестороннее изучение электронных ламп, особенно многоэлектродных, с целью устранения малопопулярного тогда диатронного эффекта и связанного с ним блокинга при работе радиосхем; проводили исследования в связи с разработкой систем стабилизации, деления и умножения частоты на основе использования пьезоэлектрических свойств кварца и турмалина, создавали магнитные модуляторы для строящихся радиостанций.

В Ленинграде у Николая Дмитриевича сложились хорошие отношения с виднейшими физиками — А. Ф. Иоффе, А. А. Чернышевым, Н. Н. Семеновым, Д. А. Рожанским, Я. И. Френкелем и др. В результате Николай Дмитриевич надолго становится по совместительству сотрудником Физико-технического института, с 1930 г. — заведует отделом научной радиотехники, с 1931 г. — консультант электрофизического сектора, на базе которого был создан Ленинградский электрофизический институт во главе с А. А. Чернышевым. Одновременно Николай Дмитриевич был пригласен для преподавания в Ленинградский политехнический институт. Начиная с 1928 г. в лаборатории Николая Дмитриевича в ЦРЛ интенсивно разрабатывались вопросы нелинейной радиотехники.

Нелинейная радиотехника привлекла к себе широкий интерес в связи с использованием электронных ламп, причем исследование даже простейших процессов в радиотехнических устройствах связано с использованием сложного математического аппарата. Одним из первых, кто достаточно хорошо излагал подобные задачи, был Н. Д. Папалекси. Дальнейшим этапом в области нелинейной радиотехники было открытие Н. Д. Папалекси и Л. И. Мандельштама резонанса n -го рода, суть которого сводилась к тому, что при воздействии на колебательный контур, регенерированный в схеме с помощью электронной лампы, внешней э. д. с. с частотой приблизительно в n раз выше собственной частоты контура ($n=1, 2, 3...$), в контуре возбуждаются колебания, частота которых в точности в n раз ниже частоты возбуждающей внешней э. д. с.

К резонансу n -го рода примыкает другое явление, впервые также открытое Н. Д. Папалекси с Л. И. Мандельштамом, названное ими асинхронным возбуждением: если на регенерированный контур воздействует внешняя э. д. с., частота которой не находится в целочисленном отношении к собственной частоте контура, то при определенном режиме работы лампы и в определенном интервале амплитуд в контуре возбуждаются колебания с частотой, равной частоте собственных колебаний конту-

ра. В этот же период Н. Д. Папалекси и Л. И. Мандельштам предложили параметрический метод возбуждения колебаний, при котором появление и усиление колебаний происходит за счет энергии, затрачиваемой на периодическое изменение одного из реактивных параметров контура — индуктивности или емкости.

В 1931 г. был построен первый параметрический генератор переменного тока. В последующие годы под руководством Н. Д. Папалекси был создан ряд параметрических генераторов мощностью до 800 Вт с частотой генерируемого тока 860 Гц. После испытаний этого генератора разрабатывались проекты более мощного генератора (до 15 кВт).

Весьма важной областью работ по нелинейной радиофизике явилась разработка с начала 30-х годов методов измерения расстояний с помощью радиоволн, распространяющихся над земной поверхностью или над водой. Этот «радиоинтерференционный» метод основан на интерференции двух или нескольких радиоволн. Поскольку радиоволны распространяются с конечной скоростью, то можно определить расстояние, соответствующее одному периоду интерференционного колебания или его части, а зная число таких колебаний, можно измерить расстояние с большой точностью. Исследователями были разработаны методы передвигного интерферометра — радиолога, радиодальномера и радиозонда. Осуществление этих методов измерения расстояний оказалось возможным после того, как они в 1925 г. в ходе работ в ЦРЛ открыли явление сохранения фазы колебаний при трансформации частоты. Это дало возможность раздельно определять волну, излучаемую в данный момент и пришедшую обратно к месту ее приема. В процессе разработки радиоинтерференционных методов оказалось необходимым тщательное измерение скорости распространения радиоволн над поверхностью, в пределах которой измеряются расстояния. Такие измерения производились под руководством Н. Д. Папалекси в 1932—1934 гг. в Ленинградской области, на Кавказе и на Черном море.

На основании проведенных исследований и разработанной методики были изготовлены различные комплекты аппаратуры и станции, которые использовались в Главсевморпути, Гидрографическом управлении и других организациях. Эта аппаратура маркировалась начальными буквами фамилий Мандельштама, Папалекси и Шеголева (МПШ-2, МПШ-4 и др.).

Нелинейные вопросы радиотехники вышли далеко за пределы исследований в ЦРЛ, их стали развивать многие научные учреждения страны, в СССР образовалась обширная научная школа нелинейной радиотехники. Этому немало способствовала Первая Всесоюзная конференция по нелинейным колебаниям, проходившая в Научно-исследовательском институте физики при МГУ 10—14 ноября 1931 г. В январе 1933 г. в Париже проводилась Первая Международная конференция по нелинейным колебаниям, где с двумя докладами о работах, проводившихся в СССР, выступил Н. Д. Папалекси.

Центр исследований по нелинейным радиотехническим системам уже тогда находился в СССР; нашу научную школу достойно представляли ученики и последователи Папалекси и Мандельштама — А. А. Андронов, В. В. Мигулин, С. М. Рытов, Ю. Б. Кобзарев, С. Э. Хайкин и другие.

Все последующие направления работ по радиолокации, проводившиеся под руководством Д. А. Рожанского, Ю. Б. Кобзарева и других ученых Ленинграда, консультировались Н. Д. Папалекси. В 1934 г., когда Физический институт им. П. Н. Лебедева Академии наук (ФИАН) переехал в Москву, его директор С. И. Вавилов пригласил на работу виднейших ученых страны, в том числе Н. Д. Папалекси. В 1935 г. Н. Д. Папалекси переехал в Москву и возглавил лабораторию колебаний в ФИАН. И здесь продолжалось творческое содружество Папалекси с Мандельштамом; формально Л. И. Мандельштам осуществлял научное руководство двух лабораторий — колебаний (Папалекси) и оптики (Ландсберг). В ФИАН Николай Дмитриевич продолжал развивать свои прежние исследования, разрабатывая новые методы исследования физики колебаний. С 1938 г. Николай Дмитриевич стал также работать в Энергетиче-

ском институте АН СССР, развивая работы по созданию конструкций параметрических генераторов.

Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси обратили внимание на интересные возможности использования радио в астрономии, в частности и для целей радиолокации Луны. Такую возможность они высказали на три года раньше, чем это стало возможным осуществить в США.

По инициативе Н. Д. Папалекси были проведены теоретические расчеты коэффициентов отражения радиоволн от солнечной короны и выяснилось, что имеет место интенсивное радиоизлучение Солнца (В. Л. Гинзбург). Теория получила подтверждение во время экспедиции по исследованию явлений, происходящих во время солнечного затмения летом 1947 г.

Научная и общественная жизнь Николая Дмитриевича была интенсивной и интересной. Еще в 1930 г. он был избран председателем Физического отделения Русского физико-химического общества и президентом этого общества. В 1937 г., когда Советским правительством проводились исследования по освоению Севера, Николай Дмитриевич возглавил комиссию АН СССР по изучению распространения радиоволн

в Арктике и оказанию помощи экспедиции на Северный полюс; в 1944 г. он был избран председателем Научного совета по радиофизике и радиотехнике при АН СССР.

Труды Н. Д. Папалекси неоднократно получали достойное признание. В 1931 г. он стал членом-корреспондентом АН СССР; в 1934 г. ему была присвоена ученая степень доктора технических наук без защиты диссертации, а в 1936 г. ему вместе с Л. И. Мандельштамом была присуждена премия им. Д. И. Менделеева. В 1939 г. Н. Д. Папалекси был избран действительным членом Академии наук СССР, в 1942 г. — удостоен Государственной премии СССР и награжден орденом Ленина. В память о Н. Д. Папалекси АН СССР учредила премию его имени, присуждаемую советским ученым за лучшие научные работы по физике. Николай Дмитриевич до последних дней жизни (он скончался 3 февраля 1947 г.) сохранял бодрость и ясность мышления. Он очень любил молодежь и делился с ней своими знаниями. Он был человеком удивительной скромности, поразительной работоспособности, чутким и деликатным к своим сотрудникам и ученикам, был большим патриотом Советской Родины.

РОГИНСКИЙ В. Ю.

РУДОЛЬФ НИКОЛАЕВИЧ КАРЯКИН

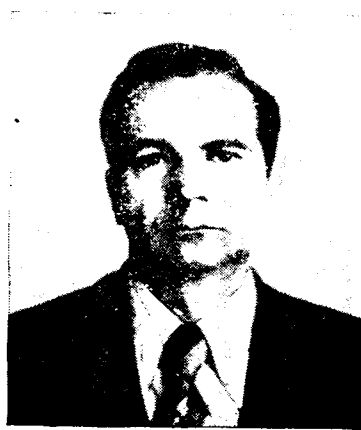
(К 50-летию со дня рождения)

Исполнилось 50 лет со дня рождения доктора технических наук, заместителя директора по научной работе института ВНИИПроектэлектромонтаж, крупного специалиста в области промышленной электроэнергетики Рудольфа Николаевича Карякина.

В 1952 г. Р. Н. Карякин окончил Московский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта и начал свою трудовую деятельность в проектном институте Трансэлектромонтаж Минтрансстроя СССР, затем продолжил ее во Всесоюзном научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта Министерства путей сообщения. С 1970 г. он работает в институте ВНИИПроектэлектромонтаж.

В 1960 г. Р. Н. Карякин защитил кандидатскую диссертацию «Резонанс в тяговых сетях и его демпфирование», которая была опубликована в виде монографии того же названия в 1961 г. Результаты исследований, выполненных в диссертации, используются в Правилах защиты устройств проводной связи от мешающих влияний тяговых сетей переменного тока. Использование результатов исследований позволяет прокладывать магистральные кабели связи в непосредственной близости от полотна железных дорог, электрифицированных на переменном токе.

В 1976 г. Р. Н. Карякин защитил



докторскую диссертацию «Исследование электромагнитных процессов в тяговых сетях переменного тока (в связи с проблемами электробезопасности)», основные результаты которой опубликованы в монографии «Тяговые сети переменного тока». Автором было разработано новое научное направление в области электробезопасности электроустановок, использующих землю в качестве обратного провода. Всего Р. Н. Карякин опубликовал более 50 научных работ.

С 1962 г. он осуществляет научное руководство аспирантами, многие из ко-

торых успешно защитили кандидатские диссертации.

Под руководством Р. Н. Карякина разработаны новые принципы построения заземляющих устройств электроустановок напряжением 0,4—750 кВ. С 1972 г. он работает в области использования металлических и железобетонных строительных конструкций промышленных зданий и сооружений в качестве заземляющих устройств электроустановок напряжением 0,4—220 кВ.

Член Московского правления НТОЭиЭП, Р. Н. Карякин является председателем секции электробезопасности этого правления, председателем секции технологии электромонтажного производства НТС ВНИИПроектэлектромонтаж и членом секции НТС Министерства монтажных и специальных строительных работ, принимает активное участие в работе Международной электротехнической комиссии, являясь председателем Советской рабочей группы подкомитета ПК23А и членом советской рабочей группы Технического комитета ТК 64.

Большая научная, производственная и общественная деятельность, трудолюбие и принципиальность снискали юбиляру заслуженный авторитет и уважение.

Группа товарищей

УКАЗАТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ, ПОМЕЩЕННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» В 1980 г.

Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.	Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА					
Пугачев В. А. — Анализ электромагнитной связи между взаимно ортогональными контурами в нелинейной ферромагнитной среде	1	24	Бельман М. Х. — Расчет квазиустановившегося процесса в нелинейной цепи при импульсном воздействии	8	25
Розенфельд А. С. — Формирование уравнений состояния цепи методом контурных токов	1	29	Хименко Л. Т. — Проникновение импульсного магнитного поля в ферромагнитную пластину	8	30
Руденко В. С., Жуйков В. Я., Коротеев И. Е. — Расчет переходных процессов в цепях с кусочно-непрерывной воздействующей функцией	1	33	Иоссель Ю. Я. — Граничные оценки емкости уединенных проводников	8	47
Щицкян Г. Н., Игнатьев В. И., Меркурьев В. Г. — Экранирующее действие оболочек токопроводов, электрически связанных с проводящим корпусом	1	42	Титов М. Н. — К расчету электрического поля на краю плоского конденсатора с учетом конечной толщины обкладок	8	64
Ивлев А. В., Кибардин А. С., Комин А. В., Кучинский В. Г., Лобанов К. М., Морозов Ю. А. — Индуктивный накопитель с электромагнитным умножением тока	1	47	Кобрин Ю. П., Гольдштейн Е. И., Кобрин Н. В. — Расчет режимов в линейных электрических цепях при периодических воздействиях	8	66
Кофман Д. Б. — Заряд емкостного накопителя постоянной мощностью	1	50	Войнов В. П. — Нелинейные активные линии для моделирования процессов переноса носителей заряда в полупроводниковых структурах	8	69
Бураев Т. К., Сланов В. М. — Индукционная зарядка жидкости в электрическом поле цилиндрического конденсатора	1	53	Толмачев С. Т. — Расчет магнитных полей в нелинейных анизотропных средах	9	7
Калихман С. А. — Взаимодействие импульсного магнитного поля с «полупространством», движущимся с постоянной скоростью	1	66	Струнский М. Г., Горбов М. М. — Расчет частичных емкостей в емкостных преобразователях с учетом формы поперечного сечения контролируемого проводника	9	25
Чагров А. И. — Аналитический метод расчета характеристик электромагнитного формирования-распределителя импульсов	1	68	Королев Е. Ф. — К анализу процесса магнитной записи на относительно тонкий носитель методом Прейсаха	9	66
Блохин Ю. В., Журавлев Э. Н., Ярославский В. И. — К расчету электростатических полей методом эквивалентных зарядов	2	26	Нетушил А. В., Ермуратский П. В. — Об учете сопротивления обкладок конденсатора	9	70
Глузман П. Л. — Метод определения потокораспределения в магнитных цепях устройств с неравномерно распределенными параметрами	2	54	Татур Т. А., Ванслова Г. А., Судаев А. И., Турук В. К. — Электрические волны в мелкослоистых цилиндрических средах	10	51
Ковалев В. Н., Ковалев Ф. И. — Преобразование Лапласа для цепей с периодическим коммутатором	2	56	Товмасын Н. Е., Мирзабекян Ж. М. — Определение электрических потенциалов и емкости двух изолированных цилиндрических проводников	10	66
Григорьев И. Н., Лапшин Е. И. — Выбор параметров емкостного накопителя, энергии для импульсного нагрева проводников	2	58	Бондаренко А. В. — К определению градиента квадрата функции интегральной чувствительности цепи	10	69
Васильев Ю. К., Рыбка Я. В. — Расчет магнитного потока в нейтральном сечении магнита с постоянной рабочей длиной	2	68	Сигорский В. П., Коляда Ю. В. — Рекуррентные системные методы численного расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях	10	72
Ковалев В. Н. — Эквивалентные схемы цепей с однофазным неперiodическим коммутатором	3	24	Глухивский Л. И. — Основные положения дифференциального гармонического метода расчета периодических процессов в нелинейных цепях	11	17
Бурков В. Н., Хранович И. Л. — Об эквивалентном сопротивлении цепи	3	69	Письменный А. И. — Эквивалентные электрические параметры слоистых неферромагнитных сред при проникновении импульсного электромагнитного поля	11	22
Пухов Г. Е. — Дифференциальные преобразования уравнений электрических цепей	4	6	Мустафа Г. М. — Анализ по частям электрических цепей с предельными ключами	11	39
Иванов-Смоленский А. В., Абрамкин Ю. В. — Критерияльная оценка электромагнитных явлений в ферромагнитной пластине с прямоугольным циклом перемагничивания	4	58	Бобров И. И. — Реакция RLC-цепи на импульсное напряжение с широтно-импульсной модуляцией	11	68
Кувалдин А. Б., Сальникова И. П. — Электромагнитная волна в ферромагнитной плите	5	71	Смолкин Р. Д., Сайко О. П. — Расчет электромагнитной пондеромоторной силы в рабочей зоне железоотделителей с плоскомеридианным магнитным полем	11	71
Жеребцов В. А., Столяров М. Д. — Расчет средств защиты от экологического влияния электрического поля	6	39	Синев В. С. — Синтез пассивных обратимых цепей с трансформаторными элементами	12	58
Немков В. С. — Расчет индукторов с использованием импедансных граничных условий	6	64	ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ		
Богаченков А. И., Новожилов О. П. — Оптимизация энергетических режимов ферромагнитного удвоителя частоты с ортогональным управлением	6	71	Хренков Н. Н., Чернышов С. К. — Построение, обработка и анализ температурно-частотных зависимостей потерь высокочастотных диэлектриков	3	56
Тозони О. В. — Принципы электродинамической теории цепей	7	40	Воробьев Г. А. — Об электрическом пробое твердых диэлектриков	4	71
Лукашов Э. С. — О движении центра инерции электрической системы	7	59	Гельман М. З., Мурович В. И. — Расчет пробивного напряжения твердой изоляции в неоднородном поле с заданной вероятностью пробоя	6	61
Афанасьев Ю. В. — О проницаемости тел, находящихся в намагничиваемых средах	7	70	Чорноготский В. М., Джунь Л. П., Максимцов А. Ф. — Электрическая прочность межкатушечной изоляции силовых трансформаторов	8	38
Пеккер Д. И. — О влиянии вихревых токов на переходные процессы в устройствах с кольцевыми сердечниками из ферромагнитной ленты	7	72	Иерусалимов М. Е., Ильенко О. С. — Математическая модель процессов абсорбции в неоднородной изоляции	10	36

- Черноготский В. М., Джуль Л. П. — Электрическая прочность масляных каналов и изоляция края обмотки трансформатора 11 47
- Лысаковский Г. Г., Пильчиков В. Е. — Особенности пробы и ресурсные испытания импульсных кабелей с полиэтиленовой изоляцией 11 61
- Ушаков В. Я., Муратов В. М., Лопатин В. В., Капишиков Н. К., Кухта В. Р., Шемякин А. И. — К выбору оптимальных форм изоляторов высоковольтных импульсных устройств с водяной изоляцией 12 5
- Абасов С. А., Курбанов М. А., Велиев Т. М., Кабулов У. А., Эльмира Д., Бедирханова С. Ш. — Исследование долговечности политетрафторэтилена в среде жидкого азота 12 62
- ### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ТВН
- Хайн М., Глазунов А. А. — О вероятностных и статистических характеристиках токов коротких замыканий в системах электроснабжения 1 5
- Дулуб И. С., Островский В. А., Селвахин А. И. — Метод автоматической коррекции шунтирующего влияния нагрузки на токи короткого замыкания в сельских распределительных сетях 1 58
- Якобс А. И., Конобеева Т. Т. — Об учете неэквивалентности заземляющих устройств при расчете их электрических параметров 1 61
- Федоров Э. К., Шнейерсон Э. М. — Измерительные органы дистанционных защит на основе операционных усилителей 2 3
- Дороднова Т. Н., Михайлова М. В., Рубинчик В. А. — Исследование расчетных условий для выбора параметров характеристики срабатывания избирательных органов устройств ОАПВ 2 15
- Лебедев О. В., Шуин В. А. — Параметры настройки устройств сигнализации замыканий на землю, сравнивающих токи в присоединениях 2 21
- Александров Г. Н., Иванов В. Л., Кадзов Г. Д., Парфенов В. А., Пахомов Л. Н., Петрунькин В. Ю., Подлевский В. А., Селезнев Ю. Г. — О возможности повышения эффективности защитного действия молниесводов с помощью лазерной искры 2 47
- Белоедова И. П., Иванов А. В., Колечицкий Е. С., Ларионов В. П. — Применение электрографии для исследования объемного заряда в длинных воздушных промежутках 2 49
- Шварц З. Л., Мирзабекян Г. З. — Исследование импульсной системы питания промышленных электрофильтров 2 50
- Айзенфельд А. И. — Погрешность определения мест повреждения ВЛ при пренебрежении неоднородностью ее участков 2 52
- Сергеев Ю. Г., Соколова М. В. — Распределение заряда по поверхности при разряде в газовом промежутке с диэлектриком на электроде 2 61
- Будзко И. А., Левин М. С., Мурадян А. Е., Эбина Г. А. — Выбор мощности резервной электростанции сельскохозяйственного предприятия 3 1
- Левинштейн М. Л., Самородов Г. И., Диаковский Э. А. — Повышение динамической устойчивости энергосистем с помощью резисторов в нейтрале трансформаторов 3 6
- Абаджики Г. Е. — Определение динамических характеристик измерительных устройств с делителями высокого напряжения 3 12
- Бесчастнов Г. А., Карпов А. М., Измени Т. М., Семенова Г. С. — Расчет процесса пуска обратного агрегата ГАЭС от статического преобразователя частоты 3 15
- Китаев Г. И., Гольдштейн М. И., Морозов В. Н., Зубрилин А. В. — Разрядные характеристики больших несимметричных воздушных промежутков 3 43
- Волкова О. В., Корявин А. Р. — К оценке минимальной электрической прочности длинных воздушных промежутков 3 46
- Базелян Э. М., Бранденбургский В. А., Пулавская И. Г., Строганов Б. А. — Поражение молнией самолетов 3 48
- Молодцов В. С. — Учет постоянных составляющих затрат в задаче компенсации реактивных нагрузок сложной электрической сети 3 53
- Синьчугов Ф. И. — Основные положения расчета надежности электроэнергетических систем 4 12
- Меерович Э. А., Сапаров А. И., Чалыян К. М., Кухтиков В. А., Базыкин Р. В., Тимонин В. К. — Исследование переходных электромагнитных процессов в пофазно-экранированных токопроводах 4 50
- Верещагин И. П., Ермилов И. В., Морозов Ю. М., Курицын Н. А. — О пробивных напряжениях в электрофильтре 4 55
- Майкопар А. С. — Исследование загрязняемости гладких изоляторов в условиях пустыни 4 57
- Апышев Дж., Неклепаев Б. И. — Анализ переходных процессов в схеме с резонансным безынерционным токоограничивающим устройством 4 62
- Аврцкий В. А., Наймарк Г. В. — Расчет спирального генератора 4 64
- Максимов Б. К., Обух А. А., Тихонов А. В. — Расчет токов электризации нефтепродуктов с учетом изменения их электропроводности 4 70
- Фархадзаде Э. М., Мамед-Велиев В. К. — Устойчивость решения задач теории надежности 5 12
- Щербина Ю. В., Мельников В. П., Ройтельман И. Г. — Моделирование энергосистемы для выбора автоматической частотной нагрузки 5 15
- Кужекин И. П., Калеников А. В. — Расчет электрической прочности промежутков в воде 5 36
- Горбунова Г. Ю., Горин Б. Н. — Регистрация токов коронного разряда на Останкинской телебашне 5 41
- Заргарян И. В., Слуцкий Л. С. — О выборе экранов для опорных изоляционных конструкций 5 47
- Габриелян Р. М. — Учет обусловленности матриц при расчете установившихся режимов электрических систем 5 49
- Авилов-Карнаухов Б. И., Гордеев В. И., Дмитриева Е. Н., Платонов В. В. — Расчет электрических нагрузок фидеров контактной сети и тяговых подстанций открытых горных разработок 5 52
- Пуго В. И. — Эффективность автоматического регулирования возбуждения при больших колебаниях в энергосистеме 6 1
- Орелович Л. С. — Некоторые результаты анализа комбинированной электропередачи 6 8
- Александров Г. И., Полевой А. И., Половой И. Ф. — Движение проводов расщепленной фазы воздушной линии при коротких замыканиях 6 12
- Мельник В. Т. — Управляемый реактор для цифроаналогов физического комплекса исследования энергетических систем 6 45
- Верещагин И. П., Заргарян И. В., Семенов А. В. — Распределение поля в электрофильтрах с игольчатыми электродами 6 48
- Гуревич Ю. Е., Кудрявцева Л. Ф. — Получение вероятностных оценок динамической устойчивости сложных энергосистем 6 55
- Гумерова И. И., Ефимов Б. В., Костенко М. В. — Расчет деформации волн атмосферных перенапряжений в линиях передач 6 58
- Меерович Э. А., Назаров Л. А., Карабаев Г. Х., Кокуркин Б. П. — Измерение токов линий высокого напряжения по их магнитным полям 7 32
- Арзамасцев Д. А., Летун В. М. — Определение экономичного режима гидро-тепловой энергосистемы 7 47
- Попов И. Н., Соколова Г. В. — Селективная направленная защита гидрогенераторов от замыканий на землю 7 51
- Шакарян Ю. Г., Цгоев Р. С., Суханов Л. А., Сафнуллин Р. Х. — О режимах работы мощных асинхронизированных синхронных машин в электрической системе 7 61
- Федоров А. А., Корнилов Г. П. — О применении компенсирующих устройств в системах электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками 7 64
- Яблоньски В., Шатковска-Карпа Б. — Допустимые напряжения прикосновения в проекте стандарта СЭВ 7 67

- Богданов В. А., Коджа М. И., Лисеев М. С., Шульженко С. В. — Программный комплекс МОДЕЛЬ для обработки контрольных замеров и суточных ведомостей в энергосистемах 8 1
- Обабков В. К., Меркулов О. Н., Целуевский Ю. Н. — Особенности функционирования поисковых систем компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях 8 7
- Сирота И. М., Назаров В. В. — Автоматическая коммутация поврежденной фазы в сетях с изолированной нейтралью 8 13
- Зильберблат М. Э., Райс Б. Г. — Определение коэффициента несинусоидальности напряжения сети, питающей вентиляемые преобразователи с фазоповоротными устройствами 8 19
- Ильин В. Д., Куров Б. Н., Баталов А. Г. — Комплекс программ для идентификации и оперативных расчетов потоков мощности по межсистемным сечениям электрообъединений 8 53
- Аввакумов В. Г., Волоцкий А. М. — Области устойчивости при оптимизации качества электроэнергии 8 55
- Федоров А. А., Каменева В. В., Чернуцкий А. И., Стебунова Е. Д., Сидоров С. Т. — Необходимость применения напряжения 20 кВ в распределительных сетях предприятий и городов 8 58
- Костенко М. В., Перельман Л. С. — Простейшая схема трансформации трехфазной ВЛ 8 59
- Седнев А. М. — Эквивалентные преобразования многополюсных линейных схем электрических систем 8 61
- Митюшкин К. Г. — Погрешность передачи телеизмерений в многоуровневых системах динамического управления 9 1
- Базелян Э. М., Понизовский А. З., Слуцкий Л. С. — Электрическая прочность воздушных промежутков при колебательных импульсах напряжения 9 34
- Жарков Ю. И. — Автоматический контроль технического состояния систем релейной защиты и противоаварийной автоматики 9 44
- Блоцкий Н. Н., Бронштейн Э. Л., Дашеев С. О., Мамиконянц Л. Г., Темижев М. Э., Цгоев Р. С., Шакарян Ю. Г. — Испытания на электродинамической модели электромеханического преобразователя частоты для гибкой связи электрических систем 9 47
- Бранденбургский В. А. — Модельные исследования роли электризации самолета в процессе иницирования молнии 9 50
- Дулуб И. С., Кошкин Ю. Л., Островский В. А. — Методика определения эффективности внедрения указателей короткого замыкания в сельских сетях 6—10 кВ 9 52
- Урин В. Д. — Оптимизация состава включенного оборудования энергосистемы 9 56
- Груздев И. А., Нгуен Виет Тинь, Терешко Л. А. — Особенности выбора настроек автоматических регуляторов возбуждения генераторов по условию максимума степеней устойчивости 9 58
- Соколов Н. И., Фокин В. К. — О синхронном реактивном самовозбуждении 9 61
- Герасимов Л. С., Икрянников В. И. — Зарядка водяного накопителя энергии от плоского взрывомагнитного генератора 9 63
- Совалов С. А., Баринов В. А. — Математические модели установленных режимов электроэнергетических систем 10 11
- Хачатрян В. С., Балебекян М. А. — К теории оптимизации режимов больших электроэнергетических систем 10 55
- Меерович Э. А., Чальян К. М. — Экранирующий эффект в системах мощных трехфазных токопроводов при различных схемах соединения экранов 10 58
- Мусин А. К., Тимофеева Г. Г. — Деионизация разреженной плазмы во внешнем электрическом поле в секционированных газоразрядных приборах низкого давления 10 64
- Оранский А. Г. — Вероятностная модель автоматического управления стационарным режимом энергосистемы 11 1
- Жежеленко И. В., Степанов В. П. — Оценка интервала осреднения при определении расчетных нагрузок 11 8
- Александров Г. Н., Сергеев А. С. — Оптимальное экранирование опорных изоляционных конструкций электрических аппаратов 11 12
- Илиев С. — Метод оценки динамического поведения электроэнергетических систем 11 53
- Молодцов В. С. — Учет фактора времени в задаче компенсации реактивных нагрузок сложной электрической сети 11 55
- Орел О. А. — О регулировании реактивной мощности группы синхронных двигателей 11 60
- Качанова Н. А., Шелухин Н. Н. — Эквивалентирование схем и режимов электроэнергетических систем 12 9
- Баринов В. А. — Исследование статической устойчивости электроэнергетических систем методом последовательных приближений 12 14
- Хачатрян В. С., Сафарян В. С. — Метод декомпозиции и коррекции Z-матрицы обобщенных параметров электрических систем 12 18
- Алексеев С. В., [Копылов И. Б.], Машанский А. М. — Описание электрообъединения как объекта управления режимом по частоте и активной мощности 12 23

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

- Гуревич Э. И. — Оценка локальных повышений температуры электрической обмотки на основе метода сопротивления 1 11
- Вершинин П. П., Бугаенко А. В., Войцех В. С. — Определение реактивной мощности синхронных машин методом планирования эксперимента 1 56
- Глебов И. А., Данилевич Я. Б., Иогансен В. И., Кад-Оглы И. А., Чернявский В. П., Шапиро А. Б. — Турбогенератор мощностью 800 МВт, 3000 об/мин с полным водяным охлаждением 2 3
- Лупкин В. М. — Решение линейных дифференциальных уравнений двухфазного короткого замыкания синхронной машины 2 31
- Кицис С. И. — Исследование регулировочных свойств асинхронного самовозбуждающегося генератора 2 36
- Шапиро Л. Я., Исембергенов Н. Т., Лабунец И. А. — Потери от вихревых токов в сердечниках роторов асинхронизированных синхронных машин 3 50
- Чабан В. И., Сивокобыленко В. Ф. — Расчет группового выбега и разгона электрических машин 3 59
- Лифанов В. А., Зильберман С. З., Мармелев Г. Н., Воронин С. Г. — Оптимизация параметров обмотки якоря бесконтактных моментных двигателей постоянного тока 4 27
- Сивокобыленко В. Ф., Костенко В. И. — Математическое моделирование широкополосных асинхронных машин 4 32
- Ефименко Е. И. — Обобщение теории электрических машин с магнитной асимметрией 4 36
- Нетленко Б. И., Дергачев А. Е. — Расчет сил динамического торможения односторонних линейных асинхронных двигателей с комбинированной вторичной цепью 4 45
- Толкунов В. П., Шевченко В. В. — Проблемы создания машин постоянного тока предельной мощности 5 9
- Ледовский А. Н., Сугробов А. М. — Оптимальное проектирование индукторных генераторов 5 20
- Веселовский О. Н. — Расчет характеристик низкоскоростных линейных асинхронных двигателей 5 26
- Демирчян К. С., Богуславский И. З. — Расчет токов и потерь в роторе короткозамкнутого асинхронного двигателя с помощью обобщенной характеристики м. д. с. ротора 5 58
- Зайчик В. М. — О выборе соотношений магнитных индукций в зубцах и ярме асинхронных машин 5 60
- Лутидзе Ш. И., Лагвилава Ю. И., Кохреидзе Т. К. — Исследование электромеханических переходных процессов в погружном электродвигателе при асимметрии ротора 5 64

- Данько В. Г., Ружинский Л. Н., Грубой А. П. — Магнитное поле обмотки статора беззубцового генератора с многослойной структурой ротора 6 18
- Нахамкин А. М., Рубинраут А. М. — Исследование шихтованного ферромагнитного экрана криогенной электрической машины 6 24
- Блок В. М. — Выбор оптимальной мощности трансформаторов по универсальным номограммам экономических интервалов 6 51
- Загорский А. Е., Сафарян А. А. — Проектирование синхронных генераторов с заданными динамическими свойствами 9 37
- Власов Е. Н., Саблин А. Д., Ходжаев К. Ш. — Уравнения медленных переходных процессов синхронной машины 9 41
- Хуторецкий Г. М., Городецкий В. В., Зубков Ю. С. — Особенности разработки системы автоматизированного проектирования крупных электрических машин 10 18
- Кицис С. И. — Переходные процессы в асинхронном самовозбуждающемся генераторе при внезапном трехфазном коротком замыкании 10 23
- Черновец А. К., Меркурьев Г. В., Солоненкин А. А., Гольдманн Д. — Быстродействие и селективность выявления потери возбуждения мощных турбогенераторов 10 29
- Сафонов Л. Н., Волнянский В. Н., Русаков Л. Г. — Фазовращатели с модуляцией проводимости выходных цепей 11 26
- Артюхов Е. А. — Фазовращатель на основе синусо-косинусного вращающегося трансформатора с РС-цепью 11 50
- Синев В. С. — Схема симметрирования напряжения трехобмоточного тягового трансформатора 11 58

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Быков Ю. М., Василенко В. С. — Исследование входного тока непосредственного преобразователя частоты методами теории случайных процессов 1 17
- Лахов А. В., Левкович М. И. — Точность индукционного датчика угла в схеме с двойным преобразованием напряжения 1 62
- Мызык Г. С. — Анализ упрощенной схемы непосредственного преобразователя частоты с циклическим алгоритмом управления 2 41
- Денисов А. И. — Применение функций Уолша к приближенному аналитическому расчету систем электропитания с глубокой широтно-импульсной модуляцией 2 63
- Антонов Б. М., Случанко Е. И. — Методика исследования вентиляльных преобразователей при ненулевых начальных условиях 3 19
- Троицкий В. А. — Об одном способе плавного амплитудного регулирования напряжения 3 33
- Нгуен Ван Хай — Об одном методе оценки динамических характеристик тиристорных преобразователей при различных нагрузках 3 64
- Лабунцов В. А. — Научно-технические проблемы преобразовательной техники 5 5
- Жемеров Г. Г., Коваленко И. Т. — Расчет тиристорных непосредственных преобразователей частоты 5 31
- Морозов Ю. А., Бурухин Г. Н., Филиппов Ю. А. — Частотные характеристики возбудителей с неуправляемыми выпрямителями 5 44
- Архиреев И. П., Данилевич О. И., Пилипенко В. Н. — Переходные процессы при включении трехфазного мостового зарядного выпрямителя 5 68
- Исхаков А. С., Придатков А. Г. — Математическая модель выпрямителя 6 34
- Булатов О. Г., Лабунцов В. А., Пономаренко А. И. — Развитие одноканальных систем управления вентиляльными преобразователями 9 14
- Данилевич О. И. — Анализ электромагнитных процессов в однофазном одноканальном выпрямителе 10 41
- Савин А. Г. — Трансформаторно-тиристорные регулируемые преобразователи напряжения переменного тока 11 30
- Файнштейн Э. Г., Файнштейн В. Г. — Упрощенная импульсная модель вентиляльного преобразователя 11 34
- Волович Г. И. — Передаточные функции широтно-импульсных преобразователей с учетом свойств первичных источников питания 11 65
- Кацнельсон С. М., Ознобкин Ю. В. — Мощные тиристорные преобразователи ультразвуковой частоты с отсекающими диодами 12 31
- Шипило В. П., Чикотило И. И. — Устойчивость замкнутой системы с тиристорным широтно-импульсным преобразователем в режиме прерывистого тока 12 52

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

- Попов А. А., Шлейфман И. Л. — Влияние начальной части восстанавливающегося напряжения на отключающую способность воздушных выключателей 3 29
- Буль Б. К., Абдуллаев Я. Р., Резцов В. М. — О точности работы стабилизатора переменного тока на принципе индукционной подвески 3 61
- Строганов Б. Г., Чунихин А. А. — Эффект вторичного воздействия в трансформаторах тока 3 67
- Брон О. Б., Лярский Б. А., Куклев Ю. В. — Вихри плазмы в дуге, движущейся в узлах изоляционных щелях 4 16
- Шилин Н. В. — Восстанавливающаяся электрическая прочность масляных выключателей при гашении дуги 4 21
- Зекцер Д. М., Зекцер М. Д. — Учет магнитных проводимостей выпучивания, образующих конические фигуры 4 67
- Долинский Ю. М. — Термический режим в анодном основании сильноточной электрической дуги 6 30
- Железняков А. Т., Малин В. А. — Расчет электромагнитов постоянного тока по номограммам 6 53
- Загирияк М. В., Бранспиз Ю. А. — Расчет магнитного поля в обмоточной зоне П-образного электромагнита 6 66
- Намитоков К. К., Пермяков В. И., Ильина Н. А., Хмельницкий Р. С., Шкловский И. Г. — Управление интегральными характеристиками быстродействующих предохранителей 8 34
- Бальян Р. Х., Рошаль М. И. — Повышение эффективности феррорезопапсных стабилизаторов напряжения 9 21
- Багинский Л. В. — К анализу переходных процессов в глубоконасыщенных трансформаторах тока при активной нагрузке 10 47
- Афанасьев В. В., Добрянская Н. А., Убийко А. М., Цевровский Г. Г. — Исследование отключающей способности контактов при многократных отключениях 11 45

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Петров Л. П., Подзолов Р. Г. — Динамическое торможение асинхронных электроприводов с тиристорным фазовым управлением 3 37
- Юнков М. Г., Ильинский И. Ф. — Перспективы развития автоматизированного электропривода 5 1
- Сандлер А. С., Янура Я. — Статические и динамические режимы в асинхронном вентиляльном каскаде с автономным питанием 5 55
- Гончарук Ю. Л., Терешкин Д. С. — Метод исследования электропривода с учетом упругих связей на математической модели 8 43
- Корхин А. С. — Инженерный метод идентификации объектов с запаздыванием 10 61
- Петров Л. П., Ладензон В. А., Печковский И. И. — Физико-математическое регулирование асинхронных электроприводов с преобразователями частоты 12 45
- Шестаков В. М. — Исследование и оптимизация динамики многодвигательных электроприводов с упругими связями 12 47

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

Бочаров В. И., Фришман Е. М., Либерман В. Л., Смоленчук В. С. — Системы магнитного подвеса для бесконтактного транспорта 12 35
 Ефремов В. И., Тюрин В. П. — Оценка параметрической надежности электронных систем тяговых электроприводов методом нелинейного физического моделирования 12 41

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ, ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ, ЭЛЕКТРОСВАРКА

Павлов Н. А. — Расчет индукторов для нагрева ферромагнитных цилиндрических тел 1 39
 Максимов Н. П., Степаняц С. Л. — Частотная передаточная функция для исследования САР руднотермической печи 6 68

ДИСКУССИИ

Подгорный Э. В., Дроздов А. Д. — Погрешности работы трансформаторов тока при трансформации неустановившихся токов — по статьям Сироты И. М., Стогния Б. С. (№ 4, 1978) и Казанского В. Е. (№ 4, 1978) 1 71
 Холмский Д. В., Ванеев Б. Н. — Приведенные затраты и надежность энергосистем — по статье Смирнова Э. П. (№ 8, 1978) 3 71
 Герасимов В. Н. — Об эффекте от применения потребителей-регуляторов в энергосистемах — по статье Денисова В. И. и Яркина Е. В. (№ 8, 1978) 3 73
 Аникин В. Ф., Фалов Б. М. — Система показателей качества электрической энергии — по статье Константинова Б. А., Жежеленко И. В., Никифоровой В. Н. (№ 9, 1978) 4 73
 Стернинсон Л. Д. — О значениях некоторых параметров тепломеханического оборудования электростанций и их влияния на длительные переходные процессы в энергосистемах — по статье Алексеева С. В., [Копылова И. Б.] Машанского А. М. (№ 12, 1980) 12 6

БИБЛИОГРАФИЯ

Воскресенский А. А. — рецензия на книгу Казанского В. Е. «Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики» 2 71
 Сивокобыленко В. Ф. — рецензия на книгу Неклепаева Б. Н. «Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах» 2 72
 Тареев Б. М. — рецензия на книгу Маклепа Е. Д. «Термисторы» 3 75
 Веников В. А. — рецензия на книгу под ред. Савалова С. А. «Автоматизация управления энергообъединениями» 4 75
 Корж Н. А. — рецензия на книгу Рябковой Е. Я. «Заземления в устройствах высокого напряжения» 5 73
 Журавлев В. Г. — рецензия на книгу под ред. Веникова В. А. «Электрические системы: автоматизированные системы управления режимами энергосистем» 8 71
 Тареев Б. М., Иерусалимов М. Е., Ильенко О. С., Кириленко В. М. — рецензия на книгу Кучинского Г. С. «Частичные разряды в высоковольтных конструкциях» 8 72
 Шаталов А. С. — рецензия на книгу Херпи М. «Аналоговые интегральные схемы. Операционные усилители и аналоговые умножители» 10 74

ХРОНИКА

Богатенков И. М., Гольдштейн В. Г., Халилов Ф. Х. — Перенапряжения и защита от них в распределительных сетях и сетях генераторного напряжения 1 73

Гришин В. Ф., Соколовский С. М. — Международная выставка «Электротехнология-80» — путь к совершенствованию производства» 1 75
 Каялов Г. М. — Первая сессия семинара «Промышленные электрические сети и их нагрузки» 2 73
 Данилевич Я. Б. — Проблемы механики в генераторостроении 2 74
 Ларионов В. П. — XV Европейская конференция по молниезащите 3 76
 Шидловский А. К., Михалевич Г. А. — Всесоюзная научно-техническая конференция «проблемы преобразовательной техники» 5 74
 Бортников Ю. С. — Заседание секции № 6 Научного совета по комплексной проблеме «Научные основы электрофизики и электроэнергетики» ОФТПЭ АН СССР 6 74
 Лепер Д. П. — V семинар по физике гашения дуги в выключателях высокого напряжения 6 75
 Тареев Б. М., Наумывчева К. И., Петрин Б. К., Вчерашний В. П. — Юбилей реферативного журнала «Электротехника и энергетика» 6 77
 Рекомендации по организации работы общественных научно-исследовательских институтов (лабораторий, групп) 7 74
 Шмонина Л. И. — Перспективы применения новых электротехнических материалов как основы развития электромашиностроения 7 76
 Никитин П. З. — Семинар по вопросам старения изоляции крупных электрических машин 7 77
 Моцохейн Б. И., Шинянский А. В. — VIII Всесоюзная конференция по проблемам автоматизированного электропривода, силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе 8 73
 Страхов С. В. — В электротехнической секции Московского Дома ученых АН СССР 8 75
 Тамкиви П. И. — Научно-техническое совещание «Проблемы электромагнитного совмещения силовых полупроводниковых преобразователей» 9 73
 Афанасьев В. В., Бронштейн А. М., Уткин А. И. — VIII Всесоюзное научно-техническое совещание «Перспективы развития высоковольтной аппаратуры в XI пятилетке» 9 74
 Розенбулат М. А., Субботина Г. В. — XVI Всесоюзное совещание «Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники» 10 75
 Коновалова Л. К. — Научно-техническая конференция «Электробезопасность в народном хозяйстве» 12 67

ЮБИЛЕИ

Андрей Георгиевич Захарии (К 75-летию со дня рождения) 1 76
 Сергей Андронникович Волотковский (К 75-летию со дня рождения) 1 77
 Хасил Фазылович Фазылов (К 70-летию со дня рождения) 1 77
 Георгий Николаевич Александров (К 50-летию со дня рождения) 2 76
 Игорь Владимирович Жежеленко (К 50-летию со дня рождения) 3 78
 Геннадий Антонович Сипайлов (К 60-летию со дня рождения) 4 77
 Самуил Исаакович Рабинович (К 75-летию со дня рождения) 5 75
 Алексей Алексеевич Булгаков (К 70-летию со дня рождения) 5 76
 Василий Александрович Яковенко (К 70-летию со дня рождения) 5 76
 Александр Александрович Янко-Триницкий (К 70-летию со дня рождения) 5 77
 Константин Михайлович Поливанов (К 75-летию со дня рождения) 6 77
 Альберт Иосифович Бертинов (К 75-летию со дня рождения) 6 78
 Ефим Маркович Синельников (К 75-летию со дня рождения) 8 76
 Владимир Владимирович Бургсдорф (К 70-летию со дня рождения) 8 77
 Ольгерд Владиславович Слежановский (К 60-летию со дня рождения) 8 78

Борис Григорьевич Меньшов (К 50-летию со дня рождения)	8	78
Андроник Гевондович Иосифьян (К 75-летию со дня рождения)	9	75
Андрей Павлович Альтгаузен (К 70-летию со дня рождения)	9	76
Сергей Петрович Розанов (К 60-летию со дня рождения)	9	77
Игорь Александрович Будзко (К 70-летию со дня рождения)	11	76
Николай Дмитриевич Папалекси (К 100-летию со дня рождения)	12	68
Рудольф Николаевич Карякин (К 50-летию со дня рождения)	12	70

НЕКРОЛОГИ

Абрам Борисович Чернин	1	78
Абрам Соломонович Сандлер	2	78
Николай Семенович Ильченко	2	78
Владимир Владиславович Пучковский	4	78
Кязим Новруз Али Оглы Кулизаде	5	78
Василий Кузьмич Щербаков	9	78
Олег Владимирович Щербачев	9	78
Петр Афанасьевич Ионкин	10	77
Владимир Васильевич Мешков	10	78
Михаил Миронович Акодис	11	78



АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ СТАТЕЙ

А	
Абаджиди Г. Е.	3, 12
Абасов С. А.	12, 62
Абдуллаев Я. Р.	3, 61
Абрамкин Ю. В.	4, 58
Аввакумов В. Г.	8, 55
Авилов-Карнаухов Б. Н.	5, 52
Авруцкий В. А.	4, 64
Айзенфельд А. И.	2, 52
Александров А. П.	7, 3
Александров Г. Н.	2, 47; 6, 12; 11, 12
Алексеев С. В.	12, 23
Аникин В. Ф.	4, 73
Антонов А. К.	7, 5
Антонов Б. М.	3, 19
Апышев Дж.	4, 62
Арзамасцев Д. А.	7, 47
Артюхов Е. А.	11, 50
Архиереев И. П.	5, 68
Афанасьев В. В.	9, 74; 11, 45
Афанасьев Ю. В.	7, 70

Б

Багинский Л. В.	10, 47
Базелян Э. М.	3, 48; 9, 34
Базыкин Р. В.	4, 50
Бакин Б. В.	7, 5
Балабекян М. А.	10, 55
Бальян Р. Х.	9, 21
Баринов В. А.	10, 11; 12, 14
Баталов А. Г.	8, 53
Бедирханова С. Ш.	12, 62
Белоседова И. П.	2, 49
Бельман М. Х.	8, 25
Бертинов А. И.	7, 9
Бесчастнов Г. А.	3, 15
Блок В. М.	6, 51
Блохин Ю. В.	2, 26
Блоцкий Н. Н.	9, 47
Бобров И. И.	11, 68
Богатенков И. М.	1, 73
Богаченков А. Н.	6, 71
Богданов В. А.	8, 1

Богуславский И. З.	5, 58
Бондаренко А. В.	10, 69
Борисов Е. И.	12, 3
Бортников Ю. С.	6, 74
Бочаров В. И.	12, 35
Бранденбургский В. А.	3, 48; 9, 50
Брансиз Ю. А.	6, 66
Брон О. Б.	4, 16
Бронштейн А. М.	9, 74
Бронштейн Э. Л.	9, 47
Бугаенко А. В.	1, 56
Будзко И. А.	3, 1; 7, 15
Булатов О. Г.	9, 14
Буль Б. К.	3, 61
Бураев Т. К.	1, 53
Бурков В. Н.	3, 69
Бурухин Г. И.	5, 44
Быков Ю. М.	1, 17

В

Валов Б. М.	4, 73
Ванеев Б. Н.	3, 72
Ванслова Г. А.	10, 51
Василенко В. С.	1, 17
Васильев Ю. К.	2, 68
Велиев Т. М.	12, 62
Веников В. А.	4, 75; 7, 22; 10, 1
Верещагин И. П.	4, 55; 6, 48
Вершинин П. П.	1, 56
Веселовский О. Н.	5, 26
Власов Е. Н.	9, 41
Войнов В. П.	8, 69
Войцех В. С.	1, 56
Волкова О. В.	3, 46
Волнянский В. Н.	11, 26
Волович Г. И.	11, 65
Волоцкий А. М.	8, 55
Воробьев Г. А.	4, 71
Воронин С. Г.	4, 27
Воскресенский А. А.	2, 71
Вчерашний В. П.	6, 77

Г

Габриелян Р. М.	5, 49
Гельман М. З.	6, 61
Герасимов В. Н.	3, 73

РАЗНЫЕ СТАТЬИ И ИНФОРМАЦИИ

Ковалев Н. Н., Козаков А. К. — VI (электротехнический) отдел Русского технического общества — прообраз НТО энергетики и электротехнической промышленности	1	1
Государственные премии СССР 1979 г.	2	1
Карцев В. П., Стеклов В. Ю. — В. И. Ленин и электрификация	4	1
Непорожний П. С. — Пропагандист и проводник в жизнь ленинских идей электрификации страны	7	6
Никитин Ю. А. — Летопись отечественной электротехники	7	8
Бертинов А. И., Евсеев Б. Н. — Журнал «Электричество» в период реализации плана ГОЭЛРО и строительства социализма в СССР (1922—1941 гг.)	7	9
Будзко И. А. — Журнал «Электричество» во время Великой Отечественной войны и первых послевоенных пятилеток (1944—1956 гг.)	7	15
Веников В. А. — Прогресс электротехники и электроэнергетики и журнал «Электричество» (1956—1979 гг.)	7	22
Веников В. А., Ефремов И. С., Копылов И. П. — Развитие электроэнергетики и электромеханики в Московском энергетическом институте	10	1
Борисов Е. И. — Электроэнергетика СССР от плана ГОЭЛРО до наших дней	12	3

Герасимов Л. С.	9, 63
Глазунов А. А.	1, 5
Глебов И. А.	2, 3
Глузман П. Л.	2, 54
Глухивский Л. И.	11, 17
Гольдманн Д.	10, 29
Гольдштейн В. Г.	1, 73
Гольдштейн Е. И.	8, 66
Гольдштейн М. И.	3, 43
Гончарук Ю. Л.	8, 43
Горбов М. М.	9, 25
Горбунова Г. Ю.	5, 41
Гордеев В. И.	5, 52
Горин Б. Н.	5, 41
Городецкий В. В.	10, 18
Григорьев И. Н.	2, 58
Гришин В. Ф.	1, 75
Гриценко Н. Н.	7, 4
Грубый А. П.	6, 18
Груздев И. А.	9, 58
Гумерова Н. И.	6, 58
Гуревич Э. И.	1, 11
Гуревич Ю. Е.	6, 55

Д

Данилевич О. И.	5, 68; 10, 41
Данилевич Я. Б.	2, 3; 2, 74
Данько В. Г.	6, 18
Дашеев С. О.	9, 47
Демирчян К. С.	5, 58
Денисов А. И.	2, 63
Дергачев А. Е.	4, 45
Джунь Л. П.	8, 38; 11, 47
Диаковский Э. А.	3, 6
Дмитриева Е. Н.	5, 52
Добрянская Н. А.	11, 45
Долинский Ю. М.	6, 30
Дороднова Т. Н.	2, 15
Дроздов А. Д.	1, 71
Дулуб И. С.	1, 58; 9, 52

Е

Евсеев Б. Н.	7, 9
Елютин В. П.	7, 6

Ермилов И. В. 4, 55
Ермуратский П. В. 9, 70
Ефименко Е. И. 4, 36
Ефимов Б. В. 6, 58
Ефремов В. И. 12, 41
Ефремов И. С. 10, 1

Ж

Жарков Ю. И. 9, 44
Жежеленко И. В. 11, 8
Железняков А. Т. 6, 53
Жемеров Г. Г. 5, 31
Жеребцов В. А. 6, 39
Жуйков В. Я. 1, 33
Журавлев В. Г. 8, 71
Журавлев Э. П. 2, 26

З

Загирняк М. В. 6, 66
Загорский А. Е. 9, 37
Зайчик В. М. 5, 60
Заргарян И. В. 5, 47; 6, 48
Зекцер Д. М. 4, 67
Зильберблат М. Э. 8, 19
Зильберман С. З. 4, 27
Зубков Ю. С. 10, 18

И

Иванов А. В. 2, 49
Иванов В. Л. 2, 47
Иванов-Смоленский А. В. 4, 58
Ивлев А. В. 1, 47
Игнатъев В. И. 1, 42
Иерусалимов М. Е. 8, 72; 10, 36
Икрянников В. И. 9, 63
Илиев С. 11, 53
Ильенко О. С. 8, 72; 10, 36
Ильин В. Д. 8, 53
Ильина Н. А. 8, 34
Ильинский Н. Ф. 5, 1
Иогансен В. И. 2, 3
Иоссель Ю. Я. 8, 47
Исембергенов Н. Т. 3, 50
Исхаков А. С. 6, 34
Иштинский А. Ю. 7, 4

К

Кабулов У. А. 12, 62
Кадзов Г. Д. 2, 47
Кадн—Оглы И. А. 2, 3
Калеников А. В. 5, 36
Калихман С. А. 1, 66
Каменева В. В. 8, 58
Канишников Н. К. 12, 56
Карабаев Г. Х. 7, 32
Карпов А. М. 3, 15
Карцев В. П. 4, 1
Кацнельсон С. М. 12, 31
Качанова Н. А. 12, 9
Каялов Г. М. 2, 73
Кибардин А. С. 1, 47
Кирилленко В. М. 8, 72
Китаев Г. И. 3, 43
Кицис С. И. 2, 36; 10, 23
Кобрин Ю. П. 8, 66
Кобрин Н. В. 8, 66
Ковалев В. Н. 2, 56; 3, 24
Ковалев Н. Н. 1, 1; 7, 4
Ковалев Ф. И. 2, 56
Коваленко И. Т. 5, 31
Коджа М. И. 8, 1
Козаков А. К. 1, 1
Кокуркин Б. П. 7, 32
Колечицкий Е. С. 2, 49
Коляда Ю. В. 10, 72
Комин А. В. 1, 47
Коновалова Л. К. 12, 67

Копылов И. П. 10, 1
Корж П. А. 5, 73
Корнилов Г. П. 7, 64
Королев Е. Ф. 9, 66
Коротеев И. Е. 1, 33
Корхин А. С. 10, 61
Корявин А. Р. 3, 46
Костенко В. И. 4, 32
Костенко М. В. 6, 58; 8, 59
Кофман Д. Б. 1, 50
Кохреидзе Т. К. 5, 64
Кошкин Ю. Л. 9, 52
Кувалдин А. Б. 5, 71
Кудрявцева Л. Ф. 6, 55
Кужский И. П. 5, 36
Куклев Ю. В. 4, 16
Курбанов М. А. 12, 62
Курицын Н. А. 4, 55
Куров Б. Н. 8, 53
Кухта В. Р. 12, 56
Кухтиков В. А. 4, 50
Кучинский В. Г. 1, 47

Л

Лабунец И. А. 3, 50
Лабунцов В. А. 5, 5; 9, 14
Лагвилава Ю. И. 5, 64
Ладензон В. А. 12, 45
Лапшин Е. И. 2, 58
Ларионов В. П. 2, 49; 3, 76
Лахов А. В. 1, 62
Лебедев О. В. 2, 21
Левин М. С. 3, 1
Левинштейн М. Л. 3, 6
Левкович М. И. 1, 62
Ледовский А. Н. 5, 20
Лепер Д. П. 6, 75
Летун В. М. 7, 47
Либерман В. Л. 12, 35
Лисеев М. С. 8, 1
Лифанов В. А. 4, 27
Лобанов К. М. 1, 47
Лопатин В. В. 12, 56
Лукашов Э. С. 7, 59
Лупкин В. М. 2, 31
Лутидзе Ш. И. 5, 64
Лысаковский Г. Г. 11, 61
Лярский Б. А. 4, 16

М

Майкопар А. С. 4, 57
Максимцов А. Ф. 8, 38
Максимов Б. К. 4, 70
Максимов П. П. 6, 68
Малли В. А. 6, 53
Мамед—Велиев В. К. 5, 12
Мамиконяц Л. Г. 9, 47
Мармелев Г. Н. 4, 27
Марчук Г. И. 7, 3
Машанский А. М. 12, 23
Меерович Э. А. 4, 50; 7, 32; 10, 58
Мельник В. Т. 6, 45
Мельников В. П. 5, 15
Меркулов О. Н. 8, 7
Меркурьев В. Г. 1, 42
Меркурьев Г. В. 10, 29
Мирзабекян Г. З. 2, 50
Мирзабекян Ж. М. 10, 66
Митюшкин К. Г. 9, 1
Михайлова М. В. 2, 15
Михалевич Г. А. 5, 74
Молодцов В. С. 3, 53; 11, 55
Морозов В. Н. 3, 34
Морозов Ю. А. 1, 47
Морозов Ю. М. 4, 55
Морозова Ю. А. 5, 44

Моцохейн Б. И. 8, 73
Мурадян А. Е. 3, 1
Муратов В. М. 12, 56
Мурович В. И. 6, 61
Мусин А. К. 10, 64
Мустафа Г. М. 11, 39
Мыщык Г. С. 2, 41

Н

Назаров В. В. 8, 13
Назаров Л. А. 7, 32
Наймарк Г. В. 4, 64
Намитоков К. К. 8, 34
Наумычева К. И. 6, 75
Нахамкин А. М. 6, 24
Нгуен Ван Хай 3, 64
Нгуен Виет Тинь 9, 58
Неклепаев Б. Н. 4, 62
Немков В. С. 6, 64
Непорожний П. С. 7, 4; 7, 6
Нетушил А. В. 9, 70
Никитин П. З. 7, 77
Никитин Ю. А. 7, 8
Новожилов О. П. 6, 71
Нэмени Т. М. 3, 15

О

Обабков В. К. 8, 7
Обух А. А. 4, 70
Ознобкин Ю. В. 12, 31
Оранский А. Г. 11, 1
Орел О. А. 11, 60
Орелович Л. С. 6, 8
Островский В. А. 1, 58; 9, 52

П

Павлов Н. А. 1, 39
Парфенов В. А. 2, 47
Пахомов Л. Н. 2, 47
Пеккер Д. И. 7, 72
Перельман Л. С. 8, 59
Пермяков В. И. 8, 34
Петленко Б. И. 4, 45
Петрик Б. К. 6, 77
Петров Л. П. 3, 37; 12, 45
Петрунькин В. Ю. 2, 47
Печковский И. И. 12, 45
Пилипенко В. Н. 5, 68
Пильщиков В. Е. 11, 61
Письменный Э. И. 11, 22
Платонов В. В. 5, 52
Подгорный Э. В. 1, 71
Подолов Р. Г. 3, 37
Подлевский В. А. 2, 47
Полевой А. И. 6, 12
Половой И. Ф. 6, 12
Понизовский А. З. 9, 34
Попомаренко А. И. 9, 14
Попов А. А. 3, 29
Попов И. Н. 7, 51
Придатков А. Г. 6, 34
Пугачев В. А. 1, 24
Пуго В. И. 6, 1
Пудавская И. Г. 3, 48
Пухов Г. Е. 4, 6

Р

Райс Б. Г. 8, 19
Резцов В. М. 3, 61
Рогинский В. Ю. 12, 68
Розенблат М. А. 10, 75
Розенфельд А. С. 1, 29
Ройтельман И. Г. 5, 15
Рошаль М. И. 9, 21
Рубинраут А. М. 6, 24
Рубинчик В. А. 2, 15
Руденко В. С. 1, 33
Ружинский П. Н. 6, 18
Русаков Л. Г. 11, 26
Рыбка Я. В. 2, 68

С

Саблин А. Д. 9, 41
Савин А. Г. 11, 30
Сайко О. П. 11, 71
Сальникова И. П. 5, 71
Самородов Г. И. 3, 6
Сандлер А. С. 5, 55
Сапаров А. И. 4, 50
Сафарян А. А. 9, 37
Сафарян В. С. 12, 18
Сафиулина Р. Х. 7, 61
Сафонов Л. Н. 11, 26
Седнев А. М. 8, 61
Селезнев Ю. Г. 2, 47
Селивахин А. И. 1, 58
Семенов А. В. 6, 48
Семенова Г. С. 3, 15
Сергеев А. С. 11, 12
Сергеев Ю. Г. 2, 61
Сивокобыленко В. Ф. 2, 72; 3, 59; 4, 32
Сигорский В. П. 10, 72
Сидеров С. Т. 8, 58
Синев В. С. 11, 58; 12, 58
Синьчугов Ф. И. 4, 12
Сирота И. М. 8, 13
Сланов В. М. 1, 53
Слуцкий Л. С. 5, 47; 9, 34
Случанко Е. И. 3, 19
Смоленчук В. С. 12, 35
Смолкин Р. Д. 11, 71
Совалов С. А. 10, 11
Соколов Н. И. 9, 61
Соколова Г. В. 7, 51
Соколова М. В. 2, 61
Соколовский С. М. 1, 75
Солоненкин А. А. 10, 29
Стебунова Е. Д. 8, 58
Стеклов В. Ю. 4, 1
Степанов В. П. 11, 8
Степанянц С. Л. 6, 68
Стернинсон Л. Д. 12, 64
Столяров М. Д. 6, 39
Страхов С. В. 8, 75
Строганов Б. А. 3, 48
Строганов Б. Г. 3, 67
Струнский М. Г. 9, 25
Субботина Г. В. 10, 75
Сугробов А. М. 5, 20
Судаев А. И. 10, 51
Суханов Л. А. 7, 61

Т

Тамкиви П. И. 9, 73
Тареев Б. М. 3, 75; 6, 77; 8, 72

Татур Т. А. 10, 51
Темижев М. Э. 9, 47
Терешкин Д. С. 8, 43
Терешко Л. А. 9, 58
Тимонин В. К. 4, 50
Тимофеева Г. Г. 10, 64
Титов М. И. 8, 64
Тихонов А. В. 4, 70
Товмасын Н. Е. 10, 66
Тозони О. В. 7, 40
Толкунов В. П. 5, 9
Толмачев С. Т. 9, 7
Троицкий В. А. 3, 33
Турук В. К. 10, 51
Тюрин В. П. 12, 41

У

Убийко А. М. 11, 45
Урин Д. Д. 9, 56
Уткин А. И. 9, 74
Ушаков В. Я. 12, 56

Ф

Файнштейн В. Г. 11, 34
Файнштейн Э. Г. 11, 34
Фархадзаде Э. М. 5, 12
Федоров А. А. 7, 64; 8, 58
Федоров Э. К. 2, 8
Филиппов Ю. А. 5, 44
Фокин В. К. 9, 61
Фришман Е. М. 12, 35

Х

Хайн М. 1, 5
Халилов Ф. Х. 1, 73
Хачатрян В. С. 10, 55; 12, 18
Хименко Л. Т. 8, 30
Хмельницкий Р. С. 8, 34
Ходжаев К. Ш. 9, 41
Холмский Д. В. 3, 71
Хранович И. Л. 3, 69
Хренков Н. Н. 3, 56
Хуторецкий Г. М. 10, 18

Ц

Цгоев Р. С. 7, 61; 10, 47
Целуевский Ю. Н. 8, 7
Цицикян Г. Н. 1, 42
Цыбровский Г. Г. 11, 45

Ч

Чабан В. И. 3, 59
Чагров А. И. 1, 68
Чальян К. М. 4, 50; 10, 58
Черновец А. К. 10, 29
Чернуцкий А. И. 8, 58
Чернышов С. К. 3, 56
Чернявский В. П. 2, 3
Чикотило И. И. 12, 52
Чорноготский В. М. 8, 38; 11, 47
Чунихин А. А. 3, 67

Ш

Шакарян Ю. Г. 7, 61; 9, 47
Шапиро А. Б. 2, 3
Шапиро Л. Я. 3, 50
Шаталов А. С. 10, 74
Шаткович—Карпа Б. 7, 67
Шварц З. Л. 2, 50
Шевченко В. В. 5, 9
Шелухин Н. Н. 12, 9
Шемякин А. И. 12, 56
Шестаков В. М. 12, 47
Шидловский А. К. 5, 74
Шилин Н. В. 4, 21
Шиньянский А. В. 8, 73
Шипилло В. П. 12, 52
Шкловский И. Г. 8, 34
Шлейфман И. Л. 3, 29
Шмонин Л. И. 7, 76
Шнеерсон Э. М. 2, 8
Шуин В. А. 2, 21
Шульженко С. В. 8, 1

Щ

Щербина Ю. В. 5, 15

Э

Эбина Г. Л. 3, 1
Эльмира Д. 12, 62

Ю

Юньков М. Г. 5, 1

Я

Яблоньски В. 7, 67
Якобс А. И. 1, 61
Янура Я. 5, 55
Ярославский В. И. 2, 26

ПОПРАВКА

В № 9, 1980 г. в статье Толмачева С. Т. «Расчет магнитных полей в нелинейных анизотропных средах» в формулах (6), (8) и (27) операцию grad следует применять к функции $\vec{J} \cdot \vec{r} / r^m$; формулу (12) следует читать так:

$$\vec{J}_{n+1}(x) = \lambda(x) \left[2\vec{H}_0(x) + \int_G K(x, y) \vec{J}_n(y) dy + \frac{m-2}{m} \vec{J}_n(x) \right];$$

в формуле (28) в поверхностном интеграле вместо rot \vec{J} следует читать Rot \vec{J} , а в пояснениях к формуле — Div $\vec{J} = \vec{J} \cdot n$; в формуле (29) вместо $\vec{r} \times (n \vec{J})$ следует читать $\vec{r} \times (n \times \vec{J})$.

СОДЕРЖАНИЕ

<p>Борисов Е. И. — Электроэнергетика СССР от плана ГОЭЛРО до наших дней 3</p> <p>Качанова Н. А., Шелухин Н. Н. — Эквивалентирование схем и режимов электроэнергетических систем 9</p> <p>Баринов В. А. — Исследование статической устойчивости электроэнергетических систем методом последовательных приближений 14</p> <p>Хачатрян В. С., Сафарян В. С. — Метод декомпозиции и коррекции Z-матрицы обобщенных параметров электрических систем 18</p> <p>Алексеев С. В., Копылов И. Б., Машанский А. М. — Описание энергообъединения как объекта управления режимом по частоте и активной мощности 23</p> <p>Кацнельсон С. М., Ознобкин Ю. В. — Мощные тиристорные преобразователи ультразвуковой частоты с отсекающими диодами 31</p> <p>Бочаров В. И., Фришман Е. М., Либерман В. Л., Смоленчук В. С. — Системы магнитного подвеса для бесконтактного транспорта 35</p> <p>Ефремов В. И., Тюрин В. П. — Оценка параметрической надежности электронных систем тяговых электроприводов методом нелинейного физического моделирования 41</p> <p>СООБЩЕНИЯ</p> <p>Петров Л. П., Ладензон В. А., Печковский И. И. — Физико-математическое моделирование асинхронных электроприводов с преобразователями частоты 45</p>	<p>Шестаков В. М. — Исследование и оптимизация динамики многодвигательных унифицированных электроприводов с упругими связями 47</p> <p>Шипило В. П., Чикотило И. И. — Устойчивость замкнутой системы с тиристорным широтно-импульсным преобразователем в режиме прерывистого тока 52</p> <p>Ушаков В. Я., Муратов В. М., Лопатин В. В., Капишиков Н. К., Кухта В. Р., Шемякин А. И. — К выбору оптимальных форм изоляторов высоковольтных импульсных устройств с водяной изоляцией 56</p> <p>Синев В. С. — Синтез пассивных обратимых цепей с трансформаторными элементами 58</p> <p>Абасов С. А., Курбанов М. А., Велиев Т. М., Кабулов У. А., Эльмира Джалал кызы, Бедирханова С. Ш. — Исследование долговечности политетрафторэтилена в среде жидкого азота 62</p> <p>ДИСКУССИИ 64</p> <p>ХРОНИКА 67</p> <p>Указатель материалов, помещенных в журнале «Электричество» в 1980 г. 71</p> <p>Алфавитный указатель авторов статей 76</p>
---	---

CONTENTS

<p>The Electric Power Industry of the USSR From the Times of the Plan GOELRO Up Till Today — E. I. Borisov 3</p> <p>Obtaining Equivalents by Reduction for Networks and Operating Conditions in Electric Power Systems — N. A. Kachanova, N. N. Schelukhin 9</p> <p>A Study of Power System Steady-State Stability by Successive Approximations — V. A. Barinov 14</p> <p>A Method for Decomposing and Up-Dating the Z-Matrix of Generalized Power System Parameters — V. S. Khachatryan, V. S. Sapharian 18</p> <p>Description of a Consolidated Power System as an Object Whose Operation is Controlled With Respect to Frequency and Real Power Flow — S. V. Alexeyev, I. B. Kopylov, A. M. Mashanski 23</p> <p>Large Thyristor Ultrasonic Frequency Converters With Chopping Diodes — S. M. Katznelson, U. V. Oznobkin 31</p> <p>Magnetic Suspension Systems for Contactless Transport — V. I. Bacharov, E. M. Frishman, V. L. Liberman, V. S. Smolenchuk 35</p> <p>Appraisal of the Parametric Reliability of Electronic Systems for Traction Drives by Means of Non-Linear Physical Modelling — V. I. Yefremov, V. P. Turin 41</p> <p>REPORTS</p> <p>Physical and Mathematical Modelling of Asynchronous Electric Drives With Frequency Converters — L. P. Petrov, V. A. Ladenson, I. I. Pechkovski 45</p>	<p>Optimizing the Dynamics of Unified Multi-Machine Electric Drives Having Elastic Coupling — V. M. Shestakov 47</p> <p>Stability of a Closed-Loop System With a Pulse-Width Thyristor Converter for Intermittent Duty — V. P. Shipillo, I. L. Chikotilo 52</p> <p>Selecting Optimum Shapes for Insulators in HV Impulse Devices Having Water Insulation — V. J. Ushakov, V. M. Muratov, V. V. Lopatin, N. K. Kapishnikov, V. R. Kukhta, A. L. Shemiakin 56</p> <p>Synthesis of Passive Bi-Lateral Networks With Transformers — V. S. Sinyev 58</p> <p>FROM OPERATING EXPERIENCE</p> <p>A Study of the Resource of Polytetrafluoroethylene in a Liquid Nitrogen Medium — S. A. Abasov, M. A. Kurbanov, T. M. Veliyev, U. A. Kabulov, Elmira Djalal kizi, S. S. Bedirkhanova 62</p> <p>DISCUSSION 64</p> <p>CHRONICLE 67</p> <p>Index to the Contents of «Electrichestvo» for 1980 71</p> <p>Alphabetical Index of the Authors 76</p>
--	--

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 621.311.001.57
 Эквивалентирование схем и режимов электроэнергетических систем. Качанова И. А., Шелухин И. И. — «Электричество», 1980, № 12.
 Изложены принципы эквивалентирования сложных энергосистем с учетом иерархии диспетчерского управления, класса решаемых задач, особенностей применения ЦВМ и аппаратуры передачи данных. Библ. 7.

УДК 621.311.016.351.001.24
 Исследование статической устойчивости электроэнергетических систем методом последовательных приближений. Баринов В. А. — «Электричество», 1980, № 12.
 Рассмотрены условия, при которых возможно проведение строгого исследования статической устойчивости электроэнергетических систем с учетом самораскачивания методом последовательных приближений при возмущении начальных условий и при приложении постоянного произвольного малого возмущения. Даны критерии, позволяющие провести исследование статической устойчивости методом последовательных приближений, и способ их вычисления. Библ. 8.

УДК 621.311.001.57
 Метод декомпозиции и коррекция Z-матрицы обобщенных параметров электрических систем. — Хачатрян В. С., Сафарян В. С. — «Электричество», 1980, № 12.
 Предложен метод коррекции Z-матрицы обобщенных параметров электрических систем, основанный на идее их представления как совокупности радиально связанных подсистем. Разработанный метод позволяет скорректировать Z-матрицу обобщенных параметров при изменениях в произвольной подсистеме, в ветвях разрыва и в ветвях связи. Библ. 7.

УДК 621.311.072.6.072.8.001.3.001.57
 Описание энергообъединения как объекта управления режимом по частоте и активной мощности. Алексеев С. В., Копылов И. Б., Машанский А. М. — «Электричество», 1980, № 12.
 Приведены уравнения энергообъединения, состоящего из произвольного числа энергосистем с различными группами эквивалентных турбин, и систем автоматического управления режимом по частоте и активной мощности. Разработана модель возмущения в энергосистемах с учетом его стохастического характера. На примере двух параллельно работающих энергосистем показано использование разработанного математического описания для исследования статических и динамических характеристик систем автоматического управления режимом по частоте и активной мощности. Библ. 9.

УДК 621.314.572
 Мощные тиристорные преобразователи ультразвуковой частоты с отсекающими диодами. Кацисльсон С. М., Ознобкин Ю. В. — «Электричество», 1980, № 12.
 Приводится схема мощного тиристорного преобразователя ультразвуковой частоты. Рассмотрен способ стабилизации напряжения на тиристорах инвертора и ограничения коммутационных перенапряжений с помощью отсекающих диодов. Дается краткий анализ электромагнитных процессов в преобразователе. Приведены зависимости максимальных токов, напряжений, моментов включения и отключения отсекающих диодов от затухания инверторного контура и даны граничные условия перехода преобразователя в режим работы без отсекающих диодов. Библ. 2.

УДК 621.335.625.2.012.858.538.65
 Системы магнитного подвеса для бесконтактного транспорта. Бочаров В. И., Фришман Е. М., Либерман В. Л., Смоленчук В. С. — «Электричество», 1980, № 12.
 Приводится анализ разрабатываемых в настоящее время систем магнитного подвеса для бесконтактного транспорта. Рассматривается принцип действия трех основных типов магнитного подвеса, их силовые, энергетические и динамические характеристики. Показаны недостатки и достоинства различных способов магнитного подвеса, указаны трудности их реализации. Библ. 12.

УДК 621.33.038.019.3
 Оценка параметрической надежности электронных систем тяговых электроприводов методом нелинейного физического моделирования. Ефремов В. И., Тюрин В. П. — «Электричество», 1980, № 12.
 Предлагается оценка параметрической надежности электронных систем методом физического моделирования с использованием нелинейных моделей элементов. Метод использования для оценки надежности электронных устройств, применяемых в тяговых электроприводах. Библ. 6.

УДК [62—83:621.314.26].001.57
 Физико-математическое моделирование асинхронных электроприводов с преобразователями частоты. Петров Л. П., Ладензон В. А., Печковский И. И. — «Электричество», 1980, № 12.
 Рассматриваются возможность и целесообразность моделирования частотно-управляемого асинхронного электропривода путем сопряжения физической модели преобразователя частоты с математической моделью двигателя. Сопряжение физической и математической частей модели системы электропривода выполняется с помощью «источников тока». Библ. 7.

УДК 62—83:621.3.018.782.3
 Исследование и оптимизация динамики многодвигательных унифицированных электроприводов с упругими связями. Шестаков В. М. — «Электричество», 1980, № 12.
 Приведено математическое описание многодвигательных унифицированных электроприводов с упругими связями 1-го и 2-го рода при питании приводных двигателей как от общего, так и от индивидуальных вентильных преобразователей. Даны рекомендации по построению и оптимизации динамики электроприводов и результаты экспериментальных исследований агрегатов. Библ. 6.

УДК 62—83:621.314.1.016.35
 Устойчивость замкнутой системы с тиристорным широтно-импульсным преобразователем в режиме прерывистого тока. Шипило В. П., Чикотило И. И. — «Электричество», 1980, № 12.
 Рассмотрены внешние характеристики широтно-импульсного преобразователя (ШИП) в режиме прерывистого тока, получена импульсная модель замкнутой системы с ШИП в этом режиме. Найдено аналитическое выражение для определения фактора пульсации, с учетом которого на базе модифицированного z-преобразования получено выражение границы устойчивости к автоколебаниям на основной субгармонике в области параметров системы. Показано, что в большей части рабочего диапазона непрерывный режим более критичен к возникновению автоколебаний, чем прерывистый. Даны соотношения для учета конечных значений сопротивления и индуктивности нагрузки при расчете устойчивости замкнутой системы авторегулирования с ШИП. Библ. 2.

УДК 621.315.615
 К выбору оптимальных форм изоляторов высоковольтных импульсных устройств с водяной изоляцией. Ушаков В. Я., Муратов В. М., Лопатин В. В., Капишников И. К., Кухта В. Р., Шемякин А. И. — «Электричество», 1980, № 12.
 Экспериментально исследовано влияние конфигурации изоляторов и электродов на напряжение перекрытия в воде с $\rho = 2 \cdot 10^6$ Ом·см в однородном поле и в поле коаксиальных цилиндров. Перекрытие осуществляется при косоугольных импульсах длительностью 10^{-8} с и амплитудой до 1 мВ. Приведены зависимости разрядных градиентов от длины промежутка и отношения диаметров электродов для изолятора из оргстекла, полиэтилена и капролона. Библ. 7.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бертинов А. И., Будзко И. А., Веников В. А., Глебов И. А., Евсеев Б. Н. (зам. главного редактора), Ефремов И. С., Иванов-Смоленский А. В., Ильинский Н. Ф., Комельков В. С., Костенко М. В., Лабунцов В. А., Ларионов В. П., Лидоренко Н. С., Лизунов С. Д., Мамиконянц Л. Г. (главный редактор), Месрович Э. А., Мучник Г. Ф., Нетушил А. В., Рабинович С. И., Сабинин Ю. А., Слежановский О. В., Совалов С. А., Тареев Б. М., Тиходеев И. Н., Толстов Ю. Г., Федосеев А. М., Шакарян Ю. Г., Шаталов А. С., Шилин И. В.

Научные редакторы А. Б. Желдыбин, Б. Д. Макарушин

Адреса редакции: 103012, К-12, Москва, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80.
 101000, Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648
 Адрес для телеграмм: МОСКВА 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Технический редактор Н. Н. Хотулева

Сдано в набор 16.10.80 Подписано в печать 08.12.80 Т-17855 Формат 60×90/8 Печать высокая Усл. печ. л. 10,0 Уч.-изд. л. 12,83
 Тираж 7604 экз. Заказ 798

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10
 Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
 по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10