

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1955



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

11

СОДЕРЖАНИЕ

| | | | |
|---|----|--|----|
| <i>Московскому энергетическому институту им. Молотова</i> | 1 | Г. Г. Гимоян — Компенсация нелинейности полупроводниковых выпрямителей в дистанционных реле | 69 |
| М. Г. Чиликин — Московский энергетический институт им. Молотова (1905 — 1955 гг.) | 2 | ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ | |
| В. В. Мешков — Научная деятельность МЭИ им. Молотова | 9 | Ф. Г. Рыклин — Эксплуатация предохранителей типа ПК в открытых установках | 75 |
| А. А. Глазунов и Л. И. Сиротинский — Участие МЭИ в создании и развитии электрических систем СССР | 12 | ДИСКУССИИ | |
| В. А. Веников и И. В. Литкенс — О влиянии регулирования возбуждения на пропускную способность дальних электропередач | 15 | О схемах электрических соединений гидроэлектрических станций — Г. С. Лисовский, В. Г. Алексеев. О необходимости расширения области применения синхронных электродвигателей — Н. А. Казак, В. З. Базылев, Г. А. Гусин | 77 |
| Л. Ф. Дмоховская и В. И. Левитов — Субгармонические колебания в простейших схемах и в дальних электропередачах | 27 | ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ | |
| В. М. Маранчак — Защита гидрогенераторов, работающих в блоке, от замыканий на землю | 33 | Работа турбогенераторов в режиме недовозбуждения. Исследование токов молнии в Швейцарии | 82 |
| Ф. А. Горяинов и Б. Ф. Токарев — Влияние магнитной несимметрии на работу трехступенчатого электромашиного усилителя | 43 | ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА | |
| Р. Р. Харченко — Динамика магнитоэлектрических приборов в режиме сильного успокоения | 47 | О схеме дистанционного управления электротрактора. Об обозначении фаз в электрических устройствах трехфазного тока. Письмо в редакцию | 85 |
| И. П. Исаев — Влияние допусков на стабильность характеристик тяговых двигателей и электровозов | 55 | ХРОНИКА | |
| А. В. Нетушил — О применении схемы куметра для измерения малых добротностей | 60 | В техническом управлении МЭС | 86 |
| В. Н. Тутевич — Магнитные элементы с прямоугольной петлей гистерезиса | 63 | БИБЛИОГРАФИЯ | |
| В. М. Русидзе — Комплектные главные распределительные устройства | 67 | Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике | 87 |
| | | РЕФЕРАТИВНЫЕ КАРТОЧКИ | |



Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2. Телеф. К 4-24-80.

Адрес для телеграмм: МОСКВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

МОСКОВСКОМУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ *им. МОЛОТОВА*

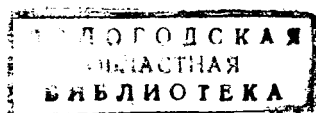
Редакция журнала «Электричество» поздравляет коллектив Московского энергетического института им. Молотова с 50-летием деятельности Института. За годы Советской власти Институт добился больших успехов в учебной, научной и методической работе. Достижения большого квалифицированного коллектива МЭИ позволили ему занять место одной из виднейших научных школ Советского Союза. Кадры, подготовленные МЭИ, работают во всех отраслях народного хозяйства страны.

Содружество Института с промышленными предприятиями способствовало в течение многих лет разрешению ряда актуальных технических задач производства, строительства и эксплуатации.

Ценный вклад внесен научными работниками МЭИ во многие области новейшей техники. Издание монографий, учебников и учебных пособий, написанных учеными МЭИ, обогатило научно-техническую литературу по различным отраслям энергетики и электротехники.

Нет сомнения, что профессорско-преподавательский и студенческий коллектив Московского энергетического института им. Молотова приложит необходимые усилия для достижения в ближайшее время еще больших успехов в реализации ответственных задач в области технического прогресса, указанных в Постановлении июльского Пленума ЦК КПСС по докладу товарища Н. А. Булганина.

Редакция журнала
«ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»





К 50-летию МЭИ им. Молотова

Московский энергетический институт им. Молотова (1905—1955 гг.)

Доктор техн. наук, проф. М. Г. ЧИЛИКИН

В декабре текущего года исполняется 50 лет со дня основания Московского ордена Ленина энергетического института им. В. М. Молотова — одного из крупнейших высших учебных заведений нашей страны.

Большой и славный путь прошел институт с тех пор, как в 1905 г. была заложена его основа — организована электротехническая специальность на механическом отделении Московского высшего технического училища.

Зарождение специального электротехнического и энергетического образования в конце прошлого столетия было исторически закономерным. Оно вызывалось все более возрастающей потребностью в специальных энергетических кадрах в связи с развитием промышленности, электрификацией фабрик и заводов, расширением практического применения электричества.

Вскоре после создания первого в России электротехнического учебного заведения — Петербургского электротехнического института [ныне ЛЭТИ имени Ульянова (Ленина)], в 90-х годах XIX в. было введено преподавание электротехники в ряде крупнейших русских высших технических учебных заведений. Одновременно в связи с развитием энергостроительства расширялось и преподавание теплотехнических и гидротехнических дисциплин.

В Москве центром развития научно-технической мысли в области электротехники, теплотех-

ники и гидротехники становится Московское высшее техническое училище — одно из старейших русских высших технических учебных заведений, отметившее недавно свой 125-летний юбилей. Электротехническая школа МВТУ возглавлялась К. А. Кругом и Б. И. Угримовым, теплотехническая — В. И. Гринивецким, гидромеханическая — Н. Е. Жуковским.

Однако до Великой Октябрьской социалистической революции подготовка в МВТУ инженерно-технических кадров в области энергетики была весьма слабой. За весь предреволюционный период было выпущено всего 74 инженера с электротехническим уклоном. Положение не изменилось и после открытия электротехнического отделения. Причиной было отсутствие дополнительных средств и оборудования для этого нового отделения. Коренной перелом в развитии высшей школы наступил лишь после Великой Октябрьской социалистической революции.

Несмотря на тяжелые годы гражданской войны и иностранной интервенции, Коммунистическая партия и Советское правительство уделяли высшей школе большое внимание и оказывали ей огромную помощь.

В 1918 г. в МВТУ на базе электротехнического отделения был организован электротехнический факультет во главе с К. А. Кругом, одним из основоположников московской электротехнической школы, старейшим деятелем МЭИ, автором

широко известного труда «Основы электротехники». Особенно интенсивно электротехнический факультет начал развиваться после 1920 г., когда большие задачи в области энергетики, выдвинутые планом ГОЭЛРО, потребовали значительного увеличения подготовки энергетических кадров.

В 1922 г. по указанию В. И. Ленина электротехническому факультету было предоставлено большое здание, в котором были размещены основные специальные лаборатории и учебные аудитории. Факультет получил возможность расширить лабораторную базу, организовать преподавание новых специальных дисциплин, развивать и совершенствовать учебный процесс.

Постепенно рос и укреплялся преподавательский коллектив факультета, большую часть которого составляли воспитанники МВТУ. На факультете вели преподавание: К. И. Шенфер — один из крупнейших советских ученых в области электромашиностроения, впоследствии академик; В. С. Кулебакин — также в дальнейшем академик, возглавлявший на факультете электроаппаростроительную специализацию; Л. И. Сиротинский, А. А. Глазунов, А. Я. Рябков и многие другие известные ученые и педагоги.

Электротехнический факультет МВТУ превращался в крупный учебный и научный центр по подготовке квалифицированных инженерно-технических кадров по трем основным специализациям: электромашиностроению; производству, распределению и применению электрической энергии; технике связи. Расширялась и крепла связь факультета с промышленностью. К 1929 г. факультет имел 13 хорошо оборудованных лабораторий, в том числе: электромашинную, электроизмерительную, высокого напряжения, электроматериалов. К этому времени им было выпущено более 2 000 специалистов, т. е. приблизительно в 30 раз больше, чем за весь дореволюционный период.

Одновременно с электротехническим факультетом МВТУ развивался и электропромышленный факультет Института народного хозяйства им. Плеханова (ИНХ), созданный в 1921 г. Деканом факультета являлся Б. И. Угримов. Факультет имел в своем распоряжении хорошо оснащенные лаборатории: общей электротехники, переменного тока и точной электрометрии, высоковольтную, электромашинную и др. На факультете в 1928 г. была открыта первая в СССР лаборатория распределительных устройств.

Профессорско-преподавательский коллектив электропромышленного факультета возглавляли такие крупные специалисты, как С. И. Курбатов (электрические машины), Б. И. Угримов (электротехника и техника высоких напряжений), И. Г. Александров (гидравлика), М. В. Шулейкин (радиотехника). Под их руководством проводилась большая научно-исследовательская работа, главным образом в области энергетики и электрификации.

Оба факультета — электротехнический в МВТУ и электропромышленный в ИНХ — представляли

собой крупные энергетические и электротехнические школы, которые готовили инженеров широкого профиля по трем основным направлениям — электроэнергетика, теплоэнергетика и гидроэнергетика.

Исключительно важное значение в жизни высшей школы имели постановления июльского Пленума ЦК ВКП(б) 1928 г. и ноябрьского Пленума ЦК ВКП(б) 1929 г., в которых были указаны пути улучшения подготовки специалистов для бурно развивающегося народного хозяйства страны, был поставлен ряд новых задач перед вузами и, в частности, предусматривалось создание отраслевых специализированных вузов. В соответствии с этими постановлениями в 1930 г. на базе электротехнического факультета МВТУ и электропромышленного факультета ИНХ был создан Московский энергетический институт.

Большую роль в создании и укреплении института играла партийная организация, которая выступала застрельщиком всех важнейших начинаний в многообразной и содержательной жизни коллектива института и прежде всего в борьбе за повышение качества учебы. Основное ядро партийной организации в то время составляли партысячники, имевшие за плечами опыт партийной и производственной работы и направленные партией в вузы для получения высшего образования.

В 1930—1932 гг. в МЭИ не было факультетов, студенты, начиная со второго курса, распределялись по 10 специальностям: центральные электрические станции, техника высоких напряжений, электрическое оборудование фабрик и заводов, светотехника, электрические машины, электрические аппараты, электрическая тяга, радиотехника, телефония и телеграфия. Это был период исканий новых форм учебной и методической работы, которые диктовались необходимостью ускорения подготовки инженерно-технических кадров для многочисленныхстроек и промышленных предприятий страны. Наряду с немалыми достижениями в работе вузов имели место и существенные недостатки, мешавшие успешному выполнению задач, выдвинутых партией и правительством.

Важное значение в улучшении работы МЭИ, так же как и всей советской высшей школы, имело постановление ЦИК СССР в сентябре 1932 г. «Об учебных программах и режиме в высшей школе и техникумах», в котором указывалось на необходимость усиления связи учебных заведений с производством, повышения уровня теоретической подготовки молодых специалистов, развития творческой инициативы и самостоятельной работы студенчества.

Постановление ЦИК СССР явилось боевой программой повышения качества подготовки специалистов. В соответствии с этим постановлением был отменен так называемый «бригадно-лабораторный» метод обучения, были введены зачетные сессии и защита дипломных проектов перед государственными квалификационными комиссиями, повышена роль и ответственность профессоров и преподавателей в организации учебного процесса.

В МЭИ было образовано шесть факультетов: теплотехнический, электроэнергетический, электромашино-аппаратостроительный, электротранспортный, электросвязи и инженерно-экономический. Коллектив института активно работал над улучшением качества преподавания и расширением научной и методической деятельности. В центре внимания встали вопросы совершенствования учебного процесса и развития самостоятельной работы студентов. В соответствии с этим увеличилось число лабораторий и улучшилось их оборудование, увеличилось число помещений для самостоятельных занятий студентов (кабинет проектирования, рабочие комнаты), обогатился книжный фонд библиотеки; упорядочились организация общественной работы и режим дня студентов. Все большее внимание уделялось воспитательной работе с молодежью. Большую помощь дирекции института в этом важном деле оказывали партийная и другие общественные организации института, а также многотиражная газета «Пролетарий на учебе» (ныне «Энергетик») и стенная печать. Все это привело к заметному улучшению качества подготовки инженеров, увеличению численности выпусков.

В конце 1934/35 учебного года МЭИ выпустил 969 инженеров — это был самый большой отряд специалистов, вышедших из стен института в довоенные годы; большинство выпускников защитило дипломные проекты с повышенными оценками. В этом же учебном году МЭИ был удостоен звания лучшего вуза страны и получил переходящее Красное Знамя ЦИК СССР, ЦК ВЛКСМ и ВЦСПС.

Общий подъем работы всего коллектива МЭИ характеризуется также развитием и расширением научно-исследовательской деятельности, приближением тематики научных работ к запросам промышленности, ростом числа студентов, участвующих в научно-исследовательской работе. Именно в эти годы зародились первые студенческие научные кружки при кафедрах, называвшиеся тогда «группами содействия кафедрам». В 1934/35 учебном году в этих группах уже работало более 400 студентов. Началось издание первых студенческих научно-технических журналов. Заметные успехи были достигнуты в подготовке научных кадров.

В связи с развитием в стране автоматизации и телемеханизации производства возникла необходимость в подготовке специалистов в этой области. С этой целью в 1933 г. в МЭИ организуется физико-энергетический факультет (ныне факультет электровакуумной техники и специального приборостроения). В 1938 г. для удовлетворения запросов радиопромышленности в институте был открыт радиотехнический факультет с тремя кафедрами: основ радиотехники, радиопередающих и радиоприемных устройств. В том же году было организовано вечернее отделение МЭИ. С ростом института все быстрее ощущалась необходимость в расширении учебных помещений и лабораторий, в ликвидации разбросанности помещений института по разным районам

Москвы. В 1934 г. правительством были отпущены средства и началось строительство нового учебного корпуса в Лефортове (дом № 17 по Красноказарменной улице).

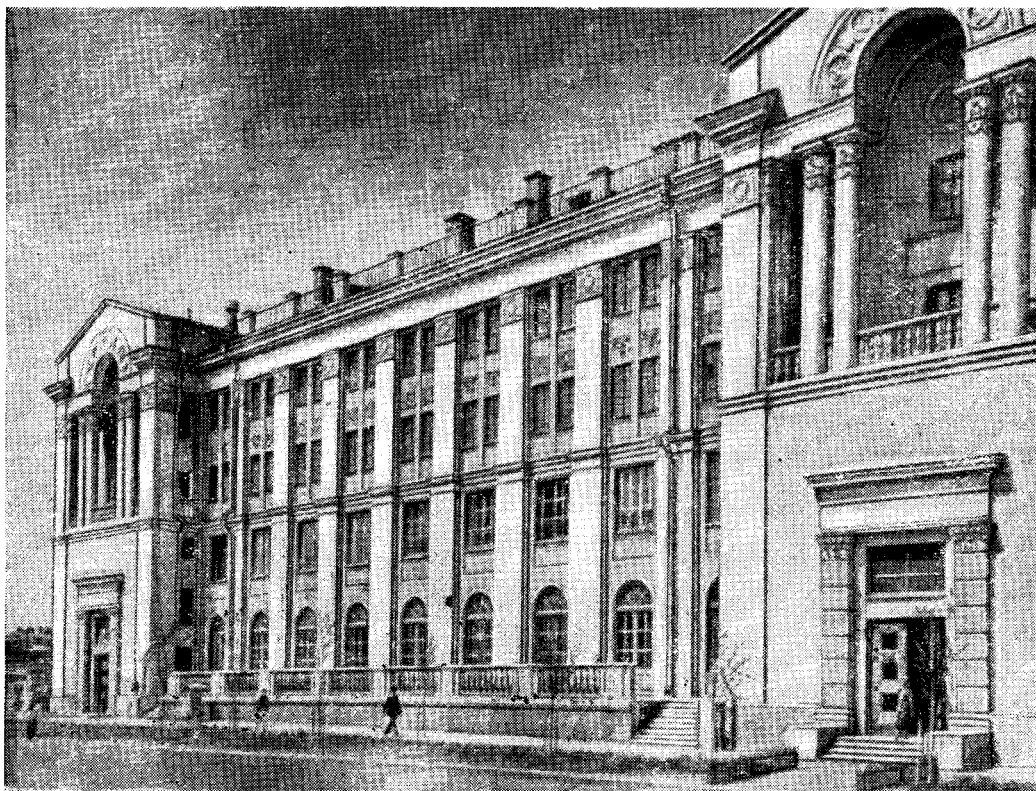
Всесоюзное совещание работников высшей школы в мае 1938 г. поставило перед коллективами вузов новые ответственные задачи. На этом совещании указывалось на необходимость усиления идейно-политического воспитания студенчества. Профессора и преподаватели призывались к более активной работе по созданию новых учебников и учебных пособий, соответствующих современному уровню науки и техники и удовлетворяющих идеологическим требованиям.

Профессорско-преподавательский коллектив МЭИ энергично принялся за осуществление этих указаний, и уже к 1940 г. институт выпустил 27 учебников (12 — в издании Госэнергоиздата и 15 — литографским способом). В этих учебниках были отражены последние достижения науки и техники, а также многолетний опыт учебно-методической работы МЭИ.

Огромную роль в подъеме работы по идейно-политическому воспитанию студентов сыграл выход в свет «Краткого курса истории ВКП(б)» и постановления ЦК ВКП(б) «О постановке партийной пропаганды в связи с выпуском «Краткого курса истории ВКП(б)» (1938 г.), на основе которого было коренным образом перестроено преподавание социально-экономических дисциплин.

К своему 35-летию юбилею, в декабре 1940 г., МЭИ добился серьезных успехов в учебной, научно-исследовательской и методической деятельности. Значительно возросла лабораторная база института: были переоборудованы и существенно обновлены старые лаборатории — электрических машин, аппаратов, электрической тяги, техники высоких напряжений, паровых турбин, гидравлики; были созданы новые лаборатории — автоматики и телемеханики, электрооборудования промышленных предприятий, электровакуумная, кабельная и др. На 38 кафедрах работало 460 преподавателей, в числе которых были академики, члены-корреспонденты Академии наук СССР, доктора технических наук; четвертая часть всего состава имела ученые степени кандидатов технических наук. Имена профессоров МЭИ — К. А. Круга, К. И. Шенфера, В. С. Кулебакина, Л. И. Сиротинского, А. А. Глазунова, М. В. Кирпичева, Г. Н. Петрова, А. Н. Ларионова и многих других стали широко известны; по их учебникам обучались многие тысячи студентов в различных вузах страны. За 35-летний период институтом было выпущено около 8 000 инженеров, возглавивших самые разнообразные участки социалистического строительства в разных уголках нашей Родины.

Московский энергетический институт превратился в крупный центр научной деятельности, он стал школой квалифицированных научных кадров. Характерной особенностью научно-исследовательской работы кафедр института стали их близкая связь и содружество с промышленными предприятиями, помощь производству в разре-



Дом культуры.

шении наиболее актуальных технических проблем. В 1940 г. по договорам с промышленностью 29 кафедр института вели научно-исследовательские работы на сумму более 2 млн. руб., что в 10 раз превышало объем научных работ в 1933 г.; при этом все большее значение приобретали комплексные научные работы. Содружество кафедр с промышленными предприятиями плодотворно сказывалось и на учебной работе кафедр, обогащая ее опытом и практикой производства, повышая научную квалификацию преподавателей, позволяя вести преподавание с учетом новейших достижений науки и техники.

За десятилетний период—с 1930 по 1940 гг.—успешно закончили аспирантуру МЭИ около 100 чел.; многие из них возглавили работу кафедр вузов, лабораторий научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий. В 1940 г. в институте уже обучалось 207 аспирантов. За период 1935—1940 гг. 92 преподавателя защитили кандидатские диссертации и 18—докторские.

В декабре 1940 г., в связи с 35-летним юбилеем и за особые заслуги в подготовке высококвалифицированных инженерно-технических и научных кадров Московский энергетический институт был награжден орденом Ленина, большая группа сотрудников института была удостоена высоких правительственных наград. Указ Президиума Верховного Совета СССР о награждении института был встречен всем коллективом и советской энергетической общественностью с огромным воодушевлением.

В годы Отечественной войны институт продолжал свою деятельность. Несмотря на трудно-

сти военного времени, в 1942 г. был осуществлен выпуск специалистов и приняты новые студенты. Помимо учебной работы, профессора и преподаватели института разрешили ряд важных научных задач, связанных с укреплением экономической и оборонной мощи нашей Родины.

В январе 1943 г. было принято постановление ГОКО об увеличении выпуска инженерно-технических кадров; этим постановлением было предусмотрено выделение институту значительных средств для расширения учебных помещений и лабораторий, строительства жилых и культурно-бытовых корпусов. Институт вступил в новый этап своего развития, характеризующийся интенсивным ростом материально-технической базы, дальнейшим совершенствованием методики преподавания и расширением масштабов научно-исследовательской работы.

За годы войны площадь института удвоилась, увеличившись на 22 000 м². В течение 1943—1945 гг. было организовано три новых факультета: энергомашиностроительный (1943 г.), гидро-энергетический (1945 г.) и факультет электрификации промышленности и транспорта (1945 г.); было создано одиннадцать новых кафедр и введены в строй новые лаборатории: электрических сетей и систем, электрических станций, преобразовательной и выпрямительной техники, кабельной техники, теплопередачи, газопечной тепло-техники, теоретических основ теплотехники, теплового контроля и автоматики, радиотехники. Вырос и окреп профессорско-преподавательский коллектив института. В 3 раза по сравнению с 1940 г. возрос объем научно-исследовательских работ, большая часть которых была связана с

оборонной тематикой. В конце 1945 г. начали работать производственно-экспериментальные мастерские МЭИ, ставшие важной опорной базой научно-исследовательской деятельности института. За годы войны было выпущено более 1 300 инженеров.

В течение двух военных лет — 1944 и 1945 — коллектив МЭИ держал звание лучшего вуза столицы. За успешную работу по подготовке инженерных и научных кадров в условиях военного времени и за решение важных научных проблем оборонного значения большая группа сотрудников института в 1945 г. была награждена орденами и медалями.

Последние 10 лет в жизни института характеризуются дальнейшими успехами во всех областях его многообразной деятельности. В центре внимания коллектива находятся вопросы совершенствования учебного процесса и улучшения учебно-методической работы.

Еще в 1936 г. в постановлении Совета Народных Комиссаров СССР и Центрального Комитета ВКП(б) «О работе высших учебных заведений и о руководстве высшей школой» было указано, что при организации учебного процесса основное внимание должно быть направлено на самостоятельную работу студентов, проводимую вне учебного расписания — в библиотеках, читальнях, кабинетах или на дому. Советской высшей школой со времени этого постановления был накоплен ценный опыт в области организации самостоятельной работы студентов. Опираясь на этот опыт, преподавательский коллектив МЭИ взялся за разработку такой системы методических мероприятий, которая должна была обеспечить равномерную и эффективную работу студентов в течение всего семестра, придать ей более самостоятельный характер, побудить студента к занятиям с книгой и к творческой работе в лаборатории.

Чтобы решить поставленную задачу, нужно было выделить студенту время для такой работы. В этих целях МЭИ пошел по пути сокращения числа часов обязательных занятий по расписанию и нормирования объема домашних заданий, выдаваемых кафедрами при одновременном повышении качества этих заданий.

Кафедрами было пересмотрено содержание всех читаемых курсов, с тем чтобы повысить идейный и научный уровень преподавания. Из программ был исключен второстепенный материал, устранены повторения; изменено содержание и сокращено число лабораторных задач; введены более углубленные задания, носящие комплексный характер.

В течение 5 лет систематически изучался бюджет времени студентов, внимательно анализировалась трудоемкость различных заданий, выдаваемых кафедрами, проводился ряд мероприятий по сокращению непроизводительной траты студенческого времени. В результате число часов занятий в институте было сокращено и выделены специальные дни для самостоятельной работы студентов (начиная со II курса), причем по

мере перехода студентов на старшие курсы доля самостоятельных занятий в бюджете времени студента возрастала. Так, например, на IV курсе занятия по расписанию составляют теперь не более 28—30, а на V курсе — 18 час. в неделю. Исключительное значение придается планированию объема и сроков выполнения заданий кафедр в виде так называемых графиков учебной нагрузки.

Опыт МЭИ показал, что научная работа студентов должна быть обязательным элементом учебного процесса и органически увязываться с учебными занятиями. В связи с этим элементы научного исследования были введены в различные виды учебных занятий: курсовые работы, производственная практика, лабораторные работы, курсовое и дипломное проектирование.

Положительные результаты методической работы института проявились в следующем: занятия студентов в течение семестра стали более равномерными, без срывов и штурмовых периодов; качество самостоятельной работы поднялось; знания студентов стали более прочными; систематически снижается отсев по неуспеваемости; растет число студентов, вовлеченных в научно-исследовательскую работу; студенты все шире пользуются книгами, материалами и текущей литературой из библиотеки. В 1950/51 учебном году число книг, взятых студентами из библиотеки на дом, возросло в 3 раза по сравнению с 1946/47 учебным годом.

Новым этапом в развитии самостоятельной работы студентов явилась организация с 1953 г. типовых расчетов на I—III курсах и учебно-исследовательских работ на старших курсах. Проводя типовые расчеты, студенты постепенно приобретают навыки, требующиеся в инженерной работе, учатся решать практические вопросы. Введение учебно-исследовательских работ способствует воспитанию у студентов самостоятельного подхода к решению научно-технических проблем, повышает интерес к своей специальности, воспитывает у них качества, необходимые инженеру-новатору. При проведении учебно-исследовательской работы студенты близко общаются с преподавателями, проводят значительную часть времени в лаборатории, на кафедрах, много работают над периодической журнальной литературой, что значительно расширяет их общенаучный кругозор. Целый ряд учебно-исследовательских работ студентов носит конкретный характер и связан с вопросами, интересующими промышленность; многие из этих работ реализованы на практике.

Послевоенный период в развитии МЭИ характеризуется серьезными успехами и в другой важной области деятельности — научно-исследовательской работе кафедр и факультетов. Особенностью научных работ последнего времени является то, что они начинают приобретать все более и более выраженный комплексный характер. Над важнейшими научно-техническими проблемами работают в содружестве несколько кафедр



Студенческое общежитие. Один из корпусов.

института и промышленных или проектных организаций.

Большинство кафедр выработало вполне определенную направленность научных исследований и с каждым годом углубляет и расширяет содержание своих работ.

Коллектив ученых МЭИ в течение многих лет работает над созданием учебников и учебных пособий. На электроэнергетическом, теплоэнергетическом, электромеханическом факультетах все основные дисциплины обеспечены современными учебными пособиями. 50-летний юбилей института профессора и преподаватели встречают большой творческой победой: к этой знаменательной дате ими подготовлено к печати и издается в 1955 г. 50 новых учебников и учебных пособий и 10 сборников научно-исследовательских работ, выполненных в МЭИ.

Московский энергетический институт превратился в центр подготовки научных и педагогических кадров в области электроэнергетики, теплоэнергетики, гидроэнергетики. В течение последних 10 лет через аспирантуру института подготовлено 287 кандидатов технических наук.

Важная роль в научной деятельности института принадлежит Научно-техническому обществу МЭИ, основанному в 1943/44 учебном году.

С каждым годом становится более интересной и содержательной работа Научного студенческого общества. Оно ежегодно организует научно-технические конференции, проводит обсуждение итогов производственной практики, выпускает научные бюллетени, пропагандирует науч-

ные и технические знания, прививая студентам любовь к своей будущей специальности, воспитывая в них навыки к творческой исследовательской работе.

Так, если в 1950/51 учебном году на кафедрах работало около 600 студентов, то в 1954/55 году в исследовательских работах участвовало более 2500 чел. Значительная часть научных работ студентов представляет интерес для промышленности, многие из них отмечены похвальными грамотами.

Интенсивное развитие учебной, методической и научной работы в институте за последние 10 лет потребовало дальнейшего расширения материально-технической базы. Было развернуто строительство новых учебных корпусов, лабораторий, оснащенных новейшим оборудованием, читальных залов, кабинетов, жилых домов и студенческих общежитий.

За последние 10 лет на строительство института затрачено свыше 190 млн. руб. Полностью закончено строительство главного учебно-лабораторного корпуса объемом 230 тыс. м³, в котором размещено более 100 аудиторий, 37 учебно-научных лабораторий и кабинетов, большой актовый зал на 1100 мест.

В числе лабораторий этого корпуса — гидроэнергетический комплекс с моделью действующей гидроэлектростанции и аппаратурой, соответствующей оборудованию мощной гЭС, с моделями строящихся гидротехнических сооружений. В большом зале размещена электродинамическая модель энергосистемы, содержащая уни-

кальное оборудование, моделирующее Куйбышевскую и Сталинградскую гЭС, модели дальних электропередач и другие сложные устройства. Такая модель способна воспроизводить все наиболее важные процессы, происходящие в электрической части системы.

В отдельных крыльях главного корпуса помещаются крупнейшие в институте лаборатории электрических станций и техники высоких напряжений. В лабораториях электрических станций заканчивается подготовка к включению в работу учебной электрической станции. Много интересных установок имеется в хорошо оборудованной лаборатории кафедры общей электротехники.

Значительную часть корпуса занимают лаборатории теплоэнергетического, энергомашиностроительного и промтеплоэнергетического факультетов, оснащенные новейшим оборудованием и установками, среди которых можно отметить действующую модель современной тепловой электростанции, действующую модель котла промышленного типа, стенда для исследования высоких давлений и температуры.

Отдельную часть корпуса занимает учебно-производственная теплоэлектроцентраль с разнообразным оборудованием. Ввод в действие тэц МЭИ сыграл значительную роль в организации учебно-методической работы в институте.

Значительная часть лабораторий электромашиностроительного и радиотехнического факультетов, а также факультета электровакуумной техники и специального приборостроения, факультета электрификации промышленности и транспорта размещена в отдельном лабораторном корпусе, площадь которого составляет около 15 000 м².

В 1954 г. введен в эксплуатацию еще один корпус института, в котором оборудованы специальная аудитория и три зала: лаборатории теоретических основ электротехники, лаборатории теории механизмов и деталей машин, кабинетов кафедр марксизма-ленинизма и политической экономии.

Несколько этажей одного из корпусов занимает фундаментальная библиотека института, насчитывающая свыше 450 тыс. томов и свыше 100 тыс. журналов. Значительно расширен и обновлен кабинет дипломного проектирования.

За последние 5 лет сданы в эксплуатацию: один 150-квартирный и два 50-квартирных жилых дома для профессорско-преподавательского состава и сотрудников института, несколько корпусов студенческих общежитий на 2 500 чел., дом культуры, столовая, физкультурный корпус, бассейн для плавания и ряд других зданий. Общая площадь введенных в эксплуатацию за последние 10 лет учебных и жилых помещений составляет более 112 000 м². Институт имеет собственный санаторий в Фирсановке под Москвой и дом отдыха в Крыму в Алушке.

Все это стало возможным благодаря заботе Коммунистической партии и Советского правительства о нуждах высшей школы.

Московский энергетический институт в настоящее время представляет собой большой коллектив. На 10 факультетах МЭИ — теплоэнерге-

тическом, электроэнергетическом, гидроэнергетическом, энергомашиностроительном, электромашиностроительном, радиотехническом, электровакуумной техники и специального приборостроения, электрификации промышленности и транспорта, промышленной теплоэнергетики и на вечернем факультете обучается 11 000 студентов.

За годы своего существования институт подготовил более 17 000 инженеров. Только в 1955 г. МЭИ выпускает 1 260 молодых специалистов по 23 специальностям различных областей энергетики. Трудно найти в нашей необъятной стране такую электрическую станцию, крупную энергетическую стройку, промышленное предприятие, научно-исследовательский институт, где бы не работали воспитанники МЭИ.

Профессорско-преподавательский коллектив института насчитывает теперь свыше 800 профессоров, доцентов и ассистентов. В их числе 11 действительных членов и членов-корреспондентов Академии наук СССР, 68 докторов технических наук и 374 кандидата технических наук. В МЭИ работает ряд крупнейших специалистов в области электроэнергетики, теплоэнергетики, гидроэнергетики. Многие из них являются выдающимися исследователями и изобретателями.

Профессорами и преподавателями института созданы сотни учебников и учебных пособий для студентов высших технических учебных заведений по всем отраслям энергетики; многие из них переизданы в странах Европы и Азии.

Несмотря на достигнутые успехи, коллектив МЭИ видит в своей деятельности еще много недостатков, над устранением которых упорно работает.

Исключительно ответственные задачи поставлены перед Московским энергетическим институтом в связи с принятыми за последние годы решениями партии и правительства. Большие задачи вытекают из постановления июльского Пленума ЦК КПСС по дальнейшему подъему промышленности, техническому прогрессу и улучшению организации производства.

Профессора, преподаватели, сотрудники и студенты МЭИ вместе со всем советским народом участвуют в борьбе за выполнение решений партии и правительства. Главной задачей всего коллектива Московского энергетического института является улучшение подготовки молодых специалистов, способных творчески решать сложные технические и научные проблемы на основе достижений современной науки и техники. Научный коллектив МЭИ должен наряду с этим усилить свое участие в проводимых для промышленности научно-исследовательских работах в интересах дальнейшего технического прогресса. Опираясь на поддержку Коммунистической партии и Советского правительства, используя многолетний опыт учебной и научной работы, коллектив института приложит все усилия к тому, чтобы справиться с этой задачей и встретить предстоящий XX съезд Коммунистической партии Советского Союза новыми успехами в учебной, методической и научной деятельности.

Научная деятельность МЭИ им. Молотова

*Заслуженный деятель науки и техники,
проф. В. В. МЕШКОВ*

В первый период становления и развития Московской электротехнической школы, т. е. до того, как в Московском энергетическом институте были созданы факультеты (1932 г.), научно-исследовательская деятельность кафедр определялась в основном созданием новых учебных дисциплин по электротехнике и консультацией молодой отечественной электротехнической промышленности, созданной в период первой пятилетки.

В этот период были разработаны теоретические основы высшего электротехнического образования и созданы учебные руководства по основным электротехническим дисциплинам: основам электротехники, электрическим машинам, электрическим станциям, технике высокого напряжения, электрическому освещению и др. В работе над созданием первых учебников принимали участие старейшие члены коллектива профессоров и преподавателей МЭИ: А. А. Глазунов, А. П. Иванов, К. А. Круг, С. И. Курбатов, А. Я. Рябков, Л. И. Сиротинский, Н. И. Сушкин, Б. И. Угрюмов, К. И. Шенфер и др.

Осуществление генеральной линии Коммунистической партии на индустриализацию и электрификацию страны потребовало от коллектива МЭИ не только увеличения выпуска инженеров, но также активного участия в решении научно-технических вопросов, возникавших в процессе создания энергетической базы Советского Союза и отечественной электротехнической промышленности. Большое значение в деле развития научной деятельности высших учебных заведений имело постановление ЦИК СССР «Об учебных программах и режиме в высшей школе и техникумах», вышедшее в сентябре 1932 г. В этом постановлении наряду с другими основными вопросами работы высших учебных заведений была отмечена необходимость усиления научно-исследовательской работы.

В ответ на постановление ЦИК СССР коллектив института активно включился в выполнение научных исследований по заданию промышленности. Многие работы этого времени носили характер промышленных испытаний, разработки новых приборов и аппаратов, а также небольших теоретических и экспериментальных исследований. Так, на кафедре теоретических основ электротехники под руководством А. В. Талицкого было разработано и внедрено в производство 14 типов электроизмерительных приборов (шестифазные осциллографы, вибрационные гальванометры и частотомеры, контрольные электродинамические ваттметры, комбинированные мосты, компенсаторы переменного тока и др.).

Многие из этих приборов были пущены в серийное производство на Московском заводе измерительных приборов, а также производились в мастерских кафедры.

Быстрое развитие в 30-х годах отечественной электротехнической промышленности поставило перед кафедрой электрических аппаратов, которой руководил в то время В. С. Кулебакин (ныне действительный член АН СССР), ряд вопросов в области автоматического регулирования, методов расчета электромагнитных и индукционных систем, исследования новых систем релейной защиты и др. Результаты многих научных работ, проводимых в то время на электромашино- и аппаратостроительном факультете института, были переданы промышленности в виде макетов машин, аппаратов и приборов, а также методов их расчета.

Тридцатые годы характеризуются резким нарастанием объема научно-исследовательских работ на кафедрах МЭИ. Научно-исследовательская работа становится одним из основных видов деятельности кафедр института. Случайность тематики научно-исследовательских работ постепенно изживается, уступая место плановости. Так, например, в 1939 и 1940 гг. большинство научных работ, выполняемых в МЭИ, было связано с решением задач, выдвинутых третьим пятилетним планом развития народного хозяйства СССР. В этот период значительно увеличивается число работ по автоматизации производственных процессов.

Разработка принципа динамической компенсации позволила приступить к конструированию приборов автоматического многократного централизованного контроля, регулирования и управления разнообразных технологических процессов (Г. М. Жданов, Ф. Е. Темников), а также к разработке и исследованию приборов автоматического контроля плавки стали по спектру излучения расплавленного металла (А. А. Соколов).

Первый опыт эксплуатации ртутных установок для выпрямления переменного тока (электрический транспорт, химическая и металлургическая промышленность) выдвинул перед отечественной электротехнической промышленностью вопрос о механической прочности трансформаторов. Частые обратные зажигания ртутных выпрямителей приводили к серьезным авариям трансформаторов. Возник вопрос о причинах этих аварий в трансформаторах, хорошо переносящих короткие замыкания в установках переменного тока. Исследования, проведенные на кафедре электрических машин под руководством Г. Н. Петрова, вскрыли причину этих явлений.

Это позволило предложить новую конструкцию обмоток, обеспечивающую достаточную механическую прочность трансформаторов, работающих на ртутные выпрямители. В напряженных условиях военного времени новые отечественные выпрямительные трансформаторы обеспечили безаварийную работу многих ответственных установок постоянного тока. За создание мощных выпрямительных трансформаторов Г. Н. Петрову совместно с работниками Московского трансформаторного завода была присуждена Сталинская премия.

Увеличение удельного веса гидроэлектростанций в энергетическом балансе в третьей пятилетке, а также рост протяженности линий электропередачи и увеличение передаваемой мощности выдвинули перед коллективом МЭИ ряд существенно важных для того времени вопросов. Участие в разработке принципов проектирования понизительных подстанций на 400/200/10 кВ и секционных постов 400 кВ для линии электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва, исследование режимов совместной работы тепловых и гидравлических электростанций, регулирование суточных режимов ГЭС, гидродинамическое моделирование гидротехнических сооружений и другие вопросы явились предметом работы коллективов электро- и гидроэнергетического факультетов института.

Широкое развертывание научной работы в МЭИ явилось основой для значительного повышения научной квалификации преподавателей и подъема уровня подготовки инженеров-энергетиков.

К началу 1941 г. из числа преподавателей института 18 чел. защитили докторские диссертации и 92 — кандидатские.

Четвертый пятилетний план восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг., предусматривавший удвоение установленной мощности электростанций по сравнению с 1940 г., и постановление Совета Министров СССР о строительстве крупнейших гидроэлектростанций на Волге и Днестре выдвинули множество проблем, решение которых было возможно лишь при объединении усилий нескольких кафедр и тесном контакте с промышленностью. Число комплексных научно-исследовательских работ, выполняемых несколькими кафедрами, росло из года в год. Также увеличивались объем этих работ, их сложность и число участвующих в них кафедр. Так, в 1945 г. было выполнено шесть комплексных работ на сумму 760 тыс. руб., что составляло около 10% годового плана, а в 1951 г. удельный вес комплексных научно-исследовательских работ увеличился до 58,6% при общем увеличении объема работ института более чем в 1,5 раза.

За последнее десятилетие выявились и установились научные направления большинства кафедр МЭИ. Это позволило создать научные школы и целеустремленно решать научно-технические и теоретические вопросы, определяющие выбранный профиль. Выбор научных направлений и формулировка основных проблемных вопросов

положительно сказались на общем повышении качества научно-исследовательских работ и на углублении их тематики. Ряд законченных и внедренных в промышленность научно-исследовательских работ был отмечен Сталинскими премиями.

В течение 1948—1950 гг. кафедрами электрических машин и электроприборостроения был разработан новый метод компенсации погрешностей трансформаторов тока массового производства (Г. Н. Петров, С. С. Окунь, В. Т. Прытков). Новые типы трансформаторов тока, разработанные кафедрами МЭИ в содружестве с заводом «Электроаппарат» и Куйбышевским заводом Энергоремтреста, имеют значительно меньший вес и лучшие характеристики по сравнению с ранее применявшимися трансформаторами тока. Экономия веса стала до 50% и меди до 30%, а также значительное снижение трудоемкости производства способствовали быстрому внедрению новых конструкций в производство. Эта работа была удостоена в 1952 г. Сталинской премии.

Отечественная электротехническая промышленность выпустила более 1 млн. трансформаторов тока с компенсацией погрешностей по методу МЭИ. В настоящее время этот метод применяется и за рубежом.

До недавнего времени одним из нерешенных вопросов электрического транспорта являлось создание мелких промышленных электровозов нормальной частоты. Отсутствие таких электровозов вынуждало пользоваться электровозами постоянного тока, требующими сравнительно сложных и дорогих преобразовательных подстанций.

В 1935 г. В. С. Кулебакиным была предложена принципиально новая простая система тяги на переменном токе с использованием конденсаторных асинхронных двигателей. Эта идея была использована при создании рудничного конденсаторного электровоза, разработанного коллективом кафедры электрического транспорта совместно с инженерными работниками завода «Динамо» им. Кирова. На основе этих работ промышленностью была выпущена в 1949 г. первая партия (25 шт.) электровозов КЭ-1 и в 1951 г. вторая партия (50 шт.) электровозов КЭ-2.

Опыт эксплуатации первой партии электровозов показал их достоинства: простота электрооборудования, повышенное сцепление, облегченные условия работы аппаратуры и др. Опытные пылезащищенные двигатели, разработанные и изготовленные заводом «Динамо», полуавтоматическая система управления электровозом, разработанная МЭИ, улучшат работу двигателя и облегчат управление электровозом. В 1950 г. группа работников МЭИ и промышленности (В. С. Кулебакин, В. Е. Розенфельд, О. А. Некрасов и др.) удостоена Сталинской премии за создание и внедрение рудничных конденсаторных электровозов.

Тенденция создания крупных энергетических систем, обеспечивающих бесперебойное электрооборудование промышленных центров Советского Союза, заставила институт пересмотреть содер-

жание курса «Электрические сети и системы». По инициативе П. С. Жданова в курс были включены вопросы регулирования частоты, обменной мощности и элементы теории устойчивости работы энергосистем. Впервые в СССР была создана учебная лаборатория электрических сетей и систем, позволяющая исследовать работу дальних электропередач, электрических систем и местных электрических сетей. В этой лаборатории совместно с работниками Теплоэлектропроекта была рассчитана и смонтирована уникальная модель переменного тока для расчета сетей электрических систем, за которую авторам (П. С. Жданову, А. М. Федосееву и др.) было присвоено почетное звание лауреатов Сталинской премии.

В созданной лаборатории сетей и систем с 1947 г. начинаются работы по вопросам дальних электропередач переменного тока. Эти работы явились логическим продолжением исследований С. А. Лебедева и П. С. Жданова, создавших современную теорию переходных процессов в электрических системах и основы методики расчета переходных процессов в регулируемых системах. Работы по исследованию дальних электропередач были ориентированы на решение ряда основных вопросов теории и практики передачи энергии переменным током (определение пропускной способности электропередач, установление рационального способа расщепления фаз с учетом технико-экономических показателей и др.).

После смерти П. С. Жданова эти работы проводились под руководством В. А. Веникова, который разработал теорию динамического моделирования энергетических систем. Им совместно с Т. Л. Золотаревым создана уникальная динамическая модель гидроэнергетической системы. В 1951 г. за разработку теории динамического моделирования В. А. Веникову была присуждена Президиумом Академии наук СССР премия имени П. Н. Яблочкова.

Работы по моделированию электрических систем, проведенные в МЭИ, явились основой для развития аналогичных работ в ряде научных институтов Советского Союза и получили признание на XIV сессии Международной электротехнической комиссии.

Кафедры факультета электрификации промышленности и транспорта в течение последнего десятилетия занимались вопросами: создание новых систем электрической тяги для магистрального электрического транспорта, в том числе на однофазном токе высокого напряжения, и разработка систем автоматического регулирования скорости движения (Д. К. Минов, Б. П. Петров, В. Н. Степанов); теория расчета печей сопротивления и автоматического регулирования дуговых печей (А. Д. Свенчанский, Н. М. Некрасова, А. М. Вайнберг), систем электрооборудования и автоматизации механизмов металлургической промышленности и металлообрабатывающих станков, а также мощных регулируемых электроприводов переменного тока (А. Т. Голован, Д. П. Морозов, Е. В. Нитусов, М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер).

Кафедрами радиотехнического факультета был решен ряд теоретических задач по вопросам теории помехоустойчивости и по переходным процессам (В. А. Котельников, С. И. Евтянов), а также выполнены большие опытно-конструкторские разработки, к числу которых следует отнести систему шахтной диспетчерской связи для горнорудной промышленности (Н. К. Свистов, С. А. Маринов).

Работа по шахтной радиосвязи была закончена разработкой системы диспетчерской высокочастотной дуплексной связи с селективным вызовом абонентов. В 1954 г. были пущены в опытную эксплуатацию комплекты аппаратуры диспетчерской связи на четырех крупнейших рудниках металлургической промышленности. На основании опыта эксплуатации рядом министерств было принято решение о серийном изготовлении этой аппаратуры для широкого внедрения в народное хозяйство.

Много интересных и оригинальных разработок было выполнено на кафедрах электровакуумного факультета по приборам СВЧ (И. В. Лебедев), ионным приборам и преобразовательным схемам (И. Л. Каганов), кодо-импульсным системам телеуправления и телеизмерения (О. А. Горяинов); следящим системам (В. Л. Шекшня), системам и устройствам автоматического контроля и телеизмерения (Г. М. Жданов, Ф. Е. Темников, С. В. Алексеев).

Одним из примеров этого направления работ может служить система «Автоматический диспетчерский рапорт», разработанная и внедренная коллективом кафедры автоматики и телемеханики в теплосети Мосэнерго. Система диспетчерского рапорта состоит из передающего и приемного устройств, присоединяемых к городской телефонной сети параллельно с телефонным аппаратом. Диспетчер по телефону вызывает нужный ему объект, на котором по сигналу вызова начинает работать автоматическое передающее устройство. Это устройство через каждые 3,6 сек. производит поочередно измерение заданных параметров (давления, температуры, расхода пара и пр.) в различных точках объекта и передает на диспетчерский пункт результаты измерений в форме электрических импульсов различной продолжительности по тем же телефонным проводам. На диспетчерском пункте сигналы автоматически распределяются по индивидуальным указывающим приборам, смонтированным на специальном пульте. После передачи заданного числа параметров система автоматически выключается.

Большой теоретический интерес представляют некоторые работы, выполненные на кафедрах физики и теоретических основ электротехники, в частности: работы по электронной микроскопии (В. А. Фабрикант, Л. М. Биберман, Н. Г. Сушкин), по динамике намагничивания ферромагнетиков (К. М. Поливанов), по расчету полей высокой частоты в диэлектриках и полупроводниках (А. В. Нетушил) и др.

По электронной микроскопии была выполнена работа по дифракции на кристаллической

решетке поочередно летящих электронов, экспериментально подтверждающая волновые свойства элементарных частиц вещества.

Московский энергетический институт им. Молотова как политехнический ВУЗ установил за время своей работы тесную связь с рядом предприятий различных отраслей промышленности. Эта связь до 1950 г. имела форму технической помощи, которую оказывали кафедры института электростанциям, заводам и отраслевым научно-исследовательским институтам при решении ими новых вопросов. В ответ на патриотический призыв ленинградских ученых коллектив профессоров и преподавателей МЭИ установил новую форму связи — социалистическое содружество работников науки и производства. С 1950 г. 14 кафедр института в содружестве с коллективом инженерно-технических работников Мосэнерго решают многие вопросы повышения экономичности, надежности и лучшего использования установленной мощности Московской энергетической системы. С 1951 г. 16 кафедр института заключили договор о социалистическом содружестве с Московским автозаводом им. Сталина, ориентированный на совместное решение ряда вопросов по тепловому и электрическому хозяйству завода.

Работа, выполняемая коллективом профессоров и преподавателей МЭИ в содружестве с инженерными работниками многих других производственных предприятий, полезна для обеих сторон.

Она обогащает работников института производственным опытом, необходимым для педагогической деятельности.

Подводя кратко итоги научной деятельности коллектива МЭИ за истекшие 50 лет его жизни, нельзя не отметить вклада ученых института в создание отечественной технической литературы. Более 350 наименований учебников, учебных пособий и монографий написано профессорами и преподавателями МЭИ. Многие из учебников выдержали 3—4 издания, некоторые учебники были высоко оценены присуждением Сталинской премии.

Большая работа проведена коллективом института по подготовке научно-педагогических кадров. Только за последние 10 лет кафедрами института подготовлено через аспирантуру 287 молодых ученых, активно участвующих в строительстве передовой энергетической базы нашей Родины.

Решение июльского Пленума ЦК КПСС, ориентирующее рабочих, инженерных и научных работников на дальнейший подъем промышленности, технический прогресс и улучшение организации производства должны служить нам путеводным маяком, указывающим правильный путь к достижению еще больших успехов в области отечественной энергетики. Это решение должно быть боевым планом действия в деле повышения качества педагогической и научной деятельности Московского энергетического института.

[5.9.1955]



Участие МЭИ в создании и развитии электрических систем СССР

Заслуженные деятели науки и техники проф. А. А. ГЛАЗУНОВ и проф. Л. И. СИРОТИНСКИЙ

В создании и развитии отечественных электрических систем принимали участие не только инженеры, окончившие МВТУ, а затем МЭИ, но и преподаватели, особенно после открытия в 1905 г. в МВТУ электротехнической специальности. Можно напомнить, что техническими руководителями проекта Московского трамвая и Московской трамвайной электрической станции (ныне 2-я МГЭС) были преподаватели МВТУ М. К. Поливанов и Н. И. Сушкин. Они же были техническими руководителями при сооружении этих предприятий, а в дальнейшем руководили и их эксплуатацией.

Московский трамвай, трамвайная электрическая станция, преобразовательные подстанции, кабельная и воздушная сети, вступившие в работу в 1906—1907 гг., по праву считались передовыми техническими сооружениями того времени. Схема трамвайной электрической станции с кольцевой секционированной системой шин отличалась простотой и высокой степенью надежности работы. Установленный на трамвайной станции турбогенератор мощностью 6 тыс. кВт и напряжением 6 кВ являлся в то время уникальным для евро-

пейских электроустановок. Для питающей кабельной сети было взято еще мало распространенное в то время напряжение 6 кВ, которое в течение нескольких последующих пятилетий являлось предельным для городских и фабрично-заводских сетей.

Генераторы трамвайной станции и сегодня участвуют в покрытии наибольших зимних нагрузок энергосистемы. Распределительное устройство и щит управления станции, а также кабельная сеть 6 кВ используются и в настоящее время.

В этот же период преподаватели МВТУ К. А. Круг, М. К. Поливанов, Н. И. Сушкин и Б. И. Угримов своими консультациями оказывали большую помощь в создании ряда электрических станций и электрификации промышленных предприятий России.

Империалистическая война 1914—1917 гг. привела к сильнейшему расстройству энергетического хозяйства страны. Прекратились ремонты, отсутствовали запасные части, оборудование было чрезмерно перегружено, нехватало топлива, вследствие мобилизаций поредел квалифицированный персонал.

Понимая пагубность разрушения энергетического хозяйства, часть русских инженеров, среди которых видное место занимали преподаватели МВТУ В. И. Гринивецкий, К. В. Кириш и К. А. Круг, пыталась найти выход из создавшегося положения в организации Теплокома, задачей которого было приостановление разрушения энергетического хозяйства страны. Теплоком стремился также определить пути развития в дальнейшем энергетики Центрально-промышленного района России. Однако усилия Теплокома в силу сложившихся обстоятельств и безучастного отношения царского правительства к начинаниям Комитета не привели к заметным практическим результатам, и ко времени Великой Октябрьской социалистической революции энергетика России пришла в полное расстройство.

С первых же дней существования Советской власти передовая часть преподавателей МВТУ, воодушевленная инициативой В. И. Ленина, включилась непосредственно в работу по восстановлению и развитию электрических систем.

М. К. Поливанов возглавил проектирование Каширской электрической станции, на которой впервые был использован низкосортный подмосковный уголь. На электропередаче Кашира — Москва впервые в России было применено напряжение 110 кВ. Электропередача первый период работала с незаземленной нейтралью по блочной схеме, не имея выключателей на напряжении 110 кВ.

Н. И. Сушкин в это же время руководил разработкой проекта крупной районной Штеровской электростанции, предназначенной для питания электроэнергией угольной и металлургической промышленности Донецкого бассейна. Передача электроэнергии со станции осуществлялась при напряжениях 35 и 110 кВ. Топливом электростанции служил не использовавшийся ранее антрацитовый штыб. В разработке проекта Штеровской станции принимал участие и К. И. Шенфер.

В январе 1920 г. по заданию В. И. Ленина Президиум ВСНХ утвердил состав комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО) под председательством Г. М. Кржижановского. В разработке этого плана принял участие ряд преподавателей электротехнического факультета МВТУ; К. А. Круг был одним из руководящих работников комиссии. При составлении плана электрификации Центрально-промышленного района были использованы материалы быв. Теплокома. Преподаватели МВТУ и МЭИ принимали также активное участие в Центральном электротехническом совете при Главэнерго ВСНХ, рассматривавшем и утверждавшем до 1930 г. проекты мощных энергообъединений и отдельных крупных электротехнических объектов, в Электрострое, занимавшемся проектированием тепловых электростанций и сетей систем, в Теплоэлектропроекте, в Мосэнерго и других организациях. Сооружение районных станций и рост мощностей энергетических систем потребовали разработки многих специальных вопросов электрических систем, в решении которых участвовали и преподаватели института.

Большое внимание было уделено схемам электрических станций и подстанций. Предпочтение отдавалось двойной системе сборных шин с присоединением цепей через один выключатель; применялось секционирование сборных шин. На районных станциях преимущественное распространение получило непосредственное соединение генераторов с повысительными трансформаторами. При разработке проектов электрических систем основное значение придавалось обеспечению надежного питания электроэнергией потребителей, экономичности и приспособленности к различным режимам работы.

Значительная работа была проведена по выяснению целесообразных конструкций распределительных устройств. В соответствии с развитием аппаратостроения и ростом мощности энергосистем закрытые распределительные устройства получали разное конструктивное оформление: открытые ячейки выключателей, распределительные устройства зального типа, взрывные камеры и снова открытые ячейки выключателей. Первые подстанции 35...110 кВ — Каширская, Шатурская, Нижегородская и др. — выполнялись закрытого типа. В дальнейшем широкое применение получили открытые подстанции.

Много внимания было уделено конструкции воздушных линий, в особенности с деревянными опорами, которые в наибольшей степени удовлетворяли технико-экономическим требованиям рассматриваемого периода. Созданные в то время основные конструкции деревянных опор применяются и в настоящее время.

Глухое заземление нейтрали в мощных установках 110 кВ потребовало тщательной разработки защитных заземлений, обеспечивающих безопасность эксплуатации. Усложнение электрических систем сопровождалось соответствующим усовершенствованием релейной защиты и внедрением автоматизации управления.

Наряду с решением целого ряда инженерных задач возникали сложные вопросы и проблемы, требовавшие более глубокого анализа. К числу этих вопросов и проблем относились: обеспечение устойчивости работы мощных электрических систем в нормальных и послеаварийных режимах; точный учет действия токов различных видов коротких замыканий и работа в этих условиях устройств релейной защиты и автоматики; разработка защитных устройств линий электропередачи, трансформаторов и аппаратов станций и подстанций от перенапряжений; мероприятия по ослаблению и устранению влияния линий электропередачи на линии связи и сигнализации; повышение надежности работы собственных нужд станций; обеспечение безопасности эксплуатации; профилактические испытания изоляции и пр.

Решение этих вопросов требовало проведения многочисленных методических, теоретических и экспериментальных исследований, которые в целом ряде случаев заканчивались составлением имеющих большое значение для правильного строительства и эксплуатации электрических систем нормативных документов в виде руководя-

ших указаний, норм и правил. Преподаватели МВТУ—МЭИ, являясь председателями и членами комиссий, соавторами руководящих указаний, правил и норм, авторами теоретических и методических разработок, участвовали вместе с другими деятелями в решении перечисленных вопросов.

В период до 1941 г. активное участие в этой области принимали: С. А. Лебедев, П. С. Жданов, И. М. Маркович (устойчивость работы электрических систем); С. А. Ульянов, А. Б. Чернин, С. В. Страхов (методика расчета коротких замыканий); А. М. Федосеев, И. И. Соловьев, А. Б. Чернин, В. Л. Фабрикант (релейная защита и автоматика); А. А. Глазунов, Н. А. Мельников, А. Я. Рябков, Ф. П. Лашков, В. Н. Степанов, С. Д. Соловьев, Ю. Н. Баскаков (методика расчетов сетей электрических систем); М. И. Михайлов, Л. И. Сиротинский (влияние электропередач на провода связи); А. А. Глазунов, П. Г. Грудинский, Н. Н. Кувшинский, А. А. Васильев (электрическая часть станций и подстанций); М. Д. Залышкин, Е. Я. Рябкова (защитные заземления); Л. И. Сиротинский, Л. Ф. Дмоховская (перенапряжения и защита от них); П. Г. Грудинский (техническая эксплуатация); А. А. Глазунов, Г. М. Розанов (механическая часть линий электропередачи).

Быстрое развитие электротехнической промышленности позволило при составлении плана второй пятилетки поставить вопрос об единой высоковольтной сети Европейской части Советского Союза. Крупную роль в разработке экономических проблем мощных энергообъединений и единой высоковольтной сети сыграли преподаватели МЭИ С. А. Кукель-Краевский и В. И. Вейц. В третьей пятилетке развития народного хозяйства СССР создание единой высоковольтной сети стало реальной возможностью, в результате чего была начата разработка проекта Куйбышевской гидроэлектрической станции с передачей электроэнергии на большие расстояния. Эту работу вели Теплоэлектропроект и Гидроэнергопроект, в которых преподаватели МЭИ С. А. Лебедев и П. С. Жданов являлись ответственными консультантами, а Е. А. Архангельский, А. М. Федосеев и Б. С. Успенский — ответственными руководителями отдельных частей проекта.

Большое участие в качестве руководителей, исполнителей и консультантов приняли преподаватели МВТУ — МЭИ при проектировании и сооружении тепловых электрических станций: Каширской, Нижегородской, Кизеловской, Ивановской, Сталинградской, Штеровской, Кузнецкой, Магнитогорской, Зуевской, Челябинской; гидроэлектрических станций: Сызранской, Камской, Куйбышев-

ской, Сталинградской; сетей электрических систем: Донбасса, Урала, Центрально-промышленного района и ряда других.

Крупной проблемой, в разрешении которой принимают участие преподаватели МЭИ в послевоенные годы, является передача электроэнергии переменным током 400 кВ. Созданная в МЭИ электродинамическая модель электрической системы широко и плодотворно используется для решения ряда вопросов устойчивости и регулирования режимов работы систем. Эти работы проводятся коллективом лаборатории под руководством В. А. Веникова совместно с рядом других организаций (ВЭИ, Теплоэлектропроект, ЦНИЭЛ МЭС). Вопросы перенапряжений и уровней изоляции установок 400 кВ изучались под руководством Л. И. Сиротинского преподавателями кафедры техники высоких напряжений (Л. Ф. Дмоховской, Д. В. Разевигом и др.). В связи с приемом электроэнергии от Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанций исследовалось построение Московской городской электрической сети (А. А. Глазуновым, Ф. Ф. Воронцовым, Л. А. Солдаткиной). Электродинамическая модель системы используется для разработки и проверки работы автоматических и релейных устройств передачи 400 кВ Куйбышевская ГЭС — Москва (А. М. Федосеевым, В. Л. Козисом, С. А. Ульяновым, В. М. Маранчаком). В решении ряда вопросов механической части линий электропередачи 400 кВ участвовали А. А. Глазунов и Г. М. Розанов.

Преподаватели МЭИ принимают активное участие в работе технических советов Министерства электростанций и Министерства электропромышленности (Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, Л. И. Сиротинский, П. Г. Грудинский).

Преподаватели МЭИ продолжают участвовать в рассмотрении новых проектов наиболее крупных электрических станций и энергообъединений.

Следует отметить большую работу коллектива Института над составлением книг и монографий по электрическим станциям, электрическим сетям и системам, технике высокого напряжения, автоматизации и релейной защите электрических систем и технической эксплуатации электрических систем. Написанные авторами МЭИ книги и справочники широко используются инженерами, работающими по проектированию, строительству и эксплуатации электрических систем.

Преподаватели МЭИ систематически помещают в научно-технических периодических изданиях значительное число статей, в которых рассматриваются наиболее важные текущие технические и экономические вопросы дальнейшей электрификации страны.

[4.8.1955]



О влиянии регулирования возбуждения на пропускную способность дальних электропередач¹

Доктор техн. наук, проф. В. А. ВЕНИКОВ и кандидат техн. наук И. В. ЛИТКЕНС

Московский энергетический институт им. Молотова

В связи с значительным увеличением протяженности современных линий электропередачи автоматическое регулирование возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов приобретает большое значение. Регулирование по отклонениям параметров режима и их производным повышает пропускную способность электропередач и создает возможность работы в так называемых режимах искусственной устойчивости [Л. 1]. Величина передаваемой мощности при этом может ограничиваться появлением самораскачиваний, которые наступают при некотором значении угла между э. д. с. передающей станции и приемной системы (угол δ).

Генераторы, линии электропередачи, регуляторы возбуждения рассматриваются как единая электрическая система, устойчивость которой должна быть обеспечена. Расчеты статической устойчивости такой системы совмещаются с анализом схемы регулятора и выбором таких коэффициентов, при которых регулирование обеспечивало бы работу системы без самораскачиваний при всех передаваемых мощностях вплоть до предельной мощности линии. Эти расчеты должны производиться при конструировании и настройке регулятора, предназначенного для работы в данной конкретной системе.

При расчетах применяются уравнения:

относительных движений роторов машин всех n станций

$$\left. \begin{aligned} M_1 p^2 \cdot \Delta \delta_1 &= -\Delta P_1 = -\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{10}} \cdot \Delta \delta_{10} - \frac{\partial P_1}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0, \\ &\dots \dots \dots \\ M_n p^2 \cdot \Delta \delta_n &= -\Delta P_n = -\frac{\partial P_n}{\partial \delta_{n0}} \cdot \Delta \delta_{n0} - \frac{\partial P_n}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0; \end{aligned} \right\} (1)$$

относительных углов смещения роторов:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \delta_{10} &= \Delta \delta_1 - \Delta \delta_0, \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta \delta_{n0} &= \Delta \delta_n - \Delta \delta_0; \end{aligned} \right\} (2)$$

баланса приращений потоков активной и реактивной мощности в узле 0:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma \Delta P_0 &= \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{10}} \cdot \Delta \delta_{10} + \frac{\partial P_1}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0 + \\ &+ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{20}} \cdot \Delta \delta_{20} + \frac{\partial P_2}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0 + \dots + \\ &+ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_{n0}} \cdot \Delta \delta_{n0} + \frac{\partial P_n}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0 - \frac{\partial P_n}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0 = 0, \\ \Sigma \Delta Q_0 &= \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_{10}} \cdot \Delta \delta_{10} + \frac{\partial Q_1}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0 + \\ &+ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_{20}} \cdot \Delta \delta_{20} + \frac{\partial Q_2}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0 + \dots + \\ &+ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_{n0}} \cdot \Delta \delta_{n0} + \frac{\partial Q_n}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0 - \frac{\partial Q_n}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0 = 0; \end{aligned} \right\} (3)$$

переходных электромагнитных процессов в обмотках возбуждения:

$$\left. \begin{aligned} T_{d01} \cdot p \cdot \Delta E'_{d1} + \Delta E_{d1} &= \Delta E_{del}, \\ &\dots \dots \dots \\ T_{don} \cdot p \cdot \Delta E'_{dn} + \Delta E_{dn} &= \Delta E_{den}; \end{aligned} \right\} (4)$$

изменения переходных э. д. с. в зависимости от E_d и U_0 :

$$\left. \begin{aligned} \Delta E'_{d1} &= \frac{\partial E'_{d1}}{\partial E_{d1}} \cdot \Delta E_{d1} + \frac{\partial E'_{d1}}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0, \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta E'_{dn} &= \frac{\partial E'_{dn}}{\partial E_{dn}} \cdot \Delta E_{dn} + \frac{\partial E'_{dn}}{\partial U_0} \cdot \Delta U_0; \end{aligned} \right\} (5)$$

переходных процессов в возбудителях и в регуляторах:

$$\Delta E_{ae1} = \frac{1}{T_e \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_p \cdot p + 1} [G_A(p) \cdot \Delta A], \quad (6)$$

где A — параметр регулирования, т. е. напряжение, ток и т. д.;

$$G_A(p) = K_{0A} + \frac{K_{1Ap}}{T_{p1}p + 1} + \frac{K_{2Ap^2}}{T_{p2}p + 1} + \frac{K_{3Ap^3}}{T_{p3}p + 1}.$$

Совместное решение уравнений (1) ... (6) относительно отклонения какого-либо параметра режима, например $\Delta \delta$, позволяет выявить характер свободного движения системы после малого возмущения и установить² наличие устойчивости в данном режиме. Задачей исследования является нахождение способов регулирования, обеспечивающих устойчивую передачу по линии предельной мощности. Чтобы такой способ найти, необходимо установить оптимальную зависимость $G_A(p)$. При этом возникает вопрос о том, по каким параметрам режима следует вести регулирование.

У генераторов этими параметрами могут быть: напряжение U , ток I или любая его составляющая (продольная I_d , поперечная I_q , активная I_a , реактивная I_p), угол передачи δ , мощность (активная P или реактивная Q).

² Соотношения (1) ... (6) приводятся к однородной системе уравнений (с нулем в правой части). Решая эту систему относительно любого неизвестного, например $\Delta \delta$, получаем:

$$\Delta \delta_n = \frac{D_1(p)}{D(p)}. \text{ В случае однородной системы уравнений}$$

$D_1(p) = 0$, и отличное от нуля решение может быть только при $D(p) = 0$, где $D(p)$ — характеристическое уравнение. Анализ этого уравнения, проводимый любым из известных методов (по Гурвицу, Михайлову или при помощи предложенных Неймарком D -разбиений), позволяет установить отсутствие положительных корней или положительных слагающих в комплексных корнях, т. е. установить устойчивость системы.

¹ Статья отражает результаты, полученные при сравнительных исследованиях пяти систем автоматических регуляторов напряжения на модели МЭИ.

Синхронные компенсаторы можно регулировать по их напряжению или току, току линии, к которой присоединен компенсатор, углу расхождения напряжений на концах электропередачи, углу между э. д. с. и напряжением компенсатора или какой-либо другой точки системы.

Оценка свойств новых регуляторов возбуждения, основанная только на аналитических исследованиях, недостаточно надежна. Методика исследования, разработанная в МЭИ, предусматривает сочетание анализа с экспериментом, позволяющим проверить сделанные допущения. Экспериментальные исследования на динамической модели МЭИ неоднократно заставляли корректировать теоретические предположки, величину коэффициентов и количество учитываемых факторов.

Согласно разработанной в МЭИ методике на первом этапе исследований выявляется возможность повышения статической устойчивости путем регулирования по отклонениям различных параметров режима, их производным и их различным комбинациям. При этом намечается оптимальный способ регулирования и оцениваются величины коэффициентов регулирования.

Для анализа характеристического уравнения и установления зависимости его коэффициентов от режима коэффициенты уравнения целесообразно представить в виде составляющих a_n , не зависящих от регулирования (приложение I) и составляющих Δa_n , обусловленных действием регулирования (добавок) (приложение II). Например, характеристическое уравнение $D(p)$ простейшей системы генератор—линия электропередачи—шины бесконечной мощности при учете запаздывания в выпрямительном T_p и дифференцирующих элементах T_{p1} и T_{p2} регулятора имеет следующий вид:

$$a_7 p^7 + a_6 p^6 + (a_5 + \Delta a_5) p^5 + \\ + (a_4 + \Delta a_4) p^4 + (a_3 + \Delta a_3) p^3 + \\ + (a_2 + \Delta a_2) p^2 + (a_1 + \Delta a_1) p + \\ + a_0 + \Delta a_0 = 0.$$

Добавки Δa_n зависят от способов регулирования и режима передачи (рис. 1). Выбором соответствующего способа регулирования можно обеспечить положительность коэффициентов характеристического уравнения, т. е. необходимое, но недостаточное условие устойчивости.

На втором этапе производится проверка остальных условий устойчивости: определение областей устойчивости в координатах коэффициентов регулирования, для чего удобным оказывается применение метода D -разбиений [Л. 2, 3]. При помощи этого метода (см. приложение III) границу области устойчивости, даже для весьма сложных систем, удается выразить в параметрической форме. Отсутствие области устойчивости указывает на неустойчивость системы. Представив область устойчивости графически, можно установить ограничения величин коэффициентов регулирования. При этом значения ω на границе

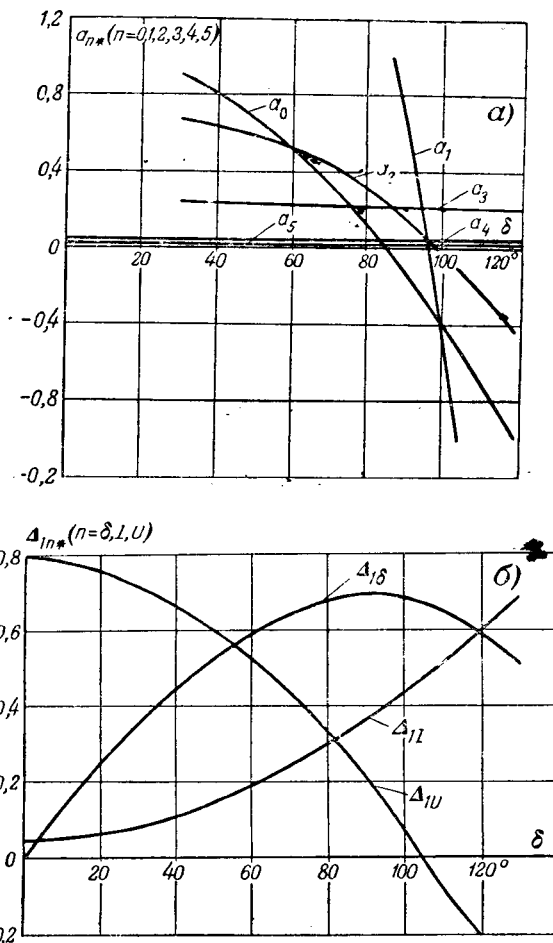


Рис. 1. Зависимость составляющих коэффициентов характеристического уравнения (при $T_{p1} = T_{p2} = 0$) от режима.

а — составляющие a_0, a_1, \dots, a_5 , не зависящие от регулирования возбуждения; б — множители Δa_n , определяющие характер зависимости от изменений режима составляющих $\Delta a_0, \Delta a_1, \Delta a_2$, обусловленных регулированием возбуждения.

области укажут примерные значения возможных частот колебаний системы. Характер областей устойчивости, построенных по методу, описанному в приложении III, при разных способах регулирования, представлен на рис. 2.

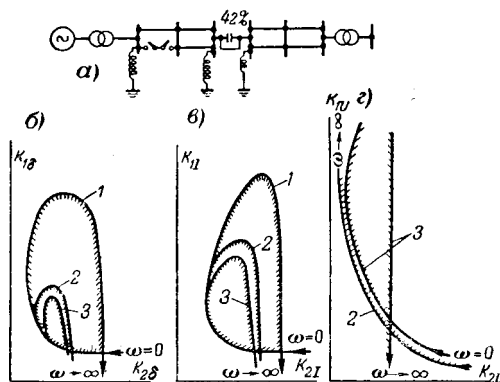


Рис. 2. Характер областей устойчивости при различных способах регулирования.

а — схема исследуемой передачи; б — граница области устойчивости при регулировании по углу; в — то же при регулировании по току; г — то же при регулировании по напряжению; 1 — расчетная без учета T_{p1}, T_{p2} ; 2 — расчетная с учетом T_{p1}, T_{p2} ; 3 — экспериментальная.

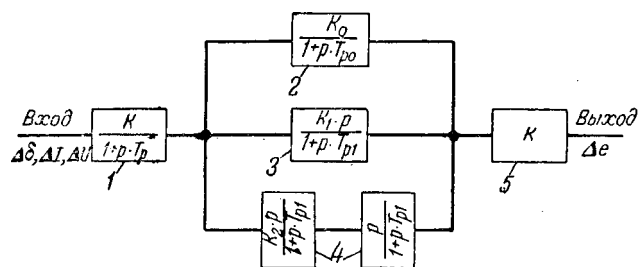


Рис. 3. Структурная схема универсального регулятора возбуждения ВЭИ.

1—преобразовательный элемент; 2—измерительный элемент; 3—дифференцирующий элемент; 4—двойной дифференцирующий элемент; 5—сумматор.

На третьем этапе исследований определяется предел статической устойчивости при заданной точности поддержания напряжения, формулируются требования к параметрам и структурной схеме регулятора, определяется его настройка применительно к конкретным параметрам системы.

На всех трех этапах аналитические исследования сочетаются с экспериментальными — на динамической модели. Однако экспериментирование на динамической модели никоим образом не противопоставляется аналитическим исследованиям и опытам в электрических системах. Напротив, только их одновременное проведение позволяет выявить истинные закономерности и избежать случайных выводов.

Динамическая модель МЭИ, на которой проводилось экспериментирование, является комплексной универсальной моделью, имеющей моделированные электрическую и гидромеханическую части [Л. 4].

Проведенные на первом этапе исследований расчеты позволили выявить оптимальные параметры регулирования и необходимость регулирования по первой и второй производным, а также наметить диапазон изменения коэффициентов регулирования, которые целесообразно было установить на универсальном измерительном элементе ВЭИ (рис. 3). Сопоставление полученных путем расчета и эксперимента областей устойчивости при регулировании по углу и его производным, по току и его производным показано на рис. 2.

В качестве примера экспериментального уточнения теории отметим, что при некоторых значениях коэффициентов регулирования по производным в системе, независимо от режима и способа регулирования, появлялись качания с довольно высокой частотой ($\omega \approx 10 \dots 20$ гц). Проведенный дополнительно теоретический анализ показал, что причина этого явления лежит в двойных дифференцирующих элементах (рис. 3), пренебрегать запаздыванием которых недопустимо, хотя ранее это делалось во всех теоретических исследованиях³.

³ При исследовании автоматически регулируемых электрических систем всякое звено с запаздыванием входит в характеристическое уравнение системы как $\frac{k}{1+pT}$.

Рис. 4. Области устойчивости при регулировании по напряжению при различных режимах.

1—расчетная при угле $\delta = 80^\circ$; 2—то же при $\delta = 90^\circ$; 3—то же при $\delta = 100^\circ$; 4—экспериментальная граница, не зависящая от режима.

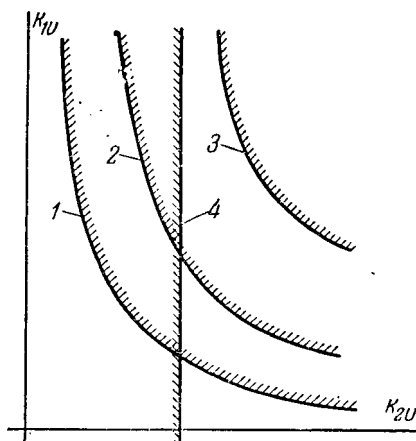
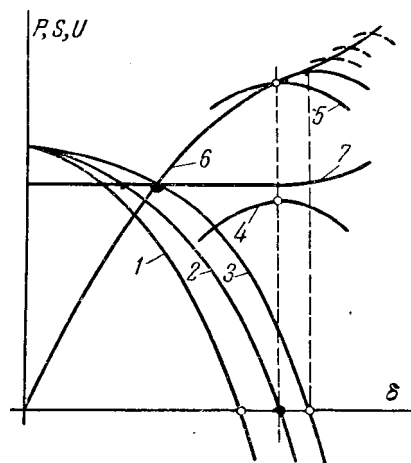


Рис. 5. Мощности и напряжение в зависимости от угла δ .

Синхронизирующие мощности (S) при: 1— $E_d = \text{const}$; 2— $E_d' = \text{const}$; 3— $U_2 = \text{const}$; 4—статические характеристики мощности при: 4— $E_d = \text{const}$; 5—то же при медленной коррекции напряжения; 6—то же при $U = \text{const}$; пунктирные кривые—статические характеристики мощности при изменении напряжения согласно зависимости (7); 7—изменение напряжения.



Для устранения качаний приходилось уменьшать коэффициент регулирования по второй производной, ограничивая этим предельно передаваемую мощность. Ограничение было особенно заметно при регулировании по напряжению и его производным (рис. 4, 5). Так, при регулировании по напряжению и его производным, при идеальных дифференцирующих элементах без запаздывания возможности электропередачи ограничены величинами, соответствующими $S_U = 0$ (рис. 5). Но, как уже отмечалось выше, наличие даже небольшого запаздывания в дифференцирующих элементах регулятора (T_{p1} менее 0,01 сек) значительно сдвигает зону устойчивой работы в сторону меньших углов⁴.

Если при этом $pT = j\omega T$ соизмеримо с единицей, то пренебрегать такими запаздываниями без предварительного исследования их влияния в данной конкретной системе нельзя. Чем больше частота колебаний системы, тем большее значение имеют малые запаздывания.

⁴ В данных условиях регулирование по напряжению оказывается менее благоприятным. Однако это не значит, что его не следует рассматривать при выборе способа регулирования возбуждения в других случаях. Например, проведенные исследования способов регулирования возбуждения синхронных компенсаторов приемного конца показали, что в этом случае оптимальным способом регулирования возбуждения как раз является регулирование по напряжению и его производным. Регулирование по напряжению может оказаться целесообразным в сложных системах, где выявление других параметров режима затруднительно.

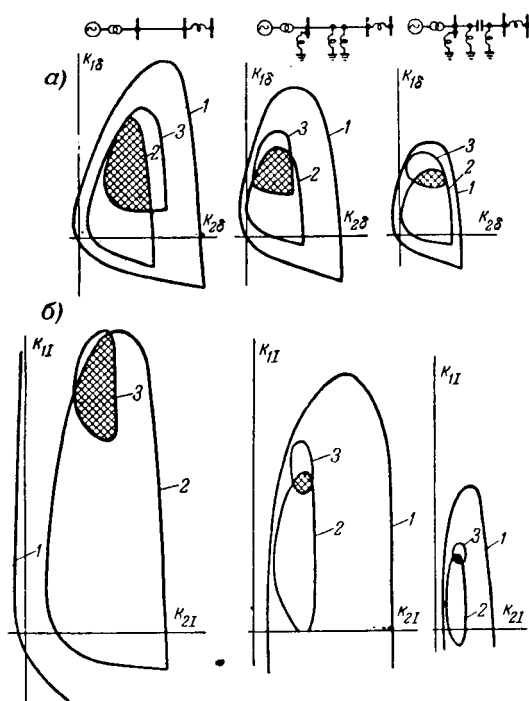


Рис. 6. Области устойчивости при изменении режима и схемы электропередачи Куйбышевская гЭС—Москва при дифференцирующих элементах регулятора, имеющих очень малые запаздывания.

а — при регулировании по углу; б — при регулировании по току; 1 — $\delta = 30^\circ$; 2 — $\delta = 90^\circ$; 3 — $\delta = 120^\circ$. Загтрихованы участки области устойчивости, общие для всех режимов в пределах одной схемы.

Регулирование по току статора и его производным или по углу и его производным расширяет зону устойчивой работы, позволяя работать при углах больших, чем углы, соответствующие $S_U = 0$ (рис. 5). Эти способы регулирования не только обеспечивают устойчивую передачу по линии предельной мощности, но создают дополнительный резерв устойчивости за счет возможности работы при $S_U < 0$ при подъеме напряжения в аварийных режимах. Для оценки устойчивости существенное значение имеет зависимость коэффициентов регулирования от режима электропередачи и ее параметров.

При регулировании по углу и неизменных коэффициентах регулирования устойчивая работа может быть обеспечена при всех режимах и изменениях параметров линии электропередачи большой протяженности (рис. 6). При наличии заметного запаздывания необходимы нелинейные коэффициенты регулирования, зависящие от режима. Их нелинейность должна быть тем большей, чем больше величины запаздываний.

Регулирование по току при реальных запаздываниях в регуляторе и постоянных коэффициентах регулирования по производным остается устойчивым при всех изменениях режима. Но резкое изменение параметров электропередачи, связанное с включением или отключением устройств продольной и поперечной компенсации линии, требует изменения коэффициентов, что является существенным недостатком этого способа регулирования.

Сравнительные испытания, проведенные в 1953 г. на динамической модели МЭИ, воспроизводящей электропередачу Куйбышевская гЭС—Москва, имели своей целью дать представление об основных свойствах следующих пяти регуляторов⁵, основанных на различных принципах и имеющих разное конструктивное исполнение: 1) Центральной научно-исследовательской электротехнической лаборатории (ЦНИЭЛ), 2) Всесоюзного электротехнического института (ВЭИ), 3) Института электротехники Академии наук СССР (ИЭ АН СССР), 4) Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР (ИАТ АН СССР), 5) Московского энергетического института (МЭИ).

Регулятор ЦНИЭЛ регулирует по отклонению угла, его первой и второй производным с медленной коррекцией напряжения. Коэффициенты регулирования вводятся нелинейно при изменении угла. Регулятор ВЭИ регулирует по отклонению напряжения и тока, первой производной тока и напряжения, второй производной тока. При росте нагрузки выше определенного значения коэффициент регулирования по току увеличивается. Регулятор ИЭ АН СССР представляет собой устройство компаундирования с обычным двухсистемным электромагнитным корректором напряжения, с дополнительным устройством ударного возбуждения и развозбуждения; он является своеобразным автоматическим регулятором релейного типа в сочетании с элементами программного управления. Регулятор ИАТ АН СССР регулирует по отклонению напряжения, его первой производной. Уставка напряжения изменяется с изменением угла и его первой производной. Регулятор МЭИ регулирует по отклонению напряжения, тока и их первым производным.

Система возбуждения модели воспроизводила бустерную схему возбуждения, имеющую четырехкратный потолок возбуждения и постоянную времени вольтодобавочной машины $T_e = 0,12$ сек. При измерении угла сравнивались напряжения от приемной системы и углоизмерительной машины генератора Куйбышевской гЭС, что соответствовало идеальной телепередаче вектора напряжения от системы к гидроэлектростанции. Все регуляторы возбуждения при испытаниях были поставлены в одинаковые условия в отношении потребления мощности измерительными элементами, падения напряжения в трансформаторах тока, питания силовых элементов, величины максимального тока при установившемся режиме и т. д. Все внутренние сопротивления силовых элементов регуляторов были установлены также одинаковыми.

Испытаниям предшествовала наладка всех регуляторов в условиях работы дальней электропередачи. При наладке выявились некоторые эксплуатационные свойства и особенности регуляторов. Например, оказалось, что регулятор ЦНИЭЛ чувствителен к колебаниям напряжения

⁵ В статье рассмотрены только характеристики регуляторов, представленных к испытаниям. Дальнейшие изменения в регуляторах (кроме регулятора ВЭИ) не рассматриваются.

и к появлению в напряжении углоизмерительных машин небольших (3...5%) низкочастотных (16 гц) составляющих. Для устранения неблагоприятного влияния этих составляющих на устойчивость приходилось несколько увеличивать запаздывание в регуляторе.

При испытаниях определялись предельные значения передаваемой мощности и соответствующие им углы по условиям статической устойчивости. Результаты для электропередачи без последовательной компенсации приведены в табл. 1, из которых следует, что регуляторы возбуждения, реагирующие на отклонения параметров и их производные, в статических режимах (при плавном увеличении передаваемой мощности) обеспечивают передачу предельной мощности линии. Регуляторы возбуждения, реагирующие на отклонение тока и его первую и вторую производные, на отклонение угла и его первую и вторую производные, обеспечивают предельный (115...118°) угол, больший, чем при $S_U = 0$ (рис. 5). Регуляторы возбуждения, реагирующие на отклонение тока, напряжения и их первые производные и на отклонение напряжения, угла и их первые производные, обеспечивали несколько меньший предельный угол (102...104°). Регуляторы, реагирующие только на отклонение параметров режима (без введения производных), обеспечивали устойчивую передачу мощности, близкую к предельной, при постоянстве E'_d .

Таблица 1

| Регулятор | Напряжение U_1 , % к $U_{1\kappa}$ | Предельная мощность P_{np} , % к P_{κ} | Предельная мощность, приведенная к одному напряжению, % к пропускной мощности линии | Максимальный угол δ , эл. град. |
|-------------|---|--|--|--|
| ВЭИ | 105 | 102 | 100 | 117 |
| ЦНИЭЛ | 111 | 107,5 | 100 | 117 |
| ИЭ АН УССР | 101 | 90 | 93 | 85 |
| ИАТ АН СССР | 102 | 98 | 100 | 102 |
| МЭИ | 106 | 101 | 100 | 99 |

Точность поддержания напряжения U_1 в начале электропередачи при изменении нагрузки от холостого хода до максимальной проверялась при всех вариантах схемы электропередачи. Характер изменения этого напряжения показан на рис. 7 и 8, из которых следует, что все исследуемые регуляторы возбуждения в нормальных режимах обеспечивают точность поддержания напряжения в пределах $\pm 2\%$ и в предельных по устойчивости режимах повышают напряжение не более чем на 10%.

Кроме этого, определялось критическое напряжение, т. е. то минимальное напряжение U_2 на конце электропередачи, при котором еще возможно передавать заданную мощность при сохранении статической устойчивости. Его величина определялась путем понижения напряжения на конце электропередачи при помощи синхронного компенсатора. При этом определялось и соответ-

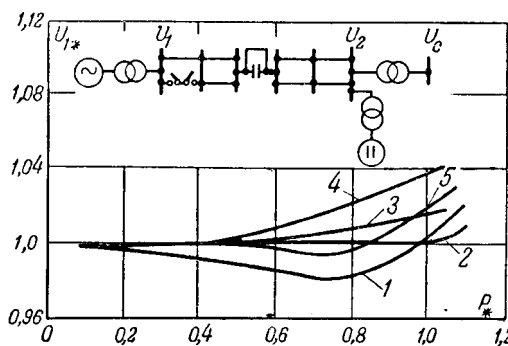


Рис. 7. Изменение напряжения с изменением нагрузки при работе регуляторов возбуждения:
1 — ЦНИЭЛ, 2 — ВЭИ; 3 — ИЭ АН УССР; 4 — ИАТ АН СССР; 5 — МЭИ.

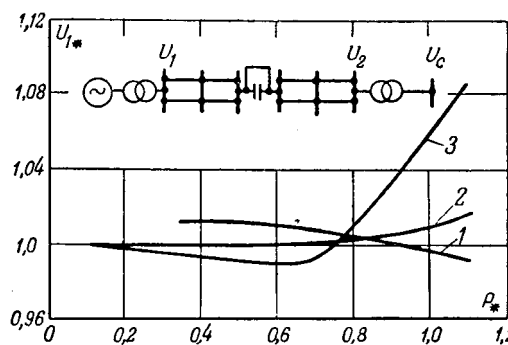


Рис. 8. Изменение напряжения с изменением нагрузки при работе регуляторов возбуждения:
1 — ЦНИЭЛ; 2 — ВЭИ; 3 — ИЭ АН УССР.

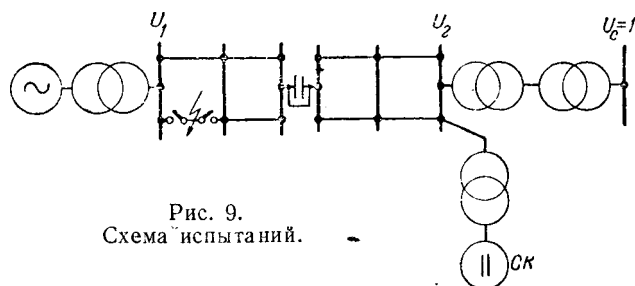
ствующее значение угла. Результаты опытов для электропередачи без последовательной компенсации приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Регулятор | $\frac{U_{2\min}}{U_{2\kappa}}$ | δ_{\max} | $K_U = \frac{U_0 - U_{\min}}{U_0} \cdot 100$ |
|-------------|---------------------------------|-----------------|--|
| ВЭИ | 82 | 113 | 18 |
| ЦНИЭЛ | 80 | 112 | 20 |
| ИЭ АН УССР | 100 | 90 | 0 |
| ИАТ АН СССР | 89 | 102 | 11 |
| МЭИ | 83 | 104 | 17 |

Чтобы выявить поведение системы вблизи предела статической устойчивости при нагрузке станции, составляющей 95% предельной мощности, производились резкие изменения осветительной нагрузки, присоединенной на конце линии. Периодичность этих изменений равнялась 3; 6 и 9 сек, а величина была такой, что колебания нагрузки генераторов Куйбышевской гЭС достигали 5% их номинальной мощности. Такие изменения нагрузки вполне реальны для крупной системы. При этих изменениях регуляторы обеспечивали устойчивую работу электропередачи.

Предел передаваемой мощности по условиям динамической устойчивости и соответствующий угол δ определялись для случая трехфазного короткого замыкания в начале линии (рис. 9) с последующим (через 0,1 сек) отключением го-

Рис. 9.
Схема испытаний.

ловного участка линии. Кроме того, опыт производился для случая короткого замыкания в конце и в середине линии при различных схемах электропередачи.

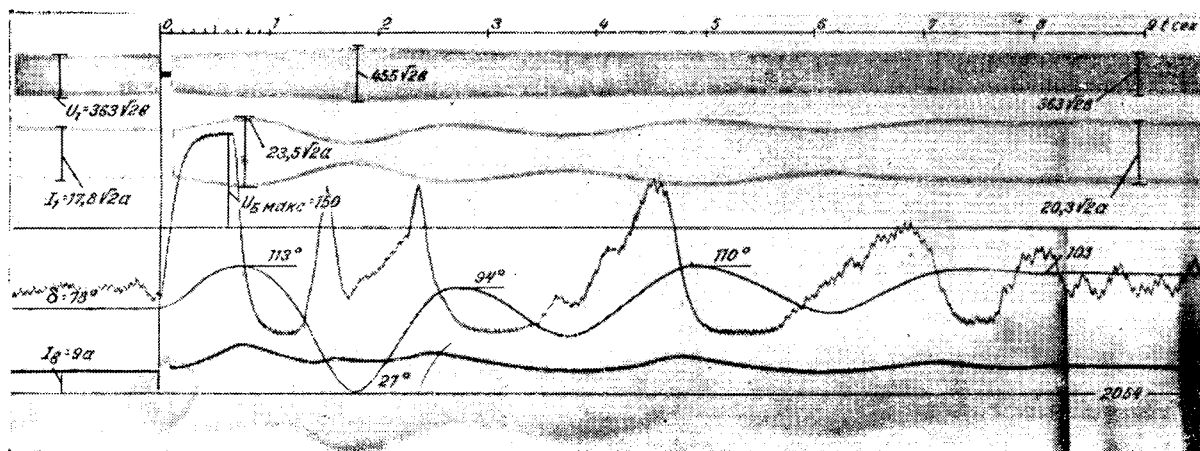
Испытания показали, что регуляторы возбуждения, реагирующие на отклонения параметров режима и их производные, обеспечивают примерно одинаковую передаваемую мощность по условиям динамической устойчивости (табл. 3). Несколько меньшая предельная мощность ($\sim 10\%$) получилась при испытании регулятора ИЭ АН УССР.

Осциллограммы предельных режимов при трехфазном коротком замыкании в начале линии и последующем отключении головного участка

| Регулятор | Предельная мощность по условиям динамической устойчивости, % P_n |
|--|--|
| ЦНИЭЛ | 96,7 |
| ВЭИ | 97,5 |
| ИЭ АН УССР | 89,3 |
| ИАТ АН СССР | 99 |
| Нормальное компаундирование с электромагнитным корректором | 73 |
| Нормальное компаундирование с корректором с релейным формированием | 76 |

Для наилучшего гашения качаний уменьшение возбуждения должно продолжаться при уменьшении угла (отрицательное скольжение рис. 9,а), а затем при новом росте угла (положительное скольжение) оно должно смениться интенсивным увеличением возбуждения (сверх i_{f0}). Следовательно, ток возбуждения должен иметь составляющую, примерно пропорциональную скольжению.

Напряжение возбудителя при этом должно изменяться с некоторым опережением по отношению



линии с применением различных регуляторов напряжения приведены на рис. 10, 11, 12 и 13.

Таким образом, применение регулирования по производным регулируемых параметров (тока или угла) не только улучшает статическую устойчивость, но и весьма существенно сказывается на динамической устойчивости системы. Для сохранения устойчивости в первом цикле качаний необходимо интенсивное увеличение тока возбуждения. Регулирование по второй производной обеспечивает такое увеличение (рис. 10, 11, 12 и 13). Однако для уменьшения размаха дальнейших качаний необходимо снять возбуждение, как только скольжение достигнет нуля (рис. 14). Если интенсивное увеличение тока возбуждения затянется и снятие возбуждения будет осуществлено при отрицательном скольжении, соотношение площадей ускорения и торможения может получиться настолько неблагоприятным, что во втором цикле качаний произойдет выпадение генераторов из синхронизма (рис. 14,б).

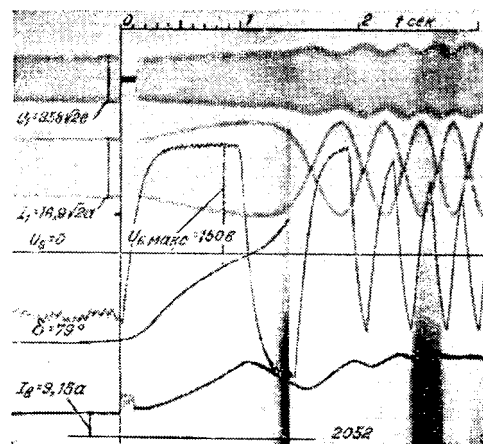


Рис. 10. Осциллограммы предельных режимов в случае применения регулятора ЦНИЭЛ.

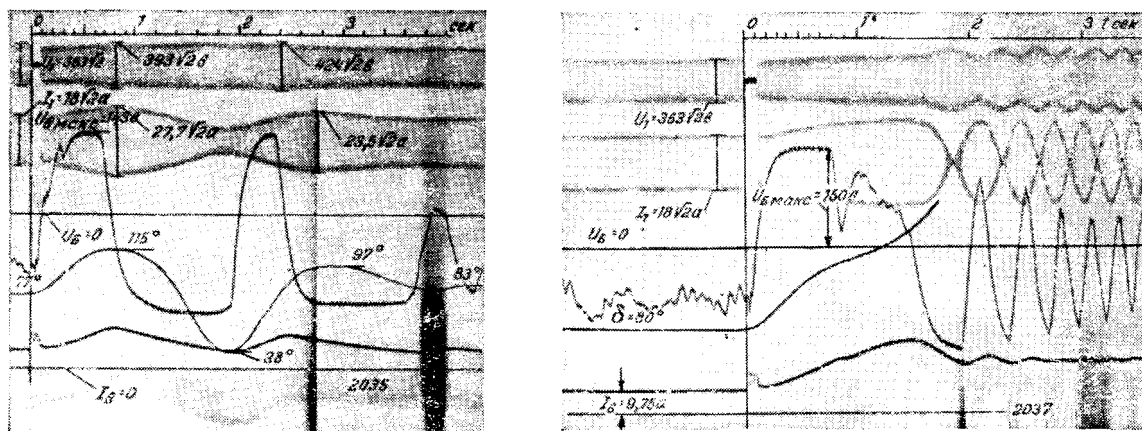


Рис. 11. Осциллограммы предельных режимов в случае применения регулятора ВЭИ.

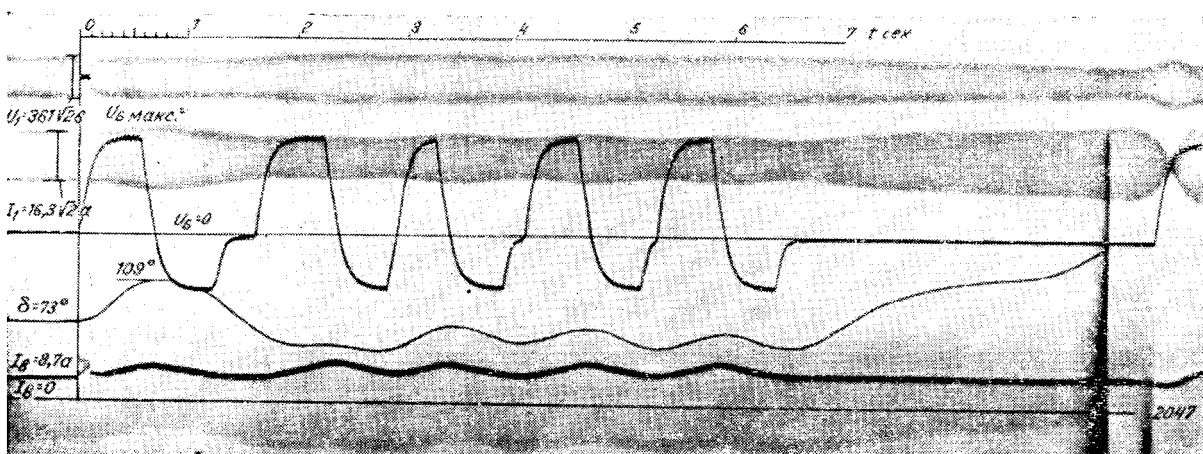
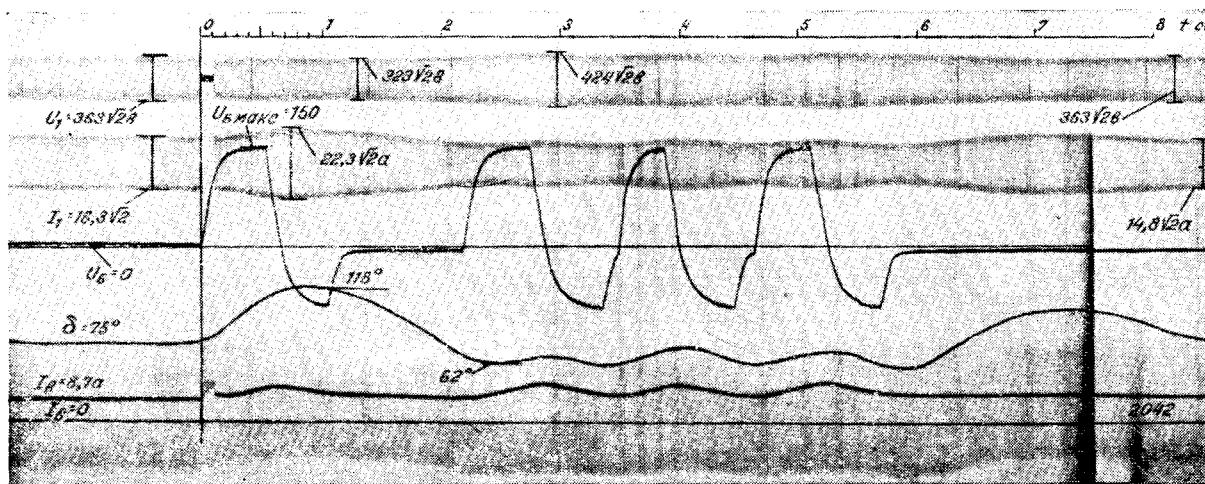


Рис. 12. Осциллограммы предельных режимов в случае применения регулятора ИЭ АН УССР.

к скольжению. Это опережение должно быть тем значительней, чем большее запаздывание по отношению к напряжению имеет ток возбуждения. Следовательно, напряжение возбудителя должно иметь составляющую, пропорциональную второй производной регулируемого параметра. Таким образом, требования к автоматическому регулированию напряжения, связанные с улучшением ста-

тической устойчивости, не противоречат требованиям, вытекающим из необходимости улучшить условия гашения колебаний ротора.

Коэффициенты регулирования по первой и второй производным, необходимые для повышения статической устойчивости, могут отличаться от коэффициентов, необходимых для наилучшего гашения больших колебаний. Для определения по-

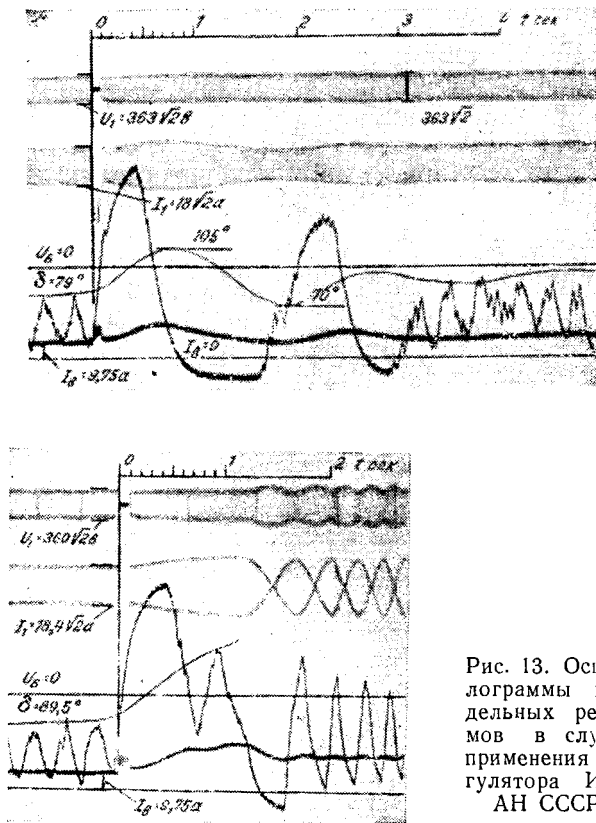


Рис. 13. Осциллограммы предельных режимов в случае применения регулятора ИАТ АН СССР.

следних полезен анализ, проводимый методом площадей (рис. 14).

При разработке рассматриваемых в настоящей статье регуляторов главное внимание обращалось на повышение статической устойчивости и улучшение динамической устойчивости в первом цикле колебаний. Повидимому, применением специальных мер можно было бы несколько улучшить затухание больших качаний.

Регуляторы ВЭИ и ИЭ АН УССР поддерживали напряжение холостого хода генератора по-

стоянным и нормально работали при синхронизации генератора с приемной системой. Регуляторы ЦНИЭЛ, МЭИ, ИАТ АН СССР не могли работать в режиме холостого хода и не обеспечивали возможности синхронизации с системой.

Регуляторы ЦНИЭЛ и ИЭ АН УССР при внезапном замыкании продольной компенсации или отключении шунтирующих дросселей не требовали перестройки коэффициентов регулирования, необходимой в регуляторе ВЭИ и осуществляемой при помощи специального реле, которому должен подаваться соответствующий импульс. Если реле почему-либо не срабатывает, то генераторы получают незатухающие колебания, которые не приводят к нарушению устойчивости и устраняются переключением реле от руки. Регулятор МЭИ при плавном переходе от одной схемы к другой требовал перестройки коэффициентов. Возможности регулятора ИАТ АН СССР в этом отношении не были полностью выявлены.

В случае отключения выключателя, через который конец линии электропередачи соединяется с приемной системой, при мощности, близкой к номинальной, и применения регулятора ВЭИ напряжение в начале линии повышается на 27% и понижается до нормального значения через 4...5 сек. В случае применения регулятора ИЭ АН УССР, работающего с отключенным программным форсированием, повышение напряжения составляет 18%, и понижение его до нормального значения происходит через 7 сек. При том же регуляторе, работающем с включенным программным форсированием, напряжение повышается на 45% и не понижается до нормального значения. Регуляторы ЦНИЭЛ, МЭИ, ИАТ АН СССР работать в рассматриваемом случае не могли.

Сравнительные испытания показали значительную эффективность введения в регуляторы возбуждения производных от параметров режима. Испытания и аналитические исследования выявили определенные преимущества комбинированно-

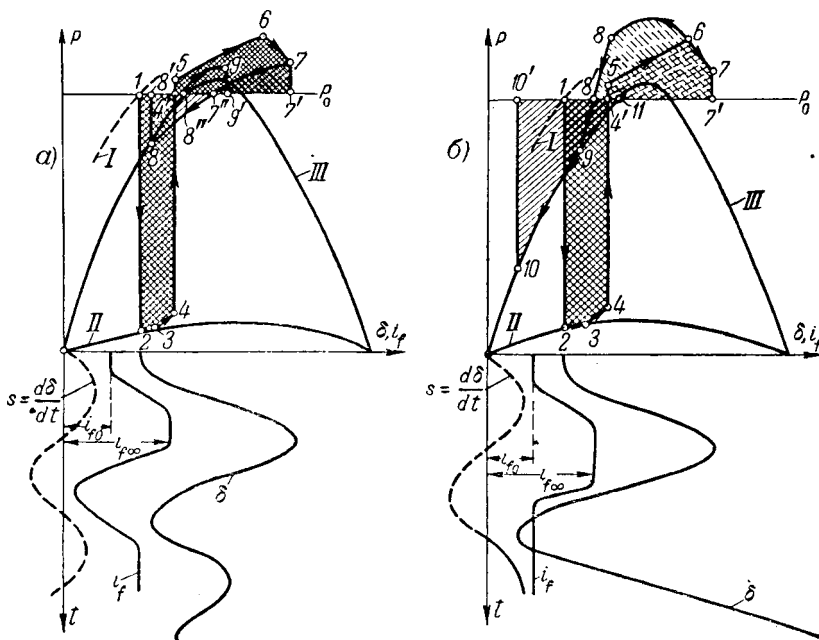


Рис. 14. Характеристики $P = f(\delta)$ и изменение во времени угла δ и тока возбуждения I_f при различном проведении форсирования.

а — при форсировании, снимающем ток при прохождении скольжения через нуль (точка 7), и последующем глубоком развозбуждении с последующим форсированием (участок характеристики 8-9); 1-2-3-4-4'-1 — площадь ускорения в первом цикле колебаний; 4'-5-6-7-7'-4' — соответствующая ей площадка торможения; 7'-7-7''-7' — площадка торможения при уменьшении угла при развозбуждении при $S_U = 0$ (точка 7); 7''-8-8'-7'' — соответствующая ей площадка ускорения; 8'-8-8''-8' — площадка ускорения, определяющая движение во втором цикле угла (при форсировании тока возбуждения); б — при длительном форсировании и последующем уменьшении тока при отрицательном скольжении; 1-2-3-4-4'-1 — площадка ускорения в первом цикле колебаний; 4'-5-6-7-7'-4' — соответствующая ей площадка торможения; 7'-7-6-8-8'-7' — площадка торможения при уменьшенном угле при длительном сохранении тока возбуждения (развозбуждение в точке 8); 8'-9-10-10'-8' — соответствующая ей площадка ускорения; 10'-10-S-11-10' — площадка ускорения, определяющая движение во втором цикле изменений угла.

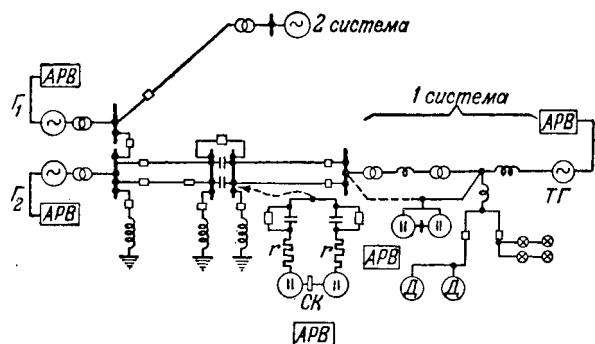


Рис. 15. Полная схема динамической модели МЭИ.

го регулирования по взаимосвязанным параметрам. Так, например, одним из наиболее целесообразных в смысле надежности и эксплуатационных удобств было признано регулирование по отклонению тока и напряжения, первой и второй производным тока.

В результате испытаний был принят регулятор ВЭИ, в который дополнительно было введено регулирование по первой производной напряжения. При изменении схемы электропередачи этот регулятор не требует переключений, изменяющих коэффициенты регулирования по производным. При такой неизменной настройке регулятора предел передаваемой мощности по условиям динамической устойчивости уменьшается на 2...3%, а предельный рабочий угол — на 5...8°.

Теоретические и экспериментальные исследования, составившие третий этап работы, были направлены: на окончательную отработку и изучение параллельной работы генераторов, снабженных регуляторами ВЭИ; на уточнение условий работы при переходе от шин бесконечной мощности к полностью моделированной системе (рис. 15), содержащей автоматически регулируемые генераторы приемной системы, синхронные компенсаторы и комплексную нагрузку. В этих исследованиях выявлялся также оптимальный способ регулирования возбуждения синхронных компенсаторов приемного конца и выяснялось влияние второй линии, отходящей от шин станции.

При работе на шины бесконечной мощности регулятор ВЭИ обеспечивал по условиям статической устойчивости передачу предельной мощности линии. По условиям динамической устойчивости, проверяемой при трехфазном коротком замыкании в начале передачи с отключением поврежденного участка регулятор обеспечивал 95—97% номинальной мощности. В случае же работы на приемную систему конечной мощности показатели электропередачи несколько ухудшались, и передаваемая мощность оказывалась меньше предельной. Однако при установке в приемной системе достаточно мощных синхронных компенсаторов (60...80% передаваемой мощности) это ухудшение может быть незначительным.

Исследования показали, что статическая устойчивость электропередачи сравнительно мало зависит от способа регулирования компенсаторов⁶.

⁶ В исследованиях работы компенсатора участие принимал аспирант М. Н. Розанов.

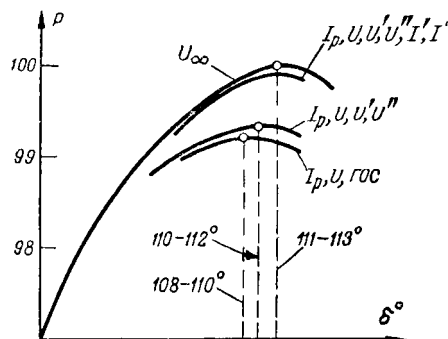


Рис. 16. Сопоставление различных способов регулирования возбуждения синхронных компенсаторов.

Результаты анализа и экспериментального сопоставления различных способов регулирования возбуждения синхронных компенсаторов, проведенного при помощи универсального регулятора ВЭИ, показаны на рис. 16.

На основе этих исследований для практического осуществления можно рекомендовать применение регулирования возбуждения по отклонению реактивного тока с коррекцией по напряжению, первой и второй производным напряжения. При таком регулировании предел мощности по условиям статической устойчивости почти не снижается по сравнению с пределом при работе на шины неизменного напряжения (рис. 16), а по условиям динамической устойчивости, определяемой по короткому замыканию в начале электропередачи, снижается только на 5...7%. В случае применения компаундирования, снабженного устройством, меняющим знак отклонения тока при изменении знака реактивной мощности, предел статической устойчивости уменьшается незначительно, а предел динамической устойчивости снижается более заметно (~10%).

При осуществлении регулирования возбуждения по производным параметров режима условия устойчивости параллельной работы отдельных генераторов станции могут отличаться от условий устойчивости электропередачи. Существенное значение может иметь изменение количества генераторов и схемы передачи, например изменение числа линий, включение связи со второй системой и т. п.

Исследование показало, что параллельная работа двух групп генераторов⁷, регуляторы которых настроены из условия получения оптимальных режимов каждой из этих групп, может оказаться неустойчивой. После включения указанных двух групп генераторов на параллельную работу имели место колебания роторов с частотой порядка 5 гц. Хотя эти колебания не были нарастающими, работа все же была невозможной, так как распределение реактивных мощностей между генераторами оказалось неустойчивым, и эти мощности свободно перераспределялись между ними.

Теоретический анализ показал, что причина этого явления в основном связана с выбором ко-

⁷ На модели эти две группы были представлены двумя генераторами.

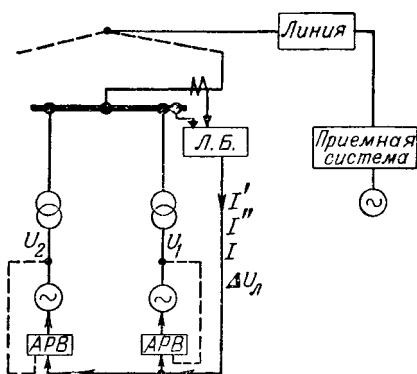


Рис. 17. Схема включения регуляторов возбуждения при параллельной работе генераторов в пределах одной станции.

эффицентов регулирования по производным. Будучи установленными из условий работы через линию большой протяженности, эти коэффициенты слишком велики для обеспечения устойчивости хорошо связанных генераторов, например находящихся в пределах одной станции.

Напротив, если коэффициенты выбрать из условия обеспечения устойчивой работы генераторов станции, то они окажутся недостаточными для обеспечения устойчивости дальнейшей передачи, и у станции в целом при предельных режимах будет иметь место тенденция к самораскачиванию.

Обеспечение устойчивости станции в целом и взаимной устойчивости ее генераторов требует некоторого усложнения системы регулирования. Например, можно применить схему, показанную на рис. 17, в которой имеется общий измерительный элемент, реагирующий на суммарный ток линии электропередачи и дающий отклонение по току и по производным на все регуляторы. Элементы, измеряющие напряжение каждого генератора, включаются в этом случае на шины своих генераторов. Чтобы избежать понижения напряжения в начале линии и, следовательно, уменьшения передаваемой мощности, предусматривается общее для всех генераторов корректирующее устройство. Статизм этого устройства скомпенсирован введением дополнительной составляющей, пропорциональной току. Схема рис. 17 имеет недостаток, заключающийся в том, что измерение тока и его производных, необходимое для устойчивой работы регуляторов, сосредоточено в одном блоке, и, следовательно, любое повреждение в этом блоке выведет из строя электропередачу. Однако останавливаясь на схемах и конструкциях, устраняющих этот недостаток, мы не будем.

Присоединение к шинам передающей станции второй линии электропередачи требует регулирования по параметрам режима той линии, которая несет наибольшую нагрузку и раньше другой подходит к пределу.

Задача осуществления достаточно надежного регулирования, обеспечивающего передачу по линии мощности, равной предельной, в настоящее время может считаться разрешенной. Это обстоятельство должно учитываться при расчетах статической устойчивости.

Вопрос о наиболее рациональной схеме автоматических регуляторов напряжения для станций, работающих на дальние электропередачи, связан с их эксплуатационными качествами и в значительной мере зависит от конструктивных свойств и практических возможностей измерения тех или иных параметров. Например, от весьма целесообразного регулирования по углу пока приходится отказываться в связи с недостаточной уверенностью в надежности телепередачи. С другой стороны, известное неудобство пользования некоторыми параметрами (ток, угол) в сложных схемах систем, при работе станции на несколько линий, связанных с различными приемными системами, может заставить обратиться к комбинированному регулированию, ввести в закон регулирования напряжение. Дальнейшей задачей являются исследования именно в этом направлении.

Приложение I. Определение не зависящих от регулирования составляющих коэффициентов характеристического уравнения:

$$\begin{aligned}
 a_7 &= M \cdot T'_d \cdot T_e \cdot T_p T_{p1} T_{p2}; \\
 a_6 &= M [T'_d T_e (T_p T_{p2} + T_p T_{p1} + T_{p1} T_{p2}) + \\
 &\quad + T_p T_{p1} T_{p2} (T'_d + T_e)] + P_d T'_d T_e T_p T_{p1} T_{p2}; \\
 a_5 &= S_{Ed} T'_d T_e T_p T_{p1} T_{p2} + M [T'_d T_e (T_p + T_{p1} + T_{p2}) + \\
 &\quad + T'_d (T_p T_{p1} + T_p T_{p2} + T_{p1} T_{p2}) + \\
 &\quad + T_e T_p (T_{p1} + T_{p2}) + T_{p1} T_{p2} (T_e + T_p)] + \\
 &\quad + P_d [T'_d T_e (T_p T_{p1} + T_p T_{p2} + T_{p1} T_{p2}) + \\
 &\quad + T_p T_{p1} T_{p2} (T'_d + T_e)]; \\
 a_4 &= S_{Ed} T_e T_p T_{p1} T_{p2} + \\
 &\quad + S_{E'd} [T'_d T_e (T_p T_{p1} + T_p T_{p2} + T_{p1} T_{p2}) + \\
 &\quad + T'_d T_p T_{p1} T_{p2}] + M [T'_d (T_e + T_p + T_{p1} + T_{p2}) + \\
 &\quad + T_e (T_p + T_{p1} + T_{p2}) + T_p (T_{p1} + T_{p2})] + \\
 &\quad + P_d [T'_d T_e (T_p + T_{p1} + T_{p2}) + \\
 &\quad + T'_d T_p (T_{p1} + T_{p2}) + T_e T_p (T_{p1} + T_{p2})]; \\
 a_3 &= S_{Ed} [T_e T_p (T_{p1} + T_{p2}) + T_{p1} T_{p2} (T_e + T_p)] + \\
 &\quad + S_{E'd} [T'_d T_e (T_p + T_{p1} + T_{p2}) + \\
 &\quad + T'_d (T_p T_{p1} + T_p T_{p2} + T_{p1} T_{p2})] + \\
 &\quad + M (T'_d + T_e + T_p + T_{p1} + T_{p2}) + \\
 &\quad + P_d [T'_d (T_e + T_p + T_{p1} + T_{p2}) + \\
 &\quad + T_e (T_p + T_{p1} + T_{p2}) + T_p (T_{p1} + T_{p2})]; \\
 a_2 &= S_{Ed} [T_e (T_p + T_{p1} + T_{p2}) + \\
 &\quad + T_p (T_{p1} + T_{p2}) + T_{p1} T_{p2}] + \\
 &\quad + S_{E'd} T'_d (T_e + T_p + T_{p1} + T_{p2}) + M + \\
 &\quad + P_d (T'_d + T_e + T_p + T_{p1} + T_{p2}); \\
 a_1 &= S_{Ed} (T_e + T_p + T_{p1} + T_{p2}) + S_{E'd} T'_d + P_d; \\
 a_0 &= S_{Ed}.
 \end{aligned}$$

Приложение II. Определение обусловленных действием регулирования составляющих (добавок) коэффициентов характеристического уравнения

| Способ регулирования возбуждения | | Δa_5 | Δa_4 | Δa_3 | Δa_2 | Δa_1 | Δa_0 |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|--|--|
| Регулирование по углу и его производным | $K_{0\delta} \cdot \Delta \delta$ | — | — | — | $K_{0\delta} P_{Ed} T_{p1} T_{p2}$ | $K_{0\delta} P_{Ed} (T_{p1} + T_{p2})$ | $K_{0\delta} P_{Ed}$ |
| | $K_{1\delta} p \cdot \Delta \delta$ | — | — | — | $K_{1\delta} P_{Ed} T_{p2}$ | $K_{1\delta} P_{Ed}$ | — |
| | $K_{2\delta} p^2 \cdot \Delta \delta$ | — | — | $K_{2\delta} P_{Ed} T_{p1}$ | $K_{2\delta} P_{Ed}$ | — | — |
| Регулирование по напряжению и его производным | $K_{0U} \cdot \Delta U$ | — | $K_{0U} M T_{p1} T_{p2} \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{0U} [M (T_{p1} + T_{p2}) + P_d T_{p1} T_{p2}] \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{0U} [S_U T_{p1} T_{p2} + M + P_d (T_{p1} + T_{p2})] \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{0U} [S_U (T_{p1} + T_{p2}) + P_d] \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{0U} S_U \frac{P_{Ed}}{P_U}$ |
| | $K_{1U} p \cdot \Delta U$ | — | $K_{1U} M T_{p2} \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{1U} (M + P_d T_{p2}) \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{1U} (S_U T_{p2} + P_d) \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{1U} S_U \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | — |
| | $K_{2U} p^2 \cdot \Delta U$ | $K_{2U} M T_{p1} \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{2U} (M + P_d T_{p1}) \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{2U} (S_U T_{p1} + P_d) \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | $K_{2U} S_U \frac{P_{Ed}}{P_U}$ | — | — |
| Регулирование по току и его производным | $K_{0I} \cdot \Delta I$ | — | $K_{0I} M T_{p1} T_{p2} (-I_{Ed})$ | $K_{0I} [M (T_{p1} + T_{p2}) + P_d T_{p1} T_{p2}] (-I_{Ed})$ | $K_{0I} [(I_{\delta} P_{Ed} - I_{Ed} S_{Ed}) T_{p1} T_{p2} + (M + P_d T_{p1} + P_d T_{p2}) (-I_{Ed})]$ | $K_{0I} [(I_{\delta} P_{Ed} - I_{Ed} S_{Ed}) \times (T_{p1} + T_{p2}) - P_d I_{Ed}]$ | $K_{0I} (I_{\delta} P_{Ed} - I_{Ed} S_{Ed})$ |
| | $K_{1I} p \cdot \Delta I$ | — | $K_{1I} M T_{p1} (-I_{Ed})$ | $K_{1I} (M + P_d T_{p2}) (-I_{Ed})$ | $K_{1I} [(I_{\delta} P_{Ed} - I_{Ed} S_{Ed}) T_{p2} - P_d I_{Ed}]$ | $K_{1I} (I_{\delta} P_{Ed} - I_{Ed} S_{Ed})$ | — |
| | $K_{2I} p^2 \cdot \Delta I$ | $K_{2I} M T_{p1} (-I_{Ed})$ | $K_{2I} (M + P_d T_{p1}) \times (-I_{Ed})$ | $K_{2I} (P_d + T_{p1}) (-I_{Ed})$ | $K_{2I} (I_{\delta} P_{Ed} - I_{Ed} S_{Ed})$ | — | — |

Приложение III. Определение характера областей устойчивости.

Для определения устойчивости применяется метод, выявляющий область с одинаковым распределением корней характеристического уравнения [Л. 2].

Подставив $p = j\omega$ в характеристическое уравнение, например (1), и приравняв отдельно мнимую и действительную части нулю, получим два уравнения вида:

$$K_1 N_1(\omega) + K_2 Q_1(\omega) + R_1(\omega) = 0,$$

$$K_1 N_2(\omega) + K_2 Q_2(\omega) + R_2(\omega) = 0,$$

где K — коэффициенты регулирования;

$N_1(\omega)$, $N_2(\omega)$, $Q_1(\omega)$, $Q_2(\omega)$, $R_1(\omega)$, $R_2(\omega)$ — многочлены по степеням ω , выражение которых через параметры системы зависит от параметра регулирования.

Решение этих уравнений относительно коэффициентов регулирования по производным K_1 и K_2 дает уравнения кривой, разграничивающей области с различным распределением корней характеристического уравнения. Придавая ω значения от $-\infty$ до $+\infty$, построим эти области.

Кроме этого, необходимо определить положение особых прямых. Особые прямые, соответствующие $\omega = 0$ и $\omega = \infty$, в нашем случае находятся в бесконечности, так как K_1 и K_2 не входят ни в старший, ни в свободный члены характеристического уравнения. Других особых прямых также нет.

Штриховка кривой D -разбиения производится по известному правилу знака определителя:

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_1(\omega) & Q_1(\omega) \\ R_2(\omega) & Q_2(\omega) \end{vmatrix}.$$

Двигаясь по кривой D -разбиения от точки, соответствующей $\omega = -\infty$, к точке, соответствующей $\omega = 0$, и обратно к точке, соответствующей $\omega = +\infty$, будем штриховать левую сторону кривой, если $\Delta > 0$, и правую, если $\Delta < 0$. В нашем случае стороны кривой оказываются заштрихованными двукратно.

Определив для одной точки плоскости расположение корней относительно мнимой оси, пользуясь критерием Рауса и зная, что при переходе в сторону двойной штриховки через кривую D -разбиения два корня переходят с правой полуплоскости в левую, определяем область устойчивости.

Для случая приведенного выше характеристического уравнения седьмого порядка граница области устойчивости в координатах коэффициентов регулирования по первой и второй производным выражается:

$$K_{1n} = \frac{\frac{V_n(\omega)}{\omega} (1 + \omega^2 T_{p1}^2) \left(1 + \frac{U_n(\omega)}{V_n(\omega)} \cdot \omega T_{p2} \right)}{-\Delta_{1n} \left[1 - \omega^2 \left(\frac{\Delta_{2n}}{\Delta_{1n}} - T_{p1} T_{p2} \right) - \omega^4 \frac{\Delta_{2n}}{\Delta_{1n}} T_{p1} T_{p2} \right]}; \quad (III,1)$$

$$K_{2n} = \frac{\frac{U_n(\omega)}{\omega^2} (1 + \omega^2 T_{p2}^2) \left[1 - \frac{V_n(\omega)}{U_n(\omega)} \omega T_{p1} \right]}{\Delta_{1n} \left[1 - \omega^2 \left(\frac{\Delta_{2n}}{\Delta_{1n}} - T_{p1} T_{p2} \right) - \omega^4 \frac{\Delta_{2n}}{\Delta_{1n}} T_{p1} T_{p2} \right]}, \quad (III,2)$$

где

$$U_n(\omega) = a_4 \omega^4 - (a_2 + \Delta_{2n} K_{0n}) \omega^2 + a_0 + \Delta_{1n} K_{0n};$$

$$V_n(\omega) = \omega (a_3 \omega^4 - a_3 \omega^2 + a_1);$$

$n = \delta, I$, U — параметр регулирования;

ω — действительное число;

T_{p1} , T_{p2} — запаздывания в дифференцирующих элементах регулятора;

Δ — величина, зависящая от способа регулирования, определяемая согласно таблице;

a_n — значения, приведенные в приложении I, если положить в них $T_{p1} = T_{p2} = 0$.

| Параметр регулирования | Значение Δ | | |
|------------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| | $\Delta \delta$ | ΔI | ΔU |
| Δ_{1n} | P_{Ed} | $P_{Ed} I_\delta - I_{Ed} S_{Ed}$ | $\frac{P_{Ed}}{P_U} S_U$ |
| Δ_{2n} | 0 | $M I_{Ed}$ | $\frac{P_{Ed}}{P_U} M$ |

При регулировании по любой составляющей тока меняется лишь выражение I_δ и I_{Ed} через параметры системы.

Литература

1. С. А. Лебедев. Исследование искусственной устойчивости. Сборник «Устойчивость электрических систем». Труды ВЭИ, вып. 40. Госэнергоиздат, 1940.
2. Ю. И. Неймарк. Устойчивость линеаризованных систем. Изд. ЛКВВИА, 1949.
3. В. И. Горюшкин. Об устойчивости синхронного генератора с ионным возбуждением. Известия АН СССР, ОТН, № 5, 1953.
4. Краткое описание динамической модели МЭИ. Под ред. В. А. Веникова. Изд. МЭИ, 1955.
5. В. А. Веников. Передача электроэнергии переменным током на большие расстояния. Электричество, № 5, 1954.
6. И. В. Литкенс. Сравнительная оценка различных способов регулирования возбуждения, применяемых для увеличения пропускной способности дальних передач. Автореферат. Изд. МЭИ, 1954.
7. И. М. Маркович и С. А. Совалов. О практических критериях статической устойчивости. Электричество, № 3, 1945.
8. В. И. Горюшкин. Динамическая устойчивость синхронных генераторов и регулирование возбуждения, как средство ее повышения. Автореферат. Изд. Академии наук СССР, 1954.

[18.7.1955]



Субгармонические колебания в простейших схемах и в дальних электропередачах

Кандидат техн. наук Л. Ф. ДМОХОВСКАЯ

Московский энергетический институт им. Молотова

Кандидат техн. наук В. И. ЛЕВИТОВ

Энергетический институт Академии наук СССР

Наличие в схемах дальних электропередач большой емкости продольной компенсации и нелинейных реакторов поперечной компенсации [Л. 1] приводит к возможности возникновения в аварийных режимах различных видов феррорезонансных колебаний, которые могут сопровождаться значительными перенапряжениями. Одним из видов таких колебаний являются колебания с частотой, равной $1/3$ частоты источника, — субгармонические колебания, возникающие после переходного процесса, например после отключения короткого замыкания за конденсаторами продольной компенсации.

Характерные черты этого явления могут быть обнаружены путем анализа процесса в простейшей схеме рис. 1, а с сосредоточенными параметрами, состоящей из линейной индуктивности L , емкости C , сопротивления r и нелинейного реактора Q .

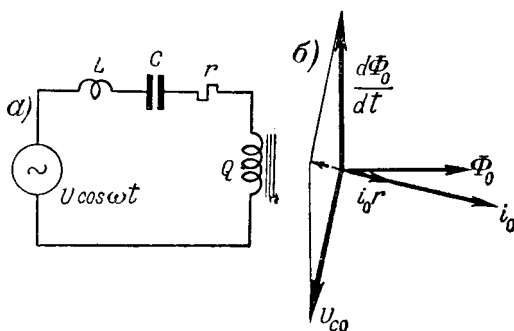


Рис. 1. Простейшая схема для изучения субгармонических колебаний.

а — простейшая схема для изучения субгармонических колебаний;
б — векторная диаграмма для субгармонических колебаний.

Результаты исследования простейшей схемы для установившегося режима при характеристике реактора вида:

$$i = a\Phi + b\Phi^3 \quad (1)$$

приведены в ряде статей, опубликованных в последнее время [Л. 2, 3 и 4]. Аналогичные результаты были получены и в Московском энергетическом институте им. Молотова в 1952 г. в связи с исследованием внутренних перенапряжений в различных вариантах схемы электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва.

В Московском энергетическом институте им. Молотова были исследованы также вопросы, не получившие достаточного освещения в литературе (влияние степени нелинейности характеристики реактора, особенности субгармонических колебаний в трехфазной схеме и в линиях большой протяженности). Результаты исследования этих вопросов излагаются в настоящей статье.

Чтобы не повторять упомянутых выше работ, мы ограничимся приведением без вывода оконча-

тельных формул, которые использовались при анализе явлений.

Анализ простейшей схемы. На рис. 2 приведена характерная осциллограмма тока и потокосцепления реактора при наличии субгармонических колебаний. Из осциллограммы следует, что периодическое решение дифференциального уравнения для простейшей схемы (рис. 1, а) может быть найдено в виде:

$$\Phi = \Phi_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + \Phi_0 \sin\left(\frac{\omega t}{3} - \varphi_0\right), \quad (2)$$

где Φ_1 , Φ_0 — амплитуды основной гармоники и субгармоники потокосцепления;
 φ_1 , φ_0 — соответствующие фазные углы.

Появление субгармонических колебаний обусловлено так называемым автопараметрическим резонансом. Как известно, явление параметрического резонанса заключается в том, что в колебательном контуре с потерями при отсутствии внешней э. д. с. могут поддерживаться незатухающие колебания, если емкость или индуктивность цепи изменяется периодически с частотой, кратной частоте собственных колебаний. При этом в цепь вносится энергия, которая расходуется на покрытие активных потерь. При автопараметрическом резонансе периодическое изменение одного из параметров достигается не механическим путем, а в силу нелинейности характеристики и воздействия напряжения сети; компенсация активных потерь осуществляется за счет электрической, а не механической энергии.

На рис. 1, б приведена векторная диаграмма для составляющих низкой частоты, показывающая, каким образом компенсируется активное падение напряжения. Разложение в ряд кривых потокосцепления и тока показывает, что субгармоника тока отстает от субгармоники потокосцепления. Вследствие этого векторы напряжений на реакторе $\frac{d\Phi_0}{dt}$ и на емкости (за вычетом падения напряжения в линейной индуктивности) U_{C0} сдвинуты друг относительно друга

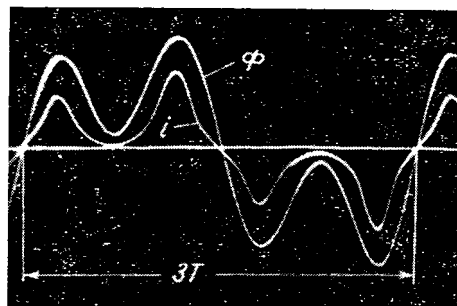


Рис. 2. Осциллограмма тока i и потока реактора Φ при наличии субгармонических колебаний.

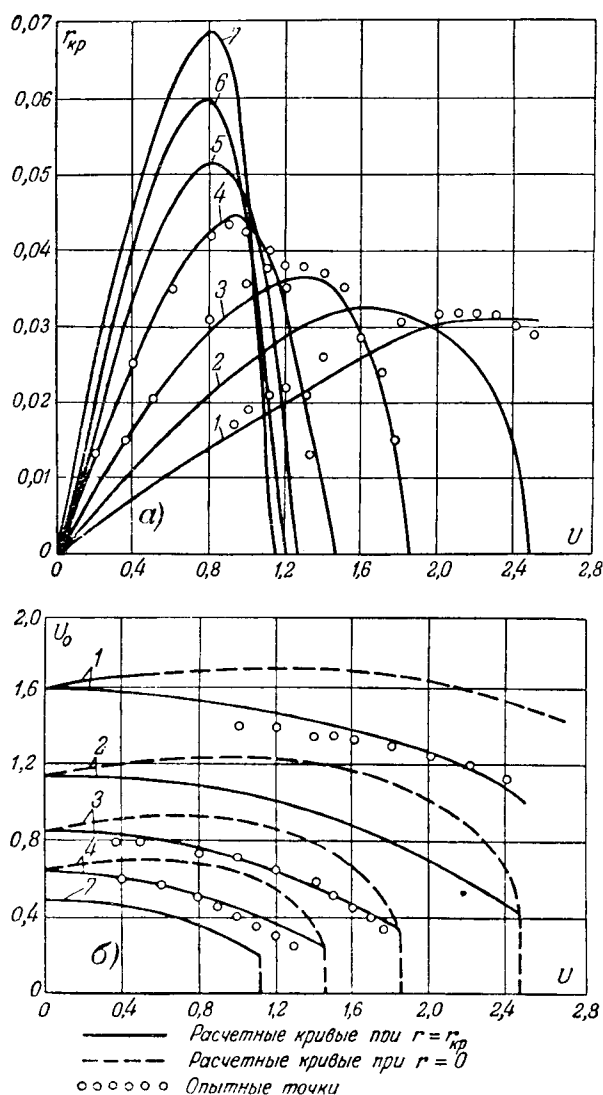


Рис. 3. Кривые зависимости критического сопротивления (а) и амплитуд субгармоник (б) от напряжения источника при $\bar{C} = 16$.

1 — $a = 0,95$, $b = 0,05$; 2 — $a = 0,9$, $b = 0,1$; 3 — $a = 0,8$, $b = 0,2$; 4 — $a = 0,6$, $b = 0,4$; 5 — $a = 0,4$, $b = 0,6$; 6 — $a = 0,2$, $b = 0,8$; 7 — $a = 0$, $b = 1$.

на угол, не равный 180° , и в сумме дают вектор, уравновешивающий падение напряжения в активном сопротивлении.

Субгармонические колебания могут существовать при сопротивлении цепи, не превышающем некоторую определенную величину критического сопротивления, которая подсчитывается по формулам, приведенным в приложении.

На рис. 3,а даны построенные на основании расчетов кривые зависимости критического сопротивления от напряжения источника при реакторах с различной степенью нелинейности, характеризующейся соотношением коэффициентов a и b в уравнении (1), а на рис. 3,б — значения амплитуд субгармонических колебаний напряжения на реакторе при сопротивлении, равном критическому, и при отсутствии сопротивления.

Кривые построены в относительных единицах, причем за базисные величины приняты номинальные напряжение и мощность реактора,

а также частота сети. Емкость конденсатора и мощность реактора в относительных единицах соответствуют аналогичным величинам линии Куйбышевская гЭС — Москва для одного из характерных режимов ($x_c = 69$ ом, $\bar{C} = 16$, мощность реактора 150 мва).

Для некоторых значений a и b на расчетные кривые нанесены опытные точки. При сравнении расчетных и опытных данных сопротивление, обусловленное потерями в стали реактора, определялось приближенно, т. е. учитывалось некоторой средней величиной при частоте $\frac{\omega}{3}$

и средней амплитуде субгармоники потока (рис. 3,б). Этим частично объясняется некоторое расхождение расчетных и опытных данных, приведенных на рис. 3 и 4.

На рис. 4 показано влияние емкости и степени нелинейности на ширину зоны существования и возникновения субгармонических колебаний. Субгармонические колебания возбуждались путем отключения короткого замыкания на реакторе, а затем напряжение источника плавно повышалось или понижалось до исчезновения субгармоник. Из кривых рис. 4 видно, что верхние границы области существования и возникновения субгармоник практически совпадают. Нижняя граница области возникновения лежит выше соответствующей границы области существования. Это значит, что минимальные напряжения, необходимые для возбуждения субгармонических колеба-

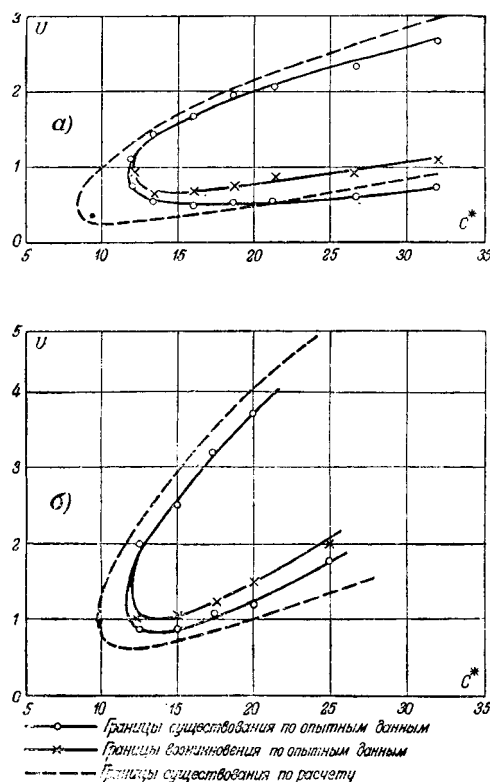


Рис. 4. Кривые зависимости верхней и нижней границы области существования и возникновения субгармонических колебаний от емкости при реакторах с различной степенью нелинейности при $R = 0,015$.
 а — $a = 0,8$, $b = 0,2$; б — $a = 0,95$, $b = 0,05$.

ний, оказываются выше минимальных напряжений, достаточных для поддержания этих колебаний в установившемся режиме.

Анализ кривых рис. 3 и 4 позволяет сделать следующие основные выводы: 1) уменьшение нелинейности характеристики реактора уменьшает величину критического сопротивления и сдвигает область существования и возникновения субгармонических колебаний в сторону больших напряжений; 2) уменьшение нелинейности приводит к возрастанию амплитуды колебаний.

Субгармоники в трехфазной системе. Особенности субгармонического резонанса в трехфазной системе также исследовались на схеме с сосредоточенными постоянными.

Рассмотрение фазных соотношений в трехфазной системе с замкнутым нулевым проводом показывает, что амплитуды и формы кривых потоков всех трех фаз будут одинаковы (все три фазы находятся в совершенно одинаковых условиях), если субгармоники потоков в соседних фазах сдвинуты на углы 40, 80 и 160° (в системе отсчета углов, отнесенных к частоте $\frac{\omega}{3}$). Для этих трех характерных режимов субгармоника тока в нулевом проводе I_n (сумма токов в фазах) соответственно равна:

$$I. I_n = I_\phi \left[\sin \frac{\omega t}{3} + \sin \left(\frac{\omega t}{3} + 40^\circ \right) + \sin \left(\frac{\omega t}{3} - 40^\circ \right) \right] = 2,53 I_\phi \sin \frac{\omega t}{3};$$

$$II. I_n = I_\phi \left[\sin \frac{\omega t}{3} + \sin \left(\frac{\omega t}{3} + 80^\circ \right) + \sin \left(\frac{\omega t}{3} - 80^\circ \right) \right] = 1,35 I_\phi \sin \frac{\omega t}{3};$$

$$III. I_n = I_\phi \left[\sin \frac{\omega t}{3} + \sin \left(\frac{\omega t}{3} + 160^\circ \right) + \sin \left(\frac{\omega t}{3} - 160^\circ \right) \right] = -0,89 I_\phi \sin \frac{\omega t}{3}.$$

На рис. 5 приведены осциллограммы токов для всех трех режимов.

При отсутствии сопротивления в нулевом проводе все три режима являются возможными и устойчивыми. При включении в нулевой провод небольшого сопротивления (порядка 20% критического) возможен только режим III с наименьшим током в нулевом проводе. При дальнейшем увеличении этого сопротивления субгармоника тока в нулевом проводе уменьшается, а затем становится равной нулю. Субгармоники тока в фазах продолжают существовать при сохранении фазных сдвигов, равных приблизительно 160°, при этом они образуют несимметричную, но уравновешенную систему, не содержащую токов нулевой последовательности. В одной из фаз, на-

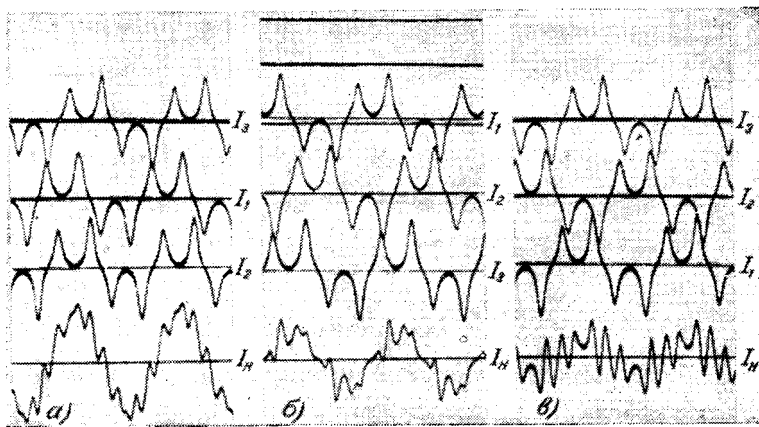


Рис. 5. Осциллограммы токов в фазах и в нулевом проводе при углах сдвига между субгармониками.
 $\alpha - 40^\circ$; $\beta - 80^\circ$; $\gamma - 160^\circ$.

пример фазе 1, субгармоники потокосцепления и тока возрастают по сравнению с соответствующими величинами при замкнутом нулевом проводе (или в однофазной системе), а в двух других фазах уменьшаются. Колебания обогащаются высшими гармониками, что приводит к изменению формы кривых потоков в фазах (рис. 6, а). В кривой потенциала нейтрали (рис. 6, б) наряду с субгармоникой (0,2 U) появляется значительная третья гармоника (0,6 U).

При большом активном сопротивлении в нейтрали или разомкнутом нулевом проводе, кроме описанного режима, наблюдалось другое состояние трехфазной системы, которое характеризуется осциллограммами рис. 7. Из осциллограммы видно, что амплитуды субгармоник периодически изменяются, причем моменты прохождения через минимум в каждой из фаз чередуются через равные интервалы времени. Период изменения амплитуд имеет порядок 1 сек. При этом режиме система в каждый момент является несимметричной, но на протяжении одного периода колебаний все фазы находятся в одинаковых условиях. Та-

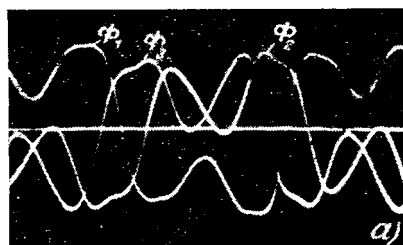
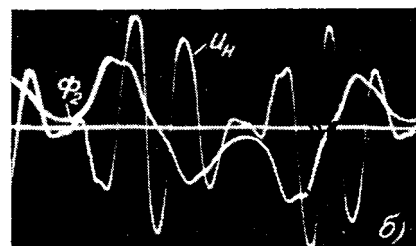


Рис. 6. Осциллограммы потокосцеплений в трех фазах (а) и потокосцепления в одной из фаз и потенциала нулевой точки (б) в схеме с разомкнутым нулевым проводом.



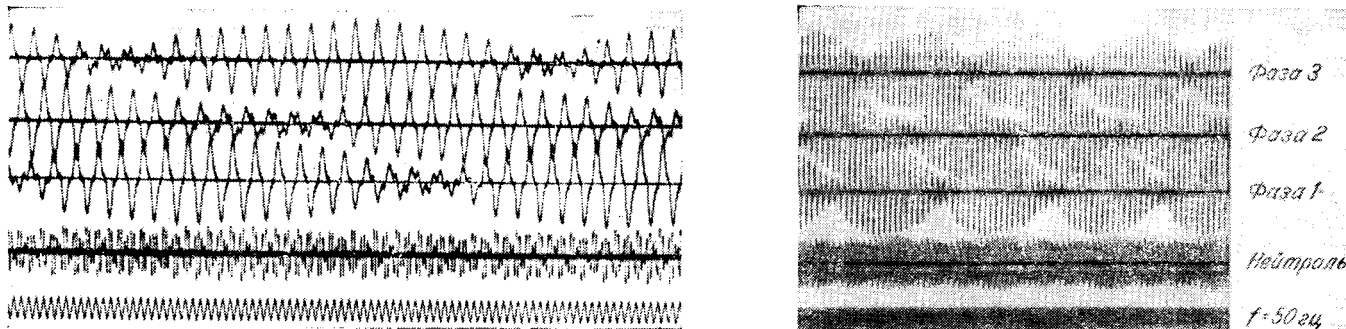


Рис. 7. Осциллограммы напряжения на емкостях и в нулевой точке трехфазной схемы с разомкнутым нулевым проводом (при разных скоростях временной развертки).

ким образом, опыты показали, что увеличение сопротивления в нулевом проводе и даже его замыкание не могут устранить субгармонических колебаний в фазах.

Устранение субгармоники при любом сопротивлении в нулевом проводе достигалось путем включения в три фазы схемы сопротивлений Δr , которые имели такие же величины, как и в однофазной схеме, или путем шунтирования конденсаторов сопротивлениями, величина которых приближенно определяется по формуле пересчета с последовательного соединения на параллельное:

$$r'_{kp} = \frac{\Delta r_{kp}}{1 + \left(\frac{\omega C}{3} \Delta r_{kp} \right)^2}.$$

Результаты опытов на трехфазной схеме с сосредоточенными постоянными показывают, что приближенное определение границ области существования субгармонических колебаний, величины критического сопротивления и возможных амплитуд перенапряжений можно производить, исходя из простейшей схемы (рис. 1,а), для которой справедливы формулы, приведенные в приложении. Следовательно, для экспериментального определения особенностей субгармонического резонанса в линиях большой протяженности можно использовать однофазную модель.

Перенапряжения, обусловленные субгармоническими колебаниями в линиях большой протяженности. Результаты исследования субгармонических колебаний в простейшей цепи могут быть использованы при рассмотрении аналогичного явления в линиях большой протяженности с поперечной и продольной компенсацией, что подтверждается опытами на модели.

Опыты проводились для схемы электропередачи 400 кВ; двухцепная линия состояла из четырех участков. При составлении схем замещения и моделировании были внесены некоторые упрощения. Генераторы моделировались постоянной э. д. с. и переходной реактивностью x'_d . Изменение э. д. с. генератора в подавляющем большинстве случаев не должно оказывать существенного влияния на рассматриваемое явление, так как область существования субгармонических колебаний достаточно широка. Изменение реактивного сопротивления генератора также играет второсте-

пенную роль, так как оно весьма мало по сравнению с кажущимся сопротивлением реактора.

Трансформаторы моделировались Г-образной схемой замещения, что позволило объединить сопротивления рассеяния трансформаторов и генераторов и оперировать в схемах замещения одним общим предвключенным реактивным сопротивлением.

При передаче энергии на одном из участков только по одной цепи и аварийном отключении другой цепи схемы замещения с учетом указанных выше упрощений принимают вид, представленный на рис. 8. Для колебаний низкой частоты эти схемы могут быть подвергнуты дальнейшему упрощению.

Поскольку при низкой частоте волновая длина линий оказывается небольшой, участок l_1 заменяется сосредоточенной индуктивностью, которая объединяется с индуктивностью генераторов и трансформаторов. Емкостью участка l_1 , магнитным шунтом трансформатора и индуктивностью реактора Q_2 можно пренебречь, так как достаточно высокие сопротивления их шунтируются небольшими сопротивлениями генераторов, трансформаторов и линии. Таким образом, схема рис. 8,б приводит к схеме с сосредоточенными постоянными (рис. 1,а). В схеме рис. 8,а разомкнутый на конце участок l_2 можно заменить сосредоточенной емкостью, которая присоединяется параллельно L и C , т. е. добавляется к эквивалентной емкости C'' [см. формулу (1,2г) приложения].

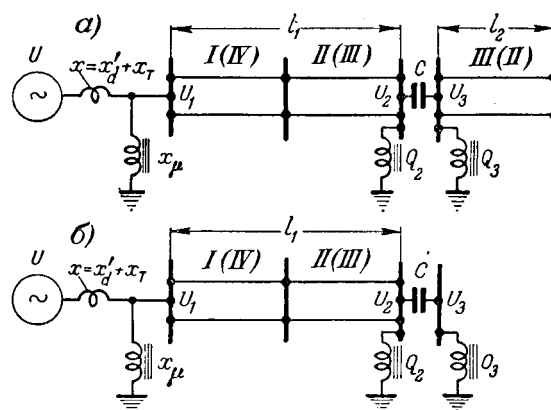


Рис. 8. Упрощенная схема замещения электропередачи.
а — после отключения короткого замыкания на участке IV (I);
б — после отключения короткого замыкания на участке III (II).

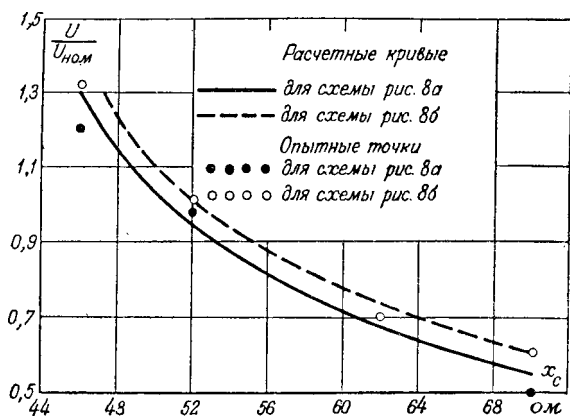


Рис. 9. Зависимость нижней границы исчезновения субгармоники от сопротивления x_C батареи продольной компенсации для схем рис. 8,а и 8,б.
 $x = 80 \text{ ом}$, $Q_1 = 150 \text{ мгва}$; U — э. д. с. источника в относительных единицах.

Схема замещения с сосредоточенными параметрами позволяет найти зависимость субгармоники поточесцепления или напряжения на реакторе от соответствующей составляющей основной частоты. Для определения напряжения основной частоты на реакторе в зависимости от э. д. с. источника используются схемы рис. 8 и формулы длинных линий. Ниже даются некоторые результаты опытов, подтверждающие правомерность предлагаемой методики расчета.

На рис. 9 приведены полученные путем расчета кривые зависимости э. д. с. источника, соответствующей нижней границе области существования субгармонических колебаний, от емкости продольной компенсации при мощности реактора 150 мва и характеристике реактора $t = 0,7\Phi + 0,3\Phi^3$. На расчетные кривые нанесены опытные точки.

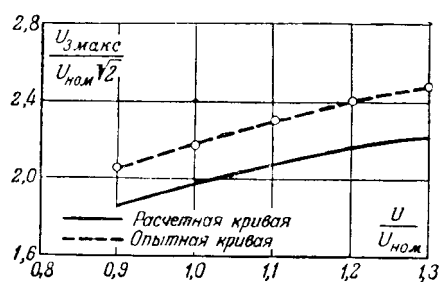
Верхняя граница существования субгармонических колебаний согласно расчету соответствует весьма большим значениям э. д. с., что также подтверждается опытом. При наличии реактора 300 мва границы существования субгармоники сужаются. Сопоставление расчетных и опытных данных для этого случая дается в виде таблицы.

| $x, \text{ ом}$ | $x_C, \text{ ом}$ | Граница существования субгармоники | |
|-----------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------|
| | | Расчет | Опыт |
| 38 | 69 | Субгармоника отсутствует | Субгармоника отсутствует |
| 38 | 52 | $(0,9 \dots 1,13) U_\phi$ | $(0,9 \dots 1,2) U_\phi$ |
| 57 | 52 | $(0,9 \dots 1,18) U_\phi$ | $(0,9 \dots 1,3) U_\phi$ |
| 57 | 46 | $(0,9 \dots 1,29) U_\phi$ | $(0,9 \dots 1,3) U_\phi$ |
| 76 | 57 | Субгармоника отсутствует | Субгармоника отсутствует |

На рис. 10 даны расчетные и опытные кривые зависимости амплитуды напряжения на реакторе Q_3 от э. д. с. источника.

Кривые рис. 9 и 10 и данные таблицы показывают удовлетворительное совпадение расчета и опыта. Небольшие расхождения объясняются наличием высших гармоник и трудностью точного определения активного сопротивления реактора.

Рис. 10. Зависимость амплитуды напряжения на реакторе от напряжения источника для схем рис. 8,б при $x = 80 \text{ ом}$, $x_C = 69 \text{ ом}$, $Q_2 = 300 \text{ мгва}$, $Q_3 = 150 \text{ мгва}$; $U_{\text{макс}}$ — амплитуда напряжения в относительных единицах.



Эксперименты на модели, помимо подтверждения расчетных формул, позволили выявить некоторые специфические особенности отдельных схем.

Схемы рис. 8,а и б сильно отличаются друг от друга начальными условиями. Схема рис. 8,а характеризуется значительно меньшими напряжениями на конденсаторах продольной компенсации при коротком замыкании в конце участка l_2 , чем схема рис. 8,б, где замыкание происходит непосредственно за конденсаторами. Поэтому в схеме рис. 8,а область возникновения субгармоник уже области существования вследствие недостаточного начального напряжения.

Различие между схемами рис. 8 проявляется также при учете влияния короны. В обеих схемах напряжение, превышающее коронное, появляется только за конденсаторами продольной компенсации, т. е. корона возникает лишь на участке l_2 в схеме рис. 8,а и вызывает небольшое снижение напряжения в установившемся режиме. В переходном режиме влияние короны оказывается более существенным; корона, ограничивая перенапряжения, сдвигает нижнюю границу возникновения субгармоник в сторону больших напряжений источника.

Полученные в опытах значения напряжения на реакторе при наличии субгармоник достигали кратности 2,5 по отношению к номинальному напряжению. Напряжения на конденсаторах продольной компенсации превосходили U_ϕ . Ток через реактор имел порядок 10-кратной величины по отношению к номинальному.

При меньшей нелинейности характеристики реактора возникновение субгармонических колебаний не исключается, но область существования их суживается вследствие повышения нижней границы, как это следует из рис. 4. Уменьшение нелинейности приводит к уменьшению кратности тока через реактор и к увеличению перенапряжений. Последнее обстоятельство может приводить к срабатыванию защиты конденсаторов продольной компенсации, вследствие чего сокращается число режимов, при которых возможно длительное существование субгармонических колебаний.

На основании предложенной методики Теплоэлектропроектом были проведены расчеты перенапряжений для случая, когда реакторы имели более линейные характеристики¹, чем это было принято в опытах на модели линии большой протяженности. Основные результаты рас-

¹ Такие реакторы были предложены Московским трансформаторным заводом в 1952—1953 гг.

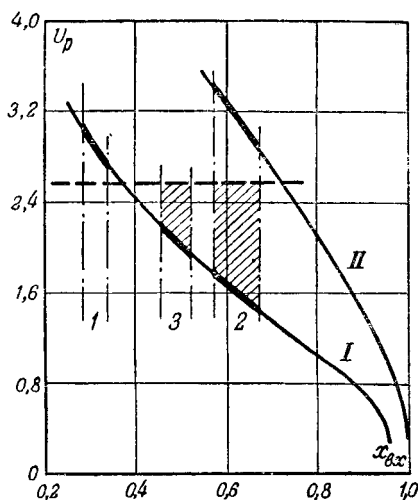


Рис. 11. Напряжения на реакторах с различными характеристиками.

$I - i = 0,833\Phi + 0,167\Phi^3$; $II - i = 0,96\Phi + 0,04\Phi^3$.
 $1 - x_C = 52 \text{ ом}$, $Q_3 = 150 \text{ мва}$; $2 - x_C = 52 \text{ ом}$, $Q_3 = 300 \text{ мва}$;
 $3 - x_C = 78 \text{ ом}$, $Q_3 = 150 \text{ мва}$.

Напряжение основной частоты на реакторе равно 1,0.

четов приведены на рис. 11, который Теплоэлектропроект любезно предоставил авторам. По оси абсцисс отложено сопротивление x_{ax} (в относительных единицах) линейной части схемы при частоте $\frac{\omega}{3}$. За базисную величину принято сопротивление реакторов в номинальной точке также при частоте $\frac{\omega}{3}$. По оси ординат отложено напряжение на реакторе. Вертикальными линиями отмечены границы практически возможных режимов, в которых соблюдаются условия существования субгармоник, а жирными — соответствующие напряжения на реакторе.

При реакторе с более линейной характеристикой в областях 2 и 3 должны срабатывать разрядники защиты продольной компенсации (пунктирная горизонтальная линия), которые будут шунтировать емкость конденсаторов и тем самым прекращать субгармонические колебания. Таким образом, длительная возможность существования субгармонических колебаний сохраняется только в областях 3 и 2 при реакторах с менее линейной характеристикой.

Выводы. 1. Возникновение субгармонических колебаний возможно при любой величине сопротивления в нулевом проводе. Увеличение этого сопротивления приводит к уменьшению субгармоники тока в нулевом проводе, смещению нейтрали и повышению напряжения в одной из фаз на 20 ... 30% по сравнению с напряжением в системе с глухозаземленной нейтралью. Субгармоники легко возникают и в системе с изолированной нейтралью. В системе с заземленной нейтралью субгармоники могут появляться и при однофазном разрыве.

Субгармоника устраняется путем шунтирования конденсаторов сопротивлением, равным кри-

тическому, которое может быть подсчитано по формулам, полученным для однофазной схемы.

2. Расчет субгармонических колебаний в линиях большой протяженности с продольной и поперечной компенсацией может быть произведен на основании результатов, полученных для схемы с сосредоточенными параметрами.

Приложение. Основные расчетные формулы. После подстановки уравнения (2) с учетом характеристики (1) в дифференциальное уравнение схемы и ряда преобразований получим следующие расчетные формулы:

$$\Phi_0^2 = k - \frac{3}{2} \Phi_1^2 - \xi + \sqrt{\left(k - \frac{3}{2} \Phi_1^2 - \xi\right)^2 - (k - 2\Phi_1^2)^2 + 2\xi(k - 2\Phi_1^2) - \xi\eta}, \quad (I,1)$$

где

$$\eta = \left(\frac{\omega}{3}\right)^2 \frac{1}{\frac{3}{4} \frac{b}{C''}}; \quad (I,2a)$$

$$k = \frac{\left(\frac{\omega}{3}\right)^2 - \frac{a}{C''}}{\frac{3}{4} \frac{b}{C''}} = \eta - \frac{4}{3} \frac{a}{b}; \quad (I,2b)$$

$$\xi = \eta \frac{\theta^2}{1 + \theta^2}; \quad \theta = \frac{rC''}{3}; \quad (I,2b)$$

$$C'' = \frac{C}{1 - \left(\frac{\omega}{3}\right)^2 LC}. \quad (I,2r)$$

Величина Φ_1 с достаточной степенью точности может быть определена без учета нелинейности и активного сопротивления:

$$\Phi_1 = \frac{U}{\omega^2 - \frac{a}{C'}}, \quad (I,3a)$$

где

$$C' = \frac{C}{1 - \omega^2 LC}. \quad (I,3b)$$

Из уравнения (I,1) следует, что Φ_0 имеет вещественное значение только при положительном подкоренном выражении.

Приравняв подкоренное выражение нулю, можно найти следующие характерные граничные величины:

1) критическое сопротивление

$$\xi_{кр} = \frac{\Phi_1^2 + \eta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\Phi_1^2 + \eta}{2}\right)^2 - \left(k - \frac{7}{4} \Phi_1^2\right) \Phi_1^2} \approx \frac{\Phi_1^2 \left(k - \frac{7}{4} \Phi_1^2\right)}{\Phi_1^2 + \eta}, \quad (I,4a)$$

$$r_{кр} = \frac{3}{C''} \sqrt{\frac{\xi_{кр}}{1 - \xi_{кр}}}. \quad (I,4b)$$

2) минимальное и максимальные значения амплитуды основной гармоники потокосцепления Φ_1 , а следовательно, и U , при которых субгармоника исчезает,

$$\Phi_{1\max}^2 = \frac{2}{7} (k - \xi) \left[1 + \sqrt{1 - \frac{7\xi(\eta - \xi)}{(k - \xi)^2}} \right], \quad (I,5a)$$

$$\Phi_{1\min}^2 = \frac{2}{7} (k - \xi) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{7\xi(\eta - \xi)}{(k - \xi)^2}} \right]. \quad (I,5b)$$

Защита гидрогенераторов, работающих в блоке, от замыканий на землю

Кандидат техн. наук, доц. В. М. МАРАНЧАК

Московский энергетический институт им. Молотова

Для защиты гидрогенераторов, работающих в блоке с трансформаторами, от замыканий на землю за последнее время получила широкое применение защита максимального напряжения нулевой последовательности с электромагнитным реле типа ЭН-Д. Однако в тех случаях, когда к обмотке трансформатора присоединено больше одного генератора (рис. 1), эта защита действует неселективно, так как фильтры напряжения нулевой последовательности, питающие реле защиты, отмечают возникновение напряжения нулевой последовательности при замыкании на землю в любой точке сети генераторного напряжения. Для определения места повреждения приходится поочередно отключать генераторы, что усложняет эксплуатацию.

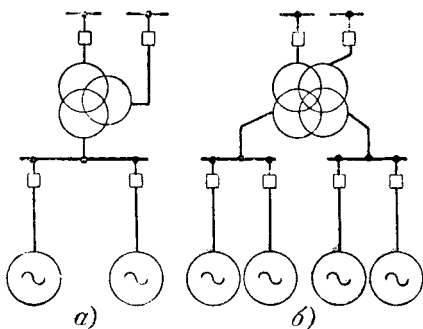


Рис. 1.

Если в блоке с трансформатором работают гидрогенераторы средней и большой мощности, то для уменьшения тока в месте замыкания на землю устанавливаются компенсирующие катушки. Наличие глубокой компенсации емкостного тока затрудняет использование и других известных принципов выполнения защиты.

Исследование неустановившихся процессов, вызванных однофазным замыканием на землю в системе генераторного напряжения, позволило разработать защиту от замыканий на землю, действующую селективно и в том случае, когда к обмотке трансформатора присоединено более

одного гидрогенератора и когда сеть генераторного напряжения компенсирована.

Защита реагирует на первую полуволну тока и напряжения нулевой последовательности неустановившегося процесса.

Принцип действия защиты. Замыкание одной фазы на землю возникает в тот момент, когда напряжение фазы относительно земли достигает значений, близких к максимуму. При металлическом замыкании напряжение поврежденной фазы относительно земли падает до нуля; напряжение неповрежденных фаз увеличивается, приближаясь к установившемуся режиму к междофазному напряжению.

Переход от начального состояния к новому, установившемуся происходит колебательно с частотой, определяемой индуктивностью обмоток генераторов, обмотки генераторного напряжения трансформатора и емкостью фаз системы генераторного напряжения относительно земли. При этом в первый момент замыкания фазы на землю происходит разряд емкости поврежденной фазы на землю и заряд емкостей неповрежденных фаз. В месте замыкания разрядный и зарядные токи имеют одинаковое направление. Таким образом, возникновение тока замыкания на землю обусловливается наличием емкостей фаз системы генераторного напряжения относительно земли.

Напряжение фазы относительно земли в момент, предшествующий замыканию, может быть как положительным, так и отрицательным. В зависимости от этого направление первой полуволны тока замыкания на землю в начальный момент времени будет различным. Изменение направления тока, притекающего к месту повреждения, в сочетании с полярностью напряжения нулевой последовательности и было использовано, как будет показано ниже, для выполнения селективной защиты от замыканий на землю.

Для расчета токов неустановившегося процесса, обусловленных емкостью фаз обмоток статора генератора относительно земли, с некоторым приближением можно использовать одну из возможных схем замещения системы генераторного

Кроме того, по уравнению (1,1) легко найти предельные значения субгармоники потокоцепления: при $r = 0$

$$\Phi_0 = \sqrt{k - \frac{3}{2} \Phi_1^2} + \sqrt{\Phi_1^2 \left(k - \frac{7}{4} \Phi_1^2 \right)} = \frac{\Phi_1}{2} + \sqrt{k - \frac{7}{4} \Phi_1^2}; \quad (1,6)$$

при $r = r_{кр}$

$$\Phi_0 = \sqrt{k - \frac{3}{2} \Phi_1^2 - \xi_{кр}}. \quad (1,7)$$

Литература

1. А. В. Миролюбов и С. С. Рокотян. Линия электропередачи 400 кВ Куйбышев — Москва. Электричество, № 7, 1952.
2. М. С. Либкинд. Субгармонические колебания в простой последовательной цепи. Известия Академии наук СССР, ОТН, № 9, 1953.
3. О. С. Шур. Деление частоты в простейшей цепи со сталью. Электричество, № 11, 1954.
4. Chihiro Hayaschi. Subharmonics Oscillations in Nonlinear Systems. Journ. of Appl. Physics, т. 24, № 5, 1953.

[17.1. 1955]



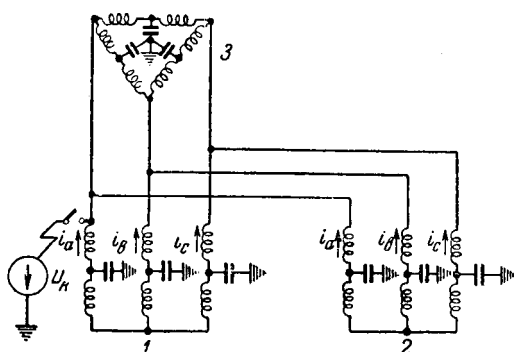


Рис. 2. Схема замещения системы генераторного напряжения для расчета переходного процесса.

1 и 2 — генераторы; 3 — трансформатор.

напряжения (рис. 2). Схема составлена для случая, когда емкости соединительных проводов незначительны и в расчете не учитываются. Обмотки генераторов и трансформаторов замещены по Т-образной схеме. Результаты расчетов по этой схеме сопоставимы с результатами расчетов для схемы с распределенными постоянными.

Влияние обмоток высшего напряжения трансформатора можно приближенно учесть в параметрах обмотки генераторного напряжения. При этом обмотки высшего напряжения, присоединенные к линиям, можно считать замкнутыми на волновое сопротивление линий, так как последнее мало по сравнению с волновым сопротивлением трансформатора.

В мощных трансформаторах обмотки генераторного напряжения размещаются на отдельных стержнях. Так как изменение тока переходного процесса происходит с большой частотой, можно полагать, что взаимное влияние обмоток генераторного напряжения трансформатора в случае схемы рис. 1, б будет незначительным и его можно не учитывать.

Основная частота свободной составляющей тока замыкания на землю в неустановившемся процессе составляет несколько килогерц. Из этого следует, что компенсирующая катушка для свободной составляющей тока замыкания на землю представляет большое сопротивление и может быть из схемы замещения исключена. Величины индуктивностей обмоток генераторов и трансформатора при таких частотах будут отличаться от их величин при промышленной частоте. Уменьшение емкости обмоток статора генератора относительно земли при таких частотах будет незначительным.

Для анализа действия защиты, как будет показано ниже, наибольший интерес представляет первая полуволна колебаний свободной составляющей тока замыкания на землю, поэтому затуха-

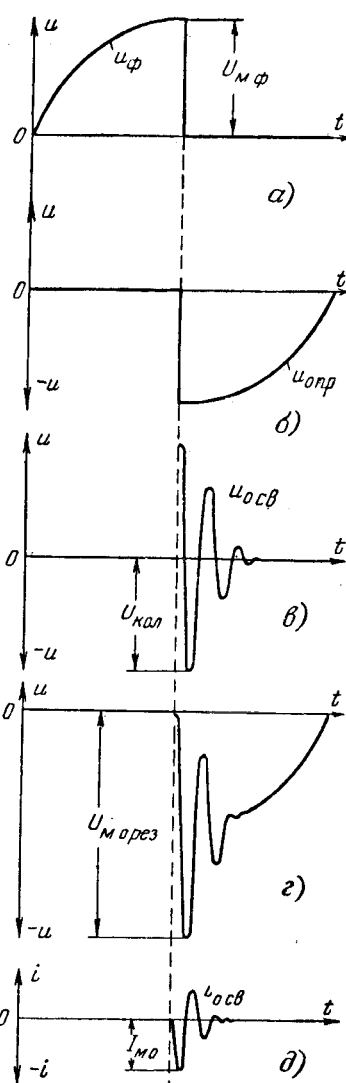


Рис. 3. Кривые тока переходного процесса и напряжения нейтрали генератора.

а — напряжение фазы относительно земли до и после ее замыкания на землю; б — принужденная составляющая напряжения нейтрали генератора относительно земли; в — свободная составляющая напряжения нейтрали генератора относительно земли; г — результирующее напряжение нейтрали генератора относительно земли при замыкании на землю; д — свободная составляющая тока переходного процесса, вызванного замыканием на землю.

хание тока можно не учитывать и активным сопротивлением пренебречь.

Расчеты неустановившихся процессов, проведенные Г. В. Зевеке для схемы, представленной на рис. 1, а, показали, что максимальное значение первой полуволны тока нулевой последовательности, притекающего к месту повреждения со стороны поврежденного генератора, во много раз превышает его установившееся значение и для генератора мощностью 100 мвт и напряжением 13,8 кв достигает 1200 а. Основная частота колебаний тока нулевой последовательности имеет порядок 5000 гц. Наибольшего значения напряжения нейтрали генератора относительно земли достигает при металлическом замыкании на выводах генератора. Без учета затухания оно равно 22,5 кв.

На рис. 3 показано изменение во времени тока и напряжения нулевой последовательности для случая, когда в момент, предшествующий замыканию на землю, фаза, получившая повреждение, имела положительный потенциал по отношению к земле. Для большей наглядности масштаб кривых свободных составляющих, имеющих более высокую частоту колебаний, не выдержан.

Как известно, в неустановившемся режиме амплитуда свободной составляющей напряжения нейтрали генератора относительно земли определяется разностью конечного и начального значений напряжения нейтрали генератора относительно земли. Независимо от того, изолирована нейтраль системы генераторного напря-

жения или заземлена через компенсирующую катушку, напряжение смещения нейтрали генератора в установившемся режиме при металлическом замыкании на выводах генератора

$$U_{см} = -U_{ф},$$

где $U_{ф}$ — отрицательное напряжение замкнувшейся фазы. При отсутствии же замыкания напряжение смещения равно нулю, поэтому без учета затухания амплитуда колебания свободной составляющей напряжения нейтрали

$$U_{кол} = U_{м осв} = U_{м кон} - U_{м нач} = -U_{м ф}.$$

Из этого следует, что знак свободной со-

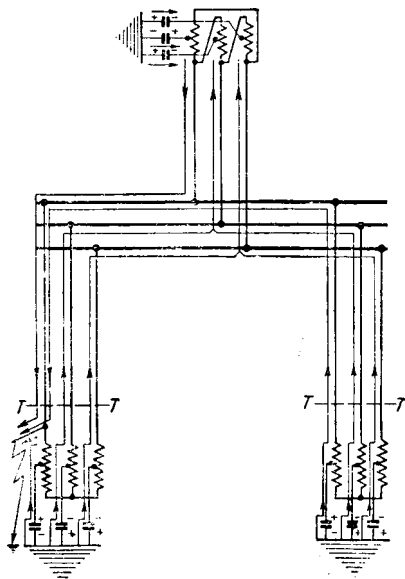


Рис. 4. Распределение свободной составляющей тока нулевой последовательности в начальный момент при положительном напряжении фазы в момент, предшествующий замыканию на землю.

составляющей напряжения нейтрали для начального момента времени после замыкания на землю будет совпадать со знаком напряжения фазы относительно земли в момент, предшествующий замыканию на землю (рис. 3, в). Без учета затухания максимальное значение результирующего напряжения нейтрали генератора относительно земли (рис. 3, г)

$$U_{м0 рез} = U_{м кон} + U_{кол} = -2U_{мф},$$

где $U_{кол}$ — вторая полуволна колебания;

$U_{мф}$ — максимальное значение фазного напряжения.

Свободная составляющая напряжения нулевой последовательности является напряжением на емкости, поэтому в начальный момент времени после замыкания на землю свободная составляющая тока нулевой последовательности будет опережать напряжение на 90° .

Из кривых рис. 3 видно, что при замыкании на выводах обмоток первая полуволна свободной составляющей тока замыкания на землю, протекающего в обмотках генераторов, совпадает по направлению с результирующим напряжением нейтрали генератора относительно земли.

При отрицательном напряжении фазы в момент, предшествующий замыканию, полярности токов, протекающих в обмотке генератора, и напряжения нейтрали будут также одинаковыми, но их знаки изменятся на обратные.

Если замыкание на землю произошло в момент, когда напряжение фазы проходило через максимум, то результирующее напряжение нейтрали генератора относительно земли в течение $1/4$ периода после повреждения не меняет своего знака (рис. 3, г).

Как видно из рис. 4, в начальный момент времени свободная составляющая тока замыкания на

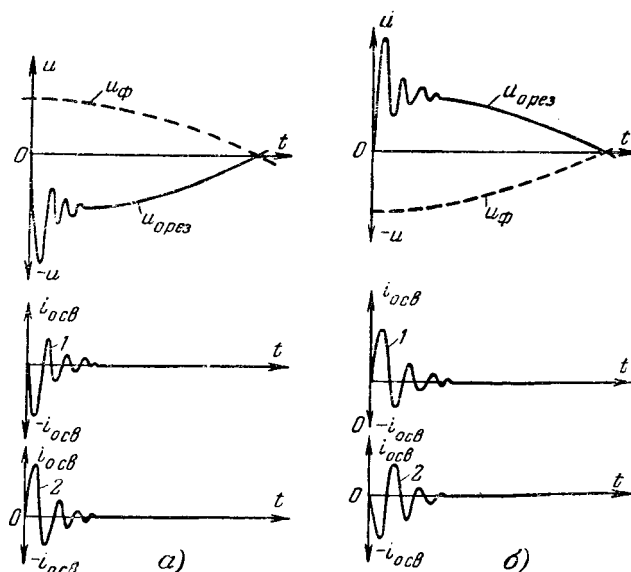


Рис. 5. Кривые свободной составляющей тока нулевой последовательности, отнесенного к первичной обмотке трансформатора тока, и напряжения нейтрали генератора относительно земли при положительном (а) и отрицательном (б) напряжении фазы в момент, предшествующий замыканию на землю.

1 — вне зоны защиты; 2 — в зоне защиты.

землю (геометрическая сумма токов трех фаз) в первичных обмотках трансформатора тока нулевой последовательности, установленных в сечениях $T—T$, в неповрежденном генераторе направлена от выводов к шинам, а в поврежденном — от шин к выводам. Знак первой полуволны результирующего напряжения нулевой последовательности одинаков для любой точки сети генераторного напряжения, в данном случае он будет отрицательным. Следовательно, у неповрежденного генератора знаки токов в сечениях $T—T$ будут одинаковыми со знаками напряжения нейтрали относительно земли, а у поврежденного — различными. При отрицательном напряжении фазы в момент, предшествующий замыканию, направление токов меняется на обратное. Эти особенности сочетания знаков и были приняты за основу при выполнении защиты.

На рис. 5 показаны кривые первой полуволны свободной составляющей тока, протекающего в сечении $T—T$, и напряжения нулевой последовательности при замыкании в зоне действия защиты, т. е. в обмотке статора и вне зоны. Кривые даны для положительного и отрицательного напряжения фазы в момент, предшествующий замыканию на землю.

Защита выполнена таким образом, что она срабатывает при сочетании на ее элементах тока и напряжения нулевой последовательности с различными знаками. При внешнем замыкании на землю ток и напряжение нулевой последовательности на элементах защиты имеют одинаковые знаки, поэтому защита не срабатывает.

Схема защиты. При наличии двух и более генераторов, имеющих электрическую связь на генераторном напряжении, направление первой

наличии в системе генераторного напряжения компенсирующих катушек напряжение смещения нейтрали не может мгновенно снизиться до нуля. К нулевому значению оно придет после ряда обусловленных индуктивностью и емкостью рассматриваемого контура колебаний с частотой, близкой к промышленной. Это сделало возможным применение в качестве органа напряжения поляризованного реле.

Поляризованное реле имеет удерживающие обмотки (рис. 7), цепь питания которых замыкается при замыкании контактов реле. Намагничивающая сила удерживающей обмотки в несколько раз больше н. с. управляющей обмотки, что исключает возможность замыкания контактов реле в противоположную сторону под действием второй полуволны напряжения.

Время работы поляризованного реле, в течение которого происходит надежное замыкание контактов, составляет $(2 \dots 3) \cdot 10^{-3}$ сек.

Применение поляризованного реле упрощает схему защиты, но несколько снижает ее чувствительность.

Кроме тиратронных органов, в схему защиты входят реле максимального напряжения нулевой последовательности и реле времени.

Сопротивления 4, 5, 4' и 5' (рис. 6) служат для получения начального запирающего напряжения смещения и блокирующего напряжения, запирающего второй тиратрон после зажигания первого. Малогабаритные реле телефонного типа b_1 или b_2 после зажигания одного из тиратронов токового органа подают плюс через контакты аналогичного реле b'_2 или b'_1 органа напряжения на выходное промежуточное реле 11. Вторые контакты этих реле шунтируют тиратроны после их зажигания, а третьи — подают плюс на реле времени 9. Последнее снимает общий минус со схемы защиты и служит для возврата схемы в исходное положение.

Реле напряжения 10 выводит тиратронные элементы из работы на все время, в течение которого генератор работает при наличии замыкания на землю. Таким образом, при длительном замыкании на землю тиратронное устройство не обтекается током.

Кнопка 12 служит для контроля исправности тиратронов. Кнопка 13 позволяет деблокировать выходное реле 11 в том случае, если оно сработало под влиянием кратковременного переходящего замыкания на землю. Сопротивление 15 подбирается таким образом, чтобы реле 11 удерживалось в состоянии срабатывания от плюса, поданного через контакты реле 10, поэтому при устойчивом замыкании на землю деблокировать реле 11 от руки невозможно. Сопротивления 8 и 8' служат для ограничения сеточного тока.

В качестве реле 10 может быть взято простейшее, термически неустойчивое электромагнитное реле с отпадающим клапаном. Для уменьшения напряжения срабатывания обмотку реле целесообразно питать через фильтр тройной частоты.

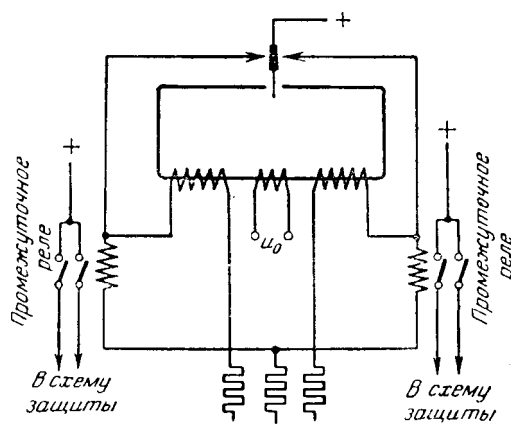


Рис. 7. Схема элемента напряжения с поляризованным реле.

Работа схемы. Возможны следующие случаи замыкания на землю.

Кратковременное замыкание в зоне действия защиты. Учитывая особенности выполнения изоляции обмоток синхронных генераторов, можно предположить, что замыкания на землю в обмотке генератора в отличие от замыканий на землю в кабельной сети будут носить устойчивый характер. Однако для регистрации замыканий на землю, переходящих в другие виды повреждений, предусмотрено действие защиты при возникновении быстропереключающихся замыканий на землю. Учтена также возможность применения защиты для кабельных сетей, в которых могут иметь место кратковременные замыкания на землю.

При кратковременном замыкании на землю после зажигания тиратронов 1 и 2' или 2 и 1' срабатывают реле b_1 и b'_2 или b_2 и b'_1 и замыкают цепь питания обмотки выходного реле 11, которое самоудерживается и подает питание на устройство звукового сигнала. Появление звукового сигнала говорит о наличии замыкания в обмотке статора данного генератора.

При замыкании контактов реле b_1 и b'_2 или b_2 и b'_1 реле времени 9 срабатывает, разрывает минусовую цепь схемы и возвращает ее в исходное положение. Реле времени 9 также могло бы возвратиться в исходное положение, так как прекращается питание его обмотки через контакты реле b_1 и b'_2 или b_2 и b'_1 . Однако реле 10 успевает сработать, поэтому реле 9 остается в положении срабатывания. Звуковой сигнал может быть снят путем деблокирования от руки реле 10 и 11 нажатием деблокировочной кнопки реле 10 и кнопки 13. При этом схема возвращается в исходное положение.

Устойчивое замыкание в зоне действия защиты. При устойчивом замыкании в зоне действия защиты зажигаются тиратроны 1 и 2' или 2 и 1', срабатывают реле b_1 и b'_2 или b_2 и b'_1 , затем реле 9 и 11. Появление звукового сигнала говорит о наличии повреждения в обмотке статора данного генератора. Реле

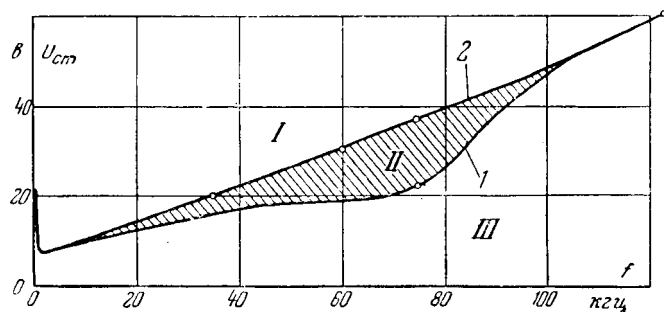


Рис. 8. Зависимость амплитуды напряжения первичной обмотки сеточного трансформатора от частоты при срабатывании тиратронов органа тока.

1 — для тиратрона 1; 2 — для тиратрона 2; I — зона работы; II — зона неправильного действия; III — зона нечувствительности.

времени 9, размыкая нормально замкнутый контакт и оставаясь в притянутом положении независимо от работы реле 6_1 и $6'_2$ или 6_2 и $6'_1$, так как питание его обмотки осуществляется через замкнутый контакт реле 10, разрывает минусовую цепь схемы, возвращает элементы схемы в исходное положение и замыкает цепь светового сигнала.

В отличие от предыдущего случая при устойчивом замыкании невозможно деблокировать выходное реле 11 от руки, так как оно удерживается через сопротивление 15 от контактного реле 10. Невозможность деблокировать реле 11 и наличие светового сигнала свидетельствуют об устойчивом замыкании на землю в обмотке статора генератора.

Реле 11 и 9 могут длительно находиться под напряжением, так как реле 11 имеет термически устойчивую обмотку, а реле 9, размыкая контакт 1, включает последовательно со своей обмоткой добавочное сопротивление 14.

Кратковременное замыкание вне зоны действия защиты. При кратковременном замыкании вне зоны действия защиты, например при положительной полуволне фазного напряжения, зажигаются тиратроны 1 и 1'. При этом срабатывают реле 6_1 и $6'_1$, а реле 11 не срабатывает, так как цепь питания его обмотки остается разомкнутой. Реле 9 возвращает схему в исходное положение. После деблокирования реле 10 путем нажатия его деблокировочной кнопки реле 9 также возвращается в исходное положение. Если замыкание на землю к этому времени прекратилось, то повторная работа схемы исключается.

Устойчивое замыкание вне зоны действия защиты. При устойчивом замыкании вне зоны действия защиты, например при положительной полуволне фазного напряжения, зажигаются тиратроны 1 и 1' и срабатывают реле 6_1 и $6'_1$. Реле 11 не срабатывает, поэтому звуковой сигнал отсутствует. Реле времени 9, разрывая минусовую цепь и оставаясь в притянутом положении, возвращает схему в исходное положение и через свой замкнутый контакт осуществляет подачу светового сигнала.

Таким образом, защита различает переходящие и устойчивые замыкания в обмотке статора

генератора, а также переходящие и устойчивые замыкания вне зоны действия защиты, т. е. в соединительных проводах и в обмотке генераторного напряжения трансформатора.

Все устройства защиты, за исключением реле 10, помещены в одном кожухе.

Зависимости напряжений срабатывания тиратронных элементов тока и напряжения от частоты изменения тока и напряжения нулевой последовательности, приведенные на рис. 8 и 9, показывают, что при больших частотах напряжения срабатывания первого и второго тиратронов органа тока и органа напряжения несколько отличаются по величине. Это объясняется расхождением частотных характеристик плеч сеточного трансформатора. Однако рабочие частоты изменения тока и напряжения нулевой последовательности, как показали расчеты неустановившихся процессов при параллельной работе двух или трех генераторов на одну обмотку трансформатора, не превышают 5 кГц. Для таких частот напряжения срабатывания тиратронов одинаковы.

При необходимости осуществить работу защиты на больших частотах нужно иметь в виду, что она может неправильно выбирать направление и работать неселективно, если величина напряжения, подаваемого на сетки тиратронов при замыкании на землю, будет приближаться к напряжению срабатывания тиратронов. Зоны неправильного выбора направления защитой показаны на рис. 8 и 9 (заштрихованные области).

Возможность неправильной работы защиты объясняется тем, что тиратрон, имеющий более высокое напряжение срабатывания, не зажжется от первой полуволны тока нулевой последовательности вследствие недостаточной величины положительного сигнала. Тогда может произойти зажигание тиратрона, имеющего меньшее напряжение срабатывания, от второй полуволны тока нулевой последовательности, так как блокирующее действие схемы будет отсутствовать. В результате выбор направления будет произведен неправильно. Если напряжение сигнала превышает наибольшее напряжение срабаты-

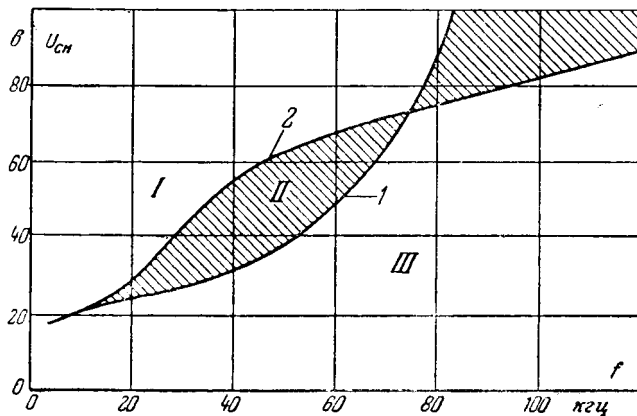


Рис. 9. Зависимость амплитуды напряжения первичной обмотки сеточного трансформатора от частоты при срабатывании тиратронов органа напряжения.

1 — для тиратрона 1; 2 — для тиратрона 2; I — зона работы; II — зона неправильного действия; III — зона нечувствительности.

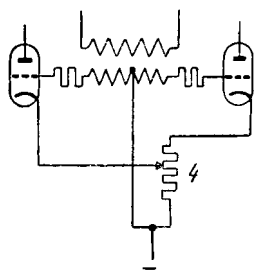


Рис. 10. Принципиальная схема включения тиратронов при работе защиты в области больших частот.

ния тиратрона, то при данной частоте неправильное действие тиратронных элементов исключено.

Указанный недостаток легко устраняется применением сеточных трансформаторов с одинаковыми частотными характеристиками плеч или регулируемого сопротивления 4. Последнее позволяет выравнять напряжение срабатывания тиратронов путем установки на сетках

тиратронов соответствующего начального смещения.

При соответствующих параметрах сеточного трансформатора характеристика срабатывания тиратронов токового органа (рис. 8) обеспечивает резкое увеличение напряжения срабатывания при малых частотах колебаний тока во вторичной обмотке трансформатора тока нулевой последовательности. Благодаря этому токовый орган защиты имеет автоматическую отстройку от токов нулевой последовательности тройной частоты, обусловленных несимметрией фазных э. д. с. генератора и токов небаланса.

Зависимость первичного напряжения срабатывания (напряжения на первичной обмотке сеточного трансформатора, при котором происходит зажигание тиратронов органа напряжения) от частоты колебаний напряжения нулевой последовательности показывает, что напряжение срабатывания увеличивается с увеличением частоты (рис. 9). В пределах рабочих частот это увеличение незначительно, не замечается и различия в величинах напряжения срабатывания совместно работающих тиратронов.

Зависимость напряжения срабатывания поляризованного реле от частоты, представленная на рис. 11, показывает, что при частоте 150 гц напряжение увеличивается примерно в 2 раза по сравнению с напряжением при частоте 50 гц. Вследствие того, что основной частотой для реле напряжения является частота, близкая к про-

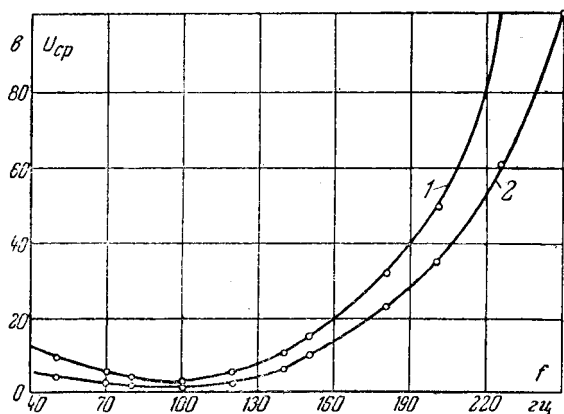


Рис. 11. Зависимость напряжения срабатывания поляризованного реле от частоты при разных добавочных сопротивлениях в цепи сигнальной обмотки.

1 — $r = 100$ Ом; 2 — $r = 200$ Ом.

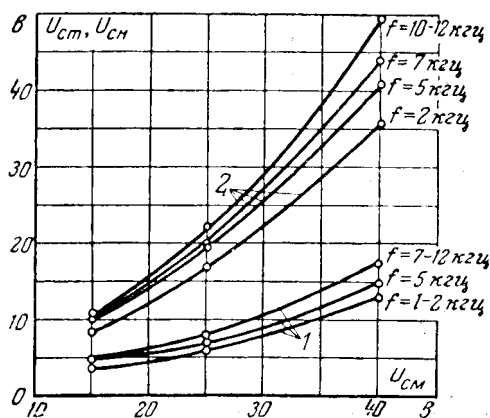


Рис. 12. Зависимость напряжения срабатывания от напряжения смещения для тиратронных органов тока и напряжения. 1 — для органа тока; 2 — для органа напряжения.

мышленной, отстройка реле от составляющих напряжения нулевой последовательности тройной частоты облегчается.

На рис. 12 приведены зависимости напряжения срабатывания тиратронных элементов тока и напряжения от напряжения начального смещения для различных частот колебания тока и напряжения нулевой последовательности. Эти зависимости определяют пределы изменения напряжения срабатывания при выборе уставок защиты.

Как указывалось выше, в качестве фильтров токов нулевой последовательности используются стандартные трансформаторы тока нулевой последовательности кабельного или шинного типа, применяемые для защиты от замыканий на землю генераторов, работающих на шины генераторного напряжения. Эти трансформаторы в рассматриваемом случае без заметных искажений должны пропускать токи нулевой последовательности, основная частота колебаний которых в неустановившемся процессе составляет примерно

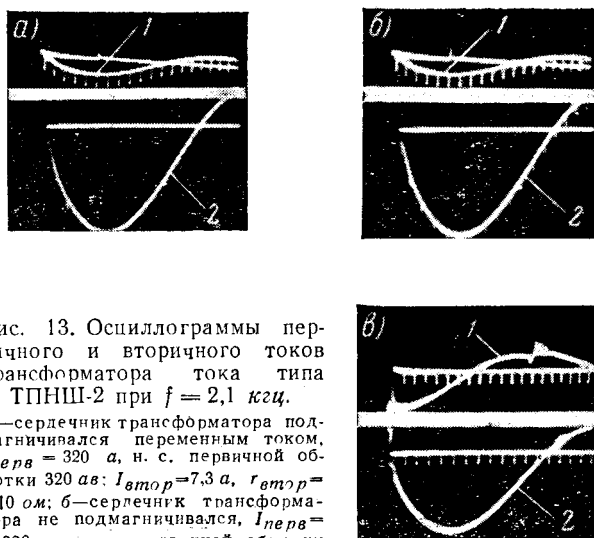


Рис. 13. Оциллограммы первичного и вторичного токов трансформатора тока типа ТПНШ-2 при $f = 2,1$ кгц.

а — сердечник трансформатора подмагничивался переменным током, $I_{перв} = 320$ а, н. с. первичной обмотки 320 ав; $I_{втор} = 7,3$ а, $r_{втор} = 10$ Ом; б — сердечник трансформатора не подмагничивался, $I_{перв} = 320$ а, н. с. первичной обмотки 320 ав, $I_{втор} = 7,3$ а, $r_{втор} = 10$ Ом; в — сердечник трансформатора не подмагничивался, $I_{перв} = 320$ а, н. с. первичной обмотки 1650 ав, $I_{втор} = 8$ а, $r_{втор} = 40$ Ом. 1 — вторичный ток; 2 — первичный ток.



Рис. 14 Осциллограммы первичного и вторичного токов трансформатора тока типа ТПНШ-2 при $f = 13,5$ кГц.

а — сердечник трансформатора подмагничивался переменным током, $I_{перв} = 140$ а, н. с. первичной обмотки 280 ав, $I_{втор} = 8$ а, $r_{втор} = 10$ ом; б — сердечник трансформатора не подмагничивался, $I_{перв} = 140$ а, н. с. первичной обмотки 280 ав, $I_{втор} = 8$ а, $r_{втор} = 10$ ом; в — сердечник трансформатора не подмагничивался, $I_{перв} = 130$ а, н. с. первичной обмотки — 260 ав, $I_{втор} = 7$ а, $r_{втор} = 40$ ом. 1 — вторичный ток; 2 — первичный ток.



Рис. 15. Осциллограммы первичного и вторичного токов трансформатора тока типа ТПНШ-2 при $f = 28$ кГц.

а — сердечник трансформатора подмагничивался переменным током, $I_{перв} = 80$ а, н. с. первичной обмотки 80 ав, $I_{втор} = 2,4$ а, $r_{втор} = 80$ ом; б — сердечник трансформатора не подмагничивался, $I_{перв} = 80$ а, н. с. первичной обмотки 80 ав, $I_{втор} = 2,4$ а, $r_{втор} = 80$ ом; в — сердечник трансформатора тока не подмагничивался, $I_{перв} = 80$ а, н. с. первичной обмотки 160 ав, $I_{втор} = 4,9$ а, $r_{втор} = 10$ ом.

1 — вторичный ток; 2 — первичный ток.

5 кГц. Составляющие более высоких частот могут не учитываться, так как их амплитуды незначительны.

В процессе разработки защиты были исследованы форма и величина высокочастотных колебаний токов нулевой последовательности во вторичной обмотке трансформатора тока шинного типа. Испытания проводились при включении во вторичную обмотку активных и индуктивных сопротивлений различной величины.

Испытания показали (рис. 13, 14 и 15), что ток во вторичной цепи при частотах до 28 кГц и токах в первичной цепи до 320 а не имеет каких-либо заметных искажений. Изменение нагрузки вторичной цепи в пределах от 10 до 40 ом и включение сеточных трансформаторов также не оказывают влияния на величину и форму кривой вторичного тока.

При увеличении н. с. первичной обмотки до 1600 ав при $f = 2,1$ кГц и $r_{втор} = 40$ ом (рис. 13) в момент, близкий к максимуму, имело место искажение формы кривой вторичного тока. При этом полярность вторичного тока не измени-

лась, и коэффициент трансформации примерно сохранил свою величину. Таким образом, это искажение не может оказать влияние на правильное действие защиты.

Осциллограмма в на рис. 15 показывает, что при значительных частотах с увеличением первичного тока уменьшается коэффициент трансформации, а сигнал во вторичной цепи увеличивается. Таким образом, стандартные трансформаторы тока нулевой последовательности могут быть использованы для рассматриваемой защиты.

Подмагничивание сердечника трансформатора тока переменным током при неустановившемся процессе не оказывает никакого влияния на чувствительность защиты и может быть исключено. В связи с этим упрощается конструкция трансформатора тока и увеличивается надежность работы защиты.

Анализ работы защиты и выбор ее уставок. Для определения уставок элементов защиты необходимо рассмотреть ее поведение при нормальном режиме работы системы генераторного напряжения и при различных повреждениях в этой системе.

Во время работы генератора между распределенными емкостями обмотки его статора относительно земли будут протекать токи нулевой последовательности тройной частоты. При заземленной нейтрали обмотки через компенсирующую катушку эти токи будут протекать в контуре, образованном емкостями системы генераторного напряжения относительно земли и местом заземления, и могут вызвать срабатывание элемента тока защиты, если он не будет от них отстроен. Орган напряжения защиты также должен быть отстроен от напряжения смещения тройной частоты, приложенного между нейтралью генератора и землей. Возникновение этих токов и напряжений вызвано наличием в кривой фазных э. д. с. генератора напряжений нулевой последовательности тройной частоты, обусловленных искажением магнитного потока в воздушном зазоре машины. Кроме составляющих нулевой последовательности тройной частоты, кривые фазных э. д. с. могут содержать гармоники, порядка более трех, но они могут не учитываться, так как их амплитуды незначительны.

Надежность отстройки элемента тока от токов нулевой последовательности тройной частоты нормального режима определяется величиной коэффициента запаса $K_{zm(3)}$. При работе на одну обмотку трансформатора двух гидрогенераторов мощностью по 100 мвт и напряжением 13,8 кВ

$$K_{zm(3)} = \frac{u_{cm}}{U_{mcm(3)}} \approx 21,$$

где u_{cm} — напряжение срабатывания токового органа защиты при частоте 150 гц, отнесенное к первичной обмотке сеточного трансформатора (рис. 16); $U_{mcm(3)}$ — максимальное напряжение тройной частоты, приложенное к первичной обмотке сеточного трансформатора в нормальном режиме.

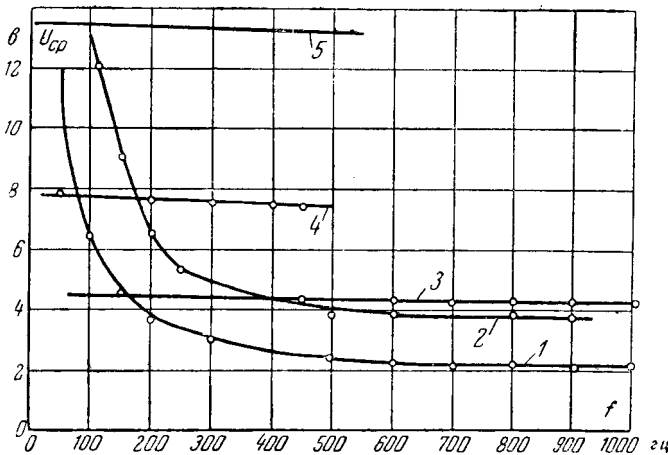


Рис. 16. Характеристика срабатывания органов тока и напряжения при плавном изменении напряжения на сеточных трансформаторах. Частота f в гц.

1 — для органа тока, $U_{сн} = 17$ в; 2 — для органа тока, $U_{сн} = 25$ в; 3 — для органа напряжения, $U_{сн} = 17$ в; 4 — для органа напряжения, $U_{сн} = 25$ в; 5 — для органа напряжения, $U_{сн} = 40$ в.

Хотя токи и напряжения нулевой последовательности тройной частоты в неустойчивых режимах междуфазных коротких замыканий могут значительно возрасти, отстраивать от них защиту не нужно, так как $K_{зт(3)}$ имеет достаточную величину.

При междуфазных коротких замыканиях на землю появляется напряжение нулевой последовательности. В то же время во вторичной обмотке трансформатора тока нулевой последовательности будет протекать ток небаланса. Знак тока небаланса может не совпадать со знаком напряжения нулевой последовательности, и защита может сработать. Надежность отстройки элемента тока от тока небаланса установившегося режима короткого замыкания определяется коэффициентом запаса:

$$K_{зт(нб)} = \frac{U_{сн}}{U_{мсет(нб)}} = 6,25,$$

где $U_{мсет(нб)}$ — максимальное напряжение небаланса, приложенное к первичной обмотке сеточного трансформатора в установившемся режиме междуфазных коротких замыканий.

Коэффициент запаса $K_{зт(нб)}$ имеет значительную величину, и можно полагать, что при протекании токов небаланса неустойчивого процесса условия отстройки будут соблюдены. В противном случае следует увеличить уставку защиты по току срабатывания.

Для предотвращения срабатывания органа напряжения от напряжения нулевой последовательности тройной частоты нормального режима, а следовательно, неправильной работы защиты необходимо, чтобы напряжение срабатывания $U_{сн}$ было больше напряжения нулевой последовательности тройной частоты $U_{мсмещ(3)}$. Выбор уставки защиты по напряжению определяется характеристикой срабатывания тиратрон-

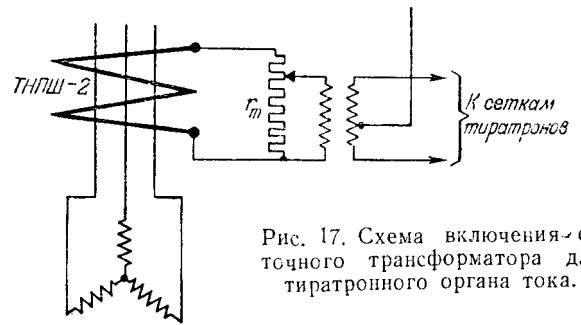


Рис. 17. Схема включения сеточного трансформатора для тиратронного органа тока.

ного элемента напряжения (рис. 16) и зависит от величины начального напряжения смещения.

Коэффициент чувствительности защиты по току определяется отношением первичного тока замыкания на землю $I_{м0}$ к первичному току срабатывания защиты $I_{сн}$ при соответствующей частоте:

$$K_u^{(m)} = \frac{I_{м0}}{I_{сн}} = \frac{I_{м0}}{i_{сн} n_n} = \frac{I_{м0} r_m}{U_{сн} n_n},$$

где r_m — активное сопротивление, шунтирующее вторичную обмотку трансформатора тока (рис. 17);

n_n — коэффициент трансформации трансформатора тока;

$i_{сн}$ — вторичный ток срабатывания защиты.

Число незащищенных витков обмотки статора генератора:

$$\alpha_x^{(m)} = \frac{1}{K_u^{(m)}} 100 \%,$$

Коэффициент чувствительности защиты по напряжению определяется отношением максимального напряжения нулевой последовательности при замыкании на землю на выводах генератора к максимальному напряжению срабатывания тиратронного органа напряжения:

$$K_u^{(н)} = \frac{U_{м0рез}}{U_{сн} n_n} = \frac{2U_{мф}}{U_{сн} n_n},$$

где $U_{м0рез}$ — результирующее напряжение нейтрали генератора относительно земли при замыкании на землю на выводах обмотки статора генератора;

n_n — коэффициент трансформации между первичной и сигнальной обмотками компенсирующей катушки.

Число незащищенных витков обмотки статора генератора:

$$\alpha_x^{(н)} = \frac{1}{K_u^{(н)}} 100 \%.$$

Если $K_u^{(m)} = 60$, а $K_u^{(н)} = 38$, то $\alpha_x^{(m)} = 1,6 \%$, $\alpha_x^{(н)} = 2,7 \%$. Так как $\alpha_x^{(н)} > \alpha_x^{(m)}$, то чувствительность защиты в целом определяется чувствительностью органа напряжения.

Путем установки фильтра тройной частоты чувствительность защиты может быть повышена до чувствительности, определяемой органом тока. В случае применения обычной защиты максимального напряжения нулевой последователь-

ности с реле типа ЭН-Д повысить чувствительность защиты не представляется возможным, так как минимальная уставка реле определяется его термической устойчивостью и равна 15 в.

При возникновении однофазных и двухфазных замыканий на землю на стороне обмотки высшего напряжения трансформатора наличие емкостной связи между этой обмоткой и обмоткой низшего напряжения обуславливает проявление в системе генераторного напряжения тока и напряжения нулевой последовательности. Такие замыкания воспринимаются защитой как внешние. Расчеты показывают, что сочетание знаков первой полуволны тока нулевой последовательности и напряжения смещения нейтрали генератора такое же, как и при внешнем замыкании на землю на стороне генераторного напряжения. Аналогичное положение имеет место и при одновременной коммутации фаз в сети высшего напряжения.

Из рассмотренных видов повреждений и нарушений нормального режима работы видно, что защита избирательно указывает не только замыкание на землю в обмотке генератора, но и замыкание во внешней цепи и что расчетными случаями при выборе уставок элементов защиты являются: для элемента напряжения — отстройка от напряжения нулевой последовательности тройной частоты нормального режима, для элемента тока — отстройка от токов небаланса при внешнем коротком замыкании.

Защита действует при работе генератора в режиме холостого хода и при работе одного генератора из двух, находящихся в одном блоке с трансформатором. В этих случаях при замыкании на землю срабатывают орган напряжения и реле 10 (рис. 6), которое удерживает реле 9 в положении срабатывания. Реле 9 замыкает цепь сигнальной лампы 17.

При всесторонних лабораторных испытаниях, проведенных в МЭИ, защита работала четко и правильно. Однако данных опытной эксплуатации защиты на действующих установках еще не имеется.

Выводы. Защита имеет значительные преимущества перед известными защитами, действует от токов и напряжений неустановившегося режима при практически полной компенсации токов в месте замыкания в установившемся режиме.

Работа системы генераторного напряжения в условиях предельно-возможной компенсации токов замыкания в месте повреждения имеет большое значение для сохранности генераторов и позволяет осуществить действие защиты на сигнал, а не на отключение.

Защита может быть использована как для генераторов, работающих в блоке с трансформатором, так и для генераторов, работающих на шины генераторного напряжения. Она может

также найти применение для защиты сложных компенсированных кабельных сетей.

Защита с тиратронными элементами тока и напряжения обладает высокой чувствительностью и регистрирует кратковременные замыкания на землю. Последнее представляет большой интерес для изучения развития повреждений при переходе однофазных замыканий в многофазные.

Устройства защиты обеспечивают автоматическую отстройку от повышенных значений токов тройной частоты при внешних междуфазных повреждениях. Вследствие большого запаса чувствительности по органу тока защита легко отстраивается от токов небаланса различных неустановившихся процессов, не связанных с замыканиями на землю, и не требует применения специальных мер для увеличения ее чувствительности (подмагничивания переменным током и магнитных усилителей).

Устройства защиты обеспечивают ее надежное действие при колебательных процессах в широком диапазоне частот и избирательное действие по отношению к внутренним и внешним повреждениям.

Защита реагирует только на первую полуволну тока и напряжения нулевой последовательности неустановившегося процесса, ее дальнейшее действие не зависит от последующего протекания процесса. Она не требует отстройки от токов, обусловленных собственной емкостью обмотки статора генератора относительно земли.

Элементы реагирующих устройств действуют в течение короткого промежутка времени и потом выводятся из работы. Горение тиратронов определяется долями секунды.

Для выполнения защиты использованы малогабаритные элементы. Для группы генераторов, имеющих между собой электрическую связь, достаточно иметь один тиратронный элемент напряжения, присоединенный к сборке или шинам генераторного напряжения. Таким образом, габариты реле могут быть еще более уменьшены, а устройство защиты упрощено. Применение в схеме безнакальных тиратронов (тиратронов с холодным катодом) может еще больше упростить устройство защиты и повысить надежность ее работы.

Защита разработана в МЭИ под руководством автора, в конструктивной разработке участвовали Н. В. Морозовская и Б. Т. Козлов.

Литература

1. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений. ч. 111, Госэнергоиздат, 1950.
2. А. М. Федосеев. Релейная защита электрических систем. Госэнергоиздат, 1952.
3. Определение места кратковременного замыкания на землю при помощи электронных реле. (Реферат статьи Н. Hegebauer), Энергетическое обозрение, № 11, 1936.

[13.5.1955]



Влияние магнитной несимметрии на работу трехступенчатого электромашинного усилителя

Кандидат техн. наук доц. Ф. А. ГОРЯИНОВ и кандидат техн. наук Б. Ф. ТОКАРЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Нормальная работа трехступенчатого электромашинного усилителя, принципиальная схема которого приведена на рис. 1*, возможна в том случае, когда магнитная система его является симметричной. При этом э. д. с. отдельных параллельных ветвей обмотки якоря от н. с. обмоток третьей ступени усиления будут одинаковы, а их сумма равна нулю.

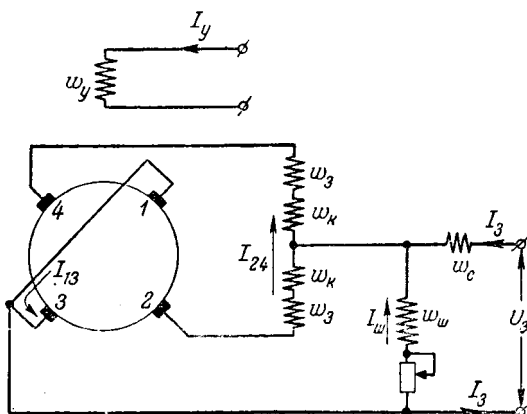


Рис. 1. Принципиальная схема трехступенчатого электромашинного усилителя.

В действительных условиях из-за эксцентричного положения якоря усилителя относительно полюсов магнитная симметрия нарушается. Вследствие этого появляется разница в э. д. с. отдельных параллельных ветвей и возникают уравнивающие токи, которые, накладываясь на токи управления первой и второй ступеней усиления, будут нарушать нормальный режим работы усилителя.

Анализ влияния магнитной несимметрии на работу усилителя удобно произвести по схеме замещения магнитной цепи, приведенной на рис. 2. При составлении ее пренебрежено магнитным сопротивлением стали, что не вносит существенной ошибки, так как магнитная цепь усилителя обычно делается ненасыщенной; кроме того, н. с. полюсов приняты сосредоточенными. На рис. 2 пунктиром показаны магнитные сопротивления для потоков рассеяния. Магнитное сопротивление воздушного зазора

$$R = \frac{\delta_i}{\mu_0 b_i l_i}, \quad (1)$$

где δ_i — приведенная длина воздушного зазора;
 b_i — расчетная ширина полюсного наконечника;
 l_i — расчетная длина полюса;
 μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

* Обмотка первой ступени w_u и компенсационная w_k располагаются на двух противоположных полюсах (например, 1 и 3). Обмотка самовозбуждения w_w , последовательная обмотка w_c и обмотка управления третьей ступени w_3 располагаются на четырех полюсах.

Предполагая, что н. с. всех полюсов заданы, найдем потоки под полюсами.

Потоки под полюсами 1, 2, 3 и 4 соответственно равны

$$\Phi_1 = \frac{F_1(R_3R_4 + R_2R_4 + R_2R_3) + F_2R_3R_4 + F_4R_2R_3 - F_3R_2R_4}{R_2R_3R_4 + R_1R_3R_4 + R_1R_2R_4 + R_1R_2R_3}; \quad (2)$$

$$\Phi_2 = \frac{F_2(R_1R_3 + R_3R_4 + R_1R_4) + F_1R_3R_4 + F_3R_1R_4 - F_4R_1R_3}{R_2R_3R_4 + R_1R_3R_4 + R_1R_2R_4 + R_1R_2R_3}; \quad (3)$$

$$\Phi_3 = \frac{F_3(R_1R_2 + R_2R_4 + R_1R_4) + F_2R_1R_4 + F_4R_1R_2 - F_1R_2R_4}{R_2R_3R_4 + R_1R_3R_4 + R_1R_2R_4 + R_1R_2R_3}; \quad (4)$$

$$\Phi_4 = \frac{F_4(R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3) + F_1R_2R_3 + F_3R_1R_2 - F_2R_1R_3}{R_2R_3R_4 + R_1R_3R_4 + R_1R_2R_4 + R_1R_2R_3}. \quad (5)$$

Проанализируем случай магнитной несимметрии, когда под одноименными полюсами первой и третьей ступеней, а также второй и третьей ступеней расположен больший воздушный зазор, чем под разноименными (рис. 3):

$$F_1 = F + \Delta F_1; \quad F_2 = F + \Delta F_2; \quad (6)$$

$$F_3 = F - \Delta F_1; \quad F_4 = F - \Delta F_2,$$

где ΔF_1 , ΔF_2 , F — результирующие н. с. первой, второй и третьей ступеней усиления на один полюс.

Согласно рис. 3 можно считать, что

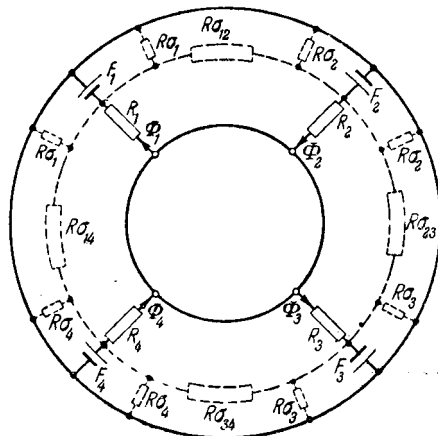
$$R_1 = R_2 = R + \Delta R; \quad R_3 = R_4 = R - \Delta R, \quad (7)$$

где R — магнитное сопротивление воздушного зазора под полюсами, пропорциональное воздушному зазору в случае, когда якорь не имеет эксцентриситета по отношению к полюсам;

ΔR — эквивалентное изменение магнитного сопротивления воздушного зазора из-за эксцентриситета якоря (практически пропорционально $\Delta\delta$).

Рис. 2. Схема замещения магнитной системы трехступенчатого электромашинного усилителя.

F_1, F_2, F_3 — н. с. полюсов; $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ — потоки под полюсами; R_1, R_2, R_3, R_4 — магнитные сопротивления воздушных зазоров под полюсами.



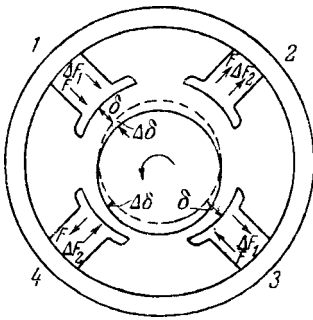


Рис. 3. Первый случай магнитной несимметрии.

Электродвижущая сила между щетками 1 и 3 (рис. 1)

$$E_{13} = \varphi'(\Phi_1 - \Phi_3), \quad (8)$$

где

$$\varphi' = \frac{Npn}{2a60} \cdot 10^{-8};$$

N — число активных проводников якоря;

p — число пар полюсов;

n — скорость вращения якоря;

$2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря.

При замыкании щеток 1 и 3 э. д. с. будет уравниваться падением напряжения в цепи этих щеток $E_{13} = I_{13}r_{13}$. Подставляя в (8) выражения для потоков Φ_1 и Φ_3 из (2) и (4), после преобразования получим:

$$E_{13} = I_{13}r_{13} = \varphi' \frac{-2F\varepsilon + \Delta F_1(2 - \varepsilon^2) + \Delta F_2\varepsilon^2}{R(1 - \varepsilon^2)}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = \frac{\Delta R}{R}$ — эксцентриситет якоря.

Из этого выражения следует, что если якорь имеет эксцентриситет, т. е. неодинаковые воздушные зазоры по отношению полюсов, то э. д. с. E_{13} возникает не только под действием н. с. ΔF_1 , как это имеет место при отсутствии эксцентриситета, но также и от н. с. F и ΔF_2 .

Электродвижущая сила между щетками 2 и 4:

$$E_{24} = I_{24}r_{24} = \varphi'(\Phi_4 - \Phi_2), \quad (10)$$

где r_{24} — сопротивление цепи щеток 2 — 4.

Заменяя Φ_2 и Φ_4 их значениями из выражений (3) и (5), после преобразования получим:

$$E_{24} = I_{24}r_{24} = \varphi' \frac{-2F\varepsilon + \varepsilon^2\Delta F_1 + \Delta F_2(2 - \varepsilon^2)}{R(1 - \varepsilon^2)}. \quad (11)$$

Отсюда также следует, что и э. д. с. E_{24} при наличии эксцентриситета зависит не только от ΔF_2 , но и от F и ΔF_1 .

Преобразуем уравнения (9) и (11), принимая во внимание, что н. с. первой, второй и третьей ступеней равны:

$$\left. \begin{aligned} F &= I_{24}\omega_3 + I_{13}\omega_{13} + I_3\omega_c; \\ \Delta F_1 &= I_y\omega_y + (\omega_{13} - \omega_a)I_{24} - I_{13}c_1; \\ \Delta F_2 &= I_{13}\omega_a - I_{24}c_2, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где ω_y , ω_3 — числа витков обмоток управления первой и третьей ступеней на один полюс;

ω_a , ω_{13} — числа витков обмотки якоря и компенсационной обмотки на один полюс;

ω_{13} , ω_c — числа витков обмотки самовозбуждения и последовательной обмотки на один полюс;

c_1 , c_2 — коэффициенты пропорциональности, определяющие эффект реакции коммутационных токов от токов I_{13} и I_{24} ;

I_y , I_{13} , I_{24} — токи управления первой, второй и третьей ступеней усиления;

I_{13} — ток в обмотке самовозбуждения;

I_3 — выходной ток усилителя.

После подстановки (12) в (9) и (11), получим:

$$I_{13}r_{13} = \frac{-2\varepsilon(\sigma_3 I_{24} + \sigma_{13} I_{13} + \sigma_c I_3)}{2(1 - \varepsilon^2)} + \frac{(2 - \varepsilon^2)(I_y \sigma_y + \sigma_{13} I_{24} - \sigma_{13} I_{13}) + \varepsilon^2(I_{13} \sigma_2 - I_{24} \sigma_{23})}{2(1 - \varepsilon^2)}; \quad (13)$$

$$I_{24}r_{24} = \frac{-2\varepsilon(\sigma_3 I_{24} + \sigma_{13} I_{13} + \sigma_c I_3)}{2(1 - \varepsilon^2)} + \frac{(2 - \varepsilon^2)(\sigma_2 I_{13} - \sigma_{23} I_{24}) + \varepsilon^2(\sigma_y I_y + \sigma_{13} I_{24} - \sigma_{13} I_{13})}{2(1 - \varepsilon^2)}. \quad (14)$$

В последних уравнениях обозначено:

$$\sigma_y = \frac{2\varphi' \omega_y}{R}; \quad \sigma_3 = \frac{2\varphi' \omega_3}{R}; \quad \sigma_{13} = \frac{2\varphi' \omega_{13}}{R};$$

$$\sigma_c = \frac{2\varphi' \omega_c}{R}; \quad \sigma_{13} = \frac{2\varphi'(\omega_{13} - \omega_a)}{R};$$

$$\sigma_2 = \frac{2\varphi' \omega_a}{R}; \quad \sigma_{13} = \frac{2\varphi' c_1}{R}; \quad \sigma_{23} = \frac{2\varphi' c_2}{R}.$$

Выясним, как влияет эксцентриситет якоря на величину выходного напряжения усилителя.

Выходное напряжение усилителя при нагрузке определяется в общем случае выражением:

$$U_3 = \sigma_{13} I_{13} + \sigma_3 I_{24} + I_3(\sigma_c - r_3). \quad (15)$$

Учитывая, что

$$I_{13} = \frac{U_3}{R_{13}}; \quad I_3 = \frac{U_3}{R_{13}},$$

найдем:

$$U_3 \left(1 - \frac{\sigma_{13}}{R_{13}} - \frac{\sigma_c}{R_{13}} + \frac{r_3}{R_{13}} \right) = \sigma_3 I_{24}, \quad (16)$$

где R_{13} — сопротивление цепи самовозбуждения;

R_{13} — сопротивление нагрузки.

Находя из совместного решения уравнений (13) и (14) ток I_{24} и подставляя его в (16), получим:

$$U_3 = \frac{\sigma_y \sigma_3 A I_y}{\left(1 - \frac{\sigma_{13}}{R_{13}} - \frac{\sigma_c}{R_{13}} + \frac{r_3}{R_{13}} \right) C + \sigma_3 \left(\frac{\sigma_{13}}{R_{13}} + \frac{\sigma_c}{R_{13}} \right) B}, \quad (17)$$

где

$$A = \sigma_2 + \varepsilon^2 \left(\frac{r_{13}}{2} - \sigma_2 \right) - \varepsilon^4 r_{13};$$

$$B = \varepsilon(r_{13} + \sigma_{13} + \sigma_2) - \varepsilon_2(r_{13} + \sigma_2 + \sigma_{13});$$

$$C = (r_{13} + \sigma_{1\kappa})(r_{24} + \sigma_{2\kappa}) - \sigma_{\kappa}\sigma_2 + \\ + \varepsilon\sigma_3(r_{13} + \sigma_{1\kappa} + \sigma_2) - \varepsilon^2(r_{13}r_{24} + r_{13}\frac{\sigma_{\kappa}}{2} + \frac{3}{2}r_{13}\sigma_3 + \\ + \frac{3}{2}\sigma_{1\kappa}r_{24} + \sigma_{1\kappa}\sigma_3 + \frac{r_{24}\sigma_2}{2} - \sigma_{\kappa}\sigma_2) - \varepsilon^3(\sigma_3\sigma_2 + \\ + r_{13}\sigma_3 + \sigma_3\sigma_{1\kappa}) + \varepsilon^4(r_{13}r_{24} + \frac{r_{13}\sigma_{\kappa}}{2} + \frac{\sigma_{1\kappa}}{2}r_{24} + \\ + \frac{\sigma_3}{2}r_{24} + \frac{\sigma_{2\kappa}}{2}r_{13}).$$

Так как практически $\varepsilon \ll 1$, то в первом приближении, пренебрегая членами, имеющими ε в степени выше первой, и учитывая, что $\sigma_{ш}$ равно критическому сопротивлению цепи самовозбуждения R_{κ} , получим:

$$U_3 = \frac{\sigma_y \sigma_2 \sigma_3 I_y}{\left(1 - \frac{R_{\kappa}}{R_{ш}} - \frac{\sigma_c}{R_{\kappa}} + \frac{r_3}{R_{\kappa}}\right) [(r_{13} + \sigma_{1\kappa})(r_{24} + \sigma_{2\kappa}) - \sigma_{\kappa}\sigma_2] + \left(1 + \frac{r_3}{R_{\kappa}}\right) \sigma_3 \varepsilon (r_{13} + \sigma_{1\kappa} + \sigma_2)}, \quad (18)$$

или после преобразований:

$$U_3 = \frac{U'_3}{1 + \varepsilon \frac{\sigma_3 \left(1 + \frac{r_3}{R_{\kappa}}\right) (r_{13} + \sigma_{1\kappa} + \sigma_2)}{\left(1 - \frac{R_{\kappa}}{R_{ш}} - \frac{\sigma_c}{R_{\kappa}} + \frac{r_3}{R_{\kappa}}\right) [(r_{13} + \sigma_{1\kappa})(r_{24} + \sigma_{2\kappa}) - \sigma_{\kappa}\sigma_2]}} = \frac{U'_3}{1 + \varepsilon D}; \quad (19)$$

$$U'_3 = \frac{\sigma_y \sigma_2 \sigma_3 I_y}{\left(1 - \frac{R_{\kappa}}{R_{ш}} - \frac{\sigma_c}{R_{\kappa}} + \frac{r_3}{R_{\kappa}}\right) [(r_{13} + \sigma_{1\kappa})(r_{24} + \sigma_{2\kappa}) - \sigma_{\kappa}\sigma_2]}, \quad (20)$$

где

$$D = \frac{\sigma_3 \left(1 + \frac{r_3}{R_{\kappa}}\right) (r_{13} + \sigma_{1\kappa} + \sigma_2)}{\left(1 - \frac{R_{\kappa}}{R_{ш}} - \frac{\sigma_c}{R_{\kappa}} + \frac{r_3}{R_{\kappa}}\right) [(r_{13} + \sigma_{1\kappa})(r_{24} + \sigma_{2\kappa}) - \sigma_{\kappa}\sigma_2]};$$

U'_3 — выходное напряжение усилителя при отсутствии эксцентриситета якоря.

На рис. 4 приведены опытная и рассчитанная по уравнению (19) кривые $\frac{U_3}{U'_3} = f(\varepsilon)$ для трех-

ступенчатого усилителя мощностью 400 *вт* при постоянных значениях тока управления и сопротивления цепи самовозбуждения. Некоторые расхождения между расчетной и экспериментальной кривыми объясняются непостоянством щеточного контакта и влиянием гистерезиса, которые не учитывались при построении расчетной кривой.

На основании уравнений (18) и (19) можно сделать следующие выводы:

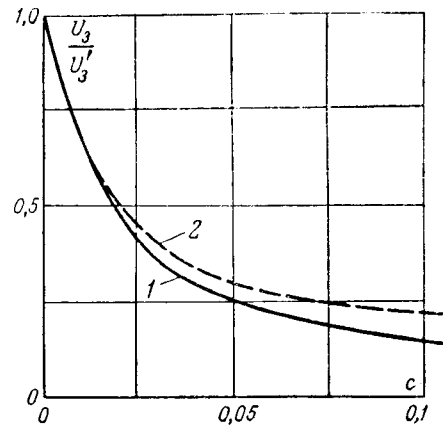
1. Выходное напряжение усилителя снижается по сравнению с выходным напряжением при отсутствии эксцентриситета и при прочих равных условиях в $1 + \varepsilon D$ раза.

2. Коэффициент усиления по мощности $k = \frac{U_3 I_3}{I_y^2 R_y} = \frac{U_3^2}{I_y^2 R_y R_{\kappa}}$, пропорциональный квадрату выходного напряжения, снижается в $(1 + \varepsilon D)^2$ раза.

Рис. 4. Расчетная (1) и опытная (2) кривые зависимости

$\frac{U_3}{U'_3} = f(\varepsilon)$ при

$I_y = \text{const.}$



3. При сопротивлении цепи самовозбуждения $R_{ш} = R_{\kappa}$ и сопротивлении нагрузки $R_{\kappa} = \infty$ (хо-

лостой ход) усилитель не будет настроен на порог самовозбуждения. Приравнявая знаменатель уравнения (18) нулю, можно найти, что для настройки на порог самовозбуждения необходимо, чтобы сопротивление цепи самовозбуждения было равно:

$$R_{ш} = \frac{R_{\kappa}}{1 + \varepsilon \frac{\sigma_3 (r_{13} + \sigma_{1\kappa} + \sigma_2)}{[(r_{13} + \sigma_{1\kappa})(r_{24} + \sigma_{2\kappa}) - \sigma_{\kappa}\sigma_2]}} = \frac{R_{\kappa}}{1 + \varepsilon G},$$

где

$$G = \frac{\sigma_3 (r_{13} + \sigma_{1\kappa} + \sigma_2)}{[(r_{13} + \sigma_{1\kappa})(r_{24} + \sigma_{2\kappa}) - \sigma_{\kappa}\sigma_2]}.$$

Следовательно, сопротивление $R_{ш}$ должно быть меньше критического сопротивления цепи самовозбуждения R_{κ} .

Если настроить цепь возбуждения так, чтобы $R_{ш} \geq \frac{R_{\kappa}}{1 + \varepsilon G}$, то можно компенсировать влияние эксцентриситета на величину выходного напряжения и на коэффициент усиления по мощности.

Это можно осуществить при относительно небольших значениях эксцентриситета ε , так как в противном случае величина сопротивления цепи самовозбуждения $R_{ш}$, необходимая для компенсации влияния эксцентриситета, может оказаться меньше сопротивления самой обмотки самовозбуждения.

Рассмотрим второй случай магнитной несимметрии, когда под одноименными полюсами первой и третьей, а также второй и третьей ступе-

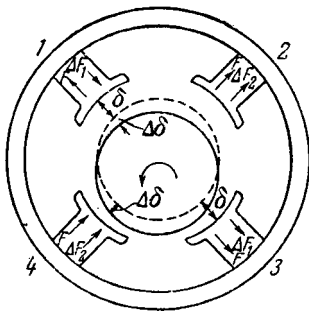


Рис. 5. Второй случай магнитной несимметрии.

ней расположен меньший воздушный зазор, чем под разноименными (рис. 5):

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= F - \Delta F_1; & F_2 &= F - \Delta F_2; \\ F_3 &= F + \Delta F_1; & F_4 &= F + \Delta F_2. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Электродвижущая сила между щетками 1 и 3

$$E_{13} = I_{13} r_{13} = \varphi' \frac{2\epsilon F + \Delta F_1(2 - \epsilon^2) + \epsilon^2 \Delta F_2}{R(1 - \epsilon^2)}. \quad (22)$$

Электродвижущая сила между щетками 2 и 4

$$E_{24} = I_{24} r_{24} = \varphi' \frac{2\epsilon F + \Delta F_1 \epsilon^2 + \Delta F_2(2 - \epsilon^2)}{R(1 - \epsilon^2)}. \quad (23)$$

Из уравнения (22) следует, что э. д. с. первой ступени E_{13} обусловлена не только н. с. ΔF_1 , но и н. с. F и ΔF_2 , так же как и э. д. с. E_{24} обусловлена не только ΔF_2 , но и F и ΔF_1 . В отличие от первого случая н. с. F третьей ступени действует согласно с н. с. первой ΔF_1 и второй ΔF_2 ступеней.

Выходное напряжение усилителя

$$U_3 = \frac{\sigma_y \sigma_2 \sigma_3 I_y}{\left(1 - \frac{R_k}{R_u} - \frac{\sigma_c}{R_n} + \frac{r_3}{R_n}\right) [(r_{13} + \sigma_{1k})(r_{24} + \sigma_{2k}) - \sigma_k \sigma_2] - \left(1 + \frac{r_3}{R_n}\right) \epsilon \sigma_3 (r_{13} + \sigma_{1k} + \sigma_2)}, \quad (24)$$

или

$$U_3 = \frac{U'_3}{1 - \epsilon D}. \quad (25)$$

На основании уравнения (24) можно сделать вывод, что если сопротивление цепи самовозбуждения настроено так, чтобы $R_k < R_u < \frac{R_k}{1 - \epsilon G}$, то усилитель будет самовозбуждаться и потеряет управление.

Для настройки усилителя на порог самовозбуждения необходимо, чтобы сопротивление цепи обмотки самовозбуждения было равно:

$$R_u = \frac{R_k}{1 - \epsilon G}.$$

Выводы. 1. Магнитная несимметрия трех-ступенчатого усилителя, возникающая вследствие эксцентричного положения якоря относительно полюсов, может явиться причиной или самовозбуждения, или резкого снижения его коэффициента усиления по мощности.

2. Снижение коэффициента усиления по мощности происходит, когда под одноименными полюсами первой и третьей ступеней, а также второй и третьей ступеней расположен больший воздушный зазор, чем под разноименными.

В этом случае происходит снижение коэффициента усиления в $(1 + \epsilon D)^2$ раза.

3. Самовозбуждение усилителя может произойти, когда под одноименными полюсами первой и третьей, а также второй и третьей ступеней расположен меньший воздушный зазор, чем под разноименными, а сопротивление цепи обмотки самовозбуждения имеет величину, меньшую, чем $\frac{R_k}{1 - \epsilon G}$.

4. Некоторую компенсацию влияния магнитной несимметрии на работу усилителя можно получить настройкой цепи обмотки самовозбуждения путем изменения ее сопротивления.

5. Для уменьшения эксцентриситета воздушный зазор машины не следует брать малым.

[21.2.1955]

◇ ◇ ◇

Динамика магнитоэлектрических приборов в режиме сильного успокоения

Кандидат техн. наук, доц. Р. Р. ХАРЧЕНКО

Московский энергетический институт им. Молотова

Приборы магнитоэлектрической системы, будучи линейными преобразователями, обслуживают область динамических измерений. Таковы, например, осциллографы, баллистические гальванометры, флюксметры, входные преобразователи фотоэлектродоптических усилителей, выходные (интегрирующие) приборы сейсмометров и виброметров и т. д.

Известно, что собственные динамические характеристики названных приборов полностью определяются тремя параметрами: чувствительностью к току S_i , частотой собственных колебаний ω_0 и степенью успокоения β . Параметр β играет особую важную роль, так как его значение определяет типовые особенности приборов. Вопрос об оптимальных значениях β в области $\beta < 1$ для каждого конкретного типа приборов изучен весьма обстоятельно. В этом можно убедиться, если рассмотреть только литературу, относящуюся к осциллографам [Л. 1]. Но интересно отметить, что все без исключения литературные источники, указанные в [Л. 1], свидетельствуют о существовании укоренившегося представления о том, что приборы, воспроизводящие¹ функцию $i(t)$, обязательно должны работать в режиме $\beta < 1$. Однако в самые последние годы была доказана необходимость переуспокоенных режимов для ряда воспроизводящих приборов, например гальванометров с фотоэлектродоптическими усилителями, рамочных вибраторов переносного осциллографа, некоторых регистрирующих приборов, предназначенных для специальных условий (тряска).

Трудами Б. П. Козырева [Л. 2] было установлено, что повышение полезной чувствительности приборов требует снижения их вибровосприимчивости, чего можно достичь путем введения переуспокоенных режимов. Вместе с тем Б. П. Козырев не ставил себе задачи исследования динамики воспроизводящих приборов для режима $\beta > 1$; он ограничился лишь оценкой времени успокоения. Таким образом, вопрос о том, какие процессы и с какими погрешностями можно записывать переуспокоенными приборами, — требует рассмотрения.

Переуспокоенные магнитоэлектрические приборы могут осуществлять и воспроизведение функции $\int_0^t i(t) dt$. Такие приборы будем назы-

вать интегрирующими. Для этой группы приборов также имеет чрезвычайно важное значение вопрос о динамике: какие кривые $i(t)$ и с какими их погрешностями можно интегрировать. Частичное освещение данный вопрос нашел в известной монографии А. Г. Калашникова по флюксметру [Л. 3]. Но и А. Г. Калашников не

рассматривает здесь динамику интегрирующих приборов в целом, так как это не входило в план его работы.

Очевидно, что аппарат для изучения поведения приборов в режиме $\beta > 1$ должен быть универсальным и приспособленным в равной мере как к воспроизводящим, так и к интегрирующим приборам. В настоящей работе функциональные свойства переуспокоенных магнитоэлектрических приборов исследуются на основе общего подхода к анализу задач динамики.

Основные характеристики прибора в режиме $\beta > 1$. Для решения различных задач динамики нужно знать аналитические выражения: 1) комплексной частотной характеристики; 2) переходной функции и 3) баллистической реакции прибора.

Рассмотрим сначала уравнение свободного движения подвижной части прибора:

$$\left(1 + \frac{2\beta}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2\right) x = 0. \quad (1)$$

Корни характеристического многочлена будут:

$$\omega_{1,2} = \omega_0 (-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 1}).$$

По физическому смыслу ω_1 и ω_2 представляют собой постоянные затухания переходной функции

$$x = x_c + C_1 e^{\omega_1 t} + C_2 e^{\omega_2 t}. \quad (2)$$

Введем постоянные времени

$$\theta_1 = -\frac{1}{\omega_1}; \quad \theta_2 = -\frac{1}{\omega_2}$$

и перепишем (2) в виде:

$$x = x_c + C_1 e^{-\frac{t}{\theta_1}} + C_2 e^{-\frac{t}{\theta_2}}. \quad (3)$$

Из свойств квадратного уравнения следует, что

$$\omega_1 \omega_2 = \omega_0^2,$$

откуда

$$\theta_1 = -\frac{\omega_2}{\omega_0^2} \quad \text{и} \quad \theta_2 = -\frac{\omega_1}{\omega_0^2}.$$

С ростом β постоянные затухания и постоянные времени ведут себя следующим образом:

$$\omega_1 \rightarrow 0; \quad \omega_2 \rightarrow -2\beta\omega_0; \quad \theta_1 \rightarrow \frac{2\beta}{\omega_0}; \quad \theta_2 \rightarrow 0.$$

Вместе с этим уравнение движения (1) постепенно превращается в вырожденное уравнение

$$\left(1 + \frac{2\beta}{\omega_0} p\right) x = (1 + \theta p) x = 0, \quad (4)$$

где $\theta = \theta_1 = \frac{2\beta}{\omega_0}$ — единственная постоянная времени или просто постоянная времени прибора.

¹ Такие приборы будем называть воспроизводящими.

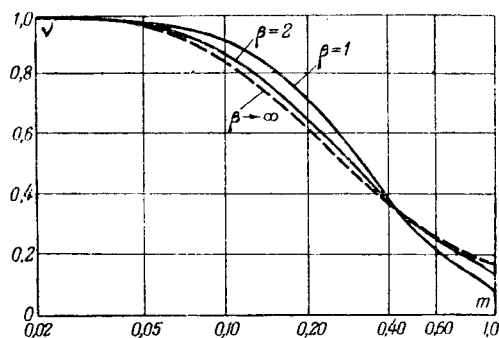


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики воспроизводящего прибора.

Для не очень больших значений β уравнение (4) будет приближенно выражать закон свободного движения.

Соответственно, приближенным уравнением переходной функции вместо (3) будет:

$$\alpha = \alpha_c + C_1 e^{-\frac{t}{\theta}},$$

а с учетом начальных условий ($C_1 = -\alpha_c$) и в безразмерных координатах

$$\frac{\alpha}{\alpha_c} = 1 - e^{-n}, \quad (5)$$

где $n = \frac{t}{\theta}$.

Отсюда видно, что время установки на отсчет (время успокоения) n_y с точностью f (в процентах) будет:

$$n_y = \frac{t_y}{\theta} = \ln \frac{100}{f}. \quad (6)$$

Приближенное уравнение баллистической реакции, или, по более распространенной терминологии, реакции прибора на единичный импульс ($Q = 1$), получится, если взять первую производную от переходной функции (5) и положить $I = 1$.

Эта операция дает:

$$\alpha_E = S_i \frac{1}{\theta} e^{-n}. \quad (7)$$

Осталось написать приближенное уравнение комплексной частотной характеристики прибора. Оно получается непосредственно из (4):

$$\frac{\dot{A}}{A_{f=0}} = \dot{v} = \frac{1}{1 + j\theta\omega} = \frac{1}{1 + j2\pi m}, \quad (8)$$

где \dot{A} — комплексная амплитуда отклонения, вызываемого при любой частоте током внешнего источника $I = \text{const}$;

$m = \theta f$ — безразмерная независимая переменная, имеющая смысл относительной частоты

$$\left(m = f : \frac{1}{\theta}\right).$$

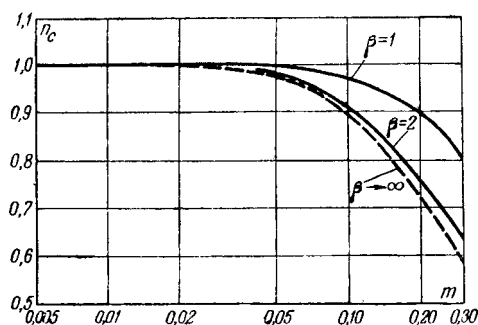


Рис. 2. Фазовые характеристики.

Отсюда имеем выражения амплитудной и фазовой характеристик:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi m)^2}}; \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = 2\pi m, \quad (10)$$

где φ — угол между векторами \dot{A} и \dot{I} .

Итак, мы выразили аппроксимирующими формулами (4) ... (10) все основные характеристики прибора (для режима $\beta > 1$). Сопоставим их с известными точными формулами (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что применение для расчетов динамических режимов (например, посредством интегралов Дюамеля или Фурье) точных формул привело бы к столь громоздким уравнениям, что практическое пользование решением было бы почти исключено. Наоборот, применение аппроксимирующих формул приводит к весьма простым уравнениям и дает хорошее приближение.

Установим точность аппроксимации собственных характеристик прибора.

На рис. 1 и 2 показаны частотные характеристики; для большей наглядности фазовая характеристика (рис. 2) представлена временем

сдвига $n_c = \frac{t_c}{\theta}$ в функции частоты. Приближенное аналитическое выражение n_c получается из формулы (10):

$$t_c = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\operatorname{arctg} 2\pi m}{\omega};$$

в безразмерных координатах

$$n_c = \frac{\operatorname{arctg} 2\pi m}{2\pi m}. \quad (11)$$

Сплошными линиями на обоих рисунках изображены кривые для $\beta = 1$ и $\beta = 2$, вычисленные по точным формулам; пунктирными линиями — кривые для любого значения $\beta > 1$, вычисленные по приближенным формулам (9), (11).

В соответствии со сделанными выше определениями при больших значениях β величина θ представляет собой реальную постоянную времени прибора; для не очень больших значений β она является расчетным параметром, численно равным $\frac{2\beta}{\omega_0}$. Независимые переменные в точной

Таблица 1

Точные и приближенные выражения основных характеристик переуспокоенного магнитоэлектрического прибора

| Характеристика | Точное аналитическое выражение | Аппроксимирующая формула |
|--|---|--|
| Амплитудно-частотная характеристика | $\nu = \frac{1}{\sqrt{(1-k^2)^2 + (2\beta k)^2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{2\beta k}{1-k^2},$ <p>где $k = \frac{f}{f_0}$</p> | $\nu = \frac{1}{\sqrt{1+(2\beta k)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi m)^2}};$ $\operatorname{tg} \varphi = 2\beta k = 2\pi m,$ <p>где $m = \theta f$</p> |
| Переходная функция | $\alpha = \alpha_c \left[1 - \frac{e^{-\beta \omega_0 t}}{\operatorname{sh} x} \operatorname{sh} (\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t + x) \right],$ <p>где $x = \operatorname{arth} \frac{\sqrt{\beta^2 - 1}}{\beta}$</p> | $\alpha = \alpha_c \left[1 - e^{-n} \right], \quad \text{где } n = \frac{t}{\theta}.$ <p>Время установки с точностью f</p> $n_y = \ln \frac{100}{f}$ |
| Баллистическая реакция ($\theta = 1$) | $\alpha_B = \frac{S_i \omega_0 e^{-\beta \omega_0 t}}{\operatorname{sh} x} \operatorname{sh} (\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t).$ <p>Амплитуда отброса $(\alpha_B)_m = S_i \omega_0 e^{-\frac{x}{\beta}}$</p> <p>Время отброса $t_1 = \frac{1}{\omega_0} \frac{x}{\operatorname{sh} x}.$</p> | $\alpha_B = \frac{S_i}{\theta} e^{-n}$ <p>Амплитуда отброса $(\alpha_B)_m = \frac{S_i}{\theta}.$</p> <p>Время отброса $n_1 = \frac{t_1}{\theta} = 0$</p> |

и приближенной формулах взаимно связаны подстановкой $2\pi m = 2\beta k$.

Из рассмотрения кривых следует, что приближенной формулой частотной характеристики можно пользоваться для определения полосы воспроизведения при $\beta \geq 2$.

мыми; это служит основанием удобного метода опытного определения постоянной времени.

На рис. 4 изображены кривые баллистической реакции прибора в масштабе $\frac{\theta}{S_i}$ для $\beta = 2$. Амплитуды действительной и приближенной

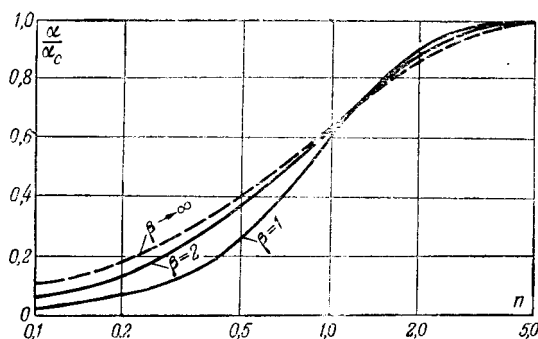


Рис. 3. Переходные функции прибора.

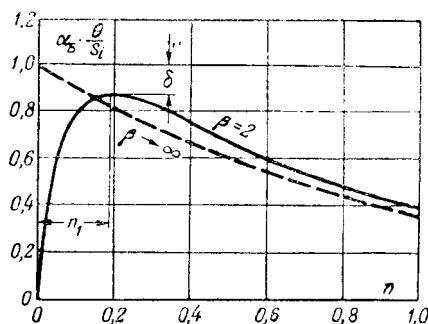


Рис. 4. Баллистическая реакция прибора.

На рис. 3 показаны графики переходной функции: сплошные линии изображают функцию, вычисленную для $\beta = 1$ и $\beta = 2$ по точной формуле, пунктирная линия дает изображение аппроксимации. И в этом случае аппроксимация оказывается возможной при $\beta \geq 2$. Точная и приближенная переходные функции в начале своего течения несколько расходятся (частотные характеристики расходятся в конце), но к моменту „времени половины отклонения“, равному 0,7·6, они становятся почти неотлич-

(пунктирная линия) кривых отличаются между собой на δ и сдвинуты на относительное время n_1 . С увеличением β показатели расхождения δ и n_1 стремятся к нулю. На рис. 5 показана зависимость амплитудной погрешности аппроксимации δ (в процентах) и времени n_1 от β . При очень больших значениях β величина δ становится ничтожно малой. Поэтому, например, для интегрирующих приборов, у которых $\beta > 20$, баллистическую чувствительность можно безоговорочно рассчитывать по формуле (7).

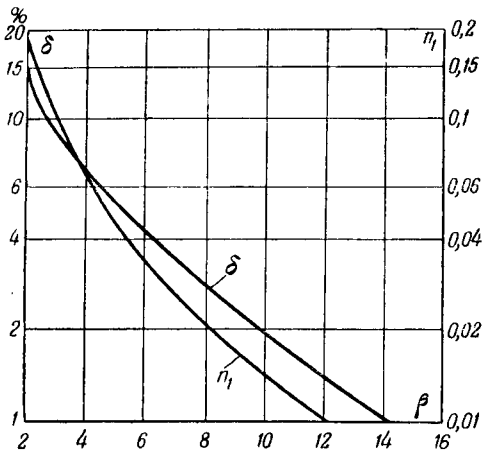


Рис. 5. Погрешности аппроксимации баллистического отклонения.

Воспроизводящие свойства. Для осциллографа принято определять рабочую полосу частот, исходя из допустимой амплитудной погрешности в 5%. При этой норме верхний предел рабочей полосы частот (рис. 1) $m_p = \theta f_p \approx \approx 0,05$, откуда

$$f_p \leq \frac{1}{20\theta} \approx \frac{1}{6,5\beta} f_0. \quad (12)$$

Необходимо проверить, допустимо ли это значение m_p по погрешности за счет временного (фазового) сдвига. Если бы прибор воспроизводил все гармоники кривой $i(t)$ с одинаковым сдвигом во времени $n_c = 1$ (рис. 2), то никаких искажений формы кривой, кроме искажений, определяемых амплитудно-частотной характеристикой, не возникло бы. Таким образом, идеальная запись была бы:

$$\alpha_0 = A \sin [2\pi m(n-1)]. \quad (13)$$

Действительная же запись имеет вид:

$$\alpha = A \sin [2\pi m(n-n_c)]. \quad (14)$$

Разница между α и α_0 будет равна мгновенной погрешности за счет временного сдвига. Целесообразно выразить эту погрешность в процентах от амплитудного значения синусоиды:

$$\xi = \frac{\alpha - \alpha_0}{A} 100. \quad (15)$$

Подставив в определяющую формулу (15) выражения (13) и (14), получим после элементарных преобразований:

$$\xi = 2 \sin [\pi m(1-n_c)] \cos [\pi m(2n-1-n_c)] 100.$$

Видно, что величина $\xi(n)$ изменяется по закону косинуса.

Наибольшим значением будет:

$$\xi_m = 2 \sin [\pi m(1-n_c)] 100. \quad (16)$$

Для найденного ранее значения $m = m_p = 0,05$ время сдвига $n_c = 0,97$ (рис. 2), и погрешность за счет временного сдвига (16) составит:

$$\xi_m \approx 1\%.$$

Столь малой погрешностью, конечно, можно пренебречь.

Итак, требования к полосе воспроизведения по фазовой характеристике менее жесткие, чем по амплитудной, поэтому предел рабочей полосы частот надо выбирать по соотношению (12). Вместе с тем из приведенного анализа ясно, что одновременную запись нескольких кривых можно выполнять только таким комплектом переуспокоенных приборов (например, рамочных вибраторов осциллографа), у которых постоянные времени одинаковы. Если вследствие разброса параметров в серии приборы в этом комплекте имеют неодинаковые собственные частоты f_0 , то их необходимо настроить на общее значение $\theta = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\beta}{f_0}$, регулируя степень успокоения.

Рассмотрим теперь важную для практики задачу воспроизведения импульсов тока разной формы. Для нормального осциллографа ($\beta < 1$), когда аппаратом формул аппроксимации пользоваться нельзя, эта задача представляет очень большие трудности [Л. 4], но для режима $\beta > 1$ она оказывается несложной и разрешаемой чисто аналитическим методом.

Качество воспроизведения будем оценивать по предложенному нами критерию [Л. 4] „относительной погрешности воспроизведения формы импульса“

$$F = \frac{\int_0^\infty |\alpha_0 - \alpha| d\lambda}{\int_0^\infty \alpha_0 d\lambda} 100, \quad (17)$$

где α —ордината идеальной записи;

$$\lambda = \frac{t}{T_u},$$

T_u —длительность импульса.

Знаменатель выражения F представляет собой определенное число, зависящее только от формы импульса, а числитель при заданной форме является функцией соотношения между длительностью импульса и постоянной времени прибора $\Delta = \frac{T_u}{\tau}$.

В качестве примера на рис. 6 показаны кривые воспроизведения экспоненты для $\Delta = 50$

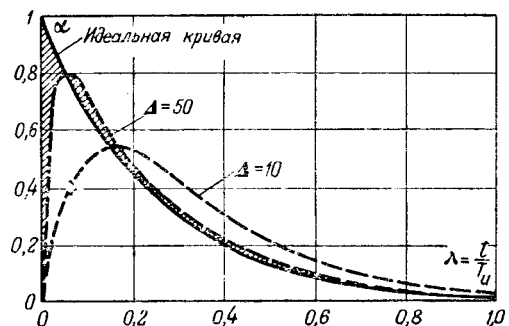


Рис. 6. Воспроизведение экспоненты.

и $\Delta=10$ (пунктирные линии). Длительность этого импульса здесь и в дальнейшем принята равной четырем постоянным времени экспоненты. Заштрихованная площадь изображает числитель (17) для $\Delta=50$. При прочих равных условиях, чем длиннее импульс, тем меньше отношение заштрихованной площади к площади идеальной кривой. Соответственно, при этом критерий F будет меньше и качество воспроизведения лучше. Воспроизведение можно считать вполне удовлетворительным, если $F=10\%$. В этом можно убедиться, рассматривая воспроизведение экспоненты с показателем $\Delta=50$ (рис. 7), для которого $F=12\%$.

Кривые импульсной реакции, построенные по приближенным формулам и по точным формулам [Л. 4] для режима $\beta > 2$, отличаются столь мало, что разница в соответствующих заштрихованных площадях при планиметрировании почти не обнаруживается. Значит — аппроксимация здесь законна.

Целью нашего исследования является выяснение зависимости $F=f(\Delta)$ для нескольких характерных форм импульсов: экспоненты, полуволны синусоиды, прямоугольника и треугольника (табл. 2). Эти четыре формы характерны

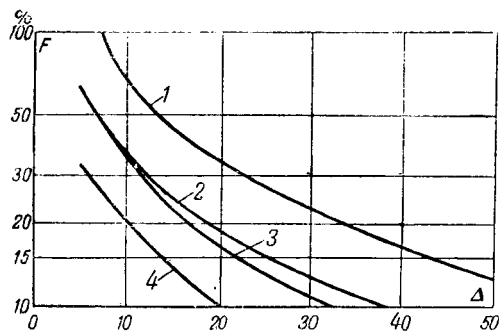


Рис. 7. Погрешности воспроизведения импульсов. 1—экспонента; 2—треугольник; 3—синусоида; 4—прямоугольник.

тем, что они дают различные сочетания видов крутизны переднего и заднего фронтов, будучи в то же время простейшими для анализа. Многие другие формы могут рассматриваться как промежуточные, вследствие чего их погрешность F должна находиться в „вилке“ погрешностей какой-либо пары из этих четырех импульсов.

Искомые погрешности вычислены нами следующим образом (табл. 2): по известным аналитическим выражениям импульса тока (идеаль-

Таблица 2

К расчету погрешности воспроизведения формы импульсов $\frac{\alpha}{S_i}$

| Форма импульса S | Идеальная запись $\frac{\alpha_0}{S_i}$ | Действительная запись $\frac{\alpha}{S_i}$ | | Погрешность воспроизведения формы импульса F |
|--------------------|---|---|---|--|
| | | Область $\lambda < 1$ | Область $\lambda > 1$ | |
| | $\frac{\alpha_0}{S_i} = e^{-4\lambda}$ | $\frac{\alpha}{S_i} = \frac{1}{1 - \frac{4}{\Delta}} \left[e^{-4\lambda} - e^{-\Delta\lambda} \right]$ | | $F = -200x \left(\frac{y}{x} \right)^{-x} + 200 \frac{y}{\Delta} \left(\frac{y}{x} \right)^{-y}$, где $x = \frac{4}{4-\Delta}$; $y = \frac{\Delta}{4-\Delta}$ |
| | $\frac{\alpha_0}{S_i} = \sin(\pi\lambda)$ | $\frac{\alpha}{S_i} = \frac{\Delta}{\pi^2 + \Delta^2} \left[\Delta \sin(\pi\lambda) - \pi \cos(\pi\lambda) + \pi e^{-\Delta\lambda} \right]$ | $\frac{\alpha}{S_i} = \frac{\Delta\pi}{\pi^2 + \Delta^2} \left[e^{-\Delta(\lambda-1)} + e^{-\Delta\lambda} \right]$ | $F = (0,5p^2 + p) 100$, где $p = \frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 + \Delta^2}}$ |
| | $\frac{\alpha_0}{S_i} = 1$ | $\frac{\alpha}{S_i} = 1 - e^{-\Delta\lambda}$ | $\frac{\alpha}{S_i} = (1 - e^{-\Delta}) e^{-\Delta(\lambda-1)}$ | $F = \frac{200}{\Delta} e^{-\Delta} \left(100 + \frac{100}{\Delta} \right)$ |
| | $\frac{\alpha_0}{S_i} = \lambda$ | $\frac{\alpha}{S_i} = \lambda - \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{\Delta} e^{-\Delta\lambda}$ | $\frac{\alpha}{S_i} = \left(1 - \frac{1}{\Delta} \right) e^{-\Delta(\lambda-1)} + \frac{1}{\Delta} e^{-\Delta\lambda}$ | $F = \frac{400}{\Delta} - \frac{400}{\Delta^2} (1 - e^{-\Delta})$ |

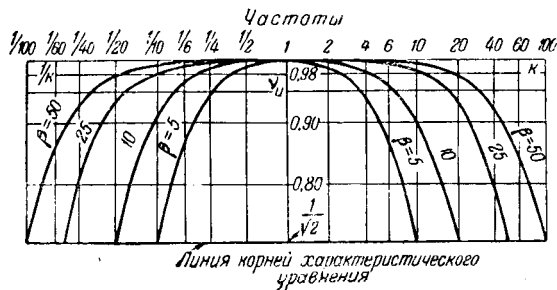


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики интегрирующего прибора.

ная запись в масштабе S_i) и собственным характеристикам прибора (5) или (7) были решены интегральные уравнения Дюамеля. Это дало выражения реакции прибора на импульс, т. е. выражения действительной записи в области $\lambda < 1$. Из них же при $\lambda = 1$ получены начальные условия для определения постоянной C в уравнении свободного движения:

$$\frac{\alpha}{S_i} = C e^{-(\lambda-1)\Delta},$$

которое характеризует действительную запись в области $\lambda > 1$. Далее непосредственно применялась формула (17), в результате чего найдены уравнения $F = f(\Delta)$. Графики погрешностей F изображены на рис. 7. Они полезны для оценки разрешающей способности воспроизводящих приборов по наиболее тяжелому критерию, каковым является допустимая погрешность F .

Пусть, например, требуется записать треугольный импульс с погрешностью $F \leq 10$. Из рис. 8 видно, что для этого необходимо соблюсти условие $\Delta > 40$ или $T_u > 40 \frac{\beta}{\pi} T_0$; пусть еще задано дополнительно $\beta \approx 3$, тогда должно быть $T_u > 40 T_0$.

Заметим, что при нормальном успокоении $\beta = 0,5 \dots 0,8$ тот же импульс воспроизводится с погрешностью $F \leq 10$ при условии $T_u > 10 T_0$ [Л. 4]. Таким образом, увеличивать успокоение воспроизводящих приборов следует крайне осторожно, прибегая к этому только при особой доказанной необходимости.

В заключение укажем, что при известных параметрах S_i и θ переуспокоенного прибора по осциллограмме легко находятся динамические погрешности воспроизведения кривой $i(t)$. Для этого достаточно, как видно из дифференциального уравнения движения

$$\alpha + \theta \frac{d\alpha}{dt} = S_i i, \quad (18)$$

построить кривую $\frac{d\alpha}{dt} = f(t)$ и, учтя масштаб построения, умножить ее ординаты на θ . Получится второй член левой части (18), который и представляет собой динамическую погрешность в функции времени.

Интегрирующие свойства. Измерение ряда электрических и неэлектрических величин осно-

вано на предварительном их преобразовании либо в конечное значение электрического заряда $Q = k_1 x$, либо в непрерывно изменяющееся значение тока, пропорциональное производной от измеряемой величины

$$i(t) = k_2 \frac{dx(t)}{dt}.$$

Выходная цепь преобразователя соединяется с интегрирующим прибором, выполняющим, в свою очередь, преобразование

$$\alpha(t) = k_3 \int_0^t i(t) dt.$$

Результатом действия измерительной цепи будет: 1) при пропускании заряда Q через прибор — конечное отклонение указателя, пропорциональное x ; 2) при пропускании тока $i(t)$ через прибор — отклонение $\alpha(t)$, отображающее во времени переменную $x(t)$. Интегрирование первого вида будем называть импульсным, интегрирование второго вида — следящим. Частным случаем импульсного интегрирования является баллистическое измерение количества электричества Q ; его основным признаком является требование весьма малой длительности импульса.

Поведение магнитоэлектрического прибора в режиме гармонического воздействия описывается уравнением:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \frac{S_i I}{1 + \theta p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2} = \\ &= S_i \frac{1}{1 - k^2 + j 2\beta k} I = S_i^* I. \end{aligned} \quad (19)$$

Будем считать входной величиной $\dot{Q} = \frac{I}{p}$. Для этой цели преобразуем (19) к виду:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \frac{S_i \dot{Q}}{\frac{1}{p} + \theta + \frac{1}{\omega_0^2} p} = \\ &= \frac{S_i}{\theta} \frac{1}{1 + j \frac{1}{2\beta} \left(k - \frac{1}{k} \right)} \dot{Q} = S_Q^* \dot{Q}. \end{aligned} \quad (20)$$

Аналогично (19) здесь первый множитель в правой части представляет собой коэффициент интегрирующего преобразования или чувствительность прибора к интегралу тока, второй множитель \dot{v}_u^* — комплексную частотную характеристику при интегрировании. Очевидно, что чем больше у прибора степень успокоения β , тем лучше он выполняет функцию измерителя интеграла тока, но зато тем меньше его чувствительность S_Q . При $\beta \rightarrow \infty$ прибор воспроизводит все гармоники Q в одинаковом масштабе $\frac{S_i}{\theta}$, так как $v_u = 1$. Следовательно, уравнением идеального интегрирующего преобразования будет при следящем интегрировании

$$\alpha_Q(t) = \frac{S_i}{\theta} q(t), \quad (21)$$

при импульсном интегрировании

$$\alpha_0 = \frac{S_i}{\theta} Q. \quad (22)$$

Общий подход к оценке интегрирующих свойств прибора заключается в следующем:

1. При гармоническом воздействии можно непосредственно из (20) найти для заданной полосы частот амплитудные и фазовые погрешности интегрирования или, наоборот, исходя из допустимых погрешностей определить рабочую полосу частот прибора.

2. При негармоническом воздействии $i(t)$ целесообразнее отправляться от уравнения (19) и соответствующих ему выражений реакции прибора на единичный ток и на единичный импульс тока (табл. 1). Применение в этом случае интегральных уравнений Фурье или Дюамеля дает возможность вычислить кривую действительного отклонения прибора в функции времени $\alpha(t)$. С другой стороны, следует найти функ-

цию $q(t) = \int_0^t i(t) dt$ и зафиксировать по уравнению (21) кривую идеального воспроизведения интеграла тока $\alpha_0(t)$. Сопоставление $\alpha(t)$ и $\alpha_0(t)$ позволит судить о качестве интегрирования.

На рис. 8 показано семейство амплитудно-частотных характеристик интегрирующего прибора $v_u = f(k)$ при параметре β , определяемое формулой (20). Все кривые симметричны в отношении переменных k и $\frac{1}{k}$.

Найдем верхнюю k_s и нижнюю k_n границы рабочей полосы частот, задавшись допустимой амплитудной погрешностью, например, в 3%. Это можно сделать по точкам пересечения кривых семейства с линией $v_u = 0,97$. Та же операция, выполненная аналитически, дает полезные и очень простые соотношения:

$$\left. \begin{aligned} k_s = \frac{\omega_s}{\omega_n} &\approx \frac{\beta}{2}, \quad k_n = \frac{\omega_n}{\omega_0} \approx \frac{2}{\beta}, \\ \text{или} \quad \omega_s &\approx \omega_0^2 \frac{\theta}{4}, \quad \omega_n \approx \frac{4}{\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Семейство рис. 8 имеет еще одну интересную особенность. Оказывается, что точки пересечения кривых с линией $v_u = \frac{1}{\sqrt{2}}$ фиксируют значения корней характеристического многочлена в уравнениях (19), (20). Это легко доказывается. Из (1) видно, что корни характеристического уравнения в безразмерных координатах

$$k_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 1};$$

при больших β они стремятся к значениям

$$k_2 = -2\beta \text{ и } k_1 = -\frac{1}{2\beta},$$

ибо $k_1 k_2 = 1$. Подставив последние значения в (20) и учитывая, что

$$\left| k_2 \right| \gg \left| \frac{1}{k_2} \right| \text{ и } \left| \frac{1}{k_1} \right| \gg \left| k_1 \right|$$

находим:

$$(v_u)_{k=k_1} = (v_u)_{k=k_2} = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (24)$$

Отсюда вытекает важный для практики метод опытного определения параметров ω_0 и β переспокоенного прибора: надо снять амплитудно-частотную характеристику $A = \varphi(f)$ при значениях тока, линейно увеличивающихся с частотой. Эта характеристика будет подобна одной из кривых рис. 8. Наибольшая ордината $A = A_m$ определит точку $f = f_0$; $v_u = 1$. Однако найти эту точку на непосредственно снятой кривой очень трудно, так как кривая при больших β не имеет резко выраженного максимума. Тогда следует пересечь кривую линией $\frac{A_m}{\sqrt{2}} = \text{const}$ и найти согласно (24) частоты f_1 и f_2 . По ним и определяется первый искомый параметр $\omega_0 = 2\pi \sqrt{f_1 f_2}$.

Второй параметр β находится из соотношения $\theta = \frac{2\beta}{\omega_0}$. Что касается постоянной времени θ , то ее можно измерить многими способами, например по „времени половины отклонения“, по времени сдвига на низких частотах (см. выше); по частоте f_1 , ибо $\theta \approx \frac{1}{2\pi f_1}$; по соотношению между баллистической и токовой чувствительностями прибора $\frac{S_E}{S_i} = \frac{1}{\theta}$.

Для решения задач динамики необходимо знать также и фазовые свойства характеристики $v_u = f(k)$. Общий подход здесь аналогичен описанному выше для воспроизводящих приборов. Надо выбрать некоторое, одинаковое для всех гармоник Q , идеальное время сдвига $(n_c)_u$ и сравнить с ним во всем диапазоне частот действительное время сдвига

$$n_c = \frac{\varphi}{\omega \theta} = \frac{\varphi}{2\beta k},$$

где согласно (20)

$$\varphi = \arctg \frac{1}{2\beta} \left(k - \frac{1}{k} \right).$$

Наибольшая разница в величинах $(n_c)_u$ и n_c позволит установить по формуле типа (16) эквивалентную амплитудную погрешность. Расчеты показывают что при таком подходе требования к полосе частот интегрирования с точки зрения фазовой характеристики получаются не более жесткими, чем по амплитудной, поэтому при отсутствии особых технических условий рабочую полосу интегрирующего прибора можно выбирать по амплитудной характеристике (рис. 8).

Рассмотрим теперь в качестве примера негармонического воздействия задачу измерения прибором величины Q . Сначала заметим, что очень короткий импульс тока интегрируется при любой степени успокоения прибора, а коэффициент преобразования, представляющий собой в данном частном случае баллистическую чувствительность,

$$S_B = \frac{\alpha_B}{Q} = S_{i\omega_0} e^{-\frac{x}{\text{th } x}}, \text{ где } x = \text{arth } \frac{V\beta^2 - 1}{\beta}.$$

Эта формула не учитывает зависимости α_B от формы и длительности импульса, вследствие чего при пользовании ею получаются баллистические погрешности [Л. 4].

Известно, что последние при прочих равных условиях тем меньше, чем сильнее успокоение прибора. Физическая сторона здесь понятна: при росте β значение S_B стремится к $S_Q = \frac{S_i}{\theta}$ (рис. 4), значит прибор начинает теперь выполнять функцию следящего интегрирования.

По причинам, которые раньше указывались, будем искать погрешности измерения Q для четырех форм импульса (табл. 2). Методику поясним на примере прямоугольного импульса. Выражая Q через амплитуду тока и время, получим при $I=1$ на границе импульса $Q = T_u$.

Идеальное интегрирование (22) дает $\alpha_0 = \frac{S_i}{\theta} Q = \frac{S_i}{\theta} T_u$. Вводим опять параметр $\Delta = \frac{T_u}{\theta}$. Тогда $\alpha_0 = S_i \Delta$. Действительная реакция прибора выражается приближенной формулой (табл. 2)

$$\alpha = S_i (1 - e^{-\Delta \lambda}).$$

На границе импульса, т. е. при $\lambda = 1$,

$$\alpha = S_i (1 - e^{-\Delta}).$$

В этом выражении экспоненту $e^{-\Delta}$ заменяем рядом $e^{-\Delta} = 1 - \Delta + \frac{\Delta^2}{2} + \dots$, после чего получаем $\alpha = S_i \left(\Delta - \frac{\Delta^2}{2} \right)$. Теперь находим относительную погрешность интегрирования импульса

$$f_u = \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_0} \approx \frac{\Delta}{2}.$$

Подобным методом были найдены приближенные значения погрешностей для всех форм импульсов. Они оказались: для прямоугольника и синусоиды $f_u = \frac{\Delta}{2}$, для треугольника $f_u \approx \frac{\Delta}{3}$; для экспоненты $f_u \approx \Delta$. Как показали специальные проверочные расчеты, при больших β и малых Δ (порядка нескольких процентов) эти зна-

чения отличаются от истинных значений погрешностей интегрирования на величины второго порядка малости. Ввиду того, что на практике форма импульса может быть неизвестной, рекомендуем выбирать допустимую длительность импульса по наибольшей из полученных погрешностей:

$$f_u = \frac{T_u}{\theta} 100. \quad (25)$$

Наряду с (23) этот критерий дает вполне определенную и очень важную характеристику разрешающей способности интегрирующего прибора.

Изложенная теория показывает, что к интегрирующим приборам можно отнести все устройства с частотной характеристикой типа (20) при больших значениях параметра β . К ним принадлежат, например, флюксметр, регистратор сейсмометра, интегрирующий усилитель вибратора, переуспокоенный вязкой жидкостью вибратор осциллографа; нормальный вибратор в сочетании со специальной корректирующей приставкой, фотоэлектрооптический усилитель с гальванометром на входе, корректированный обратной связью.

Приборы следящего интегрирования снабжаются устройством для записи выходной величины. По документу регистрации легко найти динамические погрешности интегрирования.

Входная величина i и выходная α связаны дифференциальным уравнением (18); интегрируя обе части этого уравнения и вводя подстановку $S_Q = \frac{S_i}{\theta}$, получаем:

$$\frac{1}{\theta} \int_0^t \alpha dt + \alpha = S_Q [q(t) - q(0)]. \quad (26)$$

Из (26) видно, что для определения мгновенных погрешностей надо по записи построить интегральную кривую и, учтя масштаб, разделить ее ординаты на θ . Это дает первый член (26), который и представляет собой динамическую погрешность интегрирования в функции времени.

Литература

1. Харкевич. О применении критерия квадратичной погрешности к оценке линейных искажений (приложение). ЖТФ, т VII, вып. 5, 1937.
2. Б. П. Козырев. Фотоэлектрооптический усилитель. Успехи физических наук, т. XLIV, вып. 2, июнь, 1951.
3. А. Г. Калашников. Флюксметр. Изд. АН СССР, 1949.
4. Р. Р. Харченко. Импульсная реакция приборов магнитоэлектрической системы. Электричество, № 5, 1953.

[15. 4. 1955]



Влияние допусков на стабильность характеристик тяговых двигателей и электровозов

Кандидат техн. наук доц. И. П. ИСАЕВ

Москва

Выполнение планов дальнейшего развития электрификации железных дорог требует решения ряда вопросов, связанных с созданием новых типов электровозов и улучшением использования мощности существующих. Одним из таких вопросов является обоснование допусков на характеристики тяговых двигателей.

Известно, что характеристики тяговых двигателей, снятые на стендах завода-изготовителя, всегда несколько отличаются от номинальной, предусмотренной техническими условиями на поставку электровозов.

Известные до сих пор исследования характеристик тяговых двигателей [Л. 6 и 7] не касались причин этих отклонений, а сами отклонения рассматривались, как нечто, не поддающееся строгому научному исследованию и обоснованию.

В настоящей работе приводится решение этой задачи; в ней предлагается общий метод установления и оценки заводских допусков, основанный на принципах математической статистики и подтвержденный исследованием материалов, полученных при заводских испытаниях тяговых двигателей и при паспортных испытаниях электровозов ВЛ-22М.

Предлагаемый метод позволяет, в частности, решать две практически важные задачи: а) при заданном расхождении характеристик тяговых двигателей определить возможные допуски на основные параметры тягового двигателя либо б) по принятым заводским допускам установить величину расхождения характеристики тягового двигателя от номинальной. Сущность метода заключается в том, что действительные значения параметров, определяющих характеристики двигателя, рассматриваются как случайные величины, распределенные по нормальному закону, с математическим ожиданием и стандартным отклонением этих параметров относительно его.

Согласно этому общее выражение характеристики X независимых переменных v, w, \dots, z с их математическими ожиданиями $\bar{v}, \bar{w}, \dots, \bar{z}$ и соответствующими малыми отклонениями k, l, \dots, q может быть представлено с точностью до второго порядка малости в виде:

$$X(v, w, \dots, z) = X(\bar{v}, \bar{w}, \dots, \bar{z}) \pm \sigma, \quad (1)$$

где

$$\sigma^2 = \left(\frac{\partial \bar{X}}{\partial v}\right)^2 k^2 + \left(\frac{\partial \bar{X}}{\partial w}\right)^2 l^2 + \dots + \left(\frac{\partial \bar{X}}{\partial z}\right)^2 q^2. \quad (2)$$

Понимая в уравнении (1) под математическим ожиданием функции $X(\bar{v}, \bar{w}, \dots, \bar{z})$ соответствующую номинальную характеристику тягового двигателя, на основании уравнения (2) можно получить величину σ отклонения этой характеристики от номинальной в зависимости от случайных отклонений ее параметров.

Параметрами характеристик тяговых двигателей являются напряжение, ток, сопротивление

и т. п., поэтому и отклонение действительных характеристик тягового двигателя от номинальных будет определяться отклонениями в значениях этих переменных.

Однако необходимо иметь в виду, что каждый из этих параметров является в свою очередь функцией многих случайных величин, зависящих как от свойств исходных материалов, идущих на изготовление деталей двигателя, так и от технологических процессов изготовления отдельных узлов и сборки двигателя в целом. Сумма их подчиняется вполне определенному, нормальному закону.

Чтобы в этом убедиться, ниже приводятся результаты обработки материалов заводских испытаний тяговых двигателей ДПЭ-340 и ДПЭ-400.

Данные статистического распределения отклонений характеристик ранее выпускаемых двигателей ДПЭ-340 и ДПЭ-340А были приведены А. В. Бычковским [Л. 7], полученные в результате анализа характеристик более 900 двигателей. На основании этих данных на рис. 1 пунктиром нанесена кривая нормального распределения, которая достаточно близко совпадает с графиком распределения опытных данных, представленным сплошной линией.

На оси абсцисс отложены отклонения скорости (%) двигателей от номинальной, а на оси ординат — повторения (%) их среди имеющихся опытных данных.

Для установления закона распределения отклонений характеристик выпускаемых в настоящее время тяговых двигателей ДПЭ-400А были использованы материалы заводских испытаний 570 двигателей этого типа, полученные на заводе им. Буденного в 1953 г.

Результаты обработки опытных данных методами математической статистики приведены в табл. 1. На рис. 2 сплошной линией представлен график распределения отклонений опытных характеристик двигателей и пунктиром — кривая нормального распределения, которые оказываются достаточно близкими друг другу.

Таким образом, можно считать установленным на основании статистической обработки заводских материалов испытаний около 1500 тяговых двигателей, что отклонения характеристик их подчиняются закону нормального распределения, что подтверждает справедливость предлагаемого метода оценки расхождения характеристик двигателей.

Отклонение скоростной характеристики тяговых двигателей от номинальной. Скоростная электрохимическая характеристика тягового двигателя определяется уравнением

$$n = \frac{U - I \Sigma r}{c \Phi}, \quad (3)$$

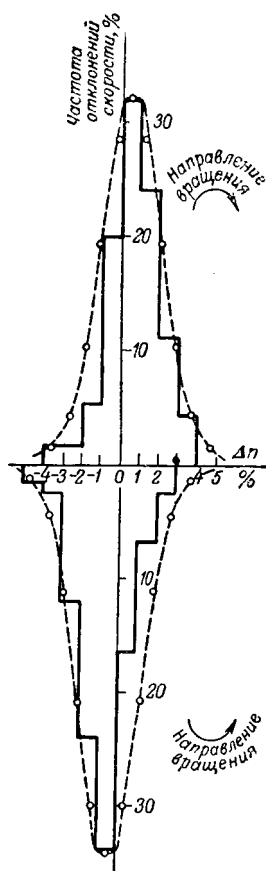


Рис. 1. Распределение отклонений скоростных характеристик 900 двигателей ДПЭ-340 по данным завода «Динамо» им. Кирова и МЭМРЗ.

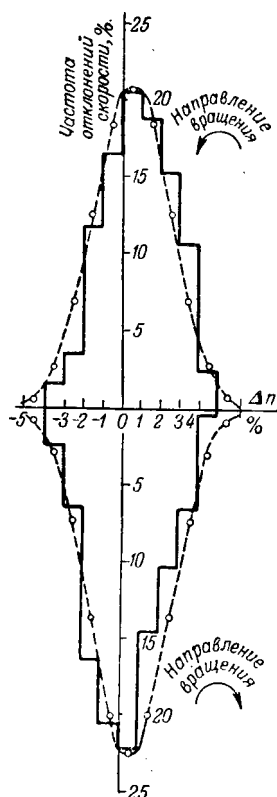


Рис. 2. Распределение отклонений скоростных характеристик 570 двигателей ДПЭ-400А по данным завода им. Буденного.

из которого следует, что скорость есть функция действительных значений величин U , I , r и Φ .

Для данного двигателя действительное значение каждого из этих параметров можно рассматривать как сумму его номинального значения и случайного отклонения относительно номинального:

$$n = \bar{n} \pm \sigma_n; I = \bar{I} \pm \sigma_I; r = \bar{r} \pm \sigma_r;$$

$$\Phi = \bar{\Phi} \pm \sigma_\Phi; U = \bar{U} \pm \sigma_U,$$

где \bar{n} , \bar{I} , \bar{r} , $\bar{\Phi}$ и \bar{U} — номинальные значения соответствующих величин;
 σ_n , σ_I , σ_Φ и σ_U — случайные отклонения.

Величина σ_I обусловлена погрешностью измерения тока двигателя.

На основании уравнения (2), определяющего полное отклонение функции от ее номинального значения при случайных отклонениях параметров, можно записать следующее приближенное выражение для квадрата отклонения скоростной характеристики двигателя от номинальной:

$$\sigma_n^2 = \left(\frac{\partial n}{\partial I} \right)^2 \sigma_I^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right)^2 \sigma_r^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial \Phi} \right)^2 \sigma_\Phi^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial U} \right)^2 \sigma_U^2. \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) значения производных, найденных из уравнения (3), получим:

$$\sigma_n^2 = \left(\frac{\bar{r}}{c\bar{\Phi}} \right)^2 \sigma_I^2 + \left(\frac{\bar{I}}{c\bar{\Phi}} \right)^2 \sigma_r^2 + \left(\frac{\bar{U} - \bar{I}\bar{\Sigma}r}{c\bar{\Phi}^2} \right)^2 \sigma_\Phi^2 + \left(\frac{1}{c\bar{\Phi}} \right)^2 \sigma_U^2. \quad (5)$$

Отсюда следует, что в общем случае отклонение скоростной характеристики есть величина переменная, зависящая от режима работы двигателя. Поскольку в процессе ведения поезда могут изменяться ток, сопротивление, магнитный поток двигателя и напряжение контактной сети, то отклонение скоростной характеристики от номинальной будет различным при разных режимах работы двигателя.

Таким образом, уравнение (5) функционально связывает частные допуски σ_I , σ_r , σ_Φ , σ_U с полным допуском на скоростную характеристику тягового двигателя в двигательном режиме.

Практически, однако, удобнее пользоваться относительными или процентными допусками, которые определяются как отношение $\sigma_{n0} = \sigma_n / \bar{n}$.

Тогда, разделив обе части уравнения (5) на \bar{n} , получим величину относительного отклонения скоростной характеристики тягового двигателя от номинальной

Таблица 1

| Пределы изменения скорости, об/мин | 682...689 | 689...696 | 696...703 | 703...710 | 710...717 | 717...724 | 724...731 | 731...738 | 738...745 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Расхождение, % | —4 | —3 | —2 | —1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Частота отклонений скорости при вращении двигателей против часовой стрелки, % | 1,6 | 3,5 | 11,9 | 16,2 | 20,5 | 18,2 | 15,2 | 10,6 | 2,3 |
| То же, при вращении двигателей по часовой стрелке, % | 2,5 | 6,4 | 16,5 | 20,7 | 22,3 | 14,2 | 10,3 | 6,7 | 0,4 |

$$\sigma_{n0}^2 = \left(\frac{1}{\left(\frac{\bar{U}}{\bar{I}\Sigma r} - 1 \right)^2} \right) (\sigma_{r0}^2 + \sigma_{I0}^2) + \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{\bar{I}\Sigma r}{\bar{U}} \right)^2} \right) \sigma_{u0}^2 + \sigma_{\Phi 0}^2, \quad (6)$$

где

$\sigma_{r0} = \sigma_r / \bar{r}$; $\sigma_{I0} = \sigma_I / \bar{I}$; $\sigma_{u0} = \sigma_u / \bar{U}$; $\sigma_{\Phi 0} = \sigma_{\Phi} / \bar{\Phi}$ — частные относительные допуски.

Значения коэффициентов в скобках зависят от номинального режима, применительно к которому определяют отклонение характеристик, а также и от схемы соединения двигателей (от номинальной величины \bar{U}).

Поскольку ГОСТ 2582-50 нормирует отклонения при часовом режиме, то определение значений коэффициентов будем производить при соответствующих нагрузках.

Обозначим:

$$a^2 = \frac{1}{\left(\frac{\bar{U}}{\bar{I}\Sigma r} - 1 \right)^2} \text{ и } b^2 = \frac{1}{\left(1 - \frac{\bar{I}\Sigma r}{\bar{U}} \right)^2}.$$

Для электровоза ВЛ-22М при часовом режиме имеем:

а) при последовательном соединении двигателей

$$U_c = 500 \text{ в}; \bar{I} = 290 \text{ а}; \Sigma \bar{r} = 0,228 \text{ ом};$$

б) при параллельно-последовательном соединении двигателей

$$U_{cn} = 1000 \text{ в}; \bar{I} = 290 \text{ а}; \Sigma \bar{r} = 0,228 \text{ ом};$$

в) при параллельном соединении двигателей

$$U_n = 1500 \text{ в}; \bar{I} = 290 \text{ а}; \Sigma \bar{r} = 0,228 \text{ ом}.$$

Полученные расчетом коэффициенты a и b сведены в табл. 2.

Таблица 2

| Коэф- фициенты | Последовательное соединение двигателей | Параллельно-по- следовательное соединение двигателей | Параллельное соединение двигателей |
|-------------------|--|---|--|
| a^2 | 0,145 ² | 0,0677 ² | 0,0441 ² |
| b^2 | 1,154 ² | 1,070 ² | 1,045 ² |

Относительное отклонение скоростной электромеханической характеристики тягового двигателя от номинальной при часовом режиме определится:

а) при последовательном соединении двигателей

$$\sigma_{n0}^2 = 0,145^2 (\sigma_{r0}^2 + \sigma_{I0}^2) + 1,154 \sigma_{u0}^2 + \sigma_{\Phi 0}^2;$$

б) при последовательно-параллельном соединении двигателей:

$$\sigma_{n0}^2 = 0,0677^2 (\sigma_{r0}^2 + \sigma_{I0}^2) + 1,070 \sigma_{u0}^2 + \sigma_{\Phi 0}^2;$$

в) при параллельном соединении двигателей

$$\sigma_{n0}^2 = 0,0441^2 (\sigma_{r0}^2 + \sigma_{I0}^2) + 1,045 \sigma_{u0}^2 + \sigma_{\Phi 0}^2.$$

Из сопоставления приведенных уравнений следует, что наибольшее отклонение скоростной характеристики двигателей от номинальной при часовом режиме и шестимоторной схеме следует ожидать при последовательном соединении двигателей и наименьшее — при параллельном соединении.

Следует иметь в виду, что ГОСТ 2582-50 нормирует отклонения характеристик при условии постоянства напряжения, т. е. при $\sigma_{u0} = 0$. Кроме того, практически в силу малости коэффициента a влиянием частных допусков σ_{r0} и σ_{I0} на отклонение скоростной характеристики тяговых двигателей можно пренебречь; тогда

$$\sigma_{n0}^2 = \sigma_{\Phi 0}^2. \quad (7)$$

Практически это означает, что отклонение скоростной электромеханической характеристики тяговых двигателей от номинальной определяется при постоянстве напряжения сети прежде всего отклонением в насыщении машины.

Чтобы перейти теперь от полного относительного допуска на скоростную электромеханическую характеристику двигателя к полному относительному допуску на скоростную электро-тяговую характеристику, необходимо учесть, что скорость движения колеса связана со скоростью вращения двигателя соотношением:

$$v = 0,188 \frac{Dn}{\mu} [\text{км/час}], \quad (8)$$

где D — диаметр колеса, м;

n — скорость вращения двигателя, об/мин;

μ — передаточное число.

Скорости движения колес и вращения двигателя, а также диаметр колес можно представить в виде суммы соответствующих номинальных величин и случайных отклонений:

$$v = \bar{v} \pm \sigma_v; n = \bar{n} \pm \sigma_n; D = \bar{D} \pm \sigma_D.$$

Полное отклонение σ_v скоростной электро-тяговой характеристики электровоза определится из уравнения

$$\sigma_v^2 = \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{D}} \sigma_D^2 + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{n}} \sigma_n^2 = \left(\frac{0,188}{\mu} \right)^2 (\bar{n}^2 \sigma_D^2 + \bar{D} \sigma_n^2). \quad (9)$$

Таким образом установлена функциональная связь между допуском σ_v на скоростную электро-тяговую характеристику с допуском σ_n на скоростную электромеханическую характеристику и допуском σ_D на диаметр колеса.

Так как в процессе работы на линии скорость вращения двигателя изменяется, то отклонение σ_v электро-тяговой характеристики будет переменной величиной.

Практически проще оценить соответствующие относительные допуски

$$\sigma_{v0} = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}; \sigma_{D0} = \frac{\sigma_D}{\bar{D}}.$$

Разделив правую и левую части уравнения (9) на σ , получим:

$$\sigma_{v0}^2 = \sigma_{n0}^2 + \sigma_{D0}^2. \quad (10)$$

Из этого уравнения следует, что отклонение электротяговой характеристики от номинальной будет заведомо больше величины σ_{n0} , установленной требованиями „Технических условий“ завода им. Буденного в 1953 г.; σ_{v0} может быть равно σ_{n0} только в том случае, если $\sigma_{D0} = 0$, т. е. при номинальном диаметре колеса электровоза. А так как согласно существующим нормам МПС СССР допускается разница в диаметрах колес 15 мм, то заведомо будет $\sigma_{v0} > \sigma_{n0}$. Так, если $\sigma_{n0} = 0,03$, $\sigma_{D0} = 0,012$, то оказывается, что $\sigma_{v0} = 0,032$, т. е. увеличивается разброс характеристик, что ведет к снижению использования мощности электровоза.

При эксплуатации приходится по различным причинам производить смену тяговых двигателей. При этом обычно оказывается, что отклонения одних двигателей отличны от отклонений других. Поэтому приобретает практический интерес решение задачи об уменьшении разброса характеристик двигателей, отнесенных к ободу колеса, за счет подбора соответствующих диаметров колесных пар в пределах от номинального (1200 мм) до предельно изношенного (1130 мм).

Таблица 3

| σ_{n0} , % | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| n , об/мин | 689 | 696 | 703 | 710 | 717 | 724 | 731 |
| D , мм | 1200 | 1189 | 1177 | 1165 | 1153 | 1141 | 1130 |

В табл. 3 приведены результаты подбора, проведенного на основании уравнения (10), диаметров колесных пар для случая, когда отклонения скоростных электромеханических характеристик тяговых двигателей лежат в допустимых по „Техническим условиям“ пределах, а именно $\sigma_{n0} = \pm 0,03$.

Если каждому двигателю подобрать по табл. 3 соответствующий диаметр бандажа колесной пары, то все оси электровоза будут иметь одинаковые скоростные электротяговые характеристики, определяемые в рассматриваемом примере диаметром 1165 мм и, следовательно, одинаковые нагрузки, что позволит повысить использование мощности электровоза.

Табл. 3 может быть применена для подбора диаметров бандажей колесных пар и для других диапазонов отклонений скоростных электромеханических характеристик тяговых двигателей, не превышающих 6%, путем соответствующего продолжения двух верхних строк

и смещения нижней ее строки таким образом, чтобы диаметр бандажа 1200 мм оказался у наиболее тихоходной колесной пары. Тогда из условия $\sigma_{n0} = 0$ определится приведенный диаметр бандажа для характеристики всего электровоза.

Отклонения электромеханической характеристики тяговых двигателей от номинальной. Электромеханическая тяговая характеристика двигателя определяется уравнением

$$M = c_1 \Phi I \eta, \quad (11)$$

т. е. является функцией значений Φ , I , η с их случайными отклонениями от номинального.

Обозначим:

$$M = \bar{M} \pm \sigma_M; \quad \eta = \bar{\eta} \pm \sigma_\eta.$$

Величина отклонения от номинальной электромеханической тяговой характеристики двигателя определится в первом приближении уравнением

$$\sigma_M^2 = \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial I}\right)^2 \sigma_I^2 + \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial \Phi}\right)^2 \sigma_\Phi^2 + \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial \eta}\right)^2 \sigma_\eta^2. \quad (12)$$

Подставляя значения частных производных, найденные из уравнения (11), получим полное отклонение тяговой характеристики от номинальной

$$\sigma_M^2 = (c_1 \bar{\Phi} \bar{\eta})^2 \sigma_I^2 + (c_1 \bar{I} \bar{\eta})^2 \sigma_\Phi^2 + (c_1 \bar{\Phi} \bar{I})^2 \sigma_\eta^2. \quad (13)$$

Отсюда следует, что отклонение тяговой характеристики от гарантийной зависит от режима работы двигателя, т. е. от величин Φ , I и η , относительно которых это отклонение определяется.

Таким образом, оказываются функционально связанными частные допуски по току, магнитному потоку и к. п. д. двигателя с полным допуском на тяговую характеристику.

Практически, однако, и здесь удобнее пользоваться относительным отклонением $\sigma_{M0} = \sigma_M / \bar{M}$.

Обозначив

$$\sigma_{\eta 0} = \frac{\sigma_\eta}{\bar{\eta}},$$

из уравнения (13) после почленного деления его на (11) получим:

$$\sigma_{M0}^2 = \sigma_{I0}^2 + \sigma_{\Phi 0}^2 + \sigma_{\eta 0}^2; \quad (14)$$

или с учетом уравнения (7):

$$\sigma_{M0}^2 = \sigma_{n0}^2 + \sigma_{v0}^2 + \sigma_{I0}^2, \quad (15)$$

т. е. допуск на тяговую характеристику оказывается функционально связанным с допуском на скоростную характеристику, допуском на к. п. д. двигателя и допуском по току.

ГОСТ 2582-50 нормируется *полный допуск на отклонение тяговой характеристики при часовом режиме $\sigma_{M0} = \pm 0,05$.

Из уравнения (15) следует, что при этом режиме максимально допустимому полному отклонению скоростной характеристики двигателя $\sigma_{n0} = 0,03$ соответствует суммарное откло-

нение к. п. д. двигателя и его тока, равное $\sigma_{M0}^2 - \sigma_{n0}^2 = 0,05^2 - 0,03^2 = 0,16$.

При снятии характеристик двигателя на стенде для регистрации тока обычно пользуются приборами класса 0,5; следовательно, $\sigma_{I0} = \pm 0,005$. Тогда допуск на к. п. д. двигателя определится как $\sigma_{\eta 0}^2 = 0,16 - 0,0025 = 0,1575$, т. е. $\sigma_{\eta 0} = \pm 3,96\%$.

При больших расхождениях в значении к. п. д. двигателей электромеханическая тяговая характеристика уже выйдет за пределы $\pm 5\%$ по отношению к номинальной.

Из уравнения (15) также следует, что для получения заданной стабильности характеристик тягового двигателя необходимо нормировать отклонения к. п. д. Однако эта величина нормативами ГОСТ 2582-50 не устанавливается.

Из уравнения (15) следует, что требование $\sigma_{n0} = \sigma_{M0} = \pm 0,05$ может быть выполнено только при условии, что расхождение в к. п. д. двигателей и расхождение по току равны нулю, т. е. $\sigma_{\eta 0} = \sigma_{I0} = 0$. Практически это условие невыполнимо, а поэтому и предельные требования $\sigma_{n0} = \sigma_{M0}$ ставить нецелесообразно.

Чтобы перейти от электромеханической характеристики тягового двигателя к электровозной, следует учесть, что сила тяги на ободе колеса и момент на валу тягового двигателя связаны соотношением:

$$F = \frac{2M\mu}{D} \eta_p, \quad (16)$$

где η_p — к. п. д. передачи.

Полагая, что в выражении (16) параметры имеют случайные отклонения от своих номинальных значений, обозначим:

$$F = \bar{F} \pm \sigma_F; \quad \eta_p = \bar{\eta}_p \pm \sigma_p.$$

Отклонение электротяговой характеристики, отнесенной к ободу колеса, определится из уравнения

$$\sigma_F^2 = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{M}} \right)^2 \sigma_M^2 + \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{D}} \right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{\eta}_p} \right)^2 \sigma_p^2. \quad (17)$$

Подставляя в это уравнение найденные из (16) значения частных производных, получим:

$$\sigma_F^2 = \left(\frac{2\mu \bar{\eta}_p}{\bar{D}} \right)^2 \sigma_M^2 + \left(\frac{2\bar{M} \mu \bar{\eta}_p}{\bar{D}^2} \right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{2\bar{M} \mu}{\bar{D}} \right)^2 \sigma_p^2. \quad (18)$$

Нагляднее оценить связь относительных отклонений этих параметров

$$\sigma_{F0} = \sigma_F / \bar{F}; \quad \sigma_{p0} = \sigma_p / \bar{\eta}_p.$$

Тогда на основании уравнения (18) можно установить, что относительное отклонение тя-

гового усилия электровоза от номинального значения определяется уравнением

$$\sigma_{F0}^2 = \sigma_{M0}^2 + \sigma_{D0}^2 + \sigma_{p0}^2. \quad (19)$$

Используя уравнения (10) и (14), получим:

$$\sigma_{F0}^2 = \sigma_{v0}^2 + \sigma_{\eta 0}^2 + \sigma_{p0}^2 + \sigma_{I0}^2. \quad (20)$$

При определении величины σ_{I0} , входящей в это уравнение, следует иметь в виду, что при движении электровоза двигателя, имеющие различные отклонения скоростных характеристик от номинальной, должны развивать одинаковую скорость. Поскольку это вызывает различные токи в параллельно включенных цепях двигателей (при параллельном и параллельно-последовательном соединениях), их тяговые усилия будут различны.

Установим возможную предельную разницу в токах двигателей при известном отклонении их скоростных характеристик.

Из уравнения скоростной характеристики двигателя отклонение тока равно:

$$\sigma_I = \frac{1}{\frac{\partial n}{\partial I}} \sigma_n. \quad (21)$$

При часовом и больших токах практически можно считать, что поток двигателя пропорционален току. Полагая поэтому в уравнении (3)

$$c\Phi = c\Phi_{vac} + kI,$$

найдем:

$$\frac{\partial n}{\partial I} = - \frac{rc\Phi_{vac} + kI}{(c\Phi_{vac} + kI)^2}. \quad (22)$$

Подставляя найденное значение производной в выражение (21), найдем предельно возможное расхождение токов в параллельных цепях двигателей:

$$\sigma_I = - \frac{(c\Phi_{vac} + kI)^2}{rc\Phi_{vac} + kU} \sigma_n$$

или в относительных единицах

$$\sigma_{I0} = - \frac{(c\bar{\Phi}_{vac} + k\bar{I})^2}{rc\bar{\Phi}_{vac} + k\bar{U}} \cdot \frac{\bar{n}}{\bar{I}} \sigma_{n0}. \quad (23)$$

Отсюда следует, что отклонение в токах параллельных цепей двигателей при неизменном отклонении скоростной характеристики растет с увеличением нагрузки и уменьшается при наличии в них добавочных сопротивлений и повышения напряжения на зажимах двигателей.

В табл. 4 приведены в качестве примера результаты подсчета по уравнению (23) возможных предельных отклонений в токах параллельных цепей двигателей при неизменном предельном отклонении скоростной характеристики

Таблица 4

| Соединение двигателей | Ток двигателя, а | $\pm \sigma_{I0}$, % | $\pm \sigma_I$, а | $\pm \sigma_{F0}$, % | $\pm \sigma_F$, кг |
|------------------------------|------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| Параллельно-последовательное | 290 | 23,4 | 68 | 23,5 | 940 |
| | 390 | 19,2 | 75 | 19,5 | 1 150 |
| | 490 | 17,1 | 84 | 17,4 | 1 320 |
| Последовательное | 290 | 17,0 | 49 | 17,5 | 700 |
| | 390 | 14,0 | 54 | 14,5 | 840 |
| | 490 | 12,4 | 61 | 13,0 | 1 000 |

$\sigma_n = 0,03 \cdot 710 = 21,3$ об/мин при следующих исходных данных:

$$c\bar{\Phi}_{\text{час}} = 2,02 \text{ в} \cdot \text{об/мин};$$

$$\bar{k} = \frac{\Delta c\Phi}{\Delta I} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ ом} \cdot \text{об/мин}; \quad \bar{r} = 0,228 \text{ ом};$$

$$\bar{U}_{cn} = 1 000 \text{ в}; \quad \bar{U}_n = 1 500 \text{ в}.$$

Из рассмотрения табл. 4 следует, что отклонения электротяговых характеристик двигателя, отнесенных к ободу колеса, оказываются всегда больше отклонений электромеханических характеристик, снятых на валу двигателя. При использовании мощности электровоза в условиях эксплуатации с их величинами приходится считаться.

С целью повышения использования мощности электровоза следует подбирать на основании уравнения (15) соответствующие диаметры колес в зависимости от отклонения скоростной характеристики данного двигателя, стабилизируя скоростные характеристики за счет уменьшения величины σ_{v0} .

Этим самым снижается разница σ_{I0} в токах двигателей и, следовательно, уменьшается разброс σ_{F0} их тяговых характеристик.

Выводы. 1. При определении характеристик двигателя и электровоза следует учитывать функциональную связь между отдельными допусками. Отклонения характеристик электровоза от

номинальных в действительности оказывается больше, чем отклонения соответствующих характеристик тяговых двигателей. В каждом конкретном случае эти величины могут быть подсчитаны по приведенным в данной работе уравнениям.

2. Для обеспечения большей стабильности характеристик тягового двигателя следует дополнить нормативы ГОСТ 2582-50 допуском на к. п. д. двигателя.

3. В ГОСТ 2582-50 следует изменить пункт, предусматривающий пределы относительных отклонений скоростной и тяговой электромеханических характеристик двигателей, так как это условие неосуществимо.

4. Поскольку отклонения характеристик тягового двигателя от номинальной зависят от режима его работы, целесообразно для лучшего использования мощности электровоза нормировать отклонения характеристик в дополнение к существующим требованиям ГОСТ 2582-50 еще при нагрузках, близких к пределу по сцеплению (450 ... 500 а).

5. Для повышения использования мощности электровозов целесообразно использовать решение уравнения (10) для подбора соответствующих диаметров колес, руководствуясь разобранным в работе примером.

Литература

1. П. Н. Шляхто и Д. Д. Захарченко. Тяговые электродвигатели. Трансжелдориздат, 1951.
2. Б. Н. Тихменев и Л. М. Трахтман. Подвижной состав электрических железных дорог. Трансжелдориздат, ч. 3, 1951.
3. Н. А. Бородачев. Основные вопросы теории точности производства. Издательство АН СССР, 1950.
4. Б. В. Гнеденко. Курс теории вероятностей. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950.
5. М. Ф. Маликов. Основы метрологии. Трудрезервиздат, ч. I, 1949.
6. Д. К. Минов. Роль скольжения колес при реализации тягового усилия и структура коэффициента сцепления при электрической тяге. Известия АН СССР (Отделение технических наук), № 4, 1947.
7. А. В. Бычковский. Расхождение характеристик тяговых двигателей и использование сцепного веса на электровозах постоянного тока. Электричество, № 3, 1948.

[10.2. 1955]



О применении схемы куметра для измерения малых добротностей¹

Доктор техн. наук, проф. А. В. НЕТУШИЛ

Согласно распространенному мнению, схема измерителя добротности — куметра, — нашедшего широкое распространение в практике исследования потерь в диэлектриках и в радиотехнических измерениях, применима только для измерения параметров элементов электрических цепей, обладающих высокими добротностями. Если иногда это прямо и не говорится, то во всяком случае подразумевается, так как вывод основных

соотношений, позволяющих рассчитать емкость и добротность образца, основан на допущении, что $\operatorname{tg} \delta$ образца много меньше единицы [Л. 1, 2, 5]. Также, говоря о схеме куметра, обычно в качестве условия для вывода основных соотношений куметра пренебрегают значением добавочного сопротивления R источника питания колебательного контура (рис. 1) в сравнении с сопротивлением остальной части контура [Л. 1].

Задача настоящей заметки — показать на основе теории преобразования электрических цепей, что схема куметра позволяет измерять

¹ Доложено в январе 1954 г. на секции электротермии МОНИТОЭ.

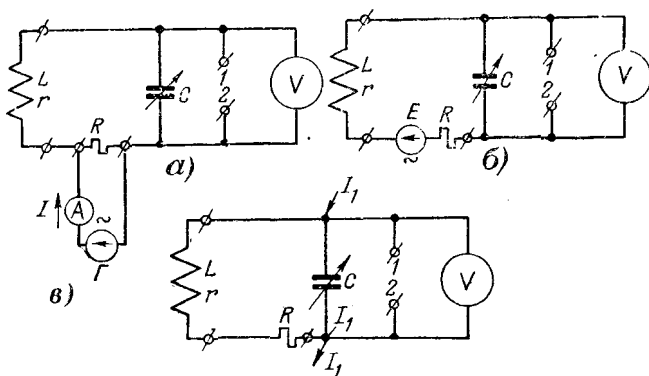


Рис. 1. Принципиальная схема куметра (а) и его эквивалентные схемы после преобразования (б, в).

E — высокочастотный генератор; R — постоянное безиндуктивное сопротивление; L, r — сменная катушка индуктивности; C — градуированный конденсатор переменной емкости; V — электронный вольтметр.

принципиально любые добротности, что при независимости режима работы генератора от емкости C величина добавочного сопротивления R также может быть любой и что основные уравнения куметра практически справедливы при любых параметрах нагрузки. Пределы измерения куметра ограничены не его схемой, а мощностью источника и точностью измерительной аппаратуры, применяемой в схеме.

Расширение пределов измерения приборов и повышение добавочного сопротивления R , от которого зависит мощность источника, позволяют при помощи схемы куметра измерять весьма малые добротности, что имеет большое значение при разработке методики измерения параметров полупроводящих материалов, угол потерь которых достигает 45° , а иногда и более высоких значений.

Принципиальная схема куметра представлена на рис. 1, а. Ток I высокочастотного генератора G поддерживается неизменным по амплитуде и частоте на протяжении всего измерения и его действующее значение измеряется амперметром A . Таким образом, высокочастотный генератор можно рассматривать как источник тока [Л. 3].

Для получения расчетных формул всю схему куметра левее конденсатора удобно преобразовать по известным правилам преобразования электрических цепей, сначала заменив источник тока источником напряжения

$$E = IR \quad (1)$$

(рис. 1, б), а затем, в свою очередь, заменив источник напряжения E источником тока

$$I_1 = \frac{E}{z}, \quad (2)$$

подключенным к зажимам 1, 2 (рис. 1, в), где

$$z = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}, \quad (3)$$

$$r_k = R + r, \quad (4)$$

$$x_k = \omega L.$$

Так как по определению добротность цепи r_k x_k равна отношению реактивного сопротивления к активному:

$$Q_k = \frac{x_k}{r_k}, \quad (5)$$

то

$$r_k = \frac{x_k}{Q_k}$$

и, следовательно,

$$z = x_k \sqrt{1 + Q_k^{-2}} = r_k \sqrt{1 + Q_k^2}. \quad (6)$$

Последовательное соединение индуктивного x_k и активного r_k сопротивлений можно преобразовать в параллельное соединение индуктивного сопротивления x_g и активного r_g :

$$x_g = \frac{z^2}{x_k} = r_k (Q_k + Q_k^{-1});$$

$$r_g = Q_k x_g = r_k (1 + Q_k^2). \quad (7)$$

После проведенных преобразований получена весьма удобная для анализа эквивалентная схема, представленная на рис. 2, а. Следует заметить, что все преобразования произведены без каких-либо ограничений, и схема а справедлива при любых значениях параметров цепи.

Если теперь изменять емкость C , то, очевидно, что при постоянстве тока I , а следовательно, и I_1 , максимум напряжения между зажимами 1 и 2 наблюдается по вольтметру V при резонансе токов, выражаемом равенством:

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C_1} = x_g. \quad (8)$$

При этом сопротивление между зажимами 1 и 2

$$z_{12} = r_g \quad (9)$$

и показание вольтметра

$$U_1 = I r_g = \frac{r_g}{z} E = \frac{r_g}{z} IR. \quad (10)$$

Обозначим отношение

$$\frac{U_1}{IR} = Q_1. \quad (11)$$

Шкала вольтметра V обычно градуирована таким образом, чтобы при известном постоянном значении IR непосредственно показывать Q_1 .

Подставив (10) в (11), получаем:

$$Q_1 = \frac{r_g}{z} \quad (12)$$

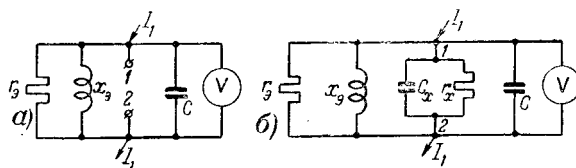


Рис. 2. Эквивалентная схема куметра.

или, учитывая (6) и (7),

$$Q_1 = \sqrt{Q_k^2 + 1}. \quad (13)$$

Таким образом, измерив Q_1 , легко подсчитать Q_k :

$$Q_k = \sqrt{Q_1^2 - 1}. \quad (14)$$

Обычно параметры катушки таковы, что $Q_k > 50$ и

$$Q_k \approx Q_1. \quad (15)$$

Для измерения емкости C_x и добротности Q_x испытуемого конденсатора его подключают к зажимам 1, 2 (рис. 1, б) и, изменяя емкость C , добиваются максимума напряжения между этими зажимами.

Максимум напряжения $U = U_2$ наступает при резонансе токов, когда

$$\frac{1}{\omega C} = x_g = \frac{1}{\omega(C_2 + C_x)} = \frac{1}{\omega C_1}.$$

Отсюда неизвестная емкость может быть сразу определена, как

$$C_x = C_1 - C_2. \quad (16)$$

Максимальное значение сопротивления между точками 1 и 2 теперь уже иное:

$$z_{12} = \frac{r_g r_x}{r_g + r_x} \quad (17)$$

и, следовательно,

$$U_2 = I_1 z_{12} = I_1 \frac{r_g r_x}{r_g + r_x} = \frac{IR}{z} \frac{r_g r_x}{r_g + r_x}. \quad (18)$$

Отношение $\frac{U_2}{IR} = Q_2$, так же как и Q_1 , определяется по показанию вольтметра V :

$$Q_2 = \frac{U_2}{IR} = \frac{r_g}{z} \frac{r_x}{r_g + r_x} \quad (19)$$

или, учитывая (7) и (12), получаем:

$$Q_2 = \frac{Q_1 r_x}{Q_k x_g + r_x}. \quad (20)$$

Решив полученное выражение относительно r_x , находим:

$$r_x = \frac{Q_2 Q_k x_g}{Q_1 - Q_2} = \frac{Q_2 \sqrt{Q_1^2 - 1}}{(Q_1 - Q_2) \omega C_1}. \quad (21)$$

Так как по определению

$$Q_x = r_x \omega C_x \quad (22)$$

то, следовательно,

$$Q_x = \frac{Q_2 \sqrt{Q_1^2 - 1} (C_1 - C_2)}{(Q_1 - Q_2) C_1}. \quad (23)$$

Известные выражения (23) и (16) выведены без всяких ограничений и справедливы практически при любых параметрах схемы, изображенной на рис. 1, а. При малых значениях Q_x обычно встречаются затруднения в измерении Q_2 и C_2 из-за недостаточной чувствительности вольтметра V и расплывчатости резонансной кривой, затрудняющей фиксацию значения C_2 при резонансе.

Увеличением сопротивления R при соответствующем повышении мощности генератора и включением к зажимам 1, и 2 добавочного более чувствительного электронного вольтметра пределы измерения куметра можно значительно расширить без существенного увеличения погрешности измерения, с которым неизбежно связано искусственное повышение добротности измерительной цепи [Л. 4, 5]. При затруднении фиксации резонансной емкости C_2 удобно определять значения C_2' и C_2'' , при которых увеличение емкости и уменьшение ее относительно резонансного значения приводят к одинаковому уменьшению показания вольтметра. В таком случае

$$C_2 = \frac{2C_2' C_2''}{C_2' + C_2''}. \quad (24)$$

Таким образом, схема куметра при повышении чувствительности измерительных приборов и повышении мощности питающего генератора может быть применена для измерения малых добротностей, и при этом основные уравнения куметра практически остаются без изменения.

Выводы, относящиеся к погрешности измерения, полученные для больших добротностей [Л. 2], с полным основанием могут быть распространены на измерение малых добротностей. При малой емкости и малой добротности образца точность измерения может быть весьма мала. Большое значение при измерении имеют паразитные параметры измерительного конденсатора [Л. 2], конструкция которого должна обеспечивать стабильность этих параметров и возможность их измерения при помощи куметра.

Литература

1. Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков и Б. М. Гареев. Электротехнические материалы. Госэнергоиздат, 1950.
2. Г. И. Сканава. Диэлектрическая поляризация и потери в стеклах и керамических материалах с высокой диэлектрической проницаемостью. Госэнергоиздат, 1952.
3. К. А. Круг (ред.). Основы электротехники. Госэнергоиздат, 1952.
4. Н. М. Бурдак и А. В. Нетушил. Измерение ϵ и $\text{tg } \delta$ полупроводников в полях высокой частоты с помощью куметра. Труды МЭИ, вып. 9, 1952.
5. R. E. Lafferty. Расширение измерений с помощью куметра. Electronics, т. 24, стр. 126, № 11. 1951.

[13 4 1955]



Магнитные элементы с прямоугольной петлей гистерезиса

Кандидат техн. наук В. Н. ТУТЕВИЧ

Москва

В импульсной технике стали применять так называемые магнитные элементы с прямоугольной петлей гистерезиса или магнитные триггеры, принцип действия которых основан на свойстве этих магнитных материалов принимать два устойчивых состояния в точках положительной и отрицательной остаточной магнитной индукции.

Наряду с трансформаторными, дроссельными и феррорезонансными устройствами, а также магнитными усилителями с обратной связью магнитные элементы с прямоугольной петлей гистерезиса относятся к классу бесконтактных устройств, которые вследствие своей надежности и долговечности призваны заменить электромагнитные реле с механическими контактами, а в ряде случаев и соответствующие схемы с электронными лампами.

По сравнению с другими типами бесконтактных реле магнитные элементы с прямоугольной петлей гистерезиса обладают рядом преимуществ. Для работы на больших скоростях они не требуют дополнительных усложнений, в то время как питание других бесконтактных реле необходимо осуществлять переменным током с частотой в тысячи и десятки тысяч герц, что усложняет эти схемы и понижает их надежность. Кроме того, магнитный триггер способен поддерживать триггерные положения, не потребляя мощности. Однако работа магнитных элементов с прямоугольной петлей гистерезиса протекает в импульсном режиме и на их выходных цепях может быть получено только импульсное, а не постоянное напряжение.

Рассмотрим принцип действия такого магнитного элемента.

На тороидальный сердечник, изготовленный из магнитного материала (рис. 1), намотаны две обмотки: входная $w_{вх}$ и выходная $w_{вых}$. Петля гистерезиса материала этого сердечника показана на рис. 2. Когда остаточная индукция B_r имеет отрицательное значение или, как условно говорят, — сердечник „находится внизу“, то это соответствует точке 1 на рис. 2. При подаче положительного импульса тока abc (рис. 2) на входную обмотку сердечника $w_{вх}$, создающего н. с., в несколько раз превышающую коэрцитивную силу H_c , магнитная индукция обойдет кривую намагничивания и останется в точке 4.

Согласно закону электромагнитной индукции при перемагничивании на выходной обмотке $w_{вых}$ будет наводиться э. д. с. За время перемагничивания сердечника на нагрузочном сопротивлении R возникнут два импульса напряжения: один положительный при перемагничивании материала из точки 1 в точку 3, а второй — отрицательный, соответствующий переходу намагниченности из точки 3 в точку 4. При перемагничивании из точки 1 в точку 3 диапазон изменения индукции больше, чем при перемагничивании из точки 3 в точку 4 (B_{1-3} больше B_{3-4}), поэтому и мощность положительного импульса будет больше.

Если теперь подать на обмотку $w_{вх}$ импульс противоположной полярности $a'b'c'$, то сердечник подвергнется перемагничиванию из точки 4 в точку 1. Таким образом, положения 1 и 4 представляют собой два возможных устойчивых состояния магнитного материала. Они могут быть легко реверсируемы путем подачи на входную обмотку импульсов соответствующей амплитуды, но противоположной полярности.

В противоположность электронному триггеру, где для обнаружения двух стабильных состояний используется электрический ток, в магнитных триггерах для этой цели применяется магнитный поток. Если для поддержания стабильного состояния в электронном триггере необходимо напряжение постоянного тока, то для поддержания потока в точках 1 и 4 совершенно не нужно наличия тока.

Однако использование сердечника, обладающего петлей гистерезиса, подобно представленной на рис. 2, наталкивается на ряд трудностей. Во-первых, при подаче, например, положительного импульса abc на выходе, наряду с положительным импульсом 1, возникает сравнительно большой отрицательный импульс 2 (рис. 3,а). Во-вторых, при приходе следующего положительного импульса на $w_{вх}$ на обмотке $w_{вых}$ вновь возникает большой положительный импульс 3 (рис. 3,а) за счет перепада индукции B_{4-3} . При этих условиях, если импульсы 1 являются рабочими, то для их выделения потребуются применить ограничители, что усложнит схему. Поэтому для магнитных триггеров применяются легко насыщающиеся материалы, обладающие почти прямоугольной петлей гистерезиса, такие как НП65 и особенно перминвар. Мерой прямоугольности пет-

ли называют отношение $\frac{B_r}{B_{макс}}$, для хороших материалов оно составляет около 0,95. На рис. 4 представлена петля гистерезиса подобных материалов, которую без особой погрешности можно назвать прямоугольной.

В таком материале, если его остаточная индукция соответствует точке 1 (сердечник находится внизу), то приходящий на обмотку $w_{вх}$ положительный импульс перебросит сердечник в точку 4 вверх, что создаст на выходном сопротивлении R (рис. 1) положительный импульс напряже-

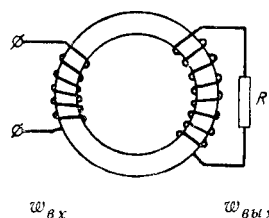


Рис. 1.

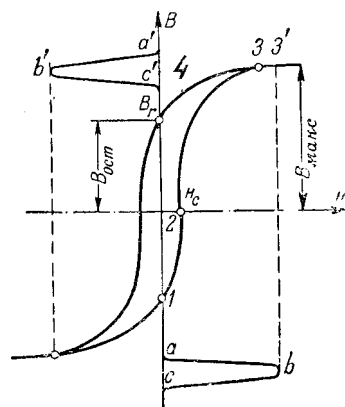


Рис. 2.

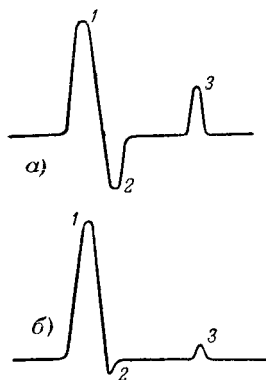


Рис. 3.

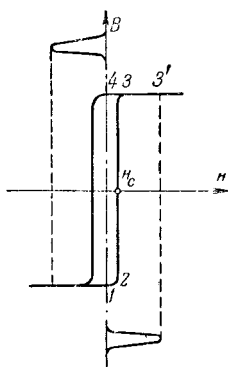


Рис. 4.

ния (рис. 3,б). Следующий положительный импульс, приходящий на обмотку w_{ex} , не вызовет сколько-нибудь заметного изменения магнитной индукции, так как остаточная индукция почти равна максимальной (линия 4—3), вследствие чего импульса на выходе практически не будет (импульс 3,б). По той же причине значительно меньше будет обратный импульс 2.

Рассмотрим несколько примеров применения магнитных элементов с прямоугольной петлей гистерезиса.

Значительные возможности применения магнитных элементов имеются в области телемеханики. Так, весьма ответственной частью многоканальной импульсной системы телемеханики является устройство, осуществляющее поочередное подключение датчиков к линии связи на передающем конце и способствующее разделению сигналов на приемном конце.

На рис. 5 представлен такой магнитный коммутатор на четыре канала, хотя число каналов может быть любым. Сердечники коммутатора разбиваются на четные и нечетные, и их входные обмотки соединяются последовательно. На эти обмотки подаются серии однополярных импульсов, сдвинутых по фазе друг относительно друга (рис. 5). Стартовое состояние намагненности сердечников показано на рис. 6. Намагниченность первого сердечника, обратная относительно всех остальных. Первый приходящий импульс создает плюс на началах обмоток возбуждения w_{a1} и w_{a3} , однако изменение состояния намагненности

произойдет только в сердечнике 1, и он переключится снизу вверх.

При переключении сердечника 1 произойдет большое изменение индукции, что повлечет за собой наведение э. д. с. как в выходной обмотке первого сердечника w_{n1} , так и в обмотке связи w_{11} . По цепи связи от начала w_{11} к концу w_{12} потечет ток, что вызовет перемагничивание сердечника 2 вниз (рис. 6), тем самым подготавливая его к приходу второго импульса, который подается одновременно на сердечники 2 и 4. Второй импульс перебросит второй сердечник вверх, отчего на w_{n2} появится импульс и через цепь связи w_{12} — w_{13} сердечник 3 перебросится вниз. Аналогично происходит и перемагничивание сердечников 3 и 4. Четвертый сердечник, перемагничиваясь вверх, перебросит сердечник 1 вниз, тем самым подготавливая очередной цикл работы коммутатора.

Коммутатор может быть собран и по схеме разомкнутого кольца. В этом случае последний сердечник не должен быть связан с первым. Кроме того, при этой схеме дополнительно вводится синхронизирующая обмотка на первом сердечнике. Приходящий синхронизирующий импульс будет восстанавливать первоначальное состояние намагненности первого сердечника. Такая схема исключает возможность накопления ошибки со временем.

В цепях связи включены вентиляльные элементы (обычно германиевые диоды) для того, чтобы предотвратить нежелательное воздействие одного сердечника на другие в процессе перемагничивания.

Следует указать, что для питания коммутаторов обязательно наличие двух серий импульсов, сдвинутых по фазе друг по отношению к другу. Возможно питание и от одной серии импульсов, подаваемой сразу на все соединенные последовательно сердечники, без деления их на четные и нечетные. В этом случае в обмотки связи вместо вентилялей параллельно обмоткам включаются конденсаторы [Л. 13].

Из рассмотренного примера ясно, что для работы магнитного триггера необходимы два сердечника, соответствующим образом связанные

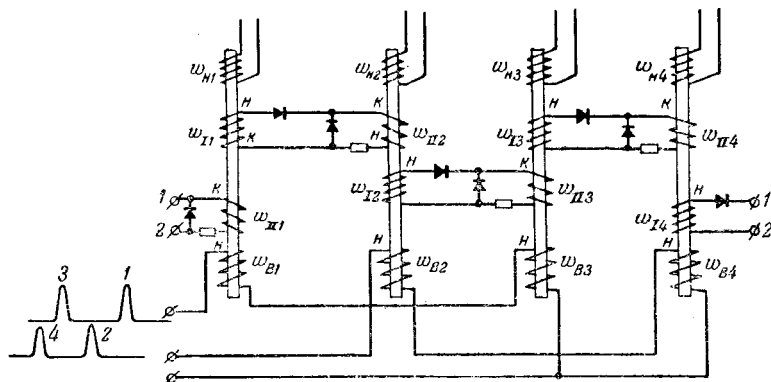


Рис. 5. Магнитный коммутатор на четыре канала на магнитных элементах.

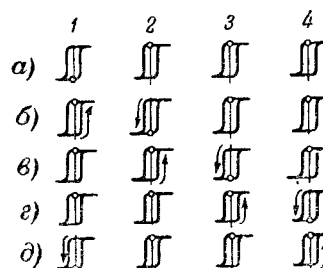


Рис. 6. Стартовое и последующие состояния намагненности сердечников магнитного коммутатора. а — первоначальное состояние намагненности сердечников; б, в, г — состояния после прихода 1, 2 и т. д. импульсов.

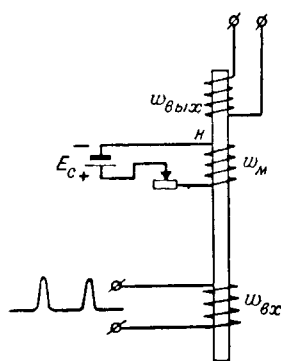


Рис. 7. Схема магнитного триггера с одним сердечником.

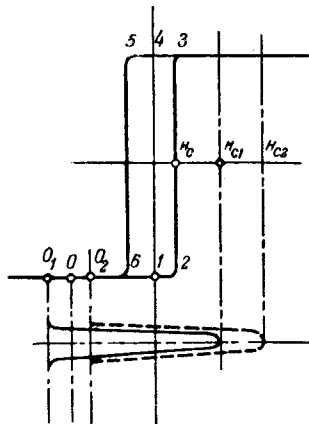


Рис. 8.

между собой, однако возможны и другие решения.

Автор статьи предложил следующую схему магнитного триггера и магнитного модулятора, использующего один сердечник [Л. 2]. На обмотку w_m (рис. 7) подается постоянное смещение E , которое будет сдвигать рабочую точку из положения 1 в положение 0 (рис. 8). Приходящий положительный импульс, амплитуда которого в несколько раз превышает смещение E , изменит состояние намагниченности сердечника, перебрасывая его вверх. После окончания импульса сердечник не останется в точке 4, а будет переведен отрицательным смещением обратно в точку 0. На выходной обмотке возникнут два импульса противоположной полярности. Ненужный импульс может быть удален детектором.

Таким образом, изменение смещения обеспечивает получение на выходе импульсов разной амплитуды (рис. 8). Кроме амплитудно-импульсной модуляции, оказалось возможным осуществление и модуляции импульсов по длительности.

Уместно остановиться на одном свойстве магнитных материалов, которое подвергает сомнению само название магнитного триггера. Дело в том, что если в электронном триггере значение выходного тока не зависит от того, насколько амплитуда импульса, запускающего триггер, превышает запирающий потенциал на сетке, то в магнитном триггере имеется закономерная зависимость между приложенной н. с. и скоростью перемагничивания сердечника. Эта зависимость близка к гиперболе: чем больше н. с., тем меньше время перемагничивания сердечника, а значит и больше амплитуда э. д. с., наведенной на выходе. Поэтому процесс переключения магнитных сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса можно назвать триггерным лишь условно. Лучше вместо термина магнитный триггер употреблять, как мы этого придерживаемся, — магнитный элемент с прямоугольной петлей гистерезиса.

Значительное применение магнитные элементы получили в области счетно-решающих устройств. Возможность запасаения информации в надежном и простом устройстве вместо исполь-

зования для этой цели ламп недолговечных и требующих значительной мощности питания, имеет решающее значение.

Простейшим устройством для запасаения сочетания импульсов (импульсного кода) может служить устройство «памяти», конструктивно выполняемое аналогично устройству, приведенному на рис. 5. Для запасаения кода из двух сигналов (два импульса или импульс и пауза) необходимо четыре сердечника, для запасаения кода из 10 сигналов требуется 20 сердечников и т. п. Выходная обмотка располагается только на одном, последнем, сердечнике. Код запоминается либо на четных, либо на нечетных сердечниках при помощи специальных обмоток, расположенных на каждом из сердечников. Считывается код подачей импульсов на обмотки возбуждения, соединенные так же, как и на рис. 5. Запасенные сигналы будут поочередно передвигаться с сердечника на сердечник и сниматься с выходной обмотки, расположенной на последнем сердечнике.

Следующая система запасаения сигналов основана на способности сердечника различать величину н. с. (рис. 9) между H_1 , когда нет переключения, и $2H_1$, когда есть переключение.

Из рис. 10 видно, что в этой системе каждый элемент представляет собой сердечник с тремя обмотками, две предназначаются для выбора того или иного элемента (цепи X и Y), а третья для съема или считывания показаний.

Если, например, два импульса, каждый значения H_1 , поданы на цепи X_1 и Y_1 , то сердечник C_{11} окажется под воздействием двойного импульса $2H_1$, а сердечник C_{12} и C_{21} под воздействием только одиночного импульса, тогда как сердечник C_{22} не получит никакого возбуждения. Это значит, что переключится только один сердечник C_{11} . При подаче импульсов на цепи, например, X и Y_2 , будет выбран сердечник C_{12} и т. п.

Практически система должна иметь такую конструкцию, чтобы можно было просто собрать тысячи сердечников при сравнительно небольших затратах. Этого трудно достичь, если сердечники имеют три отдельные обмотки, как на рис. 10. На рис. 11 представлена решетка магнитных сердечников, соединенных в ряд и столбцы. Это так называемая матричная память очень удобна в конструктивном отношении. Роль обмотки выполняет обычный провод, пропущенный через тороид. Каждый сердечник соединен тремя такими

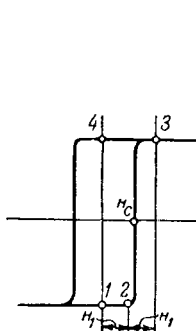


Рис. 9.

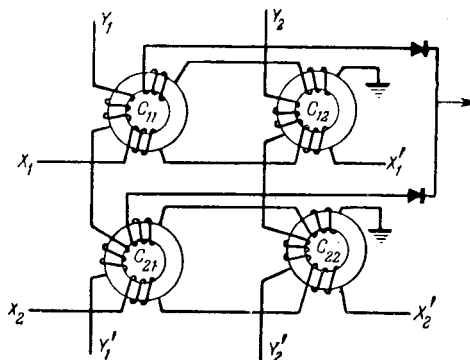


Рис. 10. Система запасаения сигналов.

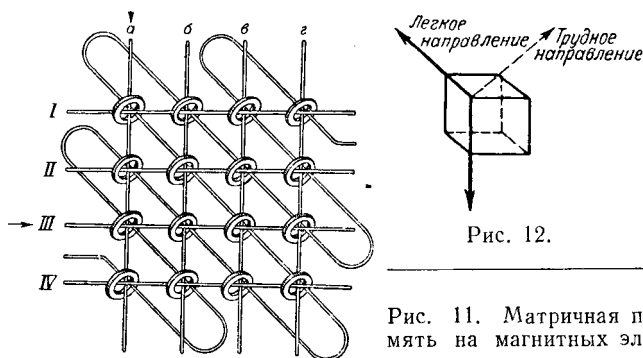


Рис. 11. Матричная память на магнитных элементах.

обмотками: две из них взаимно перпендикулярны (провода I, II, III, IV и а, б, в, г), а третья обмотка является общей последовательной обмоткой.

По принципу действия система аналогична описанной: сердечник выбирается только при совпадении двух токов. Например, при подаче импульсов на обмотку а и III переключится сердечник 3 и т. п.

После рассмотрения как самого принципа действия магнитного триггера, так и работы коммутатора, становится очевидным, что снятие импульсов с выходных обмоток магнитных элементов связано с переключением этих элементов — с нарушением их состояния намагниченности. Это значит, что если, например, какая-либо информация запасена сердечником при его состоянии намагниченности, соответствующей положению «внизу», то снять эту информацию можно лишь раз: приходящий положительный импульс переключит сердечник вверх; для вторичного снятия этой информации ее нужно вновь запасти.

Известны исследования по созданию неразрушающейся системы запаса информации [Л. 12]. Принцип действия такой системы основан на способности магнитных материалов с прямоугольной петлей гистерезиса поддерживать остаточный магнитный поток в определенных легких направлениях намагничивания. Если взять один ферромагнитный кристалл или куб, то при отсутствии внешнего поля вектор остаточного намагничивания такого куба будет лежать на одном из легких направлений (рис. 12). При приложении магнитного поля под прямым углом к вектору остаточного потока вектор будет иметь тенденцию повернуться в одно направление с полем, т. е. начнет вращаться из положения легкого намагничивания в положение трудного намагничивания.

Если это приложенное под прямым углом поле не будет достаточно сильным, чтобы повернуть вектор остаточного потока в трудное направление намагниченности, то этот вектор сразу же вернется в прежнее положение как только поле будет снято. Этот же принцип вращения вектора остаточного потока в одном кристалле может быть использован и для больших масс материалов с прямоугольной петлей гистерезиса.

Рис. 13 показывает, что происходит, когда магнитное поле H_{90° приложено под прямым углом к остаточному потоку сердечника памяти Φ_R

(направление H_A). Для случая, когда сердечник находится внизу, это соответствует отрицательному направлению потока ($-\Phi_R$), если вверх, то положительному ($+\Phi_R$).

Когда магнитное поле H_{90° приложено под прямым углом к H_A , то оба они, складываясь, образуют результирующее поле H , с которым и будет совпадать $\Phi_{ост}$, поворачиваясь из легкого направления намагничивания в трудное. Так как в материалах с прямоугольной петлей гистерезиса поток остается существенно неизменным, то выходная обмотка на сердечнике будет различать снижение потока от Φ_R до $\Phi_R \cos \theta$, где θ — угол вращения вектора. Полярность наводимого на обмотке напряжения будет зависеть от первоначального состояния намагниченности.

Таким образом, считывание с сердечника памяти может происходить без разрушения запасенной информации, так как при этом не происходит переключения потока сердечника. Это значит, что потери на гистерезисе очень малы, следовательно, система потенциально может быть очень быстродействующей.

Имеются два способа генерирования поля, прикладываемого под прямым углом (β -поля) к $\Phi_{ост}$. При наружном генерировании β -поля магнитный каркас выполняется из любого магнитного материала, так как он имеет зазор, в который вставляется сердечник памяти (рис. 14). Через обмотку на каркасе пропускаются короткие импульсы тока, которые наводят магнитный поток под прямым углом $\Phi_{ост}$ сердечника с прямоугольной петлей гистерезиса.

Вектор $\Phi_{ост}$ вращается до тех пор, пока протекает ток β -поля, и выходная обмотка ощущает изменение потока в тангенциальном направлении. Напряжение, наводимое в ней, пропорционально скорости изменения $\Phi_{ост}$. Хотя это изменение и мало, но, происходя за короткий промежуток времени, оно может генерировать достаточно большое напряжение на выходе.

При внутреннем генерировании β -поля используется полный тороидальный сердечник памяти с проводником, расположенным внутри него (рис. 15). Намагничивающая обмотка помещена

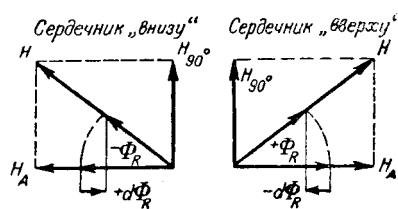
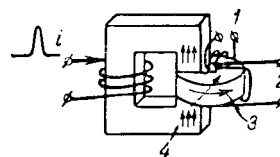


Рис. 13.

Рис. 14. Устройство для наружного генерирования β -поля.

1 — обмотка возбуждения; 2 — выходная обмотка; 3 — $\Phi_{ост}$; 4 — β -поле; ($\Phi_{ост}$ стремится повернуться в направлении β -поля) см. пунктир.



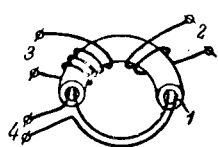


Рис. 15. Конструкция внутреннего генерирования β -поля.
1 — полый торoidalный сердечник; 2 — обмотка возбуждения; 3 — выходная обмотка; 4 — обмотка β -поля.

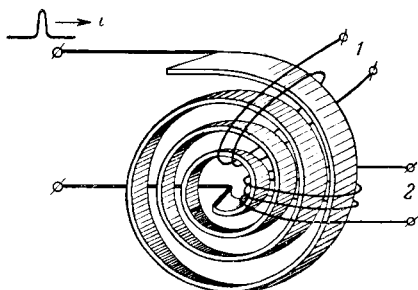


Рис. 16. Конструкция внутреннего генерирования β -поля, в которой сам сердечник служит проводником для тока, генерирующего β -поле.

1 — обмотка возбуждения; 2 — выходная обмотка.

на своем обычном месте и после пропускания через нее тока $\Phi_{ост}$ будет существовать на большой поверхности. Когда импульс тока пропускается через проводник внутри тороида, поле временно наводится вокруг проводника, отражая $\Phi_{ост}$ в направлении по или против часовой стрелки. Если сердечник первоначально находился сверху, то мы увидим отрицательное изменение $\Phi_{ост}$ при приложении β -поля и положительное — при его снятии. Сам сердечник может также служить проводником для тока, генерирующего β -поле (рис. 16).

Следует несколько остановиться на скоростях переключения магнитных сердечников.

Для получения больших скоростей переключения первоначально все усилия были направлены на изготовление миниатюрных сердечников из тонкопрокатанной ленты, толщиной в сотые и тысячные доли миллиметра из мягких магнитных материалов типа пермаллой, однако на таких сердечниках выходные импульсы длительностью

меньше 5 мксек получить не удалось. В то же время оказалось, что неметаллические магнитные материалы могут переключаться со значительно большей скоростью. Например, изготовленные путем прессования торoidalные сердечники из ферритов могут переключаться за 0,3 ... 0,6 мксек. Наружный диаметр такого тора равен 1,25 мм, внутренний — 0,75 мм и толщина — 0,4 мм. Матричная память, подобная представленной на рис. 11, была выполнена из 10 000 сердечников (100 матриц по 100 сердечников в каждом) на листе 25 × 25 см [Л. 8].

Литература

1. В. Н. Тутевич и В. А. Жожикашвили. Коммутатор, выполненный на магнитных элементах с прямоугольной петлей гистерезиса. Автоматика и телемеханика, т. XV, № 1, 1954.
2. В. Н. Тутевич. Магнитные модуляторы. Автоматика и телемеханика, т. XV, № 6, 1954.
3. В. А. Жожикашвили. Дешифраторы устройств телеуправления на магнитных элементах с прямоугольной петлей гистерезиса. Автоматика и телемеханика, т. XVI, № 1, 1955.
4. М. А. Розенблат. Импульсное перемагничивание сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса. Электричество, № 1, 1955.
5. A. Wang. Magnetic Storage and Delay Line. J. Appl. Phys., т. 21, № 1, 1950.
6. A. Wang. Magnetic Triggers. PIRE, № 6, 1950.
7. J. W. Forrester. Digital Information Storage in Three Dimensions Using Magnetic Cores. J. Appl. Phys., № 1, 1951.
8. J. A. Rajchman. Static Magnetic Matrix Memory and Switching Circuits. RCA Review, № 2, 1952.
9. W. Paplean. Accidental Current Magnetic Memory Cells for the Storage Digital Information, PIRE, № 4, 1952.
10. E. A. Sonds. The Behavior of Rectangular Hysteresis Loop Magnetic Materials under Current Puls Conditions. PIRE, № 10, 1952.
11. J. A. Rajchman. A Myriabit Magnetic — Core Matrix Memory, PIRE, № 10, 1953.
12. D. A. Buck, W. J. Frank. Non-Destructive Sensing of Magnetic Cores. Tr. AIEE, ч. I, т. 72, 1953.
13. R. D. Kodis, S. Ruhman and W. D. Woo, Convention Record of the JRE Electronic Computers, ч. 7, 1953.

[7. 3.1955]



Комплектные главные распределительные устройства*

Инж. В. М. РУСИЦЕ

Московское отделение Теплоэлектропроекта

Современный размах и темпы развития энергостроительства требуют сокращения сроков и снижения стоимости строительства. В связи с тем, что в настоящее время создана возможность массового выпуска комплектных ячеек с выключателями МГГ-10 и ВМГ-133, следует ориентироваться на комплектные главные распределительные устройства с присоединением к ним генераторов и трансформаторов мощностью 30 ... 60 тыс. кВА.

Для широкого применения комплектных распределительных устройств необходим не только

выбор соответствующих схем присоединений, но и совершенствование оборудования и аппаратуры. Например, если бы у нас в Советском Союзе был налажен выпуск генераторов и трехфазных трансформаторов с расщепленными обмотками и повышенными реактивными сопротивлениями, а также усиленных выключателей, то на электростанциях можно было бы осуществить простейшее комплектное распреестройство в соответствии со схемой рис. 1.

В настоящее время ввиду отсутствия генераторов и трехфазных трансформаторов с расщепленными обмотками и усиленных выключателей

* Печатается в порядке обсуждения.

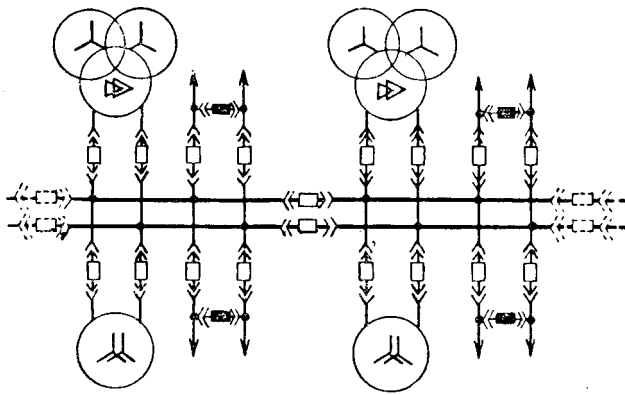


Рис. 1.

решение поставленной задачи возможно путем применения освоенных производством однофазных трансформаторов с расщепленными обмотками и расщепленных реакторов. Последние размещаются на выводах генераторов, как это показано на рис. 2. Предлагаемое распределительное устройство имеет одну систему шин и секционировано таким образом, что на каждую секцию приходится две питающие ветви. Секционные выключатели и мостовые выключатели спаренных линий — нормально разомкнуты.

При аварийном отключении какого-либо генератора или трансформатора автоматически включается соответствующий секционный выключатель. При повреждении сборных шин какой-либо секции мостовые выключатели автоматически переключают обесточившиеся линии на другую секцию.

Пунктиром на рис. 2 показана возможность неограниченного расширения распределительного устройства при сохранении всех свойств схемы.

Для простоты в схеме опущены разъединяющие контакты выключателей и измерительные трансформаторы.

Нетрудно видеть, что схема отвечает всем основным требованиям высокой надежности.

Согласно упрощенной схеме замещения (рис. 3) величины разрывной мощности тока короткого замыкания на шинах не превосходят: при 6,3 кВ

$$30 \left[\frac{1}{\frac{0,13(0,2+0,4)}{0,13+0,2+0,4} + 0,2} + \frac{1}{0,4} \right] = 173 \text{ тыс. кВа},$$

при 10,5 кВ

$$60 \left[\frac{1}{\frac{0,13(0,2+0,4)}{0,13+0,2+0,4} + 0,2} + \frac{1}{0,4} \right] = 346 \text{ тыс. кВа}.$$

Аварийный выход или вывод в ремонт генератора, трансформатора или сборных шин не вызывает ограничения выдачи электроэнергии потребителям или в систему.

При аварийном выходе V или VI секции потеря напряжения в реакторе, если пренебречь активной составляющей, определяется по формуле

$$\Delta U = \frac{u \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{100} \times \%,$$

откуда при 6,3 кВ

$$\Delta U = \frac{6,3 \sqrt{1 - 0,8^2}}{100} \cdot 20 = 0,75 \text{ кВ},$$

при 10,5 кВ

$$\Delta U = \frac{10,5 \sqrt{1 - 0,8^2}}{100} \cdot 20 = 1,26 \text{ кВ}.$$

Эта потеря находится в допустимых пределах повышения напряжения генератора на 10% и понижения напряжения у потребителей на 5%.

Реакторы на 3500 а не ограничивают выдачу мощности в систему и позволяют иметь на станции минимальные нагрузки на напряжении 6 или 10 кВ, равные 1 ... 1,5 мощности одного генератора, что соответствует обычным эксплуатационным условиям.

Принятые в схеме короткие кабельные переключки между присоединениями находятся за линейными выключателями и являются как бы добавлениями к протяженным линиям, поэтому они не могут вызвать существенного ухудшения эксплуатации линий. В особо необходимых случаях допускается перераспределение нагрузок в паре секций.

Схема не зависит от схем потребителей и системы, а также от числа генераторов и трансформаторов.

В отдельных случаях возможны упрощения схемы, например, путем исключения мостовых

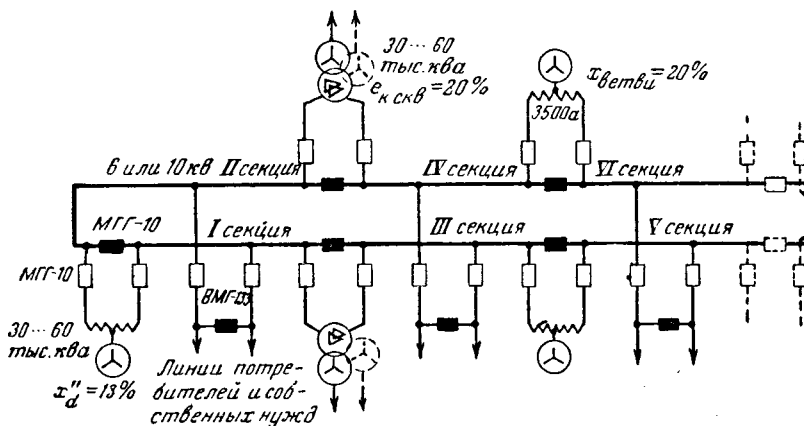


Рис. 2

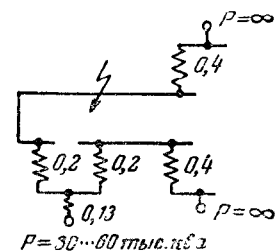


Рис. 3.

Схема проста и наглядна.

| Наименование | Предлагаемое распределительное устройство | | | Типовое распре- делительное устрой- ство | | |
|---|---|-------------------------|--------|--|-------------------------|-------|
| | Количество | Стоимость, тыс. руб. | | Количество | Стоимость, тыс. руб. | |
| | | еди- ницы | всего | | еди- ницы | всего |
| Ячейки с выключа- телями типа МГ-229 | — | — | — | 12 яч. | 75 | 900 |
| Ячейки с выключа- телями типа МГГ-10 | 16 яч. | 35 | 560 | — | — | — |
| Ячейки с выключа- телями типа ВМГ-133 | 45 яч. | 20 | 900 | 30 яч. | 45 | 1 350 |
| Реакторы в цепи генератора на 3 500 а | 9 фаз | 25 | 225 | — | — | — |
| Строительная часть, м ³ | 1 700 | 0,075 | 127,5 | 9 000 | 0,1 | 900 |
| Всего | — | — | 1812,5 | — | — | 3 150 |

При размещении распределительного устройства в главном здании возможна еще большая экономия за счет уменьшения расходов по строительной части.

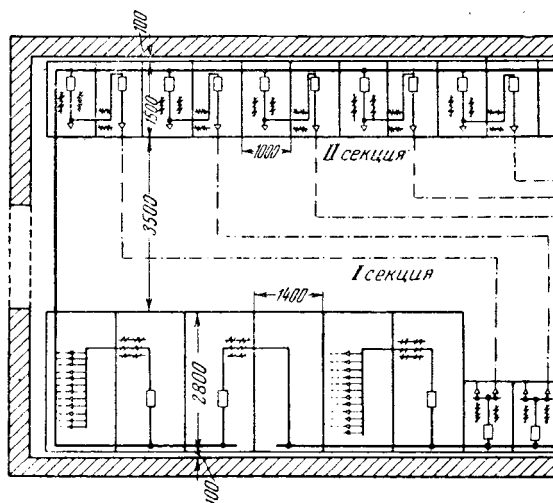


Рис. 4.

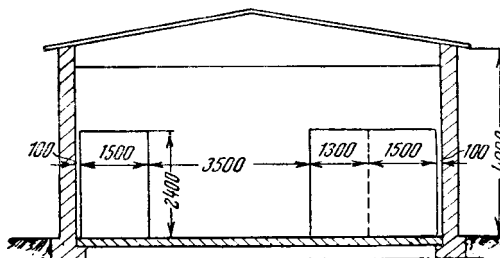


Рис. 5.

Следует заметить, что экономический расчет сугубо схематичен, полученная в результате расчета экономия может отличаться от действительной стоимости. Однако он все же характеризует высокую экономичность предлагаемого распределительного устройства.

[[13.4.1955]]



Компенсация нелинейности полупроводниковых выпрямителей в дистанционных реле

Кандидат техн. наук Г. Г. ГИМОЯН

Московский энергетический институт им. Молотова

Трудности обусловлены тем, что на таких линиях входные полные сопротивления нормального режима или даже холостого хода соизмеримы с полными сопротивлениями при коротком замыкании. Поэтому защита этих линий, осуществленная дистанционными реле с линейными элементами, характеристики срабатывания которых

представляют окружность или прямую линию (табл. 1), часто оказывается мало чувствительной. Потребление дистанционных реле с линейными элементами также сравнительно велико, что, в свою очередь, повышает значения тока и напряжения точной работы защиты, они имеют также большие собственные времена срабатывания.

Недостатки реле с линейными элементами стимулировали развитие и применение реле с нелинейными элементами, к числу которых относятся, в частности, и дистанционные реле с выпрямителями.

| Вид характеристики срабатывания | Уравнение момента срабатывания | |
|---|--|--|
| | реле с линейными элементами | реле с выпрямителями |
| Окружность с центром в начале координат | $I^2 Z_y^2 - U^2$ | $ IZ_y - \dot{U} $ |
| Окружность, проходящая через начало координат | $UIZ_y \cos(\varphi - \alpha) - U^2$ | $ I \frac{Z_y}{2} - \dot{U} - I \frac{Z_y}{2} $ |
| Прямая линия | $I^2 Z_y - UI \cos(\varphi - \alpha)$ | $ 2IZ_y - \dot{U} - \dot{U} $ |
| Односистемное реле для защиты от двухфазных к. з. | $U_{AB} U_{CB} \sin \widehat{U_{AB} U_{CB}}$ | $ \dot{U}_2 - I_2 Z_y - \dot{U}_1 - I_1 Z_y $ |
| Эллипс | — | $ i(Z_1 + Z_2) - \dot{U} - IZ_1 - \dot{U} - IZ_2 $ |
| Гипербола | — | $ I(Z_1 + Z_2) + \dot{U} - IZ_1 - \dot{U} - IZ_2 $ |

Преимущества реле с нелинейными элементами характеристики и уравнения моментов срабатывания которых приведены в табл. 1 [Л. 1], следующие:

1. Возможность получения характеристик срабатывания, недостижимых при использовании реле с линейными элементами (например, эллипс, гипербола).

2. Возможность использования поляризованных реле специального исполнения или более высокочувствительных реле с замкнутым магнитным сердечником (реле с отпадающим якорем), обеспечивающих большую чувствительность защиты и точную работу при меньших токах и напряжениях.

3. Совмещение в одном исполнительном реле функций нескольких реле (пусковой орган, орган направления энергии, дистанционный орган, различные блокировки), что обеспечивает большое быстродействие защиты.

В реле с нелинейными элементами для выпрямления подаваемых в реле токов и напряжений используются полупроводниковые выпрями-

тели. Наиболее желательно применение выпрямителей с малым обратным током и прямым падением напряжения.

Вольтамперная характеристика реальных полупроводниковых элементов — нелинейная. Для повышения чувствительности и снижения потребления, а также в целях обеспечения надежности и селективности действия дистанционных реле необходимо скомпенсировать нелинейность выпрямителей.

В целях количественного учета нелинейных искажений, обусловленных выпрямителями, выявления причин, влияющих на степень этих искажений, а также сопоставления отдельных способов компенсации нелинейности введем понятие коэффициента нелинейности.

Если выпрямительные элементы работают на прямолинейной части вольтамперной характеристики и если пренебречь их обратными токами, то можно спрямить вольтамперную характеристику, заменив элемент идеальным вентилем, соединенным последовательно со встречной э. д. с. E_o и динамическим сопротивлением R_o . В случае однофазной мостовой схемы вольтамперная характеристика схемы замещения будет представлять собой прямую линию, проходящую на расстоянии E_o от начала координат (прямая 2, рис. 1):

$$U = E_o + I(R_{доб} + R_p + R_o), \quad (1)$$

где U и I — входные напряжение и ток выпрямителя;

E_o — встречная э. д. с., равная отрезку, отсекаемому продолжением прямолинейной части вольтамперной характеристики выпрямителя на оси напряжения (рис. 1);

R_p — сопротивление нагрузки, ом;
 $R_{доб}$ — добавочное сопротивление на входе выпрямителя, ом;

R_o — динамическое сопротивление выпрямителя.

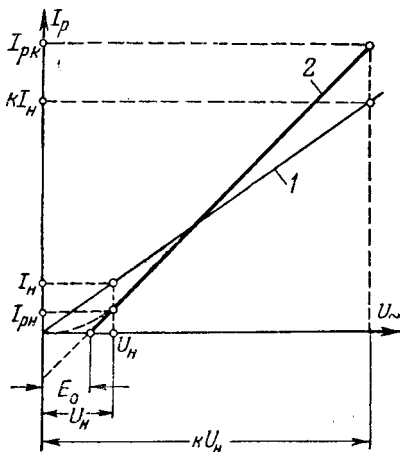


Рис. 1. Линеаризованная (1) и спрямленная (2) вольтамперные характеристики однофазного мостового выпрямителя с активной нагрузкой на выходе.

Как видно из рис. 1, при вольтамперной характеристике в виде прямой 2 зависимость между током в реле и входным напряжением — нелинейная. Если провести некоторую прямую через начало координат (прямая 1, рис. 1), то она может характеризовать идеализированную зависимость указанных выше электрических величин, при которой обеспечивается их строгая пропорциональность.

Максимальное значение отношения отклонения действительного значения тока в реле от его идеализированного значения к идеализированному значению называется коэффициентом нелинейности α .

Таким образом, как это следует из рис. 1, при начальном, минимальном значении входного напряжения

$$\alpha_k = \frac{I_k - I_{pk}}{I_k}, \quad (2)$$

а при конечном, максимальном значении входного напряжения

$$\alpha_k = \frac{I_{pk} - kI_k}{kI_k}, \quad (3)$$

где k — кратность изменения входного напряжения.

Коэффициент нелинейности α получится минимальным при соблюдении равенства

$$\alpha_k = -\alpha_k. \quad (4)$$

На основании (1), (2), (3) и (4), а также рис. 1, коэффициент нелинейности, выраженный через параметры схемы, будет иметь вид:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot I(R_{\text{доб}} + R_p + R_d)}{E_0 \left(1 - \frac{1}{k}\right)}}. \quad (5)$$

Как видно из полученной формулы, коэффициент нелинейности контура зависит от $R_{\text{доб}}$, k , I , E_0 . Существующие способы компенсации нелинейности и сводятся к искусственному изменению каких-либо из этих величин при неизменных остальных членах уравнения (5).

Рассмотрим способы снижения коэффициентов нелинейности.

Снижение коэффициента α . Введение в цепь большого добавочного линейного сопротивления. В качестве такого сопротивления можно использовать как активное, так и реактивное (емкостное или индуктивное) сопротивление. Например, в первых разработках макета дистанционного реле с полупроводниковыми выпрямителями в лаборатории ТЭП в качестве добавочного сопротивления было использовано активное сопротивление. Однако, как показывают опыт и расчеты, включение небольшого сопротивления порядка $(10 \dots 15) \cdot R_p$ при больших кратностях входного напряжения не может заметно снизить нелинейности, а включение большего сопротивления порядка $(75 \dots 100) \cdot R_p$ с одновременным повышением питающего напряжения, правда, приводит

к снижению α до $0,05 \dots 0,06$, но сопровождается значительным увеличением потерь мощности и снижением к. п. д. до $1 \dots 1,5\%$. Некоторого улучшения можно достичь включением реактивного сопротивления, однако и при этом к. п. д. защитного устройства будет не выше $3,5 \dots 4\%$.

Искусственное снижение кратности изменения входного напряжения. Искусственное снижение кратности изменения входного напряжения k необходимо осуществить так, чтобы защита сохранила удовлетворительную чувствительность при малых входных напряжениях и была обеспечена безопасная работа вентиля при больших входных напряжениях. Это требование можно осуществить включением на входе выпрямительного моста магнитонасыщенной катушки, однако сложность настройки, большое потребление, громоздкость и загромождение всего защитного устройства не позволяют рекомендовать этот способ к применению.

Искусственное увеличение тока через выпрямитель. Способ используется в технике электрических измерений неэлектрических величин (например, в вектормерной схеме, предложенной Гутенмахером), однако вектормерные схемы для правильной своей работы (неискаженных замеров) требуют управляющего напряжения, большего, чем измеренное напряжение, при постоянстве угла относительно этого напряжения. Для дистанционной защиты использовать такое напряжение не представляется возможным, так как подводимые к реле ток и напряжение по величине и по углу не постоянны.

Компенсация встречной э. д. с. E_0 . Отрезок E_0 определяет степень нелинейности контура. Чем он меньше, тем меньше нелинейность суммарного сопротивления контура. Скомпенсировать E_0 можно двумя способами: 1) введением в нелинейный контур дополнительного нелинейного сопротивления (обычно вентильного столбика, включенного на выходе выпрямителя); 2) введением в контур посторонней э. д. с., смещающей нелинейную вольтамперную характеристику контура до линейной [Л. 3].

Первый способ не может быть рекомендован. При этом решении защитное устройство требует тонкой настройки, удвоенного числа выпрямительных элементов, габариты получаются большими, к. п. д. не превышает $10 \dots 12\%$.

Рассмотрим второй способ.

При наличии в контуре схемы замещения согласной э. д. с. E_c , равной и противоположно направленной э. д. с. E_0 , зависимость между током и напряжением на входе выпрямителя будет иметь вид:

$$U = I(R_{\text{доб}} + R_p + R_d). \quad (6)$$

Уравнение (6) представляет собой смещенную вольтамперную характеристику контура, и соответствующая уравнению (6) прямая линия проходит через начало координат. Согласно э. д. с. E_c , вызвавшую смещение, назовем э. д. с. с м е щ е н и я. Характеристика (6) подтверждается экспериментально.

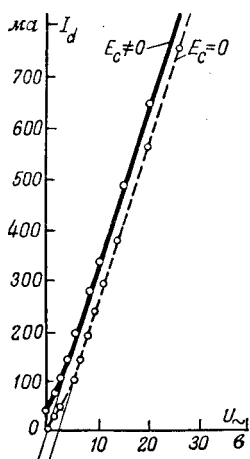


Рис. 2. Ток на выходе выпрямителя I_d в зависимости от напряжения на его входе U_1 при наличии (сплошная линия) и отсутствии (пунктир) э. д. с. смещения E_c .

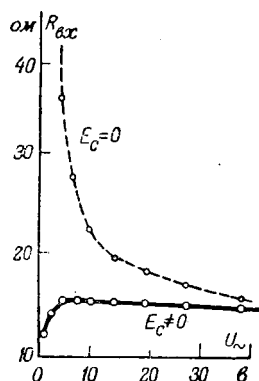


Рис. 3. Входное сопротивление $R_{вх}$ однофазного мостового выпрямителя в зависимости от напряжения на входе U_1 при наличии (сплошная линия) и отсутствии (пунктир) э. д. с. смещения E_c .

На рис. 2 приведены кривые изменения тока на выходе выпрямителя I_d , а на рис. 3 дано входное сопротивление $R_{вх}$ в зависимости от напряжения на входе U_1 при наличии и отсутствии э. д. с. смещения E_c . Из этих характеристик видно, что введенная в цепь э. д. с. смещения обеспечивает линейную зависимость входного напряжения и тока в обмотке реле. Линейность сохраняется также при изъятии добавочных сопротивлений $R_{до}$, что особенно ценно для снижения потребления и повышения к. п. д. защитного устройства.

Схемы дистанционных реле. При выполнении дистанционных реле э. д. с. смещения необходимо ввести в схему устройств таким образом, чтобы она: 1) не сказалась на селективности защиты, 2) не вызывала ложных отключений линии при обрыве в цепях питания э. д. с. смещения и 3) обеспечивала получение необходимых характеристик срабатывания защиты, возможных без применения этой э. д. с.

На рис. 4 приведена принципиальная схема дистанционного реле с круговой, а на рис. 5 — с эллиптической [Л. 2] характеристиками, удовлетворяющими указанным выше требованиям [Л. 3]. Меняя, согласно таблице, входные параметры выпрямителей, можно по схеме рис. 4 также получить реле с прямолинейной характеристикой и односистемное реле защиты от двухфазных замыканий, аналогичное индукционному реле А. М. Бреслера [Л. 1], а по схеме рис. 5 — реле с гиперболической характеристикой [Л. 1].

Вне зависимости от вида характеристики возможны два способа включения э. д. с. смещения: 1) смещение осуществляется за счет падения напряжения на общем для всех мостов сопротивлении — общее смещение (рис. 4 и 5); 2) смещение осуществляется путем включения равных сопротивлений в цепь каждого моста — раздельное смещение. При обоих схем-

ных решениях вследствие соблюдения равновесия тормозных и рабочих ампервитков, создаваемых э. д. с. смещения, практически исключается ее вредное влияние на работу защитного устройства. При этом обрыв цепи э. д. с. смещения не может вызвать ложного срабатывания защиты. Однако схемы реле при первом способе смещения обладают повышенной чувствительностью (что доказуемо аналитически и подтверждено экспериментально), к тому же они просты в выполнении, поэтому к применению рекомендуется способ общего смещения.

В качестве источника э. д. с. смещения рекомендуется использовать сеть оперативного постоянного тока.

Испытания дистанционных реле с прямолинейной, круговой, эллиптической и гиперболической характеристиками срабатывания экспериментально подтвердили возможность получения этих характеристик при наличии э. д. с. смещения.

В целях выявления зависимости чувствительности защиты от величины э. д. с. были сняты характеристики $z_p = (I_p)$ при различных значениях удельной э. д. с. смещения E_{co} (э. д. с. смещения на один выпрямительный элемент). По этим кривым построена зависимость тока точной работы защиты от э. д. с. смещения $I_{точ} = (E_{co})$. Для реле с круговой характеристикой срабатывания с использованием селеновых элементов указанная зависимость приведена на рис. 6.

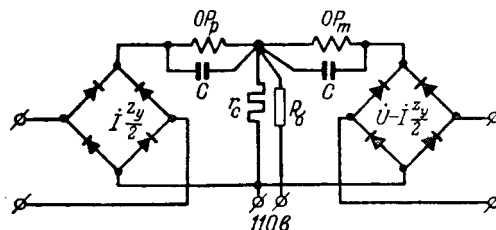


Рис. 4. Принципиальная схема дистанционного реле с характеристикой срабатывания в виде окружности, проходящей через начало координат.

OP_p и OP_m — рабочая и тормозная обмотки поляризованного реле; C — емкостный фильтр; r_c — сопротивление, создающее напряжение смещения; R_δ — балластное сопротивление цепи оперативного постоянного тока; Z_y — сопротивление уставки реле; U, I — напряжение и ток линий электропередачи.

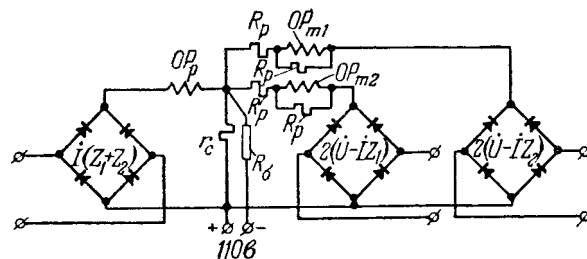


Рис. 5. Принципиальная схема дистанционного реле с эллиптической характеристикой срабатывания. OP_p, OP_{m1} и OP_{m2} — рабочая и тормозные обмотки поляризованного реле; r_c — сопротивление, создающее напряжение смещения; R_δ — балластное сопротивление цепи оперативного постоянного тока; U, I — напряжение и ток линий электропередачи (емкостные фильтры на схеме не показаны).

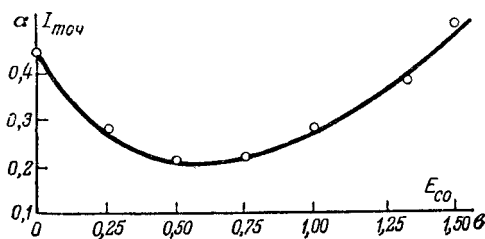


Рис. 6. Ток точной работы $I_{точ}$ в зависимости от удельной э. д. с. смещения $E_{с0}$.

Как следует из кривой рис. 6, по мере роста $E_{с0}$ значение тока, соответствующее точной работе, сначала падает, при $E_{с0} = 0,5$ в оно достигает минимума, после этого снова возрастает. Такой характер зависимости объясняется тем, что по мере увеличения $E_{с0}$ до 0,5 в сопротивление вентиля интенсивно снижается, вследствие чего чувствительность защиты резко повышается. При $E_{с0} = 0,5$ в сопротивление близко к значению динамического сопротивления, и э. д. с. смещения в основном расходуется на компенсацию нелинейности выпрямителя. При этом ток режима A мал. При $E_{с0} > 0,5$ в наряду с дальнейшим незначительным снижением внутреннего сопротивления вентиля имеет место резкое возрастание длительности режима A .

Чем больше $E_{с0}$, тем больше ток, а следовательно, и границы режима A , и тем меньше доля периода полезной работы (работы на обмотку) источника, питающего выпрямитель. Если при этом учесть, что реле для срабатывания требует определенного среднего значения тока, то ясно, что оно срабатывает при тем больших значениях тока точной работы $I_{точ}$, чем длительнее режим A . Эксперименты показали, что оптимальное значение удельной э. д. с. смещения практически не зависит ни от диаметра вентильных элементов, ни от соотношения сопротивлений контуров постоянного и переменного токов схемы выпрямления.

Заключение. Исследование различных способов компенсации нелинейности вольтамперной характеристики полупроводниковых выпрямителей показывает, что наилучшим из них является способ компенсации при помощи э. д. с. смещения. Этот способ обеспечивает высокий к. п. д. защитного устройства (порядка 60 ... 70%), превышающий к. п. д. при других способах компенсации примерно в 6 ... 7 раз. Такой высокий к. п. д. достигается обеспечением линейной зависимости электрических величин на входе и выходе выпрямителей, питающих обмотки поляризованного реле, при отсутствии всякого рода добавочных сопротивлений и при собственном сопротивлении выпрямителей, равном их динамическому сопро-

тивлению. Собственные сопротивления промежуточных трансформаторов, питающих выпрямители, вследствие отсутствия добавочных сопротивлений и меньших сопротивлений выпрямителей также получаются небольшими. Благодаря высокому к. п. д. этот способ обеспечивает также меньшее потребление защитного устройства и более высокую его чувствительность в случаях, когда чувствительность ограничена потреблением защиты.

При создании дистанционного реле с эллиптической характеристикой срабатывания [Л. 2] в случаях, когда повышение эксцентриситета ограничивается потреблением реле, применение э. д. с. смещения позволяет получить более высокие значения эксцентриситета.

К преимуществам способа э. д. с. смещение следует также отнести меньшие габариты защитного устройства вследствие изъятия из схем добавочных сопротивлений и малые размеры промежуточных трансформаторов тока и напряжения. Благодаря применению э. д. с. смещения ток точной работы защиты снижается 2,5 ... 3 раза (рис. 5). При обеспечении упомянутых выше преимуществ, имеющих особенно важное значение для защиты длинных и сильнонагруженных линий электропередачи, применение э. д. с. смещения исключает какие-либо искажения характеристики срабатывания защиты.

Обрыв в цепях питания э. д. с. смещения не приводит к ложному отключению линии электропередачи. Электродвижущая сила смещения позволяет получить все без исключения характеристики срабатывания защиты, присущие защитным устройствам с выпрямителями, но без применения э. д. с. смещения. При наличии в схеме защиты э. д. с. смещения не вводятся какие-либо ограничения для применения существующих лучших способов регулирования параметров защиты (уставки срабатывания, угла максимальной чувствительности и эксцентриситета). Применение э. д. с. смещения не препятствует также использованию расщепления фаз в целях повышения быстродействия защиты.

В заключение следует отметить также, что описанный способ компенсации нелинейности может быть использован и в других схемах с выпрямителями.

Приложение. Замечания к расчету устройств дистанционной защиты с применением полупроводниковых выпрямителей.

При расчете задаются: P_m и P_c — мощность термической устойчивости и мощность срабатывания поляризованного реле; k — кратность изменения тока короткого замыкания на линии электропередачи; $I_{точ}$ — ток точной работы защиты; Q_o — активная площадь выпрямительных элементов; тип элементов и их параметры.

Необходимо определить: сопротивление обмоток реле OP_p и OP_m (рис. 4 и 5), число витков W_p и диаметр провода обмотки реле, число выпрямительных элементов N , минимальное число вторичных витков промежуточных ненасыщающихся трансформаторов W_2 , обеспечивающее действие защиты при данном токе точной работы; минимальную уставку срабатывания защитного устройства и напряжение ее точной работы.

Расчет ведется в следующем порядке:

1. Определяется общее число выпрямительных элементов однофазного мостового выпрямителя, необходимое для

¹ В режиме A ток одновременно проводят все четыре плеча моста, выпрямитель закорочен, а обмотка реле обесточена. Режим имеет место при коммутации анодов при наличии индуктивности в цепи выпрямителя [Л. 4].

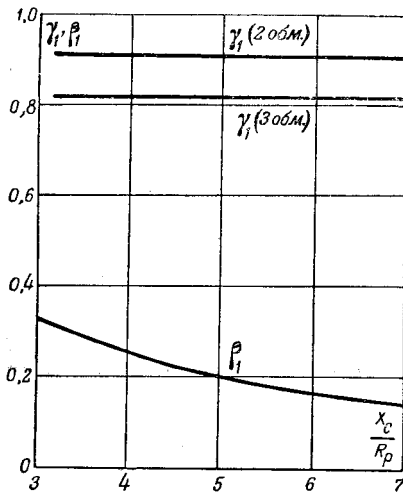


Рис. 7. Коэффициенты γ_1 , ρ_1 эквивалентных проводимостей однофазного мостового выпрямителя, работающего на активно-емкостную нагрузку с учетом взаимной индукции между обмотками поляризованного реле.

обеспечения безопасных и допустимых эксплуатационных условий работы элементов в нормальном и аварийном режимах линии электропередачи:

$$N_{\partial} = \frac{2 \cdot P_m \tau}{\lambda Q_0 j_{\partial} (U_{\partial} - 4 \lambda Q_0 j_{\partial} r_{\partial})}; \quad (I,1)$$

$$N_{\kappa} = \frac{2 \cdot P_c \tau \nu^2 k^2}{\lambda Q_0 j_{\kappa} (U_{\kappa} - 4 \lambda Q_0 j_{\kappa} r_{\partial})}, \quad (I,2)$$

где j_{∂} и j_{κ} — плотности прямого тока, длительно и кратковременно допустимые для выбранных элементов;

λ — коэффициент, учитывающий действие обратного тока;

U_{∂} и U_{κ} — средние за период переменного тока обратные напряжения, длительно и кратковременно допустимые на элемент;

r_{∂} — динамическое сопротивление одного элемента;

τ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления обмотки реле R_p за счет сопротивления, создающего э. д. с. смещения;

ν — коэффициент, равный отношению тока точной работы реле к его току срабатывания.

Из полученных двух значений N выбирается большее, затем определяется число последовательно соединенных n и параллельно a элементов в плече.

2. По Q_0 и a расчетному условию (I,1) или (I,2) определяют сопротивление обмотки реле:

$$R_p = \frac{P_m}{n_w I_m} \geq \frac{P_m}{n_w (2 \cdot \lambda a Q_0 j_{\partial})^2}, \quad (I,3)$$

$$R_p = \frac{P_c}{n_w I_c} \geq \frac{P_m}{n_w} \left(\frac{\nu \cdot k}{2 \cdot \lambda a Q_0 j_{\kappa}} \right)^2, \quad (I,4)$$

где n_w — число обмоток поляризованного реле.

3. Минимальное число вторичных витков ω_2 промежуточного ненасыщающегося трансформатора, обеспечиваю-

щее действие защиты при токе короткого замыкания, равном току точной работы, определяется из условия равенства э. д. с. E_2 , наведенной во вторичной обмотке трансформатора, и падения напряжения на контуре, питающем рабочую обмотку реле:

$$E_2 = I_{2m} Z_3, \quad (I,5)$$

где Z_3 — полное сопротивление схемы замещения контура, питающего рабочую обмотку реле;

I_{2m} — первая гармоническая тока точной работы на входе выпрямителя.

$$E_2 = 4,44 \cdot B S f \omega_2 \cdot 10^{-8}, \quad (I,6)$$

$$I_{2m} = \frac{\pi}{2 \sqrt{2}} I_c, \quad (I,7)$$

$$z_3 = \sqrt{(C_r \omega_2^2 + R_3)^2 + (C_x \omega_2^2 + X_3)^2}. \quad (I,8)$$

В последнем уравнении:

$C_r \omega_2^2$ и $C_x \omega_2^2$ — соответственно активное и реактивное сопротивление вторичной обмотки промежуточного ненасыщающегося трансформатора; при определенном типе штампа стали сердечника сопротивления зависят только от ω_2 ;

R_3 и X_3 — активное и реактивное сопротивления нагрузки в схеме замещения.

При известном сопротивлении обмотки реле R_p и емкостного сопротивления фильтра $X_c R_3$ и X_3 определяются при помощи кривых γ_1 , ρ_1 (рис. 7) по формуле:

$$R_3 = \frac{\gamma_1}{\gamma_1^2 + \rho_1^2} \left(R_p + \frac{2n}{a} r_{\partial} \right); \quad X_3 = \frac{\rho_1}{\gamma_1^2 + \rho_1^2} \left(R_p + \frac{2n}{a} r_{\partial} \right). \quad (I,9)$$

Минимальное значение ω_2 определяется из биквадратного уравнения, получаемого из (I,5) с учетом (I,6) (I,8).

При использовании в качестве источника э. д. с. смещения сети оперативного постоянного тока подсчитывается значение балластного сопротивления R_6 , последовательно включенного с сопротивлением r_c (рис 4 и 5):

$$R_6 = r_c \frac{U_n - 2n E_{co}^*}{2n E_{co}^*}, \quad (I,10)$$

где U_n — напряжение сети оперативного постоянного тока;

r_c — сопротивление, создающее напряжение смещения ($r_c = 0,1 \dots 0,2 R_p$);

E_{co}^* — оптимальное значение э. д. с. смещения на один элемент, равное 0,5 в для селеновых и 0,3 в меднозакисных вентилях.

Автор выражает свою глубокую благодарность канд. техн. наук В. Л. Фабриканту за ряд его весьма ценных указаний, использованных при выполнении настоящей работы.

Литература

1. Г. И. Атабеков. Дистанционный принцип защиты дальних электропередач. Издательство Академии наук Армянской ССР, 1953.
2. Ю. А. Гаевенко. Дистанционная защита длинных и сильнонагруженных линий электропередачи. Электричество, № 6, 1954.
3. Г. Г. Гимоян. Авторское свидетельство № 98567 от 20 июня, 1954 г.
4. В. Г. Комар. Работа полупроводниковых выпрямителей в цепях управления, Госэнергоиздат, 1952.

[30. 9. 1954]



Эксплуатация предохранителей типа ПК в открытых установках

Инж. Ф. Г. РЫКЛИН

«Правила технической эксплуатации электростанций и сетей» (ПТЭ), изданные и переработанные значительно расширили пределы применения плавких предохранителей.

Если раньше применение предохранителей ограничивалось сравнительно небольшой трансформаторной мощностью, то теперь, в соответствии с новыми ПТЭ, узаконена защита предохранителями любой мощности при соблюдении следующих условий:

1. Соответствие параметров предохранителя эксплуатационным требованиям установки (нормальные напряжения и токи, отстройка от пусковых токов во избежание ложных срабатываний и т. п.).

2. Допускаемый ток отключения предохранителя должен быть не менее тока короткого замыкания в данной точке сети, защищаемой этим предохранителем.

3. Должна быть обеспечена селективность.

Выпускаемые заводом «Пролетарий» предохранители типа ПК на напряжение 3...35 кВ, предназначенные для внутренней установки, удовлетворяют поставленным условиям при эксплуатации их в городских, сельских сетях, а также для защиты промышленных электроустановок соответствующей мощности. Освоенные промышленностью предохранители типа ПСН для напряжений 10...110 кВ, предназначенные для работы в наружных условиях, пока не применяются в широких пределах, и многие открытые электроустановки — силовые трансформаторы, линии и т. п. в городских и сельских сетях защищены самодельными плавкими вставками, работающими без патрона или перегородок между фазами на открытом воздухе. Применение таких вставок приводит зачастую к развитию аварии из-за междупазных перекрытий при сгорании этих вставок. Кроме того, самодельные вставки обычно не гарантируют желаемого тока отключения.

О предохранителях типа ПК, зарекомендовавших себя с очень хорошей стороны в течение длительной эксплуатации, у некоторых специалистов сложилось мнение, что их нельзя применять в наружных установках. Таковы же и указания завода-изготовителя, предусматривающего эти предохранители исключительно для внутренней установки.

В Сборнике информационных писем ОРГРЭС «Электрическая часть и масляное хозяйство» (Госэнергоиздат, 1952) указывается, что «Предохранители с кварцевым заполнением предназначены для работы в закрытых помещениях. Опыта эксплуатации их при установке на открытом воз-

духе не имеется. Нормальное положение предохранителя — вертикальное, указателем вниз. При горизонтальной установке и отсутствии замка возможно выпадение патронов из контактов, а также смещение спиральных плавких вставок внутри патрона вследствие вибрации или тряски» (стр. 78, раздел 5).

В недавно вышедшем «Справочнике электрика промышленных предприятий» (Госэнергоиздат, 1954) также отмечается, что предохранители ПК и ПКТ не применяются для наружной установки вследствие увлажнения кварца в патроне (стр. 238, примечание 3 к табл. 14-4). Тем не менее многолетний опыт эксплуатации предохранителей ПК в одной городской сети 6 кВ и одной городской сети 10 кВ и сетях «Сельэнерго» показывает полную пригодность этих предохранителей для работы в наружных установках.

По отзывам эксплуатационного персонала указанных сетей и наблюдениям автора предохранители ПК вполне пригодны для открытой установки. Этими предохранителями защищены трансформаторы столбовых подстанций, а также ответвления от воздушных высоковольтных линий и линии, питающие сельскохозяйственных и небольших промышленных потребителей. Всего в эксплуатации находится 49 комплектов предохранителей ПК, в том числе: 39 комплектов в сети напряжением 10 кВ и 10 комплектов в сети 6 кВ. Предохранители применяются в течение 5 лет в климатических условиях Украины, вне зоны загрязнения изоляции промышленными уносами.

Предохранители установлены вертикально (рис. 1) или горизонтально (рис. 2) в зависимости от конструктивных особенностей строения, на котором размещен предохранитель. Изоляторы предохранителя установлены на деревянной или железной раме.

Вначале неподвижные контакты предохранителей демонтировали с изоляторов типов ОА-6 и ОА-10, с которыми они поставлялись, и устанавливали на линейные штыревые изоляторы. Однако впоследствии от этого отказались и стали монтировать предохранители на изоляторах внутренней установки, не разукрупляя их.

Следует отметить, что изоляторы типов ОА-6 и ОА-10 за 4 года с лишним эксплуатации работали без случаев пробоя или перекрытия и также могут считаться вполне пригодными для использования на открытом воздухе. Предохранители работают одинаково надежно при установке указателем и вверх и вниз. Не наблюдалось также случаев ухудшения работы предохранителей при горизонтальной их установке. Предохранители,

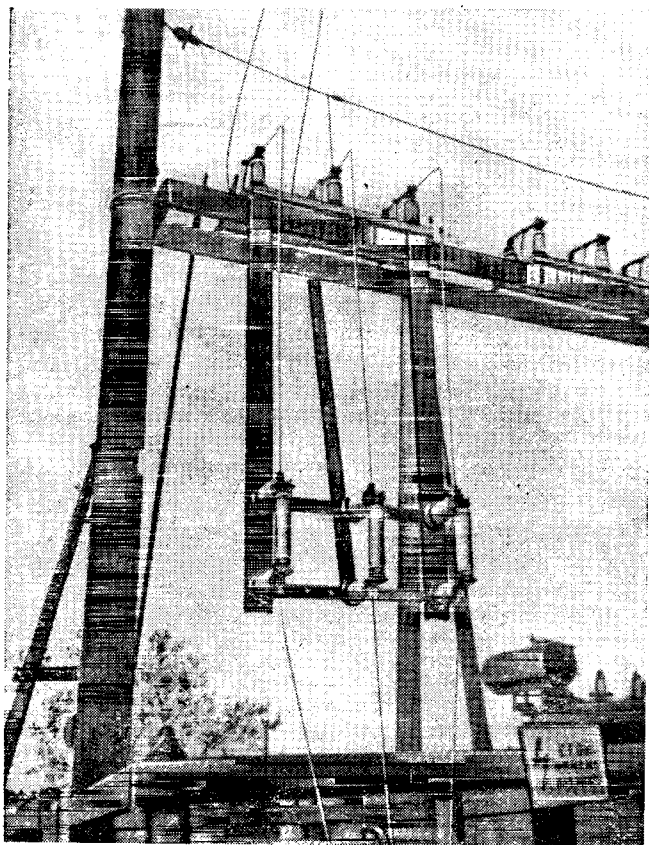


Рис. 1. Вертикальное расположение предохранителей типа ПК (защита трансформатора)

защищающие трансформаторы столбовых подстанций, чаще всего устанавливаются вертикально, а защищающие линии — горизонтально.

Герметизация патрона, выполняемая заводом, вполне достаточна. Во вскрытых для замены плавких вставок патронах, работавших длительное время даже при повышенной влажности, кварц оказывался сухим.

Для определения запаса электрической разрядной прочности ($\frac{\text{мокроразрядное напряжение}}{\text{рабочее напряжение}}$) фарфора патрона был подвергнут испытанию предохранитель ПК-6/20 после сгорания плавкой вставки, без вскрытия и удаления песка. Испытание заключалось в повышении напряжения, подаваемого на колпачки патрона, до возникновения разряда, одновременно патрон орошался искусственным дождем силой 10 мм/мин. Метод испытания соответствовал требованиям ГОСТ 1232-53. Были произведены три испытания: 1) предохранитель при вертикальной его установке орошался дождем из дистиллированной воды, 2) при горизонтальной установке — дождем из дистиллированной воды, 3) то же, что и 2, но орошением речной водой с большим количеством взвесей. Результаты испытаний приведены в таблице.

Данные испытаний свидетельствуют о том, что предохранители ПК-6 не уступают по мокро-

Мокроразрядное напряжение предохранителя ПК-6/20 в различных положениях

| Положение патрона | Качество воды | Мокроразрядное напряжение, кВ |
|-------------------|--------------------|--|
| Вертикальное | Дистиллированная | 30, 35, 34, 34, 34, 30 кВ Среднее из 6 опытов 32,8 кВ |
| Горизонтальное | То же | 34, 41, 41, 38, 34, 34 кВ Среднее из 6 опытов 38,7 кВ |
| Горизонтальное | Речная со взвесями | 20, 26, 22, 23, 19, 25 Среднее из 6 опытов 22,5 кВ |

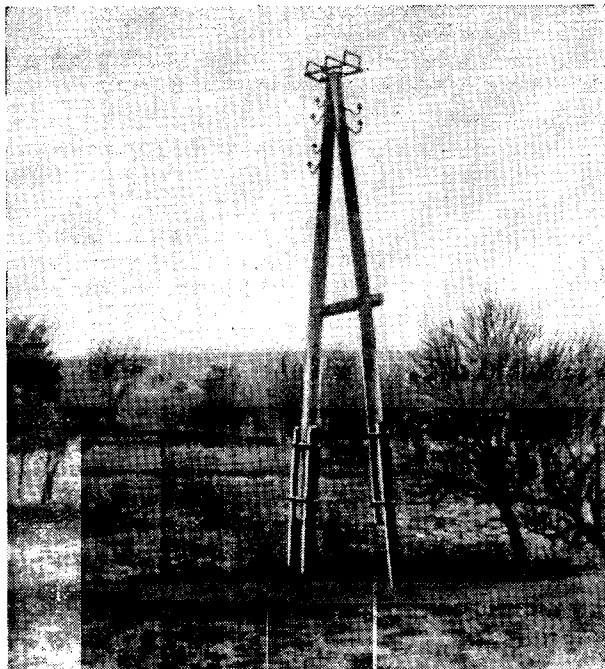


Рис. 2. Горизонтальное расположение предохранителей типа ПК (защита линии 10 кВ).

разрядному напряжению 6 кВ линейным штыревым изоляторам. Опыт эксплуатации говорит о том же.

Выводы. 1. Длительный опыт безаварийной эксплуатации предохранителей ПК в открытых установках подтверждает их полную приспособленность для этих условий. Установка предохранителей ПК вне зон промышленного загрязнения должна широко внедряться.

2. Предохранители ПК могут устанавливаться как в горизонтальном, так и в вертикальном положении.

3. Следует провести широкое экспериментальное исследование работы предохранителей ПК в тяжелых промышленных условиях — в зоне загрязнения промышленными уносами, при наличии вибраций и т. д., а также собрать данные по предприятиям об их опыте эксплуатации предохранителей ПК в таких сравнительно тяжелых условиях.

[30.11.1954]

О СХЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

(Статья Н. Н. Крачковского, *Электричество*, № 11, 1953, № 1 и 5, 1955)

Инж. Г. С. ЛИСОВСКИЙ

Ленинградское отделение Гидроэнергoprojecta

Главная схема электрических соединений гидроэлектростанции определяет всю электротехническую часть последней, поэтому выбор рациональной схемы является одним из наиболее ответственных моментов проектирования.

В этом смысле статья Н. Н. Крачковского является своевременной и в общем правильно освещает принципы, которые должны быть положены в основу выбора главной схемы электрических соединений гидроэлектростанции.

Дискуссия по статье весьма полезна, она поможет уточнить и развить целый ряд положений, характерных для схем электрических соединений современных автоматизированных и телемеханизированных гидроэлектростанций.

Одним из основных требований, которому должна удовлетворять главная схема электрических соединений, является надежность. При аварии на любом участке схемы в энергосистему или потребителю должна выдаваться максимальная мощность.

В кольцевых схемах, начиная от треугольника, благодаря тому, что каждый элемент присоединяется через два выключателя, это требование удовлетворяется полностью. Но этого нельзя сказать в отношении обычной схемы с двойной системой шин и присоединением каждого элемента через один выключатель и развилку разъединителей. Если при кольцевых схемах в случае аварии в любой точке выдача мощности полностью сохраняется, то при обычной схеме с двойной системой шин в случае аварии на шинах выдача мощности полностью прекращается или наполовину в зависимости от того, на одной или двух системах шин осуществлялась работа непосредственно перед аварией. Кроме того, при обычной схеме с двойной системой шин имеет место высокая повреждаемость на шинах из-за ошибочных операций с разъединителями. Таким образом, эта схема является самой ненадежной и не может быть рекомендована к применению на гидроэлектростанциях.

И. П. Чумбуридзе считает, что одним из существенных

требований, предъявляемых к главным схемам электрических соединений гидроэлектростанций, является гибкость. И. П. Чумбуридзе исходит, повидимому, из того положения, которое имело место раньше, когда на всех станциях был дежурный персонал. Он упускает, что в настоящее время гидроэлектростанции проектируют автоматическими и телемеханизированными, без постоянного дежурного персонала, с «дежурством на дому». Теперь одним из важнейших требований является автоматичность схемы, т. е. способность обеспечить нормальную работу станции в послеаварийном режиме не путем оперативного вмешательства дежурного персонала, а главным образом при помощи средств системной автоматики (АПВ, АВР, АПВС).

Для осуществления автоматизации и телемеханизации в нормальном режиме эксплуатации, а также успешного действия системной автоматики в послеаварийном режиме необходимо, чтобы все переключения в главной схеме электрических соединений производились только при помощи выключателей. Телеуправление разъединителями невозможно, так как из-за отсутствия у них механизма свободного расцепления не будет уверенности в окончательном завершении операций.

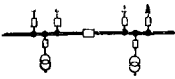

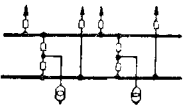
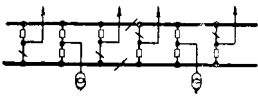
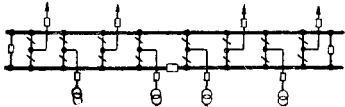
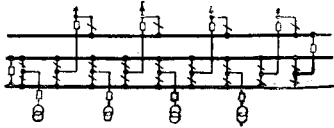
Таким образом, разъединители в схемах электрических соединений гидроэлектростанций должны постоянно находиться во включенном положении. Их назначение должно сводиться лишь к тому, чтобы отделять тот или иной участок цепи в случае его ремонта. Это приведет к резкому снижению аварийности.

Однако переход к схемам, в которых все переключения осуществляются только выключателями, не должен привести к увеличению числа последних. Наоборот, из требований надежности и экономичности следует, что количество высоковольтной аппаратуры должно быть минимальным, а ее использование — максимальным.

Наиболее экономичными являются схемы, у которых число выключателей равно числу присоединений или меньше его. Это условие свойственно кольцевым схемам и производным от них.

| Наименование схемы | Изображение схемы на повышенном напряжении | Число выключа- телей в зависи- мости от числа присоединений n | Число разъеди- нителей в зависи- мости от числа присое- динений n | Стоимость рас- пределительного устройства, % |
|-----------------------|---|--|---|--|
| Треугольник | | n | $2(n+1)$ | — |
| Четырехугольник | | n | $2(n+1)$ | 100 |
| Пятиугольник | | n | $2n+3$ | — |
| Шестиугольник | | n | $2(n+2)$ | 100 |
| Мостик | | $n-1$ | $2n$ | 75 |
| Шины-линии | | $n-2$ | $2n$ | 67 |
| Шины-линии | | $n-1$ | $2(n+1)$ | — |

Продолжение

| Наименование схемы | Изображение схемы на повышенном напряжении | Число выключа- телей в зависи- мости от числа присоединений n | Число разъеди- нителей в зави- симости от числа присое- динений n | Стоимость рас- пределительного устройства, % |
|--|--|--|---|--|
| С одиночной секционирован- ной системой шин |  | $n + 1$ | $2(n + 1)$ | 117 |
| С одиночной системой шин и обходной шиной |  | $n + 3$ | $2(n + 5)$ | 150 |
| С двойной системой шин и фиксированным присоеди- нением линий |  | $n + 2$ | $2(n + 2)$ | 132 |
| С двойной системой шин, фиксированным присоеди- нением линий и обходным устройством |  | $n + 2$ | $2(n + 5)$ | 132 |
| С двойной системой шин и трансферной шиной |  | $n + 3$ | $2(n + 5)$ | 150 |
| С двойной системой шин и обходной шиной |  | $n + 2$ | $2(n + 6)$ | 132 |

Как видно из таблицы, кольцевые и производные от них схемы имеют наименьшее количество аппаратуры. В то же время они обладают рядом других достоинств.

Как уже указывалось выше, число выключателей в кольцевых и производных от них схемах равно числу присоединений или меньше его и меньше, чем в обычных схемах, например, с одиночной или двойной системой шин. Каждый элемент в кольцевых схемах присоединяется через два выключателя и, следовательно, по степени надежности они эквивалентны схемам с двумя выключателями на присоединение. Ревизии выключателей производятся без перерыва в эксплуатации и без обходных устройств.

Все операции при кольцевых схемах производятся выключателями, что исключает ошибки, которые обычно бывают при операциях разъединителями. Схемы допускают простое осуществление автоматики и телемеханики.

Кольцевые и производные от них схемы не имеют сборных шин, что повышает надежность установки и упрощает ее эксплуатацию. Каждый участок схемы надежно защищается защитой смежного элемента. Повреждение на любом участке схемы приводит к отключению только этого участка и присоединенного к нему элемента, не нарушая нормальной выдачи мощности гидроэлектростанции. Необходимость в дифференциальной защите шин и автоматическом повторном включении на шинах при кольцевых и производных от них схемах отпадает. Транзит мощности через гидроэлектростанцию обеспечивается при ревизиях и авариях на каком-либо из участков схемы.

Применение кольцевых и производных от них схем позволяет принимать сравнительно простые и легкие конструктивные решения и при необходимости осуществлять расширение.

Из сказанного следует, что при числе присоединений до шести должны применяться кольцевые схемы, вплоть до шестиугольника. Большое число гидроэлектростанций и подстанций уже имеет эти схемы, и в ближайшее время можно

будет обобщить опыт их эксплуатации. При большем числе присоединений могут применяться схемы либо с одиночной системой шин и обходной шиной, либо с двойной системой шин и фиксированным присоединением линий, либо с двойной системой шин и трансферной или обходной шинами в зависимости от конкретных условий, т. е. в зависимости от числа присоединений, назначения и ответственности присоединений, конфигурации сети и др. Для мощных станций с большим числом присоединений может быть рекомендована «полукорная» схема с числом выключателей $1,5 n$.

И. П. Чумбурдзе пришел в общем к правильному выводу относительно применения кольцевых схем, хотя и ограничил применение их схемами до четырехугольника. Но правильно рекомендуя для случаев, когда число присоединений больше четырех, схему с двойной системой шин и обходной шиной, он необоснованно предлагает в этих схемах секционирование на обеих системах шин.

Ю. И. Иванов уделяет много места применению «чистых» блоков, которые более правильно называть одиночными. Вследствие неправильного экономического сравнения двух вариантов схемы, представленных на рис. 1 и 2 его статьи, он, естественно, пришел к неправильным выводам.

Очевидно, чем меньше число повышающих трансформаторов, т. е. чем меньше число присоединений на повышенном напряжении, тем проще и экономичней главная схема электрических соединений. В настоящее время вместе с ростом установленных мощностей в энергосистемах увеличился аварийный резерв мощности, поэтому следует, как правило, отказываться от применения схем с одиночными блоками, в особенности для многоагрегатных станций, и переходить на схемы с укрупненными блоками. Одиночные блоки должны применяться, как правило, лишь в тех случаях, когда приходится применять трансформаторы, имеющие предельную по условиям изготовления или транспорта мощность.

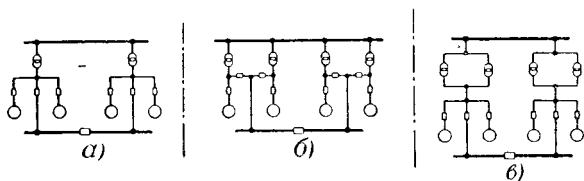


Рис. 1.

Применение укрупненных блоков приводит к существенному уменьшению капитальных затрат. Так, для четырехагрегатной станции, выдающей всю мощность на повышенном напряжении, вариант с одиночными блоками и трехфазными трансформаторами в 1,5 раза дороже варианта с укрупненными блоками (рис. 1).

В одной из схем, которые сравнивал Ю. И. Иванов, принималась группа однофазных трансформаторов, а в другой — трехфазные трансформаторы, при этом стоимость однофазных трансформаторов была завышена. Между тем в схеме, представленной на рис. 1 статьи Ю. И. Иванова, можно было применить схему со двоянными трехфазными трансформаторами (рис. 1, в), как это широко практикуется Теплоэлектропроектом. В этом случае схемы в отношении стоимости трансформаторов были бы равноценны, а надежность схемы, представленной рис. 2, в, выше, чем схемы с группами из однофазных трансформаторов.

Следует отметить, что применение трехфазных трансформаторов более предпочтительно, так как их к. п. д. на 12...15% выше, чем однофазных. На гидроэлектростанциях же их следует применять также потому, что там возникают затруднения в отношении размещения большого числа трансформаторов у стены машинного зала над отсасывающими трубами, ввиду ограниченности места.

Ю. И. Иванов для сравниваемых им схем принял принципиально различные способы питания собственных нужд, причем в схеме, представленной на рис. 2 его статьи, по видимому в целях удешевления, трансформатор собственных нужд 5600 кВА присоединяется к обходной шине. Питание шин 10,5 кВ по ответвлению от одного из блоков и от трансформатора, присоединенного к обходной шине, затрудняет эксплуатацию и не обеспечивает необходимой надежности питания общестанционных собственных нужд и местного района. Кроме того, если в схеме, представленной на рис. 2 статьи Ю. И. Иванова, принять такой же способ питания агрегатных собственных нужд, как и в схеме, представленной на рис. 1 (а только так и нужно поступать при сравнении вариантов), то в схеме рис. 2 количество выключателей будет даже на два больше, чем в схеме рис. 1, разумеется, при условии применения в ней двоянных трехфазных трансформаторов (рис. 1, в). Таким образом, в действительности, как это и должно быть, схема рис. 2 будет дороже схемы рис. 1.

Из сказанного следует, что с точки зрения уменьшения капитальных затрат, уменьшения количества устанавливаемого оборудования, упрощения главной схемы электрических соединений и, следовательно, облегчения эксплуатации и обеспечения надежного питания собственных нужд — на гидроэлектростанциях, работающих в современных энергосистемах, следует, как правило, применять укрупненные блоки генератор — трансформатор. При этом необходимо иметь в виду, что современные мощные трансформаторы обладают высокой надежностью и с возможностью аварийного выхода их из строя практически можно не считать.

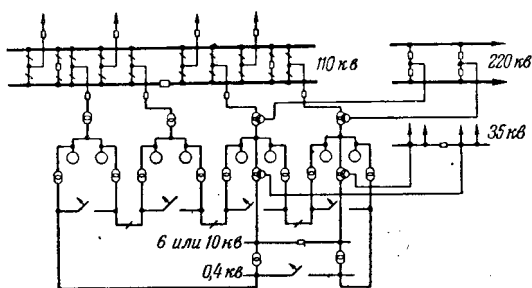


Рис. 2.

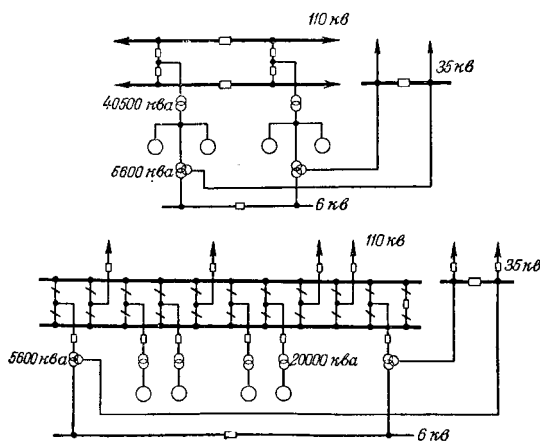


Рис. 3.

Весьма редкие плановые ревизии трансформаторов легко согласовать с режимом работы гидроэлектростанции по водоток. Данные аварийной статистики за 1950—1952 гг. показывают, что удельная повреждаемость трансформаторов равна 0,5 (одно повреждение в год на 200 единиц), в то время как удельная повреждаемость генератора равна 12.

Доводы против применения укрупненных блоков, приведенные Ю. И. Ивановым (увеличение количества газовых реле, ухудшение условий самосинхронизации и необходимость установки дугогасящих катушек), несостоятельны.

Ю. И. Иванов неправильно решает вопрос о питании местного района в схеме, представленной на рис. 4. Н. Н. Крачковский прав, утверждая, что применение трехобмоточных трансформаторов целесообразно тогда, когда мощность, выдаваемая на среднем напряжении, составляет не менее 30% мощности, выдаваемой на основном повышенном напряжении. Очевидно, при нагрузке местного района 6 тыс. кВА устанавливать для его питания трансформаторы мощностью обмоток 35 кВ в 40 тыс. кВА, как это предлагает Ю. И. Иванов, нецелесообразно.

При проектировании гидроэлектростанций, обычно сооружаемых вдали от районных центров, должно быть предусмотрено надежное электроснабжение местного района и особенно сельскохозяйственного производства как на напряжении 6 или 10 кВ, так и на напряжении 35 кВ. Однако питание местного района через понижающие трансформаторы от шин повышенного напряжения неэкономично, а применение для этой цели трансформаторов, повышающих генераторное напряжение, при схеме блоков невозможно.

В ряде случаев для питания местного района может быть использована подстанция, сооруженная для энергоснабжения строительства гидроэлектростанции. Однако не всегда такая возможность имеется. Наиболее экономичным и целесообразным представляется применение трехобмоточных трансформаторов, присоединенных к ответвлениям от блоков и питающих потребителей станционного узла на напряжении 6 или 10 кВ и удаленных потребителей местного района на напряжении 35 кВ. Агрегатные собственные нужды при этом питаются по глухим ответвлениям от блоков (рис. 2).

Трехобмоточные трансформаторы для питания собственных нужд станционного узла и потребителей местного района должны иметь мощность 5600...10 000 кВА и напряжение 10 или 13,8/6,3/38,5 кВ. Необходимо, чтобы промышленность изготавливала такие трансформаторы.

На рис. 3 приведены два варианта главной схемы электрических соединений для четырехагрегатной станции. Экономическое сравнение их показывает, что схема с применением укрупненных блоков, шестиугольника на повышенном напряжении и трехобмоточных трансформаторов в цепях ответвлений для питания местного района дает экономию около 1,5 млн. руб. Этот пример свидетельствует, что построение главных схем электрических соединений гидроэлектростанций по этим принципам может дать значительную экономию государственных средств.

В заключение своей статьи Ю. И. Иванов указывает на, якобы, имеющиеся трудности в релейной защите и вто-

ричной коммутации в случае применения кольцевых схем. Однако эти трудности преувеличены. Кольцевые схемы от треугольника до шестиугольника не вызывают усложнений в релейной защите и вторичной коммутации и, как указано выше, являются самыми надежными.

Инж. В. Г. АЛЕКСЕЕВ

Угличская эс

В статье Н. Н. Крачковского нет даже грубых подсчетов, на основании которых можно было бы судить о целесообразности уменьшения числа выключателей на один или два с точки зрения надежности, гибкости и удобства эксплуатации станции. Между тем известно, что экономия, полученная от уменьшения числа выключателей, незначительна по сравнению с эксплуатационными расходами и расходами на строительство всей станции. Что же касается сокращения затрат на строительство помещения распределительного устройства в связи с уменьшением числа выключателей, то можно сказать, что на любой гидроэлектростанции всегда найдутся свободные помещения, которые можно использовать под распределительное устройство без больших дополнительных затрат.

При выборе схемы необходимо обязательно учитывать следующие основные факторы: надежность, экономичность, удобство эксплуатации, значение станции для системы и наличие в последней необходимого резерва, а также однотипность схем станций.

Если станция не имеет большого значения в системе, то может быть применена упрощенная схема, более экономичная и менее надежная. В тех случаях, когда станция работает в пиковой части графика системы, при выборе схемы следует учитывать возможность отключения трансформаторов при остановках агрегатов. В этих случаях надо избегать присоединения на генераторном напряжении трансформаторов, от которых питаются общестанционные собственные нужды и поселок.

В настоящее время возбудители генераторов устанавливаются на одном валу с генератором, а смазка резинового подшипника и охлаждение генераторов при достаточных напорах обеспечиваются самотеком с верхнего бьефа без насосных установок. Следовательно, требования к надежности схемы собственных нужд станции могут быть снижены, так как она обеспечивает питание лишь резервных агрегатов собственных нужд.

С целью упрощения автоматики, увеличения надежности и снижения числа включений и отключений масляных выключателей целесообразно собственные нужды каждого генератора питать через трансформатор от этого же генератора, главного или вспомогательного, с тем, чтобы осуществить частотный пуск и частотную остановку агрегатов собственных нужд, при которых двигатели собственных нужд разворачиваются и останавливаются вместе с разворотом и остановкой агрегата. После остановки агрегата соб-

ственные нужды остаются присоединенными к генератору этого агрегата.

В отдельных случаях целесообразно применять упрощенную, менее надежную схему станции с тем, чтобы в дальнейшем перейти на более надежную. Например, можно сначала осуществить схему с одним выключателем, а затем перейти на схему с двумя выключателями.

Схемы, приведенные в статье Н. Н. Крачковского, можно применять для строящихся станций, но с учетом в каждом отдельном случае сказанного выше.

Схемы, помещенные на рис. 1 и 2, имеют существенный эксплуатационный недостаток. При отключении трансформаторной группы станция теряет собственные нужды, что влечет за собой аварийную остановку агрегатов и невозможность в дальнейшем поднять напряжение с нуля на группе трансформаторов. Схемы, помещенные на рис. 3, 4, 14, 16, 18, 19, 21, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 33 и особенно 20 и 32, имеют низкую надежность в связи с тем, что устройства автоматического повторного включения и защита линий электропередачи действуют на два выключателя и более. Учитывая, что защита и устройства автоматического повторного включения линий электропередачи работают особенно часто в грозовой период и когда линии не защищены тросом, можно сказать, что обычная схема с одним выключателем и блокировкой разъединителей надежнее.

Схемы рис. 12, 13, 22, 23 нельзя считать надежными, так как повреждение одной линии электропередачи приводит к отключению двух линий, являющихся продолжением друг друга. Кроме того, при этих схемах сильно усложняется вопрос о применении высокочастотных и резервных защит.

Схемы рис. 14, 16 также не надежны, так как при отключении одной линии электропередачи теряется мощность блока. В случае схемы рис. 15 при выводе группы трансформаторов в ремонт или резерв требуется отключение линий электропередачи.

Кольцевые схемы имеют тот недостаток, что при выводе в капитальный ремонт любого выключателя кольцо разрывается. Н. Н. Крачковский считает, что это не имеет существенного значения, так как ремонт можно производить в часы работы станции с минимальной нагрузкой. Но он забывает, что выключатель, например типа МКП 274, ремонтируется 5...7 дней. Следовательно, при наличии семи выключателей схема будет разорвана в течение почти двух месяцев.

К преимуществам кольцевых схем относится отсутствие общей системы шин, но зато все присоединения отключаются двумя выключателями, что снижает их надежность. Статистика показывает, что больше 50% аварий возникает из-за ошибочных действий дежурного персонала. Схема многоугольников для дежурного персонала является сложной, и ошибки весьма вероятны.

В схемах рис. 27 и 28, кроме недостатков, указанных автором, имеется еще тот большой недостаток, что присоединения нельзя переводить с одной системы на другую без отключения выключателей.

О НЕОБХОДИМОСТИ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

(Статья М. В. Грейсуха, А. М. Розенталя и Н. Н. Стефановича, *Электричество*, № 9, 1954)

Инженеры Н. А. КАЗАК, В. З. БАЗЫЛЕВ
и Г. А. ГУСИН

Вопрос о необходимости расширения области применения синхронных электродвигателей неоднократно ставится в периодической печати.

Основные выгоды применения синхронных электродвигателей указаны в статье И. А. Сыромятникова в журнале «Электрические станции», № 7, 1954 г., где автор отмечает, что широкое внедрение синхронных двигателей повысит экономичность работы энергоустановок, а при затапливаемых коротких замыканиях в сетях, в случае использования «потолочного» возбуждения, явится эффективным средством для предотвращения отключения потребителей. Это обстоятельство особенно важно для потребителей, удаленных от источников электрической энергии.

Можно согласиться с основными положениями, выдвинутыми М. В. Грейсухом, А. М. Розенталем и Н. Н. Сте-

фановичем, в пользу внедрения синхронных двигателей в самых различных областях промышленности. Однако составленные ими рекомендации частично должны быть пересмотрены и расширены.

На основе опыта эксплуатации и значительных исследований, проведенных в исследовательских институтах и на нефтепромыслах, Техническим советом Министерства нефтяной промышленности предложено максимально использовать на нефтепромыслах синхронные двигатели в качестве привода механизмов, работающих длительно в тяжелом режущем режиме, а также в условиях пуска под нагрузкой, что особенно важно для применения схем самопуска.

В настоящее время синхронные двигатели на нефтеперерабатывающих промыслах вполне надежно и устойчиво работают спаренно с такими механизмами, как грязевые поршневые насосы для турбинного бурения (402 квт, 6 кв, ДСЗ-1508-8), воздушные компрессоры, водяные поршневые насосы и т. д.

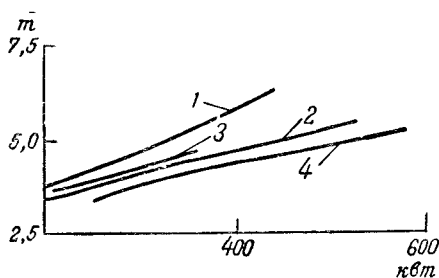


Рис. 1. Сравнение по весу двигателей 250...600 кВт на 0,4 (1, 2) и 6 кв (3, 4). Кривые 1, 3 — 750 об/мин, 2, 4 — 1 000 об/мин.

Опыт эксплуатации подтвердил допустимость резкомеханических режимов и прямого пуска при глухо подключенном возбудителе. Однако исполнение двигателей и пусковых устройств требует еще от электропромышленности значительных усилий для полной ликвидации недоброкачества сборки и других дефектов. Необходимо согласиться с утверждением авторов о совершенно недостаточной номенклатуре выпускаемых электропромышленностью синхронных электродвигателей как по шкале мощностей, так и скоростям вращения.

В целях расширения области применения синхронных двигателей следует освоить двигатели со скоростью вращения 3 000 об/мин мощностью от 500 до 12 000 кВт. Важно также, чтобы эти двигатели допускали прямой пуск непосредственно от сети. Так, для эффективного внедрения законтурного заводнения на нефтяных промыслах, как одного из основных средств повышения добычи нефти, весьма целесообразно применение центробежных насосов высокого давления типов 5П-10, П-150х11 и др. (питательные электронасосы: 270 м³/час, 140...150 ат), спаренных с синхронными двигателями 1 700 и 2 000 кВт, 3 000 об/мин.

Электродвигатели на 3 000 об/мин в диапазоне мощностей 100...500 кВт должны использоваться как основные для комплектования центробежных насосов по перекачке нефтепродуктов. Особенно необходимы двигатели этого типа в верхней части диапазона мощностей (350...500 кВт) для центробежных насосов магистральных нефтепроводов.

В качестве привода центробежных насосов для станций водоснабжения должны найти применение синхронные двигатели мощностью 60...300 кВт, 1 500 об/мин. Мощность 180...200 кВт должна стать верхним пределом для двигателей на напряжение 0,4 кв, так как дальнейшее увеличение мощности при этом напряжении неизбежно приведет к перерасходу материалов, излишним затратам и потерям мощности. Преимущество двигателей 6,0 кв по сравнению с двигателями 0,4 кв при мощности 200...500 кВт особенно проявляется при скоростях 750 и 1 500 об/мин. Помимо излишних затрат и потерь мощности, при низковольтном варианте исполнения двигателей приходится также считаться с техническими трудностями устройства подключения двигателей к питающей сети; питающие кабельные линии и коммутационная аппаратура получаются тяжелыми и дорогостоящими. Увеличение веса (сталь, медь) и потерь мощности в низковольтном варианте обусловлено потребностью в трансформаторной установке. Кривые рис. 1, 2 и 3 показывают на необходимость пересмотра рекомендаций авторов в части увеличения мощности двигателей в низковольтном варианте до 200...500 кВт. Что касается схем пуска, то при широком внедрении прямого подключения к сети с глухоподключенным возбудителем выбор варианта питающего напряжения не имеет существенного значения, так как в обоих случаях пуск реализуется в равной мере просто.

Настало также время для широкого применения напряжения 10 кв в распределительных сетях, что позволило бы повысить технико-экономические показатели работы электроустановок в значительных масштабах. Однако это бесспорно важное мероприятие пока не может найти распространения из-за отсутствия двигателей на 10 кв, в особенности синхронных. Применение промежуточных трансформаторов 10/6 кв для использования в этом случае двигателей 6 кв не может рассматриваться как целесообразное решение.

Синхронные двигатели 750, 1 500 и 3 000 об/мин, мощностью свыше 400 кВт на 10 кв могли бы найти широкое

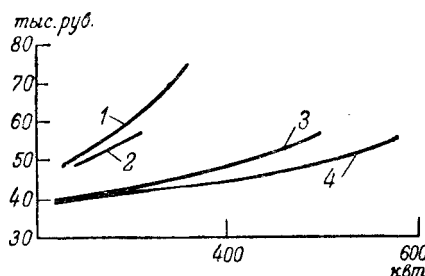


Рис. 2. Сравнение стоимости установок с двигателями 250...600 кВт на напряжения 0,4 (1, 2) и 6 кв (3, 4). Кривые 1 и 3 — 750 об/мин, 2, 4 — 1 000 об/мин. (без учета общих элементов в виде распределительных устройств 6 кв и др.).

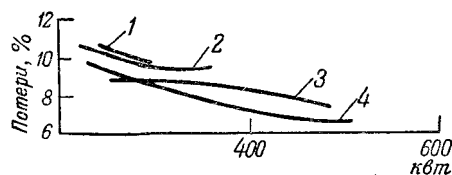


Рис. 3. Сравнение потерь мощности при использовании двигателей 250...600 кВт на напряжения 0,4 (1, 2) и 6 кв (3, 4). Кривые 1 и 3 — 750 об/мин, 2 и 4 — 1 000 об/мин (включая потери в трансформаторах).

применение в различных отраслях промышленности. Повидимому, двигатели на 10 кв будут заметно дороже двигателей на 6 кв только в диапазоне до 1 000 кВт, однако вряд ли они будут дороже двигателей 6 кв вместе с дополнительной к ним установкой трансформаторов 10/6 кв.

Повышение коэффициента мощности в распределительных сетях и у потребителей в основном осуществляется за счет применения статических конденсаторов. Вследствие дефицита конденсаторов на напряжении 400/230 в компенсация отстающей реактивной мощности, как правило, осуществляется на более высоком напряжении (6 кв). Такой способ компенсации не дает достаточного эффекта, так как наиболее значительные потери имеют место в сетях низкого напряжения и трансформаторах 6/0,4 кв. Применение синхронных двигателей на 6...10 кв будет более выгодным средством повышения коэффициента мощности и должно существенно ограничить роль статических конденсаторов, особенно, если учесть, что синхронные двигатели содействуют восстановлению напряжения в послеаварийном режиме.

Наоборот, в сетях 400/230 в в случае многочисленной мелкодвигательной нагрузки в виде двигателей 2...35 кВт должна повыситься роль статических конденсаторов, так как стоимость синхронных двигателей малой мощности с машинными возбудителями будет несравненно выше стоимости асинхронных двигателей и соответствующих статических конденсаторов.

Была бы желательна комплектная поставка электропромышленностью асинхронных двигателей 380/220 в малой мощности и набора статических конденсаторов, приспособленных для наружной установки вблизи двигателей.

Наряду с этим, должны получить широкое распространение синхронные электродвигатели с возбуждением по системе С. Г. Таманцева и по системе С. Б. Юдицкого, для чего электропромышленность должна серьезно заняться вопросом освоения и выпуска двигателей этих типов, способных конкурировать с соответствующими укрупненными асинхронными двигателями как в отношении стоимости, так и в части пусковых и нагрузочных характеристик.

Изложенное позволяет сделать вывод, что перенос функции статических конденсаторов 6 кв на синхронные двигатели потребует отдать преимущества двигателям, рассчитанным на коэффициент мощности не выше 0,8, а в случае средних и малых мощностей — 0,75...0,70. При таком решении будут повышены возможности форсировки возбуждения без особого удорожания синхронных двигателей, а компенсация отстающей реактивной мощности осуществится в широких пределах, что особенно важно для некоторых видов промышленности, например нефтяной.

При разработке новых типов двигателей должно быть обращено особое внимание на правильный подбор достаточно мощного возбудителя, обеспечивающего двукратный ток возбуждения при форсировке поля, так как только тогда можно достигнуть высокого эффекта повышения надежности работы потребителей и полного выявления преимуществ этих двигателей, как компенсаторов.

Опыт эксплуатации синхронных двигателей показал, что, помимо общих дефектов сборки и некомплектности, установка пуска в целом нуждается в серьезной доработке в части схем пуска и автоматики в целях дальнейшего их упрощения и в части обеспечения прямого пуска при глухо-подключенном возбудителе. Только при этом условии возможно внедрение схем самопуска синхронных двигателей, как одного из важнейших средств повышения надежности работы потребителей.

Нефтяная промышленность нуждается в двигателях во взрывобезопасном исполнении, иначе общее решение промышленных установок делается очень громоздким, мало-надежным и дорогостоящим. Для удовлетворения условий взрывобезопасности настоятельно требуются освоение и выпуск синхронных двигателей надлежащего исполнения, в особенности в диапазоне 200...400 квт, 750...1500 об/мин.



По страницам технических журналов

РАБОТА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В РЕЖИМЕ НЕДОВОЗБУЖДЕНИЯ

Увеличение емкости электрических сетей высокого напряжения, эксплуатируемых Тихоокеанской газовой и электрической компанией, и рост применения статических конденсаторов в системе оказали заметное влияние на уровень напряжения в сети, в особенности во время ночных провалов нагрузки. В связи с этим было признано целесообразным проверить возможность расширения пределов регулирования напряжения путем использования турбогенераторов, работающих в режиме недовозбуждения.

Возможность такой работы турбогенераторов ограничивается двумя факторами — нагревом крайних пакетов стали и массивных крепежных частей статора и статической устойчивостью параллельной работы генератора с системой.

Нагрев стали турбогенератора обусловлен тем, что поток рассеяния лобовых частей статора, вращаясь с синхронной скоростью, создает в пересекаемых им частях машины вихревые токи и добавочные потери. Вследствие того, что поток рассеяния лобовых частей проходит по бандажному кольцу ротора, магнитное сопротивление пути, проходящего этим потоком, зависит от магнитной индукции, создаваемой потоком возбуждения. При отстающем токе в обмотке статора н. с. реакции якоря направлена навстречу н. с. потока возбуждения, поэтому поток рассеяния статора мал и не вызывает заметного нагрева стали статора.

При опережающем токе поток возбуждения меньше, чем при отстающем токе, и не создает сильного насыщения. Вследствие этого поток рассеяния статора и создаваемые им добавочные потери, являющиеся причиной нагрева стали статора, больше, чем при отстающем токе.

В результате применения немагнитной стали для нажимных плит и других массивных металлических частей статора магнитное сопротивление пути потока рассеяния увеличилось, что вызвало уменьшение потока и создаваемых им добавочных потерь. Вследствие этого, значительно уменьшился нагрев стали статора при номинальной нагрузке с коэффициентом мощности вплоть до единицы.

Для проверки возможности устойчивой и надежной работы генераторов в режиме недовозбуждения решено было провести испытания в эксплуатационных условиях. Для этой цели на электростанции Мосс Ландинг, связанной с системой линиями 110 и 220 кв, были выделены два турбогенератора 13,8 кв с водородным охлаждением мощностью 100 и 103 тыс. квт. При изготовлении генераторов в крайние пакеты стали статоров обеих машин было заложено по 12 термопар.

Выводы. Для возможности широкого использования синхронных двигателей в различных отраслях промышленности их исполнение должно удовлетворять следующим требованиям:

1. Простота и надежность пуска;
2. Устойчивая работа при резкопеременных режимах.
3. Наличие в номенклатуре закрытого и взрывобезопасного исполнения.
4. Для нужд нефтяной промышленности номенклатура должна содержать на мощности до 200 квт двигатели со скоростями вращения 375, 750, 1500 и 3000 об/мин. Начиная с мощности 400 квт, двигатели должны изготавливаться на напряжения до 10 кв.

Литература

1. И. А. Сыромятников. Значение синхронных электродвигателей для экономичной и надежной работы энергосистем. Электрические станции, № 7, 1954.
2. М. В. Грейсх, А. М. Розенталь и Н. Н. Стефанович. О необходимости расширения области применения синхронных двигателей. Электричество, № 9, 1954.
3. Решение Технического Совета МНП № 72 от 16/VII 1954 г.

После введения генераторов в работу были проведены испытания на нагрев стали и проверка устойчивости в режиме недовозбуждения. При испытаниях на нагрев стали статора исследовалось влияние, оказываемое на нагрев изменениями напряжения и давления водорода при неизменной нагрузке машины, работающей в режиме недовозбуждения. Всего было произведено 83 испытания.

При испытаниях было замечено, что изменение условий нагрузки, в особенности при одновременном изменении возбуждения, резко отражается на температуре нагрева стали. Так, например, при испытании турбогенератора мощностью 103 тыс. квт при нагрузке 90 тыс. квт, напряжении 13,1 кв и при опережающем токе с коэффициентом мощности 0,8 температура нагрева стали приближалась к установившейся через 12 мин. При увеличении тока возбуждения до значения, соответствующего $\cos \varphi = 1$, температура наиболее нагретой термопары в течение 4 мин снижалась примерно на 25° С.

На рис. 1 показана зависимость превышения температуры нагрева термопары от коэффициента мощности нагрузки генератора. Все кривые построены для нагрузки 112,5 тыс. квт, являющейся максимальной при номинальном напряжении и давлении водорода 0,035 атм. При работе генератора в режиме перевозбуждения с номинальным коэффициентом мощности температура нагрева стали невелика. При увеличении коэффициента мощности примерно до единицы скорость нарастания температуры заметно увеличивается. При последующем уменьшении коэффициента мощности в режиме недовозбуждения скорость нарастания температуры вновь уменьшается.

Испытания показали, что исследованные турбогенераторы могут длительно работать с опережающим током при коэффициенте мощности 0,95 и при номинальных токе и напряжении без чрезмерного нагрева стали. Наряду с этим при испытаниях была выявлена эффективность увеличения давления водорода. Так, повышение давления водорода с 0,035 до 1,05 атм при номинальной нагрузке генератора, работающего в режиме недовозбуждения с коэффициентом мощности 0,95, вызвало уменьшение температуры нагрева стали на 14° С, тогда как уменьшение напряжения на зажимах на 5% приводило к увеличению температуры на 6° С.

Помимо испытаний на нагрев стали были произведены исследования динамической и статической устойчивости. Проверка динамической устойчивости производилась путем отключения некоторых линий электропередачи, отходящих от станции, при работе генератора в режиме недовозбуждения с коэффициентом мощности 0,8...1 при номинальном

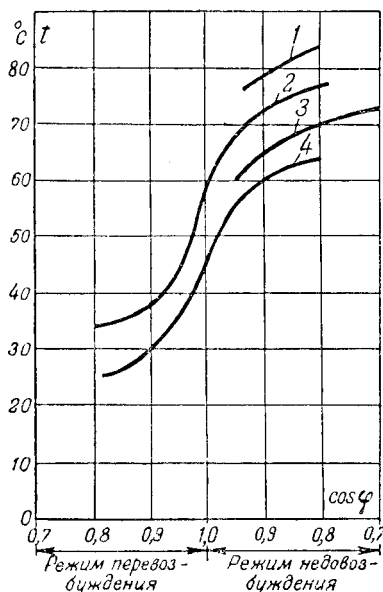


Рис. 1. Превышение температуры нагрева стали статора в зависимости от $\cos \varphi$.

t — превышение температуры нагрева стали, $^{\circ}\text{C}$;
1 — при напряжении 13,1 кВ и давлении водорода 0,035 атм; 2 — при напряжении 13,8 кВ и давлении водорода 0,035 атм; 3 — при напряжении 13,1 кВ и давлении водорода 1,05 атм; 4 — при напряжении 13,8 кВ и давлении водорода 1,05 атм.

напряжении. Такие сравнительно не тяжелые изменения режима не вызвали нарушений динамической устойчивости.

Проверка статической устойчивости производилась на турбогенераторе 13,8 кВ мощностью 100 тыс. кВт. При испытании схема системы была изменена так, чтобы обеспечить возможно более слабую электрическую связь между испытуемым генератором и остальной системой. При этом соотношение между эквивалентным реактивным сопротивлением присоединенной системы и продольным синхронным реактивным сопротивлением машины равнялось 0,35.

Для измерений угла поворота ротора генератора при опытной проверке устойчивости применялось специальное приспособление, разработанное в соответствии со стандартом Американского института инженеров-электриков. Это приспособление представляет собой диск с нанесенными по окружности делениями в градусах, установленный на конце вала ротора. Угол поворота определялся стробоскопическим методом.

При испытании нагрузка генератора, работающего с нормальным возбуждением, была доведена до 92 тыс. кВт. Снижая возбуждение, генератор переводили в режим недовозбуждения. При этом напряжение на зажимах машины понижалось, а реактивная нагрузка машины увеличивалась. Предел устойчивости был достигнут, когда напряжение на зажимах генератора снижалось до 12,3 кВ, а угол сдвига между э. д. с. холостого хода и напряжением на зажимах увеличивался до 78° .

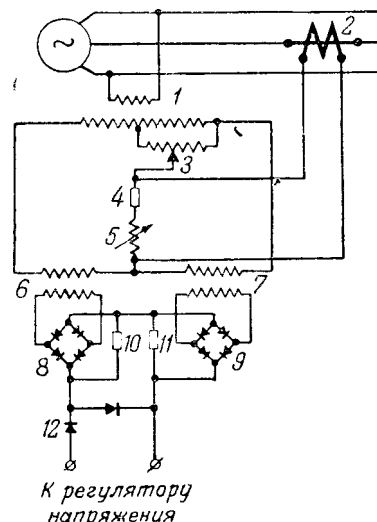
При повторении испытания с включенным электромашинным регулятором возбуждения генератор не терял устойчивости даже при уменьшении напряжения на зажимах машины до 11,8 кВ. Дальнейшее понижение напряжения не производилось из-за опасения перегрева обмоток статора.

На основе результатов испытаний было признано, что при наличии электромашинного регулятора возбуждения работа генераторов в режиме недовозбуждения вполне надежна. Применение современных регуляторов напряжения позволяет осуществить работу генераторов в динамическом режиме и заметно повысить предел статической устойчивости. Было также признано целесообразным установление минимального предела возбуждения при автоматическом регулировании. Наличие минимального предела возбуждения предотвращает возможность снижения возбуждения регулятором при внезапном повышении напряжения на шинах генератора до величины, недопустимой по условиям устойчивости или нагрева стали статора машины.

Ограничение возбуждения генератора производится по величине реактивного тока машины в режиме недовозбуждения в зависимости от предела устойчивости, соответствующей нагрузке генератора и условиям системы. Если при работе в режиме недовозбуждения реактивный ток машины превысит установленное значение, специальное ус-

Рис. 2. Схема устройства для ограничения минимального тока возбуждения.

1 — трансформатор напряжения; 2 — трансформатор тока; 3 — регулируемый автотрансформатор; 4 — активное сопротивление; 5 — регулируемый реактор; 6, 7 — изолирующие трансформаторы; 8, 9 — выпрямители; 10, 11 — активные сопротивления; 12 — вентиль.



ройство заставит регулятор возбуждения повысить напряжение на зажимах машины до восстановления прежней величины реактивного тока.

Как видно из схемы, приведенной на рис. 2, это устройство состоит из трансформатора напряжения 1 с выведенной средней точкой вторичной обмотки, трансформатора тока 2, регулируемого автотрансформатора 3, активного сопротивления 4, регулируемого реактора 5 и двух изолирующих трансформаторов 6 и 7. Напряжения вторичных обмоток изолирующих трансформаторов подводятся к дискриминатору, состоящему из выпрямителей 8 и 9, активных сопротивлений 10 и 11 и вентилей 12.

При увеличении реактивной составляющей тока генератора выше предельного значения напряжение на зажимах изолирующего трансформатора 7 превысит напряжение, подводимое к обмотке трансформатора 6, а напряжение на зажимах выпрямителя 9 превысит напряжение на зажимах выпрямителя 8. Вследствие этого через регулятор напряжения потечет ток, который вызовет увеличение напряжения на зажимах генератора.

В случае, если величина реактивной составляющей тока генератора окажется ниже установленного значения, напряжение на зажимах трансформатора 6 будет больше напряжения на зажимах трансформатора 7. При этом вентиль 12 воспрепятствует протеканию тока обратного направления через регулятор возбуждения.

Для регулировки устройства выбираются уставки реактивного тока при работе генератора в режиме недовозбуждения на холостом ходу и при максимальной нагрузке. Предельное значение тока при холостом ходе устанавливается регулировкой автотрансформатора 3; предельное значение тока при максимальной нагрузке определяется регулировкой реактора 5.

Произведенные испытания показали возможность использования работы турбогенераторов в режиме недовозбуждения для облегчения условий регулирования напряжения в периоды малой нагрузки системы. Испытания показали также, что работа турбогенераторов в режиме недовозбуждения экономически целесообразна в следующих случаях: а) в периоды малой нагрузки системы, имеющей избыток зарядной мощности, создаваемой воздушными и кабельными линиями высокого напряжения или постоянно присоединенными статическими конденсаторами, и б) при нарушениях нормального режима работы системы, связанных с необходимостью перераспределения потоков реактивной мощности.

Литература

1. V. F. Estcourt, C. H. Holley, W. R. Johnson, P. H. Light. Trans. AIEE, т. 72, ч. III, стр. 16, 1953.
2. A. S. Rubenstein, M. Temoshok. Trans. AIEE, т. 73, ч. III—B, стр. 1433, 1954.

Инж. А. И. Гершенгорн

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ МОЛНИИ В ШВЕЙЦАРИИ

На горе Сан-Сальваторе (Швейцария), расположенной в весьма грозоносном районе, действует с 1943 г. лаборатория исследования грозовых разрядов. Лаборатория оборудована двумя башнями-молниеприемниками высотой 70 м. Первая башня представляет собой деревянную конструкцию с растяжками, вторая, сооруженная в 1950 г., — решетчатое сооружение из стальных труб, на котором установлена 18-м игла. Игла изолирована от металлоконструкции и соединена с ней через осциллографический шунт.

Для записи токов молнии используются три автоматических осциллографа: два электронных с холодным катодом для регистрации формы кривой и амплитудных значений больших разрядных токов и один магнитный шестিশлейфовый для записи преимущественно низкочастотных составляющих разрядного и предразрядного токов.

Один из электронных осциллографов имеет логарифмическую развертку времени с постоянной времени 57 мксек, второй — медленнодействующий — линейную развертку длительностью 20 000 мксек. Осциллографы автоматически вступают в действие при разрядных токах, превышающих 5 ка. Автоматическая регулировка вакуума отсутствует, поэтому вакуумнасосы запускаются лишь при приближении грозы, что в ряде случаев мешало своевременной записи разрядных токов. Попытки использовать отпаянные электронные осциллографы не дали благоприятных результатов ввиду высокой относительной влажности воздуха на горе Сан-Сальваторе.

Магнитный осциллограф записывает разрядные токи в течение 1 сек на непрерывно вращающемся барабане окружностью 1 м. При возникновении разрядного или предразрядного тока практически безинерционно вспыхивает дуговая лампа с вольфрамовыми электродами, присоединенная к небольшому импульсному генератору, и происходит запись. Четыре шлейфа с чувствительностью до 300 а и до 5 000 а используются для записи общего протекания тока в обоих молниеприемниках. Для защиты от перегрузки они зашунтированы селеновыми вентилями. Остальные два шлейфа фиксируют положительную и отрицательную амплитуды разрядного тока; эти шлейфы включены через искусственную схему, состоящую из зарядных диодов, емкости и разрядного сопротивления. В первые годы сходная искусственная схема использовалась для непосредственной записи осциллографом количества электричества в молнии; после установки второго молниеприемника от такой записи пришлось отказаться ввиду недостаточного числа шлейфов. Количество электричества определяется теперь путем планиметрирования осциллограмм.

Осциллографы установлены в клетке Фарадея на расстоянии 400 м от второго молниеприемника. Они соединены с шунтом молниеприемника девятижильным кабелем с полиэтиленовой изоляцией, с медным экраном сечением 550 мм².

Шунт состоит из двух ступеней (см. рисунок). Первая ступень, используемая для записи амплитудных значений тока обоими типами осциллографов, безиндукционна и состоит из константовой трубы сопротивлением 0,02 ом. Вторая ступень, сопротивлением 1 ом, используется для основных шлейфов магнитного осциллографа и для аппаратуры автоматического включения обоих осциллографов. Выход второй ступени изолирован на 100 кВ и соединен с жилами кабеля через высокоомные добавочные сопротивления и защитные искровые промежутки. Сопротивление второй ступени обладает большой теплоемкостью во избежание разрушения тепловым действием разрядного тока; оно состоит из константовой ленты весом 16 кг, наматанной бифилярно.

На обоих шунтах, а также на всех других путях возможного стекания разрядного тока установлены для контроля ферромагнитные регистраторы. На молниеприемнике установлен также грозоотметчик, оповещающий персонал лаборатории о появлении грозы на расстоянии до 10 км. Отметчик реагирует на токи смещения, протекающие через молниеприемник при удаленных грозовых разрядах.

Иглы молниеприемника оборудованы индукционным устройством для измерения наибольшей крутизны нарастания разрядного тока. Устройство состоит из проволочной петли площадью 0,5...0,6 м², расположенной вблизи иглы

и в одной плоскости с ней. Концы петли соединены с двумя антипараллельно включенными клидонографами. Клиндонографы позволяют определить положительную и отрицательную амплитуды напряжения, наведенного в петле и пропорционального крутизне нарастания разрядного тока.

В осциллографическом помещении установлены два самопишущих амперметра на ± 50 ма для записи токов тихого разряда в молниеприемниках. Опыт показал, что можно было ограничиться диапазоном ± 10 ма. Приборы защищены от перегрузки цепочками из селеновых вентилялей.

В трех точках — на вершине горы, у ее подножия и на одном из молниеприемников — оборудованы фотографические помещения. Для съемки молний используется ряд обычных фотокамер, затвор которых остается открытым на ночь, а также камеры Бойса с медленной (1...3 м/сек) и быстрой (50 м/сек) подачей светочувствительного слоя. В фотографическом помещении установлен также прибор для измерения ионизации воздуха.

За последние 9 лет лаборатория осциллографировала 274 грозовых разряда, в том числе 204 отрицательных и 57 положительных; в 13 случаях полярность менялась в процессе разряда. Около 50% всех разрядов имели амплитуду менее 2 кВ; в пяти случаях амплитуда превышала диапазон измерения установки — 65 ка.

Молнии отрицательной полярности часто состояли из нескольких — до 17 — частичных разрядов, разделенных паузами в 0,01 мсек или более. При положительной полярности в 55 случаях был зарегистрирован только один разряд и лишь в двух случаях — два частичных разряда.

Средний заряд молнии составлял для отрицательных разрядов 22,2 к, для положительных 44,5 к, для биполярных 120 к. Наибольший заряд отрицательных молний достигал 169 к; для положительных и биполярных разрядов он превышал 350...385 к.

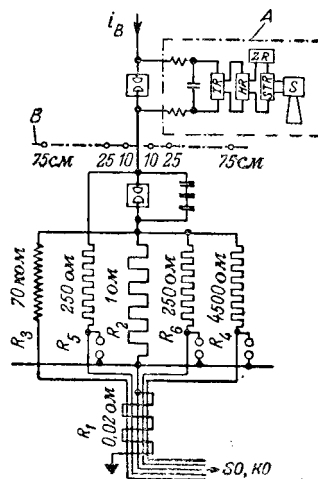
Крутизна нарастания тока составляла в большинстве случаев 10...20 ка/мксек. В шести замерах она превышала диапазон клидонографа (40 ка/мксек). При положительной полярности крутизна меньше, чем при отрицательной. Длительность молнии составляла в 60% всех случаев менее 0,2 сек, в 90% всех случаев — менее 0,45 сек. Отдельные многократные разряды имели длительность до 1,8 сек. Зависимости между амплитудой и длительностью тока обнаружено не было.

Число успешных фотографий молнии составляло около 20% общего числа отмеченных грозовых разрядов. Ступенчатое продвижение лидера было зафиксировано лишь на двух фотографиях, причем только для первого частичного разряда. Ряд снимков с камерой Бойса относится к разрядам, развивавшимся от вершины молниеприемника или от земли в сторону тучи. Снимки показывают слабо светящийся канал разряда, плавно продвигающийся вверх; затем весь канал ярко вспыхивает, начиная от верхней своей части. Случаев ступенчатого продвижения лидера снизу вверх отмечено не было. Осциллограммы разрядов, развивавшихся от вершины молниеприемника, начинаются с протекания сравнительно длительного тока в несколько сот

Схема осциллографического шунта.

А — грозоотметчик; В — ферромагнитные регистраторы; ИР — импульсное реле; HR — промежуточное реле с самоблокировкой; ZR — реле времени; STR — выходное реле; S — гудок; SO — к магнитному осциллографу; KO — к электронному осциллографу;

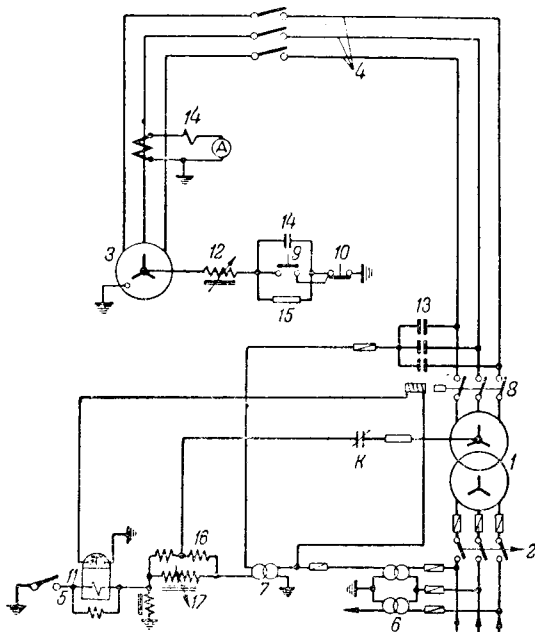
R_1, \dots, R_6 — сопротивления;
 i_B — ток молнии.



О СХЕМЕ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТРАКТОРА¹

(Ответ на запрос инж. Р. А. Богданова)

На рис. 3 на стр. 8 журнала «Электричество», № 9 за 1954 г. была приведена схема соединений той части электроаппаратуры, которая размещается на самом электро-тракторе, здесь же приводится полная схема электрических соединений электротрактора и подстанции агрегатов, демонстрируемых на ВСХВ (см. рисунок).



Силовой трансформатор 1 напряжением 6...10/1,2 кв получает питание от воздушной линии через линейный токо-съем и выключатель нагрузки 2 с ручным автоматическим приводом. Электроэнергия при напряжении 1...1,2 кв передается к электродвигателю 3 электротрактора по силовому кабелю с тремя фазными жилами 4 и заземляющей жи-лой 5.

Система собственных нужд подстанции, куда входит и аппаратура дистанционного управления, получает питание от трансформаторов напряжения 6 напряжением 6...10/0,1 кв. Непосредственным источником питания системы дистан-ционного управления является трансформатор-стабильза-

тор 7 на напряжение 100/48 в. Как видно из схемы, на-пряжения на зажимах вторичной обмотки трансформато-ра-стабилизатора появляется при подключении к полевой линии линейных токо-съемов передвижной трансформатор-ной подстанции. После включения выключателя нагрузки 2 включение и отключение контактора 8 подстанции произ-водится дистанционно соответственно кнопками 9 «пуск» и 10 «стоп». При нажатии кнопки «пуск» замыкается цепь дистанционного управления: зажим трансформатора-ста-билизатора 7, реле защиты 16 и дроссель подстанции 17, реле управления 11, заземляющая жила кабеля 5, кор-пус электротрактора, нормально-замкнутая кнопка «стоп» 10, кнопка «пуск» 9, дроссель 12, нулевая точка статор-ной обмотки электродвигателя 3, три токоведущие жилы кабеля 4, конденсаторный фильтр 13, второй зажим транс-форматора-стабилизатора 7. Таким образом, все три токо-ведущие жилы кабеля для тока дистанционного управле-ния представляют собой как бы один вывод, а заземляю-щая жила второй вывод.

После завершения запуска электродвигателя и отпуска-ния кнопки «пуск» цепь дистанционного управления про-должает обтекаться током, так как срабатывает реле бло-кировки 14, которое своими контактами шунтирует кон-такты пусковой кнопки. Сопротивление 15, шунтирующее пу-сковую кнопку и контакты реле 14, облегчает работу этих контактов при аварийном отключении контактора 8. При разрыве цепи контактами реле 14 ток продолжает проте-кать по цепи управления через сопротивление 15, но он недостаточен для включения контактора подстанции.

Резонансный контур цепи дистанционного управления состоит из дросселя 12 на тракторе, конденсаторного филь-тра 13 и кабеля. Индуктивность дросселя и емкость кон-денсаторов выбираются в зависимости от параметров ка-беля и его длины. Длина кабеля для электротрактора без промежуточной дополнительной кабельной тележки состав-ляет 800 м, а для трактора с повышенным радиусом дей-ствия, имеющего дополнительную кабельную тележку,— 1 600 м.

Как видно из схемы, при обрыве нулевой или фазных жил кабеля ток в цепи дистанционного управления умень-шается, вследствие чего размыкается контакт реле управ-ления 11, и контактор 8 отключается. При пробое токоведущей жилы кабеля на землю или на нулевую жилу ток в цепи управления увеличивается, реле 16 срабатывает и отключает выключатель нагрузки 2. Нормально закрытый блок-контакт К контактора 8 обеспечивает защиту обо-рудования подстанции от замыканий на корпус в цепи на-пряжением 1,2 кв подстанции при отключенном контакто-ре 8, так как обмотка реле 16 в аварийном режиме обте-кается током и отключает выключатель нагрузки 2.

Заземление нулевой точки статорной обмотки электро-двигателя во время его работы осуществляется через блок-контакты реле. Защитное заземление (зануление) дви-гателя присоединено к корпусу двигателя, как это показано на помещаемом рисунке, а не к нулевой точке статорной обмотки, как было показано на рис. 3 в упомянутой выше статье (Электричество, № 9, 1954). Фильтр 13 состоит из конденсаторов типа КБГ-П_{ИТ} 6-1 на 6 кв емкостью $1 \pm 5\%$.

Кандидат техн. наук А. П. Златковский

¹ В письме в редакцию читатель Р. А. Богданов обращает вни-мание на то обстоятельство, что в схеме дистанционного управ-ления электротрактором ХТЗ-12 (А. П. Златковский и А. С. Волков—Электрификация на Всесоюзной сельскохозяйственной выставке; Электричество, № 9, 1954) непонятно назначение сопротивления, шунтирующего кнопку «ход», при наличии блок-контактов реле, также шунтирующих кнопку «ход». Р. А. Богданов также указы-вает, что заземление нулевой точки статора исключает защиту двигателя от перегрузки в случае замыкания на землю фазы питающего кабеля. Помещаем разъяснения автора статьи. Редакция.

ампер. Лидерных разрядов из туч положительной полярно-сти на снимках обнаружено не было.

При многих разрядах определялось расстояние до точ-ки, пораженной молнией, исходя из промежутка времени между вспышкой молнии и громом. Последующая провер-ка по карте показала, что этот метод давал в ряде случаев расстояния, заниженные в 2—4 раза. Предполагается, что канал молнии проходил в подобных случаях горизонтально над наблюдателем, но что его длинная горизонтальная часть была скрыта облаками.

Содержание ионов в 1 см³ воздуха составляет нор-мально 2 000, повышаясь во время грозы до 15 000 и более.

Одновременно с увеличением ионизации нарастает и ток тихого разряда, достигающий во время грозы 3...4 ма. При грозовых разрядах вблизи молниеприемника на запись тока тихого разряда накладывались толчки тока, связанные с образованием кистевого разряда на острие молниеприем-ника.

Литература

1. K. Berger. Bull. ASE, стр. 193, № 5, 1955.
2. K. Berger. Bull. ASE, стр. 405, № 9, 1955.

Кандидат техн. наук Я. М. Червоненкис



ОБ ОБОЗНАЧЕНИИ ФАЗ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

В своей заметке¹ А. Я. Розенталя указывает на недоразумения, возникающие в связи с тем, что фазы трехфазных систем и выводы обмоток трехфазных трансформаторов обозначаются одинаково. Он предлагает сохранить существующее обозначение выводов трансформаторов буквами А, В, С, а фазы в соответствии с принятой для них расцветкой обозначать буквами Ж, З, К.

Считаем, что предлагаемое А. Я. Розенталем обозначение фаз на схемах, диаграммах и при маркировке не может быть принято, так как оно, оградив нас от одних недоразумений, которые указаны в заметке А. Я. Розенталя, вызовет новые недоразумения. Дело в том, что хотя ОСТ НКТП 8249/1117 «Отличительная окраска голых проводов и шин» введен в действие с 1935 г. и установленная им расцветка внедрена на всех новых электрических станциях и других энергетических установках, до сих пор в некоторых энергосистемах продолжают существовать две другие системы расцветок и соответствующие им обозначения фаз: 1) К (А), З (В), Ж (С) и 2) Ж (А), К (В), З (С). Больше того, эти нестандартные окраски шин узаконены новыми Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей, в § 727 которых говорится: «Расцветка фаз сборных и соединительных шин всех распределительных устройств и трансформаторных помещений каждой электростанции и подстанции должна быть одинаковой. Ошиновка сооружаемых электростанций должна быть окрашена: фаза А — в желтый, В — в зеленый и С — в красный цвета».

Следовательно, расцветка фаз должна быть одинаковой в пределах каждой электростанции и подстанции; за их же пределами, даже в одной энергосистеме, она может быть неодинаковой. Стандартная расцветка обязательна только для сооружаемых установок.

Совершенно очевидно, что при наличии на станциях и подстанциях разных расцветок фаз принятие предложения А. Я. Розенталя создаст путаницу.

¹ См. „Электричество“ № 1, 1955.



Хроника

В ТЕХНИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ МЭС

О предотвращении неправильных действий релейной защиты. Для предотвращения неправильных действий релейной защиты из-за дефектов испытательных блоков типа ИБН, в настоящее время снятых с производства (завод «Электропульта» перешел на выпуск испытательных блоков новой конструкции типа БИ, которые не имеют недостатков испытательных блоков типа ИБН), Техническое управление МЭС предложило (циркуляр № Э-1/55 от 21.I 1955 г.) главным инженерам районных управлений и энергокомбинатов провести регулировку положения закорачивающей пластины во всех имеющихся в эксплуатации испытательных блоках типа ИБН, установленных в токовых цепях защиты и электроавтоматики.

Регулировка должна производиться следующим образом: слегка отвинчиваются (ослабляются) крепящие закорачивающую пластину винты с таким расчетом, чтобы контактные пружины могли отжать закорачивающую пластину настолько, насколько позволяет разница в ширине ее отверстий и диаметре крепящих винтов. Затем без смещения пластины затягиваются до отказа крепящие винты.

После регулировки необходимо проверить надежность закорачивания и размыкания полюсов при снятии и установке крышки блока.

Проверку следует производить с помощью лампы или мегомметра путем многократного (3—5 раз) снятия и установки крышки. Во время проверки крышку следует отжимать рукой сверху вниз.

Считаем, что было бы наиболее правильным обозначать фазы на схемах, диаграммах и при маркировках цифрами I, II и III (или 1, 2 и 3). Такое обозначение не зависит от расцветки, принятой на той или иной станции, и будет всегда связано с физической последовательностью чередования фаз во времени. Это поможет избежать недоразумений, указанных в письме А. Я. Розенталя.

Инж. А. Г. Малков
Оргэнергонефть

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

В № 1 журнала «Электричество» за 1955 г. в статье Г. Г. Белоногова «О методах расчета линейных электрических схем» имеется ряд ссылок на мои работы. В частности, из моей статьи «Преобразования в цепях, составленных из четырехполюсников» («Электричество», № 5, 1954) взят для иллюстрации пример.

Приведенное в статье Г. Г. Белоногова решение примера дало результат, отличающийся от моего на 8,3%. Эту разницу Г. Г. Белоногов относит за счет меньшей точности моих вычислений. В действительности же неточность допущена не мной, а Г. Г. Белоноговым.

В схеме рис. 3 моей статьи имеются девять ветвей. Проводимости четырех ветвей Г. Г. Белоногов взял такими, какими они значатся у меня, а остальные по каким-то причинам изменил так, что некоторые из них оказались больше моих в десять раз. Если проводимости взять такими, какими они значатся у меня, то результат решения по методу Г. Г. Белоногова будет точно совпадать с результатом, содержащимся в моей статье.

Доктор технических наук, проф. Р. А. Воронов

ОТ РЕДАКЦИИ

В своем письме в редакцию Г. Г. Белоногов сообщил, что действительно в примере, заимствованном им у Р. А. Воронова, ошибочно взяты не те величины проводимостей. Ошибку Г. Г. Белоногов объясняет тем, что Р. А. Воронов в своей статье пользуется не общепринятыми обозначениями четырехполюсников.

Об автоматическом и дистанционном повторном включении линий, трансформаторов и шин. В целях дальнейшего усиления бесперебойности электроснабжения Техническое управление предложило (циркуляр № Э-2/55 от 9 февраля 1955 г.) главным инженерам энергосистем и энергокомбинатов применять, кроме АПВ линий, также АПВ шин станций и подстанций и АПВ трансформаторов. Для этого устройствами автоматического повторного включения должны оборудоваться: все шины, имеющие защиту, действующую на отключение; все одиночные понижающие трансформаторы; понижающие трансформаторы, работающие раздельно на стороне низшего напряжения, при отсутствии на них АВР или по своей мощности не обеспечивающие подхват всей отключенной нагрузки в случае действия АВР.

Отказ от применения АПВ или немедленного повторного включения от руки должен быть в каждом случае технически обоснован и оформлен главным инженером энергосистемы (энергокомбината).

При введении в действие АПВ не требуется получения предварительного согласия потребителя. Устройства АПВ должны оставаться в эксплуатации круглый год.

На линиях с двусторонним питанием (в том числе и одиночных) должно устанавливаться: а) быстродействующее АПВ при наличии быстродействующей релейной защиты и воздушных выключателей, оборудованных быстродействующим АПВ (за исключением выключателей 110 кв типа ВВ-2501). АПВ должно обеспечивать длительность

полного цикла отключения и повторного включения не свыше 0,5...0,6 сек, когда векторы напряжения по обоим концам линии не разошлись на недопустимо большой угол; б) АПВ без проверки синхронизма, если толчок тока при наиболее неблагоприятном случае несинхронного включения для каждого из генераторов не превышает пятикратного от номинального для турбогенераторов и трехкратного от номинального для гидрогенераторов. При выполнении АПВ без проверки синхронизма необходимо принять меры для предупреждения неправильной работы защиты на смежных участках сети.

При невозможности выполнить на одиночных линиях с двусторонним питанием быстродействующее АПВ или АПВ без проверки синхронизма на них должно устанавливаться АПВ с улавливанием момента синхронизма, ОАПВ (пофазное АПВ) или АПВС (АПВ с самосинхронизацией).

На линиях, на которых установлено быстродействующее АПВ, следует в дополнение к нему устанавливать АПВ без проверки синхронизма или АПВ с улавливанием момента синхронизма (в связи с возможностью неуспешного действия быстродействующего АПВ при одновременном отключении линии по концам).

АПВ без проверки синхронизма независимо от величины возможного толчка тока должно устанавливаться при наличии четырех и более связей между синхронно работающими станциями или частями энергосистемы (или энергосистемами).

Разрешается применение АПВ без проверки синхронизма независимо от толчка тока также при наличии трех связей, если по схеме этих связей маловероятна или редко возможна работа с одновременным и длительным отключением двух связей.

При наличии 2...3 связей и невозможности выполнения на них АПВ без проверки синхронизма в соответствии с условиями, указанными выше, следует устанавливать АПВ: с одного конца линии с контролем отсутствия встречного напряжения и контролем синхронизма (на случай одностороннего отключения линии и наличия встречного напряжения), а с другого конца линии с контролем наличия синхронизма.

В случаях, когда на линии с двусторонним питанием почему-либо не установлено или временно отсутствует (выведено из работы) полноценное АПВ (с обоих концов линии), на ней должно иметься АПВ с одного конца (с проверкой отсутствия встречного напряжения или без него) для автоматического опробования линии напряжением с целью ускорения ее последующего включения.

При автоматическом отключении воздушных и кабельных линий всех напряжений, шин и трансформаторов и отсутствии на них АПВ или отказе его персонал должен проинформировать 1 раз, немедленно (без предупреждения потребителей, осмотра оборудования и других операций, задерживающих ликвидацию аварии и подачу напряжения потре-

бителям), обратное их включение. Исключение составляют линии, шины и трансформаторы, по которым может быть подано несинхронное напряжение с недопустимым для машин толчком тока, а также трансформаторы, отключившиеся действием защит от внутренних повреждений.

На линиях с односторонним питанием рекомендовано шире применять двукратное АПВ, особенно для подстанций без постоянного дежурства персонала.

О выборе уставок максимальных токовых защит и токовых пусковых органов дистанционных защит. Ввиду того, что ток срабатывания максимальных токовых защит от сверхтоков короткого замыкания линий и трансформаторов выбирается близким к номинальному или к рабочему току защищаемого элемента, в эксплуатации имеются случаи неправильного действия указанных защит.

С целью исключения неправильных действий максимальных токовых защит от сверхтоков короткого замыкания линий и трансформаторов из-за их повышенной чувствительности Техническое управление предложило (циркуляр № Э-4/55 от 21 февраля 1955 г.) при выборе уставок защит от сверхтоков короткого замыкания линий и трансформаторов и токовых пусковых органов дистанционных защит руководствоваться следующими основными положениями.

Ток срабатывания максимальных токовых защит и токовых пусковых органов дистанционных защит должен быть выбран, исходя из надежного действия защиты при коротких замыканиях. Как правило, кратность тока срабатывания по отношению к номинальному току защищаемого объекта должна быть не менее 4; меньшие значения кратности тока срабатывания допускаются только в тех случаях, когда коэффициент чувствительности получается меньше 1,5 — для основных максимальных токовых защит и для токовых пусковых органов дистанционных защит; 1,2 — для резервных максимальных токовых защит, не предназначенных для замены основных защит (при этом должна быть проверена надежность отстройки защиты от нормально возможных для защищаемого объекта токов самозапуска и токов перегрузки).

Защита от перегрузки, действующая на отключение, трансформаторов, воздушных и кабельных линий, реакторов и других элементов оборудования, как правило, не должна применяться; действие защиты от перегрузки на отключение должно быть обосновано в каждом отдельном случае.

В тех случаях, когда перегрузка может иметь место при изменении режима работы сети (например, при отключении одного из параллельно работающих трансформаторов и т. п.), защиту от перегрузки следует выполнять или с действием на переключение части нагрузки на другой источник питания, или на сигнал, или на разгрузку.

З. П. Родионова



Библиография

НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Акимов В. Н., Апаров Б. П., Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф., Коробан Н. Т., Ларионов А. Н., Мастяев Н. З. **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ САМОЛЕТОВ И АВТОМАШИН.** Допущено МВО СССР в качестве учебного пособия для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. Под ред. А. Н. Нестеренко. 384 стр., ц. 18 р. 10 к. Госэнергоиздат.

Велоруссов И. И., Красоткин В. Н. **СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ.** 464 стр., ц. 10 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.

Бенедикт О. В. **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА «АВТОДИН».** 200 стр., ц. 9 руб. 40 коп. Труды МИИТ. Москва.

Берг А. И. **СОВРЕМЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ.** 48 стр., ц. 1 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.

Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.** Учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. Изд. 3-е, переработ. 372 стр., ц. 9 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.

Брагин С. М. **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ. КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ.** Учебное пособие для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. 264 стр., ц. 6 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

ВРЕМЕННАЯ ИНСТРУКЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ИЗОЛЯЦИИ ИЗ СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ. Утв. 21.2 1955 г. 13 стр., ц. 45 коп. Госгиптехиздат.

Винтер А. В., Фатеев Е. М. **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЕТРА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ.** Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского АН СССР. 111 стр., ц. 1 руб. 75 коп. Академиздат.

Грибанов А. И. **МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВИДИМОСТИ ПРИ НАПРАВЛЕННОМ ОСВЕЩЕНИИ.** 143 стр., ц. 3 руб. 90 коп. Госэнергоиздат.

Гусев С. А. **ОЧЕРКИ ПО ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.** 216 стр., ц. 8 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.

Долин П. А., Хавин Н. З., Шутов И. Г. **СБОРНИК ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРАВИЛ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ.** Изд. 2-е, пересмотр. и доп. (по сост. на 1 января 1955 г.). 696 стр., ц. 67 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

Епанешников М. М., Соколов М. В. **ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ.** Учебное пособие для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. Под ред. В. В. Мешкова. Изд. 2-е доп. и переработ. 224 стр., ц. 6 руб. 70 коп. Госэнергоиздат.

- Ермолин Н. П. РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН. 168 стр., ц. 5 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.
- Зарницкий Г. Э. ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО. 76 стр., ц. 1 руб. 5 коп. Краснодариздат.
- Ивановский энергетический институт им. Ленина. СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. Вып. 6. 208 стр., ц. 8 руб. 30 коп. Госэнергоиздат.
- ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 35 кВ ВКЛЮЧИТЕЛЬНО (Утв. 19 декабря 1953 г.). 48 стр., ц. 2 руб. 5 коп. Госэнергоиздат.
- ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРИВОДОВ. Техн. упр. МЭС. 48 стр., ц. 2 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.
- ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ. Техн. упр. МЭС. 56 стр., ц. 2 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.
- Ионкин П. А., Пантюшин В. С., Смирнов В. А. СБОРНИК ЗАДАЧ И УПРАЖНЕНИЙ ПО ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ. Изд. 3-е, доп. и переработ. 464 стр., ц. 9 руб. 15 коп. «Советская наука».
- Иосифян А. Г. К ВОПРОСУ ОБ УРАВНЕНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ВЕЩЕСТВА. 9 стр. Академиздат Арм. ССР.
- Калантаров, Манф. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ. Институт энергетики АН Аз. ССР. 116 стр., ц. 1 руб. 80 коп. Академиздат Аз. ССР.
- Кампе-Немм А. А. ДИНАМИКА ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. 235 стр., ц. 7 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.
- П. И. Копняев. СБОРНИК, ПОСВЯЩЕННЫЙ ПАМЯТИ ЗАСЛУЖ. ПРОФ. П. П. КОПНЯЕВА. Отв. ред. А. Д. Нестеренко. 135 стр., ц. 5 руб. 80 коп. Институт электротехники АН УССР. Харьковское обл. издательство.
- Коробейников В. И. В РАЙОНЕ СПЛОШНОЙ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ (мтс и колхозы Северного района). 32 стр., ц. 40 коп. Новосибирское книжное изд.
- Костин К. Ф. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ГИДРОГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ СЕЛЬСКИХ ГЭС. 128 стр., ц. 3 руб. 70 коп. Госэнергоиздат.
- Куваева А. П., Липатов Д. Н. СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ОСНОВАМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. Для энергетических, электротехнических вузов и факультетов. Под ред. А. Т. Голована. 172 стр., ц. 4 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.
- Лебедев П. Д. СУШКА ИНФРАКРАСНЫМИ ЛУЧАМИ. 232 стр., ц. 9 руб. Госэнергоиздат.
- Летов А. М. УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ СИСТЕМ. 312 стр., ц. 9 руб. 20 коп. Гостехиздат.
- Линенберг Г. Г. ВИБРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. 144 стр., ц. 4 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.
- Мазель К. Б. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА. 135 стр., ц. 3 руб. Госэнергоиздат.
- Мандельштам Л. И. ЛЕКЦИИ ПО КОЛЕБАНИЯМ (1930—1932 г.). Под ред. М. А. Леонтовича. 504 стр., ц. 23 руб. Академиздат.
- Метревели В. И. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ КОЛХОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА. 243 стр., ц. 5 руб. Грузгосиздат.
- МЕХАНИЗАЦИЯ РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ. Сборник статей под общ. ред. А. И. Бронникова. 88 стр., ц. 6 руб. 95 коп. Госэнергоиздат.
- Милевский П. Г. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПЕРЕДВИЖНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПЭС-3 МОЩНОСТЬЮ 60 кВА, 72 стр., ц. 2 руб. 75 коп. Заготиздат.
- Михайлов В. В. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В.В. АППАРАТУРЫ. Учебник для электромеханических техникумов. Изд. 2-е. доп. 272 стр., ц. 6 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.
- Науменко И. А. АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ. Под ред. Г. И. Покровского. 87 стр., ц. 1 руб. 35 коп. Изд. ДОСАФ.
- Осколков И. Н., Соколов Ф. Ф. СЕЛЕНОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ. 96 стр., ц. 1 руб. 65 коп. «Искусство».
- ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Учебник для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. В трех частях. Ч. 1. Зевеке В. и Ионкин П. А. — ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ. 216 стр., ц. 9 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.
- Ч. 2. Нетушил А. В., Страхов С. В. ЦЕПИ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ. 216 стр., ц. 9 р. 65 к. Госэнергоиздат.
- ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ. Утв. 8 мая 1954 г. 160 стр., ц. 6 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.
- ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ И ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. Отв. ред. В. А. Трапезников, А. М. Летов, М. А. Айзерман. 604 стр., ц. 37 руб. 50 коп. Академиздат.
- Родионов В. М. СБОРНИК НОМОГРАММ ПО РАДИОТЕХНИКЕ. Изд. 2-е, переработ. и доп. 164 стр., ц. 19 руб. 50 коп. «Соврадио».
- Ромалин В. П. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ. Доп. и переработ. стенограмма публ. лекций. 48 стр., ц. 1 руб. 20 коп. «Знание».
- РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В УСТАНОВКАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. Техническое управление и Госинспекция по промэнергетике и энергонадзору МЭС. 7 стр., ц. 25 коп. Госэнергоиздат.
- Рябов А. Я. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ. Учебник для энергетических техникумов. Изд. 3-е, переработ. и доп. 496 стр., ц. 10 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.
- Сергеев Н. П. КОНТАКТНАЯ СВАРКА. 92 стр., ц. 2 руб. 10 коп. Машгиз.
- Сергеев П. С. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. 256 стр., ц. 11 руб. 15 коп. Госэнергоиздат.
- СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК АН СССР ПО МИРНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ (1—5 июля 1955 г.). Сборник докладов. 340 стр., ц. 14 руб. 45 коп. Академиздат.
- Соловьев П. Ф. ОСНОВЫ МОНТАЖА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК. Учебное пособие для ремесленных училищ. 3-е переработ. и доп. изд. 384 стр., ц. 8 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.
- Стамикост И., Ромашев В. ИЗ ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ. 39 стр., ц. 45 коп. Казгосиздат.
- Тареев Б. М. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. Учебное пособие для техникумов, ремесленных и ж.-д. училищ электротехнической специальности. Изд. 5-е, переработ. 256 стр., ц. 6 руб. 15 коп. Госэнергоиздат.
- ТАРИФЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ И ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ, ОТПУСКАЕМУЮ РАЙОННЫМИ ЭНЕРГОУПРАВЛЕНИЯМИ, ЭНЕРГОКОМБИНАТАМИ И ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ МЭС. Сборник. 84 стр., ц. 4 руб. 15 коп. Госэнергоиздат.
- Термен Ф., Петтит Дж. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА В ЭЛЕКТРОНИКЕ. Перевод со 2 англ. изд. В. Н. Дулина. Под ред. В. Т. Фролкина. 604 стр., ц. 38 руб. 80 коп. Изд. иностр. лит.
- Туровская П. Г. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СВЕТ. Под ред. С. О. Майзеля. 124 стр., ц. 3 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.
- Францевич И. Н., Черновой В. С., Геренрот И. С., Пилипенко Н. А., Ягульская Л. Н. КОМПЛЕКСНАЯ ЭЛЕКТРОЗАЩИТА ГАЗОПРОВОДА ДАШАВА—КИЕВ ОТ КОРРОЗИИ. 32 стр., ц. 1 руб. 15 коп. Академиздат УССР.
- Френкель Я. И. ПРИНЦИПЫ ТЕОРИИ АТОМНЫХ ЯДЕР. 2-е изд. 248 стр., ц. 12 руб. 50 коп. Академиздат.
- Халфин А. М. ОСНОВЫ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ. 580 стр., ц. 20 руб. 90 коп. «Сов. радио».
- Хашинский В. П., Рудаков В. В. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ. Под ред. В. П. Хашинского. 140 стр., ц. 1 руб. 90 коп. Сельхозгиз.
- Царев Б. М. КОНТАКТНАЯ РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ. 2-е переработ. и доп. изд. 280 стр., ц. 9 руб. 65 коп. Гостехиздат.
- Чечет Ю. С. УПРАВЛЯЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОЛЫМ РОТОРОМ. 240 стр., ц. 6 руб. 35 коп. Госэнергоиздат.
- Чиликин М. Г., Коротин А. М., Прокофьев В. Н. СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОГИДРОПРИВОД. 216 стр., ц. 7 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.
- Чукаев Д. С. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ БЫТОВЫЕ ПРИБОРЫ. 88 стр., ц. 2 руб. 05 коп. Коммуниздат.
- Шевцов В. Н., Смирнов И. С. ГЕНРИХ ОСИПОВИЧ ГРАФТИО — ИНЖЕНЕР-СТРОИТЕЛЬ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И УЧЕНЫЙ ЭНЕРГЕТИК. 64 стр., ц. 2 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.
- 60 ЛЕТ РАДИО (1895—1955). Научно-технич. сборник. Под ред. А. Д. Фортуненко. 344 стр., ц. 13 руб. 40 коп. Связиздат.
- Шилонов М. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. РЕМОНТ И ИСПЫТАНИЯ. 2 испр. и доп. изд. 404 стр., ц. 14 руб. 50 коп. Машгиз.
- Шрейбер В. П. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА МЕЛКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ. Из опыта работы треста «Кавминэнерго». 20 стр., ц. 65 коп. Коммуниздат.
- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ (ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ). Учебник для энергетических вузов. Под ред. Г. Н. Петрова. 396 стр., ц. 13 руб. 23 коп. Груз. политехнич. институт.
- ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ. Обр. М. М. Кагановича. 24 стр., ц. 85 коп. ОРГРЭС. Госэнергоиздат.
- ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ. Обр. А. И. Нейштадта. 32 стр., ц. 1 руб. 10 коп. ОРГРЭС. Госэнергоиздат.
- ЭНЕРГЕТИКА. ОБМЕН ТЕХН. ОПЫТОМ. Сборник 7. 52 стр., ц. 1 руб. 20 коп. Гизлептом.
- Эфендизаде А. А. ТЕОРИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА. 188 стр., ц. 9 руб. 70 коп. Изд. АН, Аз. ССР.
- Юткин Л. А. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. 51 стр., ц. 1 руб. 75 коп. Машгиз.
- Яворский Б. М. КАК РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ СВЕТ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ. 112 стр., ц. 3 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

И. А. Андрианов, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова,
Н. Г. Дроздов (главный редактор), **Е. Г. Комар, М. П. Костенко,**
И. А. Сыромятников (зам. главного редактора), **А. М. Федосеев,**
М. Г. Чиликин, М. А. Шателен.

Сдано в пр-во 27/IX 1955 г.

Т-09521

Объем 12 п. л.

Уч.-изд. 16,5 л.

Тираж 19 600 экз.

Подписано к печати 15/XI 1955 г.

Бумага 60×92¹/₂.

Зак. 420.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

В. А. Веников и И. В. Литкенс

О ВЛИЯНИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Современные регуляторы возбуждения, реагирующие на отклонения параметров режима и их производные, могут заметно улучшить пропускную способность и надежность дальних электропередач.

При таком регулировании статическая устойчивость ограничивается уже не внутренним пределом мощности, а пределом по линии. Расчеты статической устойчивости в этом случае могут заменяться определением пропускных способностей соответствующих связей, но выбор и разработка системы возбуждения каждого генератора должны проводиться с надлежащим анализом условий его параллельной работы с другими генераторами данной станции и системы.

В статье приводится разработанная в МЭИ методика аналитических исследований такого рода и опи-

Л. Ф. Дмоховская и В. И. Левитов

СУБГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ПРОСТЕЙШИХ СХЕМАХ И В ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ

В статье рассмотрен один из видов перенапряжений, возникающих при аварийных разрывах дальней электропередачи с продольной и поперечной компенсацией и связанных с появлением колебаний низкой частоты (субгармоник).

Основные черты субгармонического резонанса изучены на простейшей схеме, состоящей из последовательно соединенных линейной и нелинейной индуктивности, емкости и сопротивления. Рассмотрено влияние степени нелинейности на величину критического сопротивления, область существования и амплитуды субгармонических колебаний.

Рассмотрены особенности субгармонического резонанса в трехфазной схеме. Выяснено, что субгармони-

Н. Blaschke

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Существенным элементом для рационализации распределительных устройств среднего напряжения являются закрытые комплектные распределительные устройства, состоящие из отдельных ячеек-шкафов; однако, они отличаются сравнительно высокой стоимостью и требуют увеличенного расхода стали. Выдвижные ячейки на роликах неудобны тем, что в них обычные разъединители отсутствуют и заменены подвижными контактами. Поэтому для удешевления и рационализации конструкции распределительных устройств рекомендуется помещать на роликовой тележке только выключатель, привод к нему и трансформаторы тока. Другим элементом рациональной кон-

В. М. Маранчак

ЗАЩИТА ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В БЛОКЕ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Если несколько генераторов, работающих в блоке с трансформатором, подключены к одной обмотке генераторного напряжения трансформатора, то выполнить на основе известных принципов селективную защиту от замыканий на землю обмотки статора генератора при глубокой компенсации емкостного тока системы генераторного напряжения становится затруднительным.

Рассмотрение неустановившихся процессов, вызванных замыканием на землю, позволило разработать защиту, селективно определяющую место повреждения. Защита реагирует на токи и напряжения нулевой последовательности неустановившегося процесса.

Действие защиты не зависит от степени компенсации емкостного тока. Защита обладает большой чувствительностью и имеет ряд преимуществ по сравнению с известными защитами от замыканий на землю.

Е. Т. В. Gross, W. J. Mc Nutt

УСТРАНЕНИЕ ЕМКОСТНОЙ АСИММЕТРИИ ЛИНИЙ СО СДВОЕННЫМИ ПРОВОДАМИ

Приведены результаты исследования возможности уменьшения емкостной асимметрии линии со сдвоенными проводами, имеющей два защитных троса, путем изменения расстояний между проводами и тросами и высоты подвеса проводов, с полным отказом от транспозиции. Данные получены для линии с высотой подвеса проводов 12,2 м, защитных тросов 18,3 м. Расстояние между фазами изменялось от 9,15 до 12,2 м, между тросами — от 9,15 до 15,25 м. Расстояние между проводами одной фазы 0,3 м; в средней фазе оно изменялось от 0,2 до 0,75 м. Увеличение высоты подвеса проводов средней фазы при отсутствии тросов не дает заметного снижения асимметрии; напротив, ее уменьшением на 10...15% по сравнению с проводами крайних фаз можно добиться полной симметрии емкостей всех

Н. L. Rudolph

ПОКРЫТИЕ ИЗОЛЯТОРОВ ПАРАФИНОМ

Для облегчения очистки изоляторов, установленных в местностях с сильно загрязненной атмосферой (например, вблизи цементного завода), Южно-Калифорнийская эдисоновская компания (США) применяет покрытие их раствором парафина в бензине или керосине. Парафин выбран из-за его сравнительно высокой точки плавления (54,5°С): чем выше точка плавления, тем дольше держится покрытие на изоляторах. Растворитель должен быть как можно более летучим, чтобы ускорить затвердевание парафинового раствора; поэтому лучше всего пользоваться авиационным бензином, но за неимением его пригоден и керосин. Парафиновая стружка берется в количестве 0,5 кг на 2,0 л слегка подогретого растворителя. Предварительно очищенные от пыли изоляторы либо протираются тряпкой,

Н. R. Harris

БОРЬБА С ПЕРЕКРЫТИЯМИ ИЗОЛЯТОРОВ В ТЯЖЕЛЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

Фирма «Детройт Эдисон» (США) в числе прочих мероприятий, направленных к устранению перекрытия изоляторов в условиях дождя, тумана, а также близости загрязняющих воздух химических предприятий, применила покрытие изоляторов кремнийорганическим слоем, увеличивающим поверхностное сопротивление изоляторов. После ряда лабораторных испытаний был выбран состав из 50%-го растворителя (например, изопропилового спирта) и 50%-го кремнийорганического масла. Но этот состав в эксплуатационных условиях застывает слишком медленно. В настоящее время лабораторией фирмы разработан и проходит производственные испытания новый кремнийорганический состав, отличающийся быстротой застывания, причем покрытие получается более твердым.

Ф. А. Горяинов и Б. Ф. Токарев

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ НЕСИММЕТРИИ НА РАБОТУ ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО УСИЛИТЕЛЯ

В статье рассматривается влияние магнитной несимметрии на работу трехступенчатого электромашинного усилителя продольного поля.

Анализ влияния магнитной несимметрии проводится на основе схемы замещения магнитной цепи машины.

Рассмотрены два случая несимметрии: первый — когда под одноименными полюсами первой и третьей ступеней, а также второй и третьей ступеней расположен больший воздушный зазор, чем под разноименными; второй — когда под одноименными полюсами первой и третьей, а также второй и третьей ступеней находится меньший воздушный зазор, чем под разноименными.

На основании проведенного анализа делаются выводы, что магнитная несимметрия трехступенчатого

трех фаз; однако этот способ невыгоден, так как связан с увеличением высоты опоры.

Уменьшение расстояния между проводами средней фазы увеличивало асимметрию; увеличение этого расстояния в $2...2\frac{1}{2}$ раза (по сравнению с расстоянием между проводами в крайних фазах) позволяло свести ее к нулю. При этом оказалось, что чем больше расстояние между фазами, тем сильнее сказывается изменение расстояния между проводами средней фазы. Так, при расстоянии между фазами 9,15 м асимметрия исчезала при расстоянии между проводами средней фазы, в 2,8 раза большем, чем в крайних; при расстоянии же между фазами 12,2 м достаточно было увеличения в 2 раза.

El. Eng., т. 73, стр. 695, № 8, 1954.

(Э-во, 11, 1955)

сываются проведенные на динамической модели МЭИ сравнительные испытания регуляторов возбуждения различных систем, рассматриваются вопросы автоматического регулирования синхронных компенсаторов приемной системы.

Результаты исследования динамической устойчивости показывают, что для ее улучшения должно быть применено форсирование возбуждения с возможно более высоким потолком, причем последнее может с успехом осуществляться от второй производной. Дальнейшее гашение колебаний при сильных толчках в системе требует такого управления автоматическим регулятором возбуждения, при котором ток возбуждения возможно быстрее изменялся бы при прохождении скорости через нуль.

В приложении даются математические соотношения, характеризующие методику расчета, основанные на методике *D*-разбиений.

Электричество, № 11, 1955.

пропитанной этим составом, либо покрываются парафином при помощи плоской кисти. При первом способе гладкая поверхность сохраняется до 90 дней, при втором — до 60 дней, и значительно облегчает удаление пыли и грязи с изоляторов.

Недостаток парафинового покрытия состоит в его легкой воспламеняемости. Дождь и сильный туман сразу после нанесения парафина могут частично нарушить покрытие, если оно не успело затвердеть. Это покрытие разрушается быстрее в условиях высоких температур, особенно на открытом солнце.

El. World, т. 142, стр. 100, 105, № 10, 1954.

(Э-во, 11, 1955)

ческие колебания могут существовать при любой величине сопротивления в нулевом проводе.

Показано, что расчет субгармонических колебаний в длинных линиях с продольной и поперечной компенсацией может быть с небольшими видоизменениями произведен на основании расчетных формул, полученных для схем с сосредоточенными параметрами. Приведены экспериментальные данные, полученные на модели линии электропередачи большой протяженности.

Электричество, № 11, 1955.

Кремнийорганический раствор наносится на изолятор пульверизатором или протирающим тряпкой, пропитанной раствором. Предварительно поверхность изолятора тщательно очищается четыреххлористым углеродом, изопропиловым спиртом или водой. Раствор наносится на поверхность дважды и держится на ней более трех месяцев. Этот способ предохранения от перекрытий достаточно экономичен: покрытие кремнийорганическим раствором почти 360 изоляторов на 132 кв дважды в год обошлось в 8 раз дешевле их полной замены. Однако для подвесных и штыревых изоляторов увеличение пути утечки до 5 см/кв обходится дешевле периодического покрытия слоем кремнийорганического раствора.

El. World, т. 142, стр. 80, № 4, 1954.

(Э-во, 11, 1955)

струкции распределительного устройства являются так называемые «выдвижные» разъединители взамен обычных откидных. Выдвижные разъединители позволяют сократить высоту камеры распределительного устройства с 3,5 до 2,85 м, т. е. на 16%. Наконец, в качестве стандартного элемента камеры может служить шкаф управления, закрытый со всех сторон обшивкой из листового металла и содержащий провода управления и измерительные приборы, смонтированные уже на электротехническом заводе.

Deutsche Elektrotechnik, т. 9, стр. 17, № 3, 1955. (Э-во, 11, 1955)

усилителя может явиться или причиной резкого снижения коэффициента усиления (первый случай несимметрии) или причиной самовозбуждения усилителя (второй случай).

В статье указываются пути компенсации влияния магнитной несимметрии.

Электричество, № 11, 1955.

В качестве фильтра токов нулевой последовательности использованы трансформаторы тока нулевой последовательности типа ТПНШ. Проверена экспериментально способность трансформаторов тока пропускать без заметных искажений тока нулевой последовательности повышенной частоты.

Защита может быть использована как для генераторов, работающих в блоке с трансформатором, так и для генераторов, работающих на шины генераторного напряжения. Защита может найти применение и в сложных, компенсированных кабельных сетях.

Электричество, № 11, 1955.

В. М. Русидзе

КОМПЛЕКТНЫЕ ГЛАВНЫЕ РАСПРЕДУСТРОЙСТВА

До того, как будет налажено производство генераторов с расщепленными обмотками, можно путем установки у выводов, в цепи генератора расщепленных реакторов и применения однофазных трансформаторов с расщепленными обмотками мощностью до 60 тыс. *кВА* получить секционированное распределительное устройство с одной замкнутой системой сборных шин с присоединением каждого генератора и трансформатора к смежным секциям и спариванием отходящих линий разных секций мостиковыми выключателями.

При повреждении генераторов, трансформаторов или сборных шин автоматическим включением соответствующих, нормально разомкнутых, секционных или мостиковых выключателей обеспечивается бесперебойность электроснабжения. Расчет токов короткого замы-

Р. Р. Харченко

ДИНАМИКА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ В РЕЖИМЕ СИЛЬНОГО УСПОКОЕНИЯ

Магнитоэлектрические приборы, будучи линейными преобразователями, обслуживают область динамических измерений. Таковы, например, гальванометры, резонансные индикаторы, флюксометры, вибраторы осциллографа, интегрирующие измерители сейсмометров и другие приборы.

Как известно, свойства, характеристики и область применения всех названных типов приборов существенно зависят от степени успокоения подвижной части β . Однако особенности динамики этих приборов достаточно хорошо изучены только для режима $\beta < 1$. В области режимов $\beta > 1$ и $\beta \gg 1$ в общей их те-

А. В. Негушил

О ПРИМЕНЕНИИ СХЕМЫ КУМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ДОБРОТНОСТЕЙ

На основании преобразования активных электрических цепей с источниками тока или напряжения и рассмотрения простейшего резонанса токов показывается, что основные формулы для расчета емкости и добротности образца по измерениям при помощи измерителя добротности (куметра) справедливы не только при больших, но и при малых добротностях образца.

С целью повышения пределов измерения рекомендуется увеличивать мощность в измерительной цепи и повышать чувствительность вольтметра куметра.

Доказывается, что распространенное мнение о пригодности схемы и расчетных формул куметра только для измерения высоких добротностей несправедливо и что эта схема при соответствующем изменении пара-

S. Jahn

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЗАМЫКАНИЯ И РАЗМЫКАНИЯ КОНТАКТОВ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Для измерения выдержек времени более 10 *мсек* хорошо оправдали себя секундомеры с электрическим дистанционным срабатыванием. Для измерения продолжительности коммутации менее 10 *мсек* указанные секундомеры не пригодны, так как по техническим причинам постоянная времени их срабатывающих звеньев не может быть сделана ниже определенного значения. В этих случаях успешно применяют метод измерения посредством ламп тлеющего разряда. Этот метод, принципиальная схема которого дана в статье, позволяет не

Г. Г. Гимоян

КОМПЕНСАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ В ДИСТАНЦИОННЫХ РЕЛЕ

Преимущества дистанционной защиты линий электропередачи, использующей выпрямители и поляризованное реле, общеизвестны. Возможность получения разнообразных характеристик срабатывания защиты (прямая, окружность, эллипс, гипербола), повышенная чувствительность и меньшее потребление выгодно отличают эти устройства от устройств, использующих реле с линейными элементами. Однако вследствие несовершенства способов компенсации нелинейности вольт-амперных характеристик выпрямительных узлов в существующих конструкциях дистанционных реле с выпрямителями имеют место большие потери мощно-

F. J. Fischer, E. Friedländer

ДРОССЕЛЬ НАСЫЩЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ 100 ТЫС. *КВА*

На заводе «Дженерал Электрик Компани» (Англия) построен реактор мощностью 100 тыс. *кВА* для напряжений от 6,6 до 22 *кВ* с подмагничиванием постоянным током. Реактор предназначен для использования в качестве искусственной нагрузки при испытании электрических машин. Цель управления реактора питается постоянным током от ртутного выпрямителя 500 *кВт*; плавное изменение тока управления достигается сеточным регулированием выпрямителя. Реактор представляет собой двоячную конструкцию из двух однотипных шестисердечниковых реакторов, половинной мощности каждый. Требования экономичности заста-

Ф. Г. Рыклин

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ ТИПА ПК В ОТКРЫТЫХ УСТАНОВКАХ

Ссылаясь на опыт длительной эксплуатации 39 комплектов предохранителей типа ПК в открытых установках, автор утверждает, что предохранители этого типа вполне приспособлены для этих условий работы и что следует широко внедрять их в открытые установки вне зон промышленного загрязнения.

Следует также провести широкое экспериментальное исследование работы предохранителей ПК в тяжелых промышленных условиях — в зоне загрязнения промышленными уносами, при наличии вибраций и т. д., а также собрать данные по предприятиям об их опыте эксплуатации предохранителей ПК в таких сравнительно тяжелых условиях.

L. Cigánek

КРАТКОВРЕМЕННЫЙ НАГРЕВ ПРОВОЛОК НА КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДКЛАДКАХ

Путем решения основного уравнения теплового состояния получена формула для уточненного расчета допустимого нагрузочного тока элементов сопротивления, укрепленных на фарфоровых подкладках:

$$I = \sqrt{[s \nu \sqrt{\pi \lambda c / 4 t_z} + c_d s^2 / t_z] \vartheta_m / \rho},$$

где s — сечение провода, *мм*²;

ν — шаг намотки провода на керамику, *мм*;

λ — теплопроводность керамики, *вт/°С м*;

c — теплоемкость керамики, *дж/°С м*³;

t_z — время нагревания, *сек*;

c_d — теплоемкость провода, *дж/°С м*³;

ории имеется ряд пробелов и отсутствует единый подход к решению типовых динамических задач.

Эти режимы и являются предметом исследования статьи. В работе рассматриваются основные динамические характеристики магнитоэлектрических приборов (для $\beta > 1$): переходная, баллистическая, амплитудно-частотная и несколько временных. Для аналитического выражения этих характеристик вводятся простые аппроксимирующие формулы, в которых новым параметром является постоянная времени прибора. Затем выделяется две наиболее важные общие группы приборов: воспроизводящие (например, осциллограф) и интегрирующие (например, флюксметр) и применительно к ним определяются: рабочая полоса частот при заданной точности измерений, погрешности отработки импульсов разной формы и длительности и способы внесения поправок в документы регистрации.

Электричество, № 11, 1955.

только измерить выдержки времени менее 10 мсек, но и непрерывно наблюдать за работой реле и определить также время дребезжания контакта при коммутации.

Для испытания и отрегулировки поляризованных реле и измерения их постоянных времени применяют специальный прибор с индикацией процесса коммутации на небольшой катодно-лучевой трубке. Этот метод обладает очень высокой точностью отсчета, так как поворот якоря реле дает изображение, занимающее всю ширину экрана. Экран снабжен шкалой, калиброванной в процентах установленной продолжительности импульса. Прибор позволяет легко установить отклонения постоянных времени реле от номинала и внести соответствующие поправки.

Deutsches Elektro-Handwerk, стр. 57, № 4, 1955. (Э-во, 11, 1955)

вили конструировать реактор с возможно более высокой индукцией. Поэтому особое внимание было обращено на компенсацию гармоник в кривой тока, что является особенно важным в условиях нагрузки испытываемых машин. Для этой цели был использован принцип, сходный с применяемым для компенсации гармоник в многофазных выпрямительных установках: магнитные потоки фаз в двух одинаково насыщенных группах сердечников смещаются на 30° один относительно другого, что достигается особой схемой обмоток. Потери в реакторе составляют: для обмотки постоянного тока — менее 1/4%, для обмотки переменного тока и в стали менее 1% отдаваемой реактивной мощности.

G. E. C. Journal, т. 22, стр. 93, № 2, 1955. (Э-во, 11, 1955)

ϑ_m — максимальная допустимая температура, °C;

ρ — удельное сопротивление провода, ом·м.

Эта формула выведена в предположении, что тепло распределяется по проводу равномерно в течение короткого (1...2 мин) времени, причем избыток тепла поступает в керамику. Толщина керамики принимается достаточно большой, так что за рассматриваемый промежуток времени тепло успевает проникнуть только на глубину, значительно меньшую этой толщины. Из уравнения видно, что ток, являясь функцией времени, зависит в основном от сечения провода и шага намотки, но мало зависит от свойств самой керамики, входящих в формулу в виде корня четвертой степени из λc .

Экспериментальная проверка подтвердила хорошее совпадение результатов измерений с расчетной кривой.

Elektrotechnický obzor, т. 125, стр. 69, № 2, 1955. (Э-во, 11, 1955)

кания показывает, что в предлагаемом распределительном устройстве возможно применение комплектных ячеек с выключателями МГГ-10 и ВМГ-133 без реактирования линий.

Электричество, № 11, 1955.

метров и измерительных приборов может быть применена для измерения электрических свойств полупроводников, угол потерь которых превышает 45°.

Обращается внимание на значительное влияние, на результаты измерения параметров и погрешностей, связанных со схемой измерения. Даются рекомендации по уменьшению погрешности, обусловленной влиянием паразитных параметров и расплывчатости резонансной кривой.

Электричество, № 11, 1955.

сти, резко снижающие параметры защиты по чувствительности и потреблению.

Недостатком этих реле является также необходимость сглаживания выпрямленного тока для предотвращения вибрации реле, приводящей к увеличению времени действия реле или к усложнению его схемы.

В статье предлагаются новые способы компенсации нелинейности полупроводниковых выпрямителей, пригодный как для релейных, так и для измерительных схем, магнитных усилителей и т. д.

Электричество, № 11, 1955.

Автор также указывает, что предохранители типа ПК могут устанавливаться как в горизонтальном, так и в вертикальном положении.

Электричество, № 11, 1955.

ПОРТАТИВНЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Осциллограф предназначен для регистрации переходных напряжений на контактах выключателей и при испытании плавких вставок. Метод развертки и регистрации заключается в следующем. Развертка периодическая, непрерывная с малым временем обратного хода. Весь интересующий отрезок времени разбивается на некоторое количество равных циклов развертки. След луча на экране электронно-лучевой трубки под воздействием исследуемого напряжения смещается относительно нейтрального положения. Таким образом, каждый последующий цикл развертки смещается относительно нейтрального положения и следа развертки предыдущего цикла. На пленке получается изображение всех циклов развертки; каждая точка на

ВЛИЯНИЕ ДОПУСКОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОВЗОВ

Характеристики тяговых двигателей, снятые на стендах завода-изготовителя, всегда несколько отличаются от номинальной, предусмотренной техническими условиями на поставку электровозов. Известные до сих пор исследования характеристик тяговых двигателей не касались причин отклонений их, а сами отклонения рассматривались, как нечто, не поддающееся строгому научному исследованию и обоснованию.

В статье приводится решение этой задачи, в котором обосновываются принципы построения ортогональной системы допусков. Этот метод позволяет, в частности, решать две практически важные задачи: а) при заданном расхождении характеристик тяговых двига-

ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ 6...30 кВ

В Швейцарии разработана серия воздушных выключателей 6...30 кВ на номинальные токи до 4000 А и большие разрывные мощности. Для токов до 1000 А и умеренных разрывных мощностей рекомендуется применение маломасляных выключателей. Дуга гасится сжатым воздухом, который продувается одновременно через сопло, служащее неподвижным контактом, и через полый подвижной контакт.

При номинальном токе свыше 1000...1200 А параллельно основным контактам включены дополнительные контакты большего сечения без дугогасящих приспособлений. В рабочем положении основная часть тока проходит через дополнительные контакты. При отключении они размыкаются раньше основных контактов без образования дуги. Применение дополнительных

НОВЫЕ ВИДЫ ПРИВОДОВ ЛЕБЕДОК И СУДОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Бортовые электростанции оборудованы синхронными «генераторами стабильного напряжения» мощностью от 2×100 до 3×300 кВА, с компаундированной системой самовозбуждения, обеспечивающей нормальную работу сети при толчках нагрузки, создаваемых работой грузовых лебедок. Ротор генератора питается от вторичной обмотки трансформатора возбуждения (ТВ) через выпрямители. На одну первичную обмотку ТВ подается напряжение от выводов генератора, и к ней же подключены конденсаторы для улучшения процесса самовозбуждения. Другая первичная обмотка ТВ питается от трансформаторов тока в цепи генератора. Параллельная работа нескольких генераторов осуше-

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА СО ВРЕМЕНЕМ СРАБАТЫВАНИЯ МЕНЕЕ ОДНОГО ПЕРИОДА

Для коротких кабелей на электростанциях и шахтах нередко требуется дифференциальная защита с особо малым временем действия, нечувствительная к сквозным коротким замыканиям. Реле с тормозными катушками и стабилизированные поляризованные реле постоянного тока, включаемые через сухие выпрямители, имеют время срабатывания не менее 0,02 сек.

Предлагается схема дифференциальной защиты с одним электромагнитным реле переменного тока на каждом конце кабеля; реле действует непосредственно на отключающую катушку выключателя. Реле присоединяются к измерительным трансформаторам — промежуточные смесительные трансформаторы — по одному на каждом конце кабеля. К первичной обмотке

ЭЛЕКТРОВОЗЫ ОДНОФАЗНОГО ТОКА НОРМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

Приводится обзор систем электровозов, предложенных различными фирмами для работы на однофазном токе 25 кВ нормальной частоты.

Фирма Крупп-Шон разработала электровоз со ствольными трехфазными асинхронными двигателями. Для получения трехфазного тока один из каждой пары двигателей имеет между статором и ротором вращающееся кольцо с трехфазной обмоткой, питаемой постоянным током. При своем вращении это кольцо компенсирует одно из двух вращающихся полей, образующихся при питании трехфазной обмотки однофазным током. Получаемым при этом трехфазным током питается второй двигатель данной пары. Фирма Вестингауз разработала две системы: одну с применением модификации трансформаторов Скотта с вращаю-

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА

Описываются магнитные элементы с прямоугольной петлей гистерезиса, принцип действия которых основан на свойстве магнитных материалов принимать два устойчивых состояния в точках положительной и отрицательной магнитной индукции.

Использование таких легко насыщаемых материалов, как перминвар, пермаллой ПН65, обладающих высо-

кой степенью прямоугольности (отношение $\frac{B_r}{B_{макс}}$ боль-

ше 0,9), позволяет использовать эти элементы в качестве бесконтактных реле. Применение магнитных элементов, обладающих практически неограниченным сроком службы, высокой надежностью и достаточным быстродействием (скорости срабатывания таких элементов могут лежать в пределах от десятков миллисекунд до долей миллисекунды), дает возможность замены в ряде случаев электромагнитных реле и электронных ламп.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОПИРОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Копировальные станки и их электрическая часть должны удовлетворять определенным требованиям с точки зрения их практического применения.

Погрешности автоматической обработки копированием могут быть разбиты на три группы: 1) погрешности из-за несовершенства элементов электрической или механической части станка; 2) погрешности при обработке углов детали и мест большой кривизны; 3) погрешности из-за несовершенства элементов станка, не охватываемых и не обрабатываемых замкнутой следящей системой копирования.

Несовершенство элементов станка выражается в люфтах, в упругих деформациях элементов, нагружен-

телей определить возможные допуски на параметры тягового двигателя либо б) по принятым заводским допускам установить величину отклонения характеристики тягового двигателя от номинальной.

Сущность излагаемого метода заключается в том, что действительные значения параметров, определяющих характеристики двигателя и электровоза, рассматриваются как случайные величины, распределенные по нормальному закону, с математическим ожиданием и стандартным отклонением этих параметров относительно его.

Метод практически подтверждается результатами испытаний тяговых двигателей на стендах завода-изготовителя и результатами паспортных испытаний электровозов ВЛ-22 М на линии.

Электричество, № 11, 1955.

данном цикле сдвинута по вертикали относительно нейтрали на расстояние, пропорциональное приложенному напряжению.

Осциллограф состоит из двух блоков: блока питания и блока регистрации. В блок питания входят источники питания электронных ламп и электронно-лучевой трубки. Кроме того, в блоке питания помещено устройство подсветки луча электронно-лучевой трубки, увеличивающее яркость луча в нужные моменты времени. Это устройство может быть синхронизировано с внешним источником. В блоке регистрации размещены электронно-лучевая трубка, схема развертки и синхронизирующий генератор.

Временная развертка в приборе, собранная по схеме Миллера, имеет синхронизацию с калибровочным генератором, работающим по принципу «R. C.».

Electronic Eng., стр. 115, № 3, 1955.

(Э-во, 11, 1955)

ствляется как обычно. Приведена схема самовозбуждения генераторов и осциллограммы испытаний.

Лебедки приводятся трехскоростными короткозамкнутыми двигателями с встроенным дисковым тормозом, имеющими независимое охлаждение от пристроенных вентиляторов для эксплуатации в тропиках. Рукоятка командоконтроллера — с самовозвратом в нулевое положение. Шкафы магнитных станций, установленные на палубах, снабжены электрическими подогревателями для предупреждения конденсации влаги. Механическая долговечность контакторов 10...15 млн. включений. Контакты выдерживают 2 млн. включений под нагрузкой.

Schiff and Hafen, т. 7, стр. 240, № 4, 1955.

(Э-во, 11, 1955)

контактов уменьшает требуемое сечение сопла и, следовательно, расход сжатого воздуха. В выключателях на большие разрывные мощности главные контакты выполняются для уменьшения обгорания из вольфрама. В этом случае дополнительные параллельные контакты требуются уже при номинальных токах от 600 а.

Воздушный выключатель 20 кв в состоянии разорвать цепь при мощности короткого замыкания до 750 тыс. кв. Если расчетная мощность выше этого значения или если скорость восстановления напряжения велика, применяется выключатель с шунтирующими сопротивлениями 5...20 ом. Цепь сопротивления разрывается либо главным контактом после погасания дуги, либо — при особо больших разрывных мощностях — отдельным контактом, рассчитанным на небольшой ток.

Bull. Oerlikon, стр. 15, № 309, 1955.

(Э-во, 11, 1955)

щимся полем и другую с игнитронными выпрямителями. Фирма AEG предложила электровоз с выпрямителями с управляемыми сетками, а фирма Алстон — с однофазным синхронным двигателем и генератором постоянного тока. Фирма Эрликон предложила электровоз с изменением частоты тока, питающего тяговые двигатели. Этот электровоз оборудован двумя агрегатами. Первый из них состоит из однофазного синхронного двигателя и машины постоянного тока I. Второй агрегат состоит из машины постоянного тока II на одном валу с трехфазной асинхронной машиной. Изменение частоты тока, подаваемого этими агрегатами к тяговым двигателям, достигается следующим образом: при низких скоростях (до 22 км/час) трехфазная асинхронная машина вращает машину постоянного тока II. Током от нее питается машина постоянного тока I. При высоких скоростях, наоборот, машина I питает машину II и приводит во вращение, асинхронную машину.

Indicateur Industr. т. 36, стр. 11, № 633, 1955.

(Э-во, 11, 1955)

ных большими механическими силами, в разнице между трением покоя и движения подвижных частей станка, в вибрации, в неточном соответствии установки шаблона со следящей головкой, с одной стороны, и обрабатываемой детали с инструментом, — с другой.

Люфты являются основным фактором, лимитирующим точность копирования. Наибольшие люфты имеют место в ходовых винтах. Они могут быть сведены до величины, меньшей 0,2 мм. Люфты в зубчатых передачах (приведенные к ходовому винту) в 30 раз меньше.

В современных копировальных станках достижения скорости копирования до 2,5 м/мин. При этой скорости станки способны обрабатывать детали с наименьшим радиусом кривизны в 25 мм с погрешностью порядка $\pm 0,3$ мм. При скорости около 1,3 см/мин погрешность не превышает 0,0125 мм при любой форме детали.

El. Eng., № 8, 1954.

(Э-во, 11, 1955)

смесительного трансформатора присоединены выводы вторичных обмоток измерительных трансформаторов на трех фазах кабеля. Смесительные трансформаторы насыщаются быстрее, чем высоковольтные трансформаторы тока, причем строго одновременно на обоих концах кабеля.

В соединительные провода включены добавочные сопротивления для уравнивания нагрузки во вторичной цепи обоих смесительных трансформаторов. Номинальный ток вторичной обмотки не превышает 0,3 а с целью уменьшения потребляемой мощности.

ETZ — В, стр. 108, № 4, 1955

(Э-во, 11, 1955)

Приводятся примеры применения магнитных элементов в различных отраслях техники. Так, в телемеханике находит широкое применение коммутатор или переключатель, предназначенный для поочередного подключения датчиков к модулирующему или непосредственно передающему устройству. Такой переключатель лежит в основе многих схем памяти, применяемых в счетно-решающей технике.

Рассматривается схема магнитного модулятора, позволяющего осуществлять амплитудно-импульсную и широко-импульсную модуляции.

Приводятся два примера систем запасаения сигналов. Одна из них, так называемая матричная память, очень компактна.

Электричество, № 11, 1955.

МОТОВАГОННЫЙ ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ОДНОФАЗНОГО ТОКА 50 гц ДЛЯ ТУРЦИИ

В Турции электрифицируется на однофазном токе 25 кв, 50 гц пригородный участок длиной 27 км у Стамбула, для которого заказано 18 трехвагонных электросекций и три электровоза. Первая электростанция выпущена с завода и проходит обкатку на линии Балансьенн—Тионвиль французских железных дорог.

Электросекция состоит из двух моторных и одного прицепного вагонов. Полуподдрессоренные электродвигатели установлены только на одной тележке. Трансформатор и прочее оборудование смонтированы под кузовом. Длина секции 68 м, вес без пассажиров около 120 т, вместимость секции 500 пассажиров (252 места для сидения), максимальная скорость 90 км/час; часо-

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ И ТОРМОЗА С МАГНИТНЫМ ПОРОШКОМ

Электромагнитные муфты с порошком, помещенным в масле, характеризуются следующими тремя свойствами: 1) передаваемый муфтой крутящий момент пропорционален току возбуждения; 2) при выбранном токе возбуждения момент, развиваемый муфтой, сохраняет почти постоянную величину, т. е. не зависит от разности скоростей обеих половин муфты или ее скольжения; 3) затрачиваемая в обмотке возбуждения муфты мощность составляет ничтожную долю от передаваемой муфтой мощности. Например, для муфты с передаваемой мощностью 350 вт на возбуждение затрачивается 1,5%, для муфты на 500 кат — 0,05% (при скорости 1500 об/мин). Эти цифры зависят от ширины рабочего зазора, колеблющегося от 2 до 6 мм. Электромагнит-

ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ НОМИНАЛЬНОГО

В практике эксплуатации асинхронных двигателей трехфазного тока часто наблюдаются случаи, когда двигатели питаются напряжением, отличным от номинального. Так, в условиях электроустановок в Болгарии двигатели, рассчитанные на 380 в, получают иногда напряжение 360, 320 и даже 300 в. С другой стороны, при близком расстоянии двигателя от трансформаторной подстанции напряжение на его зажимах достигает 420 в. В связи с этим в статье предлагается способ определения рабочих характеристик двигателя при отклонении питающего напряжения от номинального. Способ основан на использовании круговой диаграммы.

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ТРАМВАЙНОГО ТРАНСПОРТА

Приводится исследование структуры стоимости пассажироперевозок трамвайными поездами, состоящими из одних моторных или из моторных и прицепных вагонов, и формулируются основные требования, предъявляемые современными большими городами к городскому транспорту, и, в частности, к трамвайному подвижному составу. Описывается новый современный моторный трамвайный вагон для больших городов, запроектированный исследовательским институтом машиностроения.

Новые вагоны — четырехосные, оборудованные четырьмя тяговыми двигателями последовательного возбуждения, обладающими следующими параметрами: в часовом режиме 44 кат, 167 а, 1760 об/мин, а в дли-

ЭЛЕКТРОПРИВОД ЭКСКАВАТОРА ДЛЯ ТОРФА

Торфодобывающая машина состоит из копателя со стрелой, подающего сырой торф из траншеи, и распределителя, укладывающего торф для сушки. Все механизмы торфодобывающей машины смонтированы на двух гусеничных тележках. Машина получает электрическую энергию из сети 8,3 кв трехфазного тока посредством перемещающегося по земле кабеля. Главный двигатель для копателя — асинхронный короткозамкнутый в 120 л. с., 3,3 кв. Для питания остальных двигателей, вспомогательного электрооборудования и освещения на машине установлен трансформатор. Каждая гусеничная тележка перемещается при помощи двигателя в 1,5 л. с., а распределитель приводится от двигателя в 6,5 л. с. Так как три последних двигателя должны допускать регулирование скорости в отношении 2:1 и, кроме того, их вращение должно быть син-

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ НА ОДНОФАЗНОМ ТОКЕ 50 гц

Приводится краткое описание электрифицированной линии Хелленталь (Германия) протяжением 75 км. Рельеф дороги тяжелый, имеются подъемы до 55‰, и дорога частично проходит на высоте 900 м над уровнем моря.

Контактная сеть дороги построена по нормам германских железных дорог для 15 кв, несмотря на то, что ее напряжение составляет 20 кв. Высота подвески контактного провода 6,25 м со снижением до 5,2 м в туннелях. Из-за стесненных габаритов туннелей ширина токоприемников и длина их контактной части сокращены. Контактный провод медный 100 мм², несущий трос — бронзовый. На одном участке в качестве эксперимента подвешен сталеалюминиевый провод.

На дороге испытываются электровозы четырех раз-

КОМБИНИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МУФТА — СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

На двухвинтовом грузовом судне водоизмещением 1400 т установлены электрические машины двойного назначения: во время движения судна эти машины действуют как электромагнитные муфты, соединяющие вал приводного двигателя внутреннего сгорания с валом судового винта. Во время стоянки судна в гавани каждая из двух муфт может работать в качестве трехфазного синхронного генератора 500 квт, 440 в, 50 гц, обслуживающего электроприводы грузоподъемных и разгрузочных устройств. Каждая муфта рассчитана на передачу 630 л. с. Внутренняя часть муфты выполнена 20-полюсной; обмотка полюсов возбуждается от источника постоянного тока через контактные кольца. Наружная часть муфты в виде кольца с шихтованным железом снабжена трехфазной обмоткой, состоящей из медных стержней с изоляцией класса В. При работе

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Приводятся статистические данные по электрификации железных дорог в Европе и во всем мире. По этим данным всего в мире электрифицировано 49 000 км железных дорог, в том числе в Европе 29 000, в Америке 9 000, в Азии 6 000 и в Австралии 900 км. По данным на 1952 г. страны Европы имеют следующую протяженность электрифицированных железных дорог: Швейцария 4 232 км, или 80% всей железнодорожной сети страны, из этого количества 3 548 км на переменном токе, 15 кв, 16²/₃ гц и 611 км на постоянном токе, 1 500 в; Швеция 5 882 км (35,2%); Норвегия 1 030 км (23%), обе эти страны применяют однофазный ток, 16²/₃ гц; Италия 5 616 км (34,3%), в основном, на постоянном токе 3 000 в; Голландия 1 021 км (31,8%), на постоянном токе 1 500 в; Австрия 1 274 км (21,1%), на однофазном токе 16²/₃ гц; Франция 4 121 км (10%); Испания 1 264 км (7,2%), на постоянном токе 1 500 в;

ную муфту с порошком можно применять в сочетании с короткозамкнутым двигателем для облегчения условий его пуска в ход при частых пусках или в качестве предохранительного элемента при больших механических перегрузках. Ток возбуждения для электромагнитной муфты с порошком подводится через контактные кольца на роторе или бесконтактным способом при помощи индуктивного передатчика с неподвижной части (статора) на вращающуюся. Приводятся примеры выполненных конструкций двигателей с муфтой мощностью в 0,5 л. с., причем в одном случае применены две муфты для возможности вращения рабочего вала в двух направлениях.

Feinwerktechnik, т. 59, стр. 60, № 2, 1955.

(Э-во, 11, 1955)

вая мощность (при 59 км/час) 1 480 л. с., длительная (при 61 км/час) — 1 320 л. с.

Тележка оборудуется двумя самовентилирующимися тяговыми коллекторными двигателями. Длительная мощность двигателя 325 л. с. при 240 в и 1 320 а. Двигатель имеет 12 главных полюсов, вспомогательные полюсы постоянно шунтированы нерегулируемым омическим сопротивлением. Вес двигателя с передачей 2 650 кг. Оба двигателя подключены параллельно к трансформатору 500 ква с естественным масляным охлаждением. Вес трансформатора 3 900 кг. Скорость двигателей регулируется изменением напряжения ответвлениями от вторичной обмотки трансформатора. Переключения производятся групповым кулачковым контактором. Пуск полуавтоматический.

Chemins de fer, стр. 1, № 190, 1955.

(Э-во, 11, 1955)

тельном режиме 40 квт, 150 а, 1 840 об/мин. Система управления с автоматическим пуском; многоступенчатый контроллер размещается под полом и приводится от вспомогательного двигателя. Управление контроллером осуществляется ножной педалью. Торможение — электрическое реостатное и механическое колодочное и клещевое на диски, расположенные на осях.

Питание цепей управления, освещения, сигналов, открывания и закрывания дверей, зарядки аккумуляторной батареи производится от двигатель-генератора 24 в, работающего от контактного провода. На общем валу с двигатель-генератором располагаются два вентилятора для охлаждения тяговых двигателей и пусковых сопротивлений. В зимнее время теплый воздух можно направлять в салон вагона для отопления.

Намечается направление дальнейшей работы по созданию стандартного трамвайного вагона для Чехословацкой Республики.

Elektrotechnický obzor, стр. 665, № 12, 1953.

(Э-во, 11, 1955)

Рассматривается влияние изменения напряжения на активную и реактивную составляющие тока. Так как точки рабочих характеристик двигателя охватывают участок круговой диаграммы с относительно небольшими скольжениями, то описанный в статье способ расчета можно распространить и на двигатели с глубоким пазом с двойной беличьей клеткой. Практическое применение способа иллюстрируется на примере двигателя 10 квт, 380 в, 1 445 об/мин, для которого определяются рабочие характеристики при напряжениях 300, 340 и 420 в.

Электроэнергия (София), т. 6, стр. 3, № 1, 1955. (Э-во, 11, 1955)

личных типов, изготовленных разными фирмами: а) с выпрямителями с сеточным управлением, б) с игнитронами, в) с однофазными коллекторными двигателями на 50 гц и г) со сдвоенными асинхронными двигателями (на каждую ось по одному шестиполюсному и одному трехфазному двигателю). Вес электровозов колеблется для разных типов от 83 до 85 т, длительная мощность (по трансформатору) 1 720...2 160 ква.

Сравнивая на основании опыта эксплуатации электровозы, работающие на линии, автор приходит к выводу, что в условиях работы на частоте 50 гц наиболее подходящими являются электровозы, оборудованные однофазными коллекторными двигателями 50 гц.

Bull. ASE, стр. 34, № 1, 1955.

(Э-во, 11, 1955)

хронизировано, то для них выбрано частотное регулирование: все три двигателя питаются регулируемой частотой от преобразовательного агрегата, состоящего из приводного коллекторного шунтового двигателя трехфазного тока и синхронного генератора. Возбуждение синхронного генератора получается из сети переменного тока через сухие выпрямители. Торфодобывающая машина снабжена радиосвязью со складом торфа.

Metropolitan-Vickers gazette, т. 26, стр. 86, № 428, 1955. (Э-во, 11, 1955)

Англия 1 509 км (4,8%), на постоянном токе 1 500 в; Бельгия 182 км (3,6%), на постоянном токе 3 000 в; Венгрия 196 км (2,3%), на однофазном токе; Югославия 98 км (1%); Португалия 25 км (0,7%); Польша 24 км (0,1%).

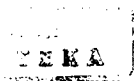
В Германии в 1945 г. было электрифицировано 2 450 км, в основном, на однофазном токе 15 кв, 16²/₃ гц.

VDJ Nachrichten, т. 9, стр. 3, 9, № 8, 1955.

(Э-во, 11, 1955)

муфты в качестве генератора трехфазная обмотка соединена звездой. При стоянке судна вал с наружной частью муфты заклинивается. Во время хода трехфазная обмотка переключается посредством переключателя таким образом, что образует замкнутую обмотку по типу беличьей клетки, что необходимо для режима работы в качестве электромагнитной муфты. Комбинированное использование электрической машины в качестве синхронного генератора и электромагнитной муфты дает значительную экономию в первоначальных затратах и в габаритах помещения, необходимого для установки машин.

El. Times, т. 127, стр. 541, № 3308, 1955. (Э-во, 11, 1955)



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

**Открыта подписка на 1956 г.
НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЖУРНАЛЫ**

„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Орган Академии наук СССР, Министерства электростанций СССР и Министерства электротехнической промышленности СССР

Основан в 1880 г. 12 номеров в год

Подписная цена на год 96 руб.,
на 6 мес. 48 руб., на 3 мес. 24 руб.

„ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ“

Орган Министерства электростанций СССР
Год издания 27-й 12 номеров в год

Подписная цена на год 84 руб., на 6 мес. 42 руб.

Приложение к журналу «Электрические станции»

„ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ“

6 номеров в год

Подписная цена приложения с журналом
«Электрические станции»
на год 108 руб., на 6 мес. 54 руб.

„ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО“

Орган Министерства электростанций СССР и
Министерства строительства электростанций СССР
Год издания 25-й 8 номеров в год

Подписная цена на год 48 руб., на 6 мес. 24 руб.

„ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА“

Журнал Министерства электростанций СССР, Министерства тяжелого машиностроения СССР и Академии наук СССР

Год издания 3-й 12 номеров в год
Подписная цена на год 84 руб., на 6 мес. 42 руб.

„ЭНЕРГЕТИК“

Массовый производственно-технический журнал
Министерства электростанций СССР

Год издания 4-й 12 номеров в год
Подписная цена на год 24 руб., на 6 мес. 12 руб.

„ТОРФЯНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ“

Орган Министерства электростанций СССР
Год издания 33-й 8 номеров в год
Подписная цена на год 32 руб., на 6 мес. 16 руб.

„ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА“

Орган Министерства электростанций СССР
Год издания 11-й 12 номеров в год
Подписная цена на год 48 руб., на 6 мес. 24 руб.

„СВЕТОТЕХНИКА“

Орган Министерства электротехнической промышленности СССР и Министерства радиотехнической промышленности СССР

Год издания 2-й 6 номеров в год
Подписная цена на год 18 руб., на 6 мес. 9 руб.

**„ВЕСТНИК
ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ“**

Орган Министерства электротехнической промышленности СССР
Год издания 27-й 12 номеров в год
Подписная цена на год 84 руб., на 6 мес. 42 руб.

„ЭЛЕКТРОТЕХНИКА“

Институт научной информации Академии наук СССР
Год издания 1-й 12 номеров в год
К журналу (сверх 12 номеров) дается авторский указатель объемом 20 печ. л.
Подписная цена (с указателем)
на год 260 руб., на 6 мес. 130 руб.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ:

ГОРОДСКИМИ И РАЙОННЫМИ ОТДЕЛАМИ СОЮЗПЕЧАТИ, ВО ВСЕХ КОНТОРАХ, ОТДЕЛЕНИЯХ
И АГЕНТСТВАХ СВЯЗИ И ОБЩЕСТВЕННЫМИ УПОЛНОМОЧЕННЫМИ ПО ПОДПИСКЕ
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ, В ОРГАНИЗАЦИЯХ, УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ И УЧРЕЖДЕНИЯХ.