

## Светлый гений человечества

*К 85-летию рождения В. И. Ленина*

**В. Ф. МОРОЗОВ**

*Директор Центрального музея В. И. Ленина*

Народы Советского Союза и все прогрессивное человечество отмечают 22 апреля этого года знаменательную дату — 85-ю годовщину рождения великого Ленина.

Никогда в истории не было человека, который бы так полно охватил своим умом все сложнейшее многообразие явлений человеческого общества, так глубоко познал закономерности его развития в современную ему эпоху и указал широким массам трудящихся и угнетенных выход из капиталистического и империалистического рабства; — человека, который бы создал авангард самого революционного класса современного общества — Коммунистическую партию и поднял бы массы на борьбу за свое счастье, как это сделал Владимир Ильич Ульянов-Ленин.

Ленин был не только великим мыслителем, гениальным теоретиком, но и столь же великим и гениальным организатором, практиком, руководителем и вождем масс. Маркс и Энгельс открыли законы развития общества, показали неизбежность гибели капитализма и замены его социалистическим обществом. Ленин развил марксизм дальше, он открыл закон развития капитализма в новую эпоху — эпоху империализма и разработал новую теорию социалистической революции. Эта теория исходит из возможности прорыва фронта империализма в одной отдельно взятой капиталистической стране, победы в ней социалистической революции и построения социалистического общества.

Октябрьская социалистическая революция, в которой рабочие и крестьяне нашей страны под руководством Коммунистической партии во главе с Лениным свергли власть капиталистов и помещиков, создали советское государство и присту-

пили к строительству новой социалистической жизни, блестяще подтвердила правильность ленинской теории социалистической революции.

В разработке планов осуществления социализма, о котором только мечтали лучшие умы человечества и которого еще не знала история, сказались две замечательные черты вождя народа, вождя нового типа: вера Ленина в неисчерпаемые творческие силы народных масс и его необычайная дальновидность, сила его предвидения, основанная на блестящем анализе действительности.

Советская страна начинала строительство новой, социалистической, жизни (во всех ее областях) в чрезвычайно трудной обстановке. Две только что пережитые войны — первая мировая и иностранная интервенция — сильно истощили материальные и людские ресурсы. Тяжелая хозяйственная разруха, голод и болезни (тиф и др.) породили не только огромные трудности в налаживании хозяйственной, мирной жизни, но и породили настроения неуверенности и разочарованности. Эти настроения были и среди менее устойчивых элементов внутри партии. Коммунистической партии пришлось сначала очистить свои ряды от этих шатких и неустойчивых элементов, прежде чем приступить к решению задачи восстановления народного хозяйства и закладке фундамента социалистической экономики страны.

Весь мир с напряженным вниманием следил за этой титанической работой: друзья — рабочие, крестьяне, передовые люди науки и культуры — с надеждой, враги — со злобой и ненавистью. Многие, не только ярые противники советского строя, ослепленные своей ненавистью, но и люди, одаренные богатой фантазией, но ограниченные

в своем мышлении рамками буржуазного мира, такие, например, как писатель Герберт Уэлс, расценили невиданно смелые ленинские планы строительства социализма в нашей стране, в частности план электрификации России, как плод необычайной фантазии. Уэлс писал, что Россия — во мгле, а Ленин мечтает об электрификации всей страны. Эти люди не понимали того, что решающей силой истории во всех вопросах жизни общества являются народные массы. Они являлись решающей силой и в осуществлении планов восстановления народного хозяйства нашей страны и его социалистического преобразования.

Уверенность Ленина в реальности осуществления выдвинутого им плана строительства социализма в нашей стране, предусматривавшего создание крупной социалистической промышленности (индустриализация), перевод мелкотоварных крестьянских хозяйств на путь крупного социалистического земледелия (кооперативный план Ленина) и осуществление культурной революции, опиралась на веру в творческие силы народных масс, руководимых Коммунистической партией, которая по выражению Ленина представляет собой ум, честь и совесть нашей эпохи.

В. И. Ленин учил, что основой социалистической экономики является современная крупная тяжелая промышленность. С самого своего возникновения советское государство и его правительство, возглавляемое Лениным, принимали все меры к восстановлению и дальнейшему развитию крупной тяжелой промышленности, которая одна только способна обеспечить все более нарастающий подъем всей промышленности, сельского хозяйства и транспорта, обеспечить их процветание.

Во главу угла была поставлена задача развития крупной тяжелой промышленности, а затем и всего народного хозяйства на базе электричества. Осуществляя жесткую экономию во всем, советское государство выделяло большие средства на выполнение грандиозного государственного плана электрификации страны — ГОЭЛРО. Теперь, когда план ГОЭЛРО давно уже осуществлен, он выглядит как крепкий зародыш, из которого бурно выросла современная энергетическая система нашей страны. Первенец электрификации Волховстрой в сравнении с грандиозными стройками на Волге, Дону, Днепре, Ангаре и т. д. выглядит очень скромно, но никогда не следует забывать огромных трудностей, преодоленных усилиями партии и народа, титанический труд, вложенный Лениным в борьбу за осуществление

плана ГОЭЛРО — фундамента дальнейшего мощного расцвета энергетики Советского Союза.

Ленин оставил партии, народу и всему человечеству огромное идейное наследство. В его трудах раскрывается проникнутая мудростью и глубоким человеколюбием перспектива развития человеческого общества, освобожденного от цепей капиталистического и империалистического рабства. Осуществив задачу создания социалистического общества, производители материальных и культурных благ становятся их полными хозяевами и потребителями.

Ленин в своем гениальном философском произведении «Материализм и эмпириокритицизм» не только отстоял все основные положения материалистического мировоззрения, разработанные Марксом и Энгельсом, но, развивая марксизм дальше, дал также и блестящий анализ физической науки начала XX в. и прогноз дальнейшего развития естествознания. В философии, во всех областях науки о природе люди науки применяют в качестве исходной теоретической базы своих исследований методику и ряд положений, выдвинутых и развитых в трудах В. И. Ленина.

Гениальные теоретические положения В. И. Ленина отличаются неразрывной связью с практикой, исключительной реалистичностью. В совершенстве владея марксистским диалектическим методом, Ленин постоянно соединял в одно неразрывное целое теорию с революционной практикой; теория, освещающая путь практике, сама проверялась и развивалась дальше в горниле борьбы народных масс за свое счастливое будущее.

Ленин — корифей науки, его вклад в науку столь велик, что представляет собой основу развития самых различных сторон духовной и материальной жизни передового человечества. И в политике, и в экономике, и в эстетике, и в технике — всюду с именем великого Ленина связана новая эпоха развития.

С именем В. И. Ленина тесно связана и электрификация нашей Родины. Формула В. И. Ленина «Коммунизм — это есть советская власть плюс электрификация всей страны» со всей силой подчеркивает то положение, что при наличии самого передового политического строя ключом к решению задачи удовлетворения непрерывно растущих потребностей общества является развитие крупной тяжелой промышленности на базе электрификации всей страны. Коммунистическая партия и Советское правительство, следуя указаниям Ленина, свято выполняя его заветы, осуществили идею индустриализации, в том числе как

ее составную часть и электрификацию Советского Союза. В СССР с каждым годом растут мощности электростанций, увеличивается выработка электроэнергии. В текущем пятилетнем плане близится к завершению грандиозная программа строительства новых и расширения существующих электростанций. На Волге скоро вступят в строй действующих крупнейшие в мире гидроэлектростанции. Выдающихся успехов добилась наша страна в области теплофикации. Недалеко то время, когда будет создана крупнейшая в мире объединенная энергетическая система Европейской части СССР.

Труднейшей задачей социалистической революции был перевод многомиллионных масс крестьянства на путь крупного социалистического земледелия. Выполняя кооперативный план Ленина, развивая его идеи на основе накопленного опыта практической работы, партия осуществила коллективизацию сельского хозяйства и ликвидацию на этой основе последнего и самого многочисленного эксплуататорского слоя — деревенской буржуазии, кулачества.

Всю работу по созданию социалистической экономики в городе и деревне и борьбу за уничтожение эксплуататорских классов партия успешно проводила благодаря последовательной политике тесного союза рабочего класса с трудящимся крестьянством, на необходимость которого многократно указывал В. И. Ленин.

В одной из последних своих работ В. И. Ленин писал о необходимости всемерного развития культуры и достижения поголовной грамотности нашего народа. Следуя указаниям Ленина, мы не только догнали, но и перегнали капиталистические страны в области культурного развития населения, в области расцвета всех видов культуры. Отошла в прошлое бывшая неграмотность большинства населения, теперь по размаху дела образования наша страна опередила все страны мира.

Огромна созидательная работа советского народа, направляемого Коммунистической партией по ленинскому пути. Ликвидация эксплуататорских классов в нашей стране, уничтожение безработицы и нищеты, уничтожение национального гнета в каком-либо виде и форме, превращение советских граждан в тружеников социалистического хозяйства города и деревни привели к невиданному политическому и моральному единству всего советского народа и тесному его сплочению вокруг партии Ленина — Коммунистической партии Советского Союза. Социализм из мечты превратился в действительность. Кровь,

пролитая нашими людьми, говорил И. В. Сталин, не пропала даром, а дала свои блестящие результаты. Победа социализма в СССР является торжеством ленинской теории о возможности победы социализма в одной стране и путеводной звездой для других стран, вступивших на путь социализма.

Великим испытанием прочности советского общественного и государственного строя, созданного Лениным, явилась вторая мировая война. В обращениях к народу Коммунистическая партия призвала всех советских людей сплотиться под знаменем Ленина и под этим всепобеждающим знаменем разгромить наглых фашистских захватчиков.

«Никогда не победят того народа, в котором рабочие и крестьяне в большинстве своем узнали, почувствовали и увидели, что они отстаивают свою, Советскую власть — власть трудящихся, что отстаивают то дело, победа которого им и их детям обеспечит возможность пользоваться всеми благами культуры, всеми созданиями человеческого труда», — говорил В. И. Ленин (В. И. Ленин. Соч., т. 29, стр. 292).

Так было в годы иностранной военной интервенции, так было и позже в годы Великой Отечественной войны.

Обострение кризиса капиталистической системы, начавшегося со времени Великой Октябрьской социалистической революции, вылившееся в новую мировую войну, привело в конечном счете к отпадению от капиталистического мира Китая, Польши, Чехословакии, Венгрии, Болгарии, Румынии, Кореи и других стран, образовавших лагерь мира, демократии и социализма, насчитывающий в своих рядах свыше 900 миллионов человек. Лагерь социализма растет и укрепляется.

Великая Октябрьская социалистическая революция, прорвав фронт империализма, вывела нашу страну из первой мировой войны, в которую народы мира были втянуты империалистами. Одним из первых декретов, подписанных Лениным, был декрет о мире, который выражал волю и желание всего советского народа. Ленинская политика поддержания и упрочения мира между народами проводилась Советским правительством на протяжении всего времени. Ленин выдвинул положение о возможности мирного сосуществования двух систем: социалистической и капиталистической. Ленин и Сталин многократно подчеркивали, что вопрос о политическом и общественном строе является внутренним делом каждого народа. Революции не экспортируются. Характер общественного строя определяется разви-

тием революционного движения внутри той или иной страны. Советский Союз никогда не вмешивался во внутренние дела других государств. Внешняя политика Советского Союза ясна, ее целью является борьба за мир, за дружеские отношения с другими народами. Социалистическому государству чужда политика вражды в отношении других стран, больших и малых. К сожалению, этого нельзя сказать о политике империалистических государств по отношению к СССР и странам народной демократии. Состоявшаяся недавно вопреки действительной воле немецкого и французского народов ратификация парижских соглашений омрачила горизонт международной жизни.

Возрождение кровавого вермахта во главе с отъявленными авантюристами — гитлеровскими генералами свидетельствует о далеко идущих намерениях милитаристской клики. Что несут народам нацистские хищники и людоеды, известно и не забыто народами Европы.

Советское правительство неоднократно проявляло инициативу, направленную на разрядку международной напряженности, на мирное разрешение спорных вопросов. Открытые, благородные и человеколюбивые стремления великого Советского государства империалисты лицемерно истолковывают как проявление слабости, клеветнически извращая действительные мотивы, которыми руководствуется СССР. Но правды от народов не утаить! Правда понятна и доступна всем честным людям. Они видят, что 900-миллионный демократический лагерь во главе с Советским Союзом, следующий ленинскому принципу мирного сосуществования стран с различным общественным строем, есть лагерь мира, а вступившие на путь фашизма и человеконенавистничества американские архиреакционеры, ополчившиеся с огнем и мечом против национально-освободительного движения колониальных народов и окружившие СССР, Китай и страны народной демократии сетью военных баз, оснащенных атомным оружием, есть лагерь войны.

Но если недальновидные заокеанские капита-

листы рассматривают войну как выход из тупика, в котором они оказались, если в отчаянии они надеются тотальной войной отсрочить, задержать закономерный ход истории, их ожидает горькое разочарование, ибо новая мировая война, если она будет развязана, станет могилой капитализма. Поджигателям войны несдобровать, а угрозы их никого не запугают. Гнев народов может быть поистине великим и справедливая кара постигнет агрессоров, посягнувших на жизнь и счастье людей.

Силы мира огромны. Они растут повсеместно и повседневно, растут неодолимо и быстро. Коммунистическая партия, созданная и воспитанная Лениным, считает, что первым благом, необходимым всем народам, является мир, и потому последовательно и настойчиво борется за его сохранение и упрочение. Естественно поэтому, что инициатива проведения всех мероприятий, направленных на укрепление мира между народами, принадлежит Советскому Союзу и странам народной демократии, также вступившим на путь социалистического развития, на путь, указанный народам Лениным.

Сейчас, осуществляя заветы Ленина, наш народ, руководимый Коммунистической партией и Советским правительством, завершает выполнение пятого пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР. Каждый день приносит новые и новые успехи в деле дальнейшего продвижения вперед к коммунизму.

Ленинизм — это неиссякаемый источник мудрости и знаний, открывающий человечеству путь к счастливой и радостной жизни, путь к коммунизму.

Под руководством Ленина Коммунистическая партия Советского Союза привела народы нашей страны к победе Великой Октябрьской социалистической революции. Выполняя заветы Ленина, партия привела наш народ к победе социализма. Идя по ленинскому пути, партия ведет нас к сияющим вершинам коммунизма.

Ленин — наше знамя, Ленин — светлый гений человечества.



## Электротехники и энергетики Советского Союза выполняют свой долг

Постановления январского Пленума Центрального Комитета Коммунистической партии Советского Союза и II сессии Верховного Совета СССР имеют величайшее значение для успешного проведения политики построения в СССР коммунистического общества, дальнейшего укрепления могущества Советского государства и повышения народного благосостояния.

Надежным фундаментом этой политики является выработанная под руководством Ленина и Сталина генеральная линия Коммунистической партии и Советской власти, предусматривающая всемерное и преимущественное развитие тяжелой индустрии. Советская высокоразвитая тяжелая промышленность — великое историческое завоевание Коммунистической партии и народов Советской страны. Она — залог развития всех отраслей народного хозяйства, основа дальнейшего экономического расцвета страны.

Великий Ленин учил, что «единственной материальной основой социализма может быть крупная машинная промышленность, способная реорганизовать и земледелие», что без тяжелой промышленности «мы не сможем построить никакой промышленности, а без нее мы вообще погибнем, как самостоятельная страна».

Осуществление генеральной линии партии на индустриализацию страны обеспечило победу социалистического способа производства во всех отраслях народного хозяйства, в том числе в такой обширной и жизненно важной отрасли, как сельское хозяйство. Индустриализация обеспечила развитие социалистического производства на базе высшей техники.

Современное машинное производство невозможно без широкой электрификации подавляющего большинства производственных процессов. Электротехника является мощной базой современного крупного производства. Только на базе преимущественного роста тяжелой индустрии и электрификации страны возможны широкое внедрение новейшей техники во все отрасли производства, развитие легкой, пищевой и других отраслей промышленности, подъем сельского хозяйства. Непонимание этого связано с вулгаризаторским толкованием основного экономического закона социализма в том смысле, будто на каком-то этапе социалистического строительства развитие тяжелой промышленности перестает быть главной задачей и будто легкая промышленность может и должна опережать все другие отрасли индустрии. На январском Пленуме ЦК КПСС такого рода взгляды некоторых горе-экономистов подверглись суровой критике, как извращающие существо политики партии, как представляющие собой клевету на партию, отрывку правого укло-

на, враждебных ленинизму взглядов. Теперь, когда все усилия народа направлены на решение великих задач коммунистического строительства, в условиях, когда империалистические государства открыто готовятся к агрессивной войне против Советского Союза и сплотившегося вокруг СССР демократического лагеря мира, подобного рода оппортунистические взгляды особенно вредны и недопустимы.

Осуществляя мудрую политику партии, советский народ достиг выдающихся успехов в развитии своей индустрии. В 1953 г. продукция крупной промышленности СССР превышала уровень 1913 г. (в сравнимых ценах) в 30 раз, в том числе производство средств производства — более чем в 50 раз, а производство электроэнергии — почти в 70 раз. В сравнении с 1940 г. уровень продукции тяжелой промышленности ныне вырос в 3,5 раза.

Создание и непрерывное развитие первоклассной социалистической индустрии являются величайшим торжеством всепобеждающего учения марксизма-ленинизма, триумфом генеральной линии Коммунистической партии Советского Союза.

«Коммунистическая партия, руководствуясь учением великого Ленина о всемерном развитии крупной машинной промышленности и электрификации страны, — говорится в постановлении январского Пленума ЦК КПСС, — считает, как и прежде, своей главной задачей дальнейший подъем тяжелой индустрии, составляющей прочную основу всего народного хозяйства, и несокрушимой обороноспособности нашей Родины, источник неуклонного роста благосостояния советского народа».

Для дальнейшего увеличения производства основных отраслей тяжелой индустрии (угольной, металлургической, энергетической, химической, нефтяной, машиностроительной) из 189,6 млрд. руб., вкладываемых по Государственному бюджету СССР в текущем году в промышленность, 163,6 млрд. руб. вкладывается на развитие тяжелой индустрии.

Нельзя при этом забывать, что и развитие отраслей, производящих предметы народного потребления, будет тем успешнее, чем значительнее будут наши достижения в развитии тяжелой промышленности.

Важнейшее значение в решении задач, поставленных народнохозяйственным планом на 1955 г., имеет дальнейшее повышение производительности труда.

Настойчиво улучшая организацию труда на производстве, следует добиваться повышения качества продукции.

Серьезные недостатки еще имеются в области технического прогресса. От широкого внедрения во все отрасли народного хозяйства передовой техники в высокой степени зависит решение большинства хозяйственных задач. Между тем имеются такие руководители хозяйственных организаций, заводов, строителей, которые недооценивают важности внедрения новой техники и новых методов и технологии производства, не используют результатов научно-исследовательской работы, тормозят реализацию рационализаторских предложений. Имеются еще научно-исследовательские лаборатории и институты, конструкторские бюро и проектные организации, отстающие с разработкой соответствующих уровню современной мировой техники машин, материалов, приборов, методов, не проявляющие упорства в реализации своих работ на практике. В капиталистических странах в различных отраслях техники периодически появляются новые изделия и эффективные технологические приемы. Подхлестываемые угрозой кризиса, подчинив науку полностью целям агрессивного милитаризма, капиталисты форсируют изыскательские работы. С результатами последних наших научных работники и инженеры промышленности должны своевременно ознакамливаться. Игнорирование зарубежного опыта, слепой отказ от использования того, что этого заслуживает, являются непростительной ошибкой. Следует систематически следить за новинками, критически изучать достижения иностранных ученых и конструкторов, опыт технологии лучших зарубежных предприятий.

В наших успехах в области техники никто не сомневается; их признают не только наши друзья. Советская техническая мысль занимает ведущее место в решении ряда новых технических проблем. Советским конструкторам принадлежит приоритет в создании высокоэффективного энергетического оборудования (прямоточного котла высокого давления, крупных турбогенераторов, гидрогенераторов, гидротурбин и пр.). Усилиями советских ученых и инженеров была спроектирована, построена и сдана в эксплуатацию первая в мире промышленная электростанция на атомной энергии; в настоящее время ведутся работы по созданию значительно более мощных электростанций на атомной энергии. Известно, что и во многих других решающих областях науки и техники советские ученые и изобретатели оказались впереди. Но вместе с тем имеются случаи отставания, в основе которых часто лежат замкнутость исследовательской работы, пренебрежение зарубежным опытом, высокомерное уклонение некоторых научных работников и коллективов от критического обмена мнениями с родственными научными и производственными организациями, безучастное отношение некоторых хозяйственников к результатам, полученным научно-исследовательскими организациями, и т. п. Этому должен быть как можно скорее положен конец.

В отечественном электромашиностроении и электроаппаратостроении, в производстве элект-

роматериалов и в прочих отраслях электротехнической промышленности необходимо в короткие сроки добиться нового продвижения вперед по пути технического прогресса с целью полного удовлетворения возросших требований к качеству и ассортименту электрооборудования со стороны всех отраслей народного хозяйства.

Без широкого и все увеличивающегося применения электроэнергии невозможны высокие темпы развития промышленности, социалистического сельского хозяйства, транспорта, быта. Расширение же действующих и строительство новых электростанций, в том числе ряда мощных гидроэлектростанций, а также новых предприятий требуют дальнейшего значительного увеличения выпуска продукции электротехнической промышленности. В смысле оснащения современным оборудованием крупнейшие советские электротехнические заводы стоят в ряду самых передовых электротехнических предприятий мира. Отечественная электротехническая промышленность производит самое разнообразное электрооборудование: мощные генераторы, трансформаторы, двигатели для привода сложных и тяжелых агрегатов, всевозможную аппаратуру, приборы и различные устройства высокой чувствительности с применением электроавтоматики и телеуправления, кабель, электроизолирующие и магнитные материалы, полупроводники и т. д. Продукция заводов электротехнической промышленности должна быть самого высокого качества. На основе дальнейшего повышения производительности труда и рационализации производственных процессов должна быть снижена себестоимость электрооборудования.

Наше электрооборудование по надежности, точности и износостойчивости может и должно быть непревзойденным. Однако имеющиеся еще на некоторых электротехнических предприятиях нарушения производственной и технологической дисциплины, случаи отклонения от нормативов, послабления при сборке, испытаниях и техническом контроле продукции приводят к снижению ее качества. Совершенная измерительная техника, современная методика испытаний не всюду еще используются в достаточной степени при осуществлении технического контроля деталей, узлов и готовых агрегатов.

Конструкторы должны с большим вниманием относиться к критическим замечаниям работников эксплуатации, оперативнее отзываться на выводы по результатам эксплуатации. В цехах должна поддерживаться твердая и неукоснительная производственная и технологическая дисциплина. Надо проводить в установленные сроки все необходимые профилактические мероприятия в отношении оборудования, которым оснащены заводы (осмотры, замена изношенных деталей и т. д.), во избежание выхода из строя или ухудшения работы ценных агрегатов.

Борьба с неоправданными запасами прочностных, с перерасходом металла, за сокращение норм времени производственных операций должна вестись и впредь, но она не должна переходить

в крайность, вызывая в таких случаях снижение качества изделий и невыполнение требований ГОСТ.

Необходимо, чтобы при обнаружении дефектов электрооборудования работники эксплуатации на электростанциях, в энергоцехах промышленности тщательно выясняли причину каждого отклонения от норм и стандартов с целью разработки полностью законченных технических мероприятий. Необходимо, чтобы работники эксплуатации систематически следили за износоустойчивостью электротехнических изделий, анализировали причины недостаточной стабильности, преждевременного старения отдельных частей и конструкций и свои выводы и рекомендации с подкрепляющими их экспериментальными данными безотлагательно сообщали заводам-поставщикам и Техническому управлению Министерства.

Для отличной работы ОТК на заводах должны быть созданы надлежащие условия, обеспечивающие принципиальное отношение работников ОТК к порученному им делу. Никакие скидки в этом деле недопустимы; случаи попустительства или «вынужденных» уступок со стороны ОТК должны быть предметом строгого расследования со стороны администрации и общественных организаций заводов и главных управлений.

Машиностроение — сердцевина советской индустрии. Высокоразвитая электротехническая промышленность является одним из важнейших источников перевооружения всех отраслей народного хозяйства современной передовой техникой. Коммунистическая партия и Советское правительство постоянно уделяют особое внимание прогрессу машиностроения. В результате в нашей стране налажено серийное производство мощных гидротурбин и гидрогенераторов для крупных гЭС, паровых турбин и турбогенераторов по 100 и 150 тыс. кВт, изготовлены силовые трансформаторы, трансформаторы тока, воздушные выключатели и другие аппараты на 400 кв. На одном лишь ленинградском заводе «Электросила» общая мощность выпущенных турбогенераторов выросла за пятилетие почти в 3 раза, а выпуск гидрогенераторов за этот период заводом увеличен более чем в 5 раз. Мощные гидрогенераторы завода «Электросила» им. Кирова поставлены Цимлянкой, Горьковской, Мингечаурской, Гюмушской и другим ГЭС.

Еще и еще раз необходимо подчеркнуть, что электрификация страны является важнейшим условием неуклонного роста тяжелой индустрии и других отраслей народного хозяйства. Большой вклад в дело электрификации готовят строители крупнейших энергетических строек. Выполнение заказов для этих важных строек следует считать делом чести коллектива каждого предприятия. Следует воспринять ценный опыт коллективов ленинградских заводов «Электросила» им. Кирова, Металлического им. Сталина, Московского завода им. Калинина и других заводов, успешно выполняющих заказы пусковой стройки Куйбышевской ГЭС.

Естественно, что народное хозяйство предъявляет все более широкие и более серьезные требования к электротехнической промышленности. Работники электропромышленности, ее инженеры и конструкторы должны приложить все усилия для быстрее и полного удовлетворения повышенных запросов социалистического народного хозяйства.

Перелом должен быть достигнут в обеспечении электрооборудованием нашего сельского хозяйства. Для механизации ферм и многих процессов животноводства большую роль играют электродвигатель, электропривод. По данным Всесоюзной сельскохозяйственной выставки применение электрической энергии дает экономии рабочей силы на водоснабжении на 90%, при доении коров — на 53%, приготовлении кормов — на 80%, стрижке овец — на 65%. Более 20 тыс. колхозов страны пользуются в настоящее время электроэнергией для производственных нужд; между тем, лишь четвертая часть из них применяет электроэнергию для механизации производственных процессов на фермах. Многие колхозы имеют собственные электростанции, но использование энергии этих электростанций еще нельзя назвать удовлетворительным.

В решении грандиозной задачи, поставленной январским Пленумом ЦК КПСС — в ближайшие 5—6 лет довести ежегодный сбор зерна не менее чем до 10 млрд. пудов и увеличить производство основных продуктов животноводства в два—два с лишним раза, — важная роль должна быть выполнена электрификацией сельскохозяйственного производства. Успехи советской промышленности, рост государственных районных энергетических систем создали все необходимые предпосылки для дальнейшего развития электрификации сельского хозяйства СССР. Широкое использование местных энергетических ресурсов, строительство новых крупных гидроэлектростанций на Волге, Каме, Днепре, Оби, Иртыше, Ангаре и других реках открывают неограниченные возможности для осуществления уже в ближайшие годы резкого перелома в электрификации сельскохозяйственного производства. Опыт эксплуатации отечественных электрифицированных сельскохозяйственных машин подтверждает целесообразность широкого применения в сельскохозяйственном производстве электрической энергии, возможность создания в стране электромашино-тракторных станций. Комплексная электрификация земледелия и животноводства имеет совершенно реальные перспективы развития; об этом свидетельствует практика передовых электрифицированных колхозов Московской и других областей.

Уже современный опыт электрификации передовых животноводческих ферм показывает, что имеются реальные возможности для превращения на базе электроэнергии старого скотного двора в подлинное механизированное предприятие. Препятствия на этом пути, связанные с медлительностью завершения соответствующих конструктивных разработок и задержкой с внедрением последних в производство, могут и должны быть устра-



нены. Комплекс электрифицированных машин для различных зон страны по механизации производства кормов, силосованию, водоснабжению, электрификации трудоемких процессов на животноводческих фермах должен быть разработан в короткие сроки и выпускаться серийно промышленностью сельскохозяйственного машиностроения с помощью электротехнических предприятий, которые должны обеспечить поставку соответствующего электрооборудования и материалов.

Большое место в мероприятиях по развертыванию электрификации сельскохозяйственного производства занимает сеть научно-исследовательских учреждений Академии наук СССР и отраслевых институтов. Энергетический институт им. Кржижановского АН СССР, Всесоюзный институт электрификации сельского хозяйства, Московский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, Сельскохозяйственная академия им. Тимирязева, Киевский, Челябинский и другие институты могут внести в разработку научных основ электрификации сельскохозяйственного производства и сельскохозяйственного электромашиностроения большой вклад. Чрезмерно затянувшиеся исследования и эксперименты должны быть закончены в короткие сроки и результаты их должны быть переданы промышленности для внедрения надежных и эффективных образцов высокопроизводительных электрифицированных машин и механизмов для сельского хозяйства.

Не менее важной задачей для наших ученых-энергетиков, научно-исследовательских организаций Министерства электростанций и инженерной творческой мысли в энергосистемах является быстрое изыскание наиболее рациональных путей для использования различных видов местных энергетических ресурсов в сочетании с централизованным электроснабжением от мощных энергосистем. При этом большое внимание должно быть уделено развитию комплексных энергетических схем городов, транспорта, промышленности и прилегающих районов сельского хозяйства; освоению более высоких напряжений для сельских распределительных сетей и разработке соответствующих схем и аппаратов.

В решениях январского Пленума ЦК КПСС отражена постоянная забота Коммунистической партии об электрификации сельскохозяйственного производства: в 1955—1960 гг. предусматривается значительное расширение работ по электрификации животноводческих ферм, обеспечению мтс, колхозов и совхозов электроматериалами, электродвигателями, трансформаторами, пусковой и регулирующей аппаратурой, передвижными электростанциями и пр.

На наших предприятиях имеются большие не-

используемые резервы, которые заложены в широком внедрении новой техники и технологии, в распространении передового опыта новаторов, в дальнейшем снижении простоев агрегатов и оборудования и ликвидации брака продукции. Нельзя быстро двигать вперед общественное производство, не добиваясь одновременно роста производительности труда. Необходимо ликвидировать имеющееся еще на некоторых предприятиях отставание от плановых заданий по этому показателю. Широкое внедрение в производство достижений науки и техники, быстрое распространение передовых методов труда и рационализаторских предложений, активное участие в социалистическом соревновании — испытанный путь для роста производительности труда и повышения качества продукции. Выявление и полное использование внутренних резервов производства и техники — важнейшая задача инженерно-технических работников электропромышленности и электростанций.

В ответ на заботу Коммунистической партии и Советского правительства о дальнейшем развитии тяжелой индустрии, электрификации страны, развитии животноводства, всего социалистического сельского хозяйства, о создании мощных предпосылок для подъема благосостояния народных масс инженерно-технические работники электротехнической промышленности и энергетических систем и научные работники научно-исследовательских электротехнических и энергетических организаций не пожалеют своих сил, чтобы добиться в ближайшие месяцы дальнейших успехов в производственной и научной работе, чтобы еще больше поднять темпы коммунистического строительства и повысить могущество своей горячо любимой Родины.

Электротехники и энергетики Советского Союза выполняют свой долг!

На многолетнем опыте советские люди убедились в том, что вся деятельность Коммунистической партии и Советского правительства подчинена благородной задаче всемерного улучшения жизни трудящихся. На основе дальнейшего развития тяжелой промышленности и подъема сельского хозяйства будет расширяться производство народного потребления. Под мудрым руководством Коммунистической партии советский народ уверенно идет вперед.

Осуществление решений январского Пленума ЦК — это не кратковременная кампания, а важнейшая составная часть всей организаторской и пропагандистской работы на длительный период. Энергетическая общественность страны будет активно бороться за практическое претворение в жизнь задач, вытекающих из решений январского Пленума ЦК КПСС.





# Дальние электропередачи с промежуточными синхронными компенсаторами

Кандидат техн. наук, доц. Д. И. АЗАРЬЕВ, Доктор техн. наук, проф.  
инж. Н. Н. СОКОЛОВ  
Теплоэлектропроект

В. А. ВЕНИКОВ  
Московский энергетический  
институт им. Молотова

Широко распространенное мнение об ограниченных возможностях дальних электропередач переменного тока в значительной степени связано с совершенно неправильным представлением о них как о передачах чисто магистральных. В действительности же по дальним электропередачам можно снабжать электроэнергией сельскохозяйственные и промышленные районы, через территорию которых они проходят. Такие электропередачи следует выполнять иначе, чем магистральные, не имеющие промежуточных отборов энергии и снабжаемые дорогостоящими переключательными постами и установками последовательной компенсации для обеспечения устойчивости.

Вдоль электропередачи через 250...300 км целесообразно устраивать промежуточные подстанции, связывающие ее с сетями и электростанциями района, через который она проходит. Промежуточные подстанции с их трансформаторами и устройствами поперечной компенсации (обычно синхронными компенсаторами) получают сравнительно дешевыми, так как они одновременно обеспечивают и высокую пропускную способность передачи и качество электроснабжения прилегающих районов.

Стремясь поддержать напряжение на заданном уровне, синхронные компенсаторы дают тем больший эффект в отношении повышения пропускной способности электропередачи, чем больше их мощность и меньше реактивности и чем больше быстродействие и меньше статизм их системы возбуждения. Для повышения пропускной способности в первую очередь следует использовать возможности системы возбуждения, так как ее усовершенствование требует наименьших затрат. Увеличение мощности и уменьшение реактивностей синхронных компенсаторов повысит их перегрузочную способность, особенно по току ротора.

Эффективность синхронных компенсаторов, устанавливаемых на промежуточных подстанциях, может быть повышена и путем компенсации их индуктивного сопротивления статическими конденсаторами [Л. 1]. Правильное сочетание этого мероприятия с другими значительно расширяет возможности электропередачи переменного тока. В связи с этим существенное значение имеет выяснение основных характеристик таких электропередач и целесообразных параметров основного оборудования промежуточных подстанций.

**Динамическая устойчивость.** При ее оценке необходимо иметь в виду, что начальные и максимальные углы  $\delta$  между э. д. с. генераторов передающей и приемной систем при наличии промежуточных синхронных компенсаторов могут быть значительно больше, чем в передаче с продольной компенсацией. Однако это не означает, что электропередача с промежуточными синхронными компенсаторами динамически менее устой-

чива. В самом деле, если для схемы рис. 1, а предельная передаваемая мощность

$$P_{пред} = \frac{U^2}{x},$$

то для схемы рис. 1, б при поддержании неизменным напряжения в промежуточной точке она определится выражением

$$P_{пред} = \frac{UU_{cp}}{0,5x},$$

причем угол между  $U_1$  и  $U_2$  будет равен  $180^\circ$ . Поэтому при сопоставлении различных схем электропередачи динамическую устойчивость следует оценивать по предельному времени отключения короткого замыкания при заданной величине передаваемой мощности или предельной мощности при неизменном времени отключения короткого замыкания.

Рассмотрим динамическую устойчивость дальней электропередачи применительно к схеме рис. 2. Примем, что синхронные компенсаторы, показанные на схеме, имеют выступающие полюса, трехкратный потолок возбуждения и постоянную времени возбудителя  $T_e = 0,1 \dots 0,2$  сек. Степень компенсации  $k = \frac{x_c}{x_{ск} + x_m}$  будем изменять от 0 до 1.

Включение в цепь синхронного компенсатора емкости, повышение потолка и скорости нарастания возбуждения возбудителей, правильный выбор системы регулирования возбуждения позволяют во время тех кратковременных режимов, при которых возникает опасность нарушения устойчивости, облегчить выпуск реактивной мощности при меньшей перегрузке ротора синхронного компенсатора и, таким образом, обеспечить поддержание или даже повышение напряжения в промежуточной точке электропередачи.

Из выражения

$$\frac{dQ}{dU} = \frac{E - 2U}{x_{ск} + x_m - x_c} = \frac{k_p I_p - 2U}{(x_{ск} + x_m)(1 - k)},$$

определяющего регулирующий эффект компенсированного синхронного компенсатора, где

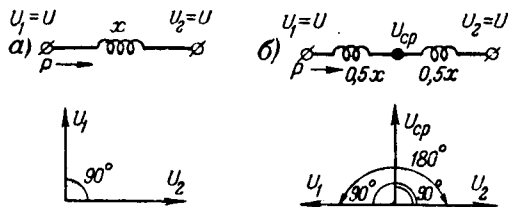


Рис. 1. Увеличение предельного угла при поддержании напряжения в промежуточной точке

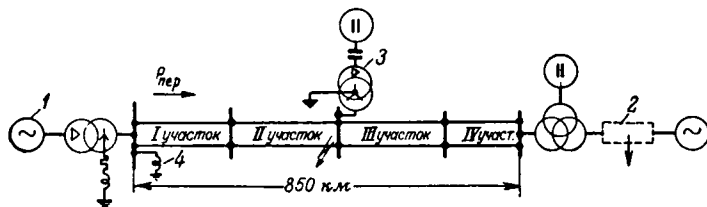


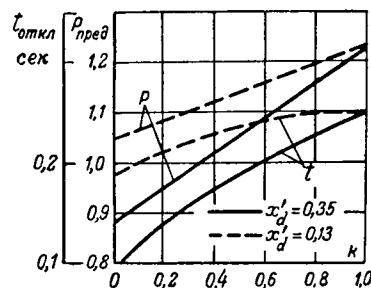
Рис. 2. Исходная схема передачи.

1 — передающая станция ( $x'_d = 0,20$ ;  $x_q = 0,38$ ;  $x_d = 0,57$ ;  $M = 16$  сек;  
 $e_M = 4$ ); 2 — приемная система; 3 — промежуточная подстанция  
 $[S_{ск} = 0,25$ ;  $M = 4,6$  сек;  $e_M = 2,7$ ;  $x'_d = 0,21$ ;  $x'_d = 0,35$ ;  $x_d = 2,34$ ;  
 $x_q = 1,22$ ;  $x_m = 0,11$ ;  $x_C = k(x'_d + x_m)$ ; 4 — дроссель ( $Q_{др} = 0,25$ ).  
 $P_{баз} = 2P_N$  линии электропередачи.

$k_p = \frac{E}{T_p}$ , следует, что способность компенсатора поддерживать напряжение зависит от действия регулятора возбуждения и системы возбуждения ( $k_p$ ), величины тока ротора и степени компенсации  $k$ . Емкостная компенсация, приводящая к снижению перегрузки ротора по току, даст эффект в том случае, если степень компенсации будет согласована с принятой системой регулирования возбуждения. Действительно, значения реактивности  $x_{ск}$ , которыми синхронный компенсатор вводится в схему замещения, будут различны в зависимости от принятой системы регулирования возбуждения, а следовательно, должны быть различны и значения выбранной степени компенсации  $k$ . При весьма сильном регулировании ( $k_p$  велико) регулирующий эффект может быть большим и без включения емкости, но в этом случае неизбежна значительная перегрузка ротора.

Сопротивление цепи компенсатора может быть снижено не только путем увеличения  $x_C$ , но и путем изменения номинальной мощности или конструкции синхронного компенсатора. Так, реактивность  $x'_d$  резко снижается, если в качестве синхронного компенсатора применить типовой турбогенератор<sup>1</sup>. Например, турбогенератор, номинальная мощность которого немного больше номинальной мощности явнополюсного компенсатора, будет иметь (в пересчете на мощность синхронного компенсатора) реактивность  $x'_d = 0,13$  вместо  $x'_d = 0,35$  для машины с выступающими полюсами. Применение турбогенератора в качестве синхронного компенсатора целесообразно также ввиду его большей инерции.

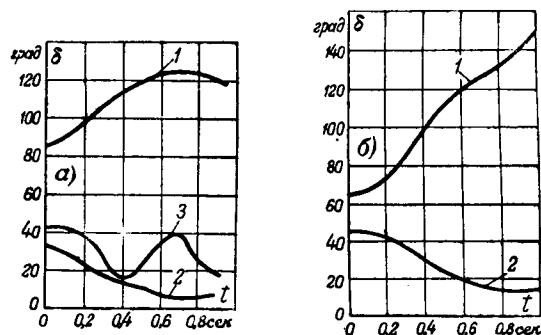
Характеристики, представленные на рис. 3, показывают, что при полной компенсации сопротивления  $x'_d + x_m$  ( $x'_d = 0,35$ ) передаваемая мощность примерно на 25% больше, чем при отсутствии компенсации. Они также указывают на рост предельного времени отключения. При расчетах, в результате которых получены характеристики, номинальная мощность генераторов

Рис. 3. Зависимость предельного времени отключения и предельной передаваемой мощности при  $t_{откл} = 0,12$  сек от степени компенсации по условиям сохранения динамической устойчивости.

передающей станции изменялась в соответствии с передаваемой мощностью.

При исследовании динамическая устойчивость определялась по первому циклу колебаний при двухфазном замыкании на землю на линии второго участка (рис. 2). При этом предполагалось, что настройка регуляторов такова, что они могут способствовать гашению последующих больших колебаний. В момент короткого замыкания компенсирующая емкость шунтировалась наглухо во всех трех фазах и расшунтировалась через 0,08 сек после отключения короткого замыкания, т. е. учитывалась возможность запаздывания работы устройства расшунтирования.

На рис. 4 представлены характеристики изменения угла  $\delta$  при передаче мощности  $P = 1,22$  для двух случаев: а) при схеме с промежуточными синхронными компенсаторами и б) при схеме с продольной компенсацией. В первом случае сопротивление  $x'_d + x_m$  компенсируется полностью, во втором же реактивность линии в нормальном режиме компенсируется примерно на 40%, а при отключении одной параллельной цепи степень компенсации автоматически увеличивается в 1,5 раза. Эти характеристики показывают, что схема с промежуточными синхронными компенсаторами имеет несомненное преимущество перед схемой с продольной компенсацией.

Рис. 4. Изменение углов э. д. с. генераторов. а — при схеме с промежуточными синхронными компенсаторами ( $x_C = x'_d + x_m$ ;  $P = 1,22$ ;  $t_{откл} = 0,12$  сек); б — при схеме с продольной компенсацией ( $x_C = 40\%$ ); 1 — передающая станция; 2 — приемная система; 3 — промежуточная подстанция.<sup>1</sup> Предложение И. Д. Урсова.

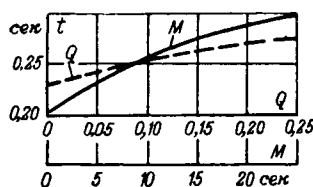


Рис. 5. Зависимость предельного времени отключения от постоянной инерции синхронного компенсатора  $M$  и мощности шунтирующего реактора  $Q$ ;  $x_c = x'_d + x_m$ ;  $P = 1$ .

Аналогичные результаты дала экспериментальная проверка на динамической модели МЭИ.

Увеличение инерции синхронных компенсаторов и мощности шунтирующих реакторов, дополнительно повышающих динамическую устойчивость передачи, увеличивает, как это видно из рис. 5, предельное время отключения.

Характер изменения тока синхронного компенсатора и напряжения на шинах промежуточной подстанции в переходном режиме показан на рис. 6.

После отключения короткого замыкания напряжение на шинах промежуточной подстанции восстанавливается примерно до 90% нормального значения, а затем начинает падать вследствие развивающихся качаний. Расшунтирование емкости через 0,08 сек после отключения короткого замыкания приводит к подъему напряжения примерно до 110% нормального. На этом уровне напряжение держится несколько десятых секунды и снижается при больших относительных углах. Ток синхронного компенсатора нарастает примерно до 4,5...5-кратного нормального значения.

Анализ процесса позволяет наметить некоторые требования, которые могут быть предъявлены к регулятору возбуждения промежуточного синхронного компенсатора в отношении поддержания динамической устойчивости электропередачи. В режимах, при которых возможно нарушение устойчивости, регулятор должен форсировать возбуждение и поддерживать его на том максимальном уровне, которого оно достигло в результате форсирования, до тех пор, пока напряжение на шинах промежуточной подстанции не станет равным 100...110% нормального. При этом статические конденсаторы без шунтирования должны выдерживать кратковременную перегрузку током, в 4...5 раз превышающим номинальный.

Экспериментальные исследования, проведенные на динамической модели МЭИ, показывают, что уменьшение сопротивления цепи компенсато-

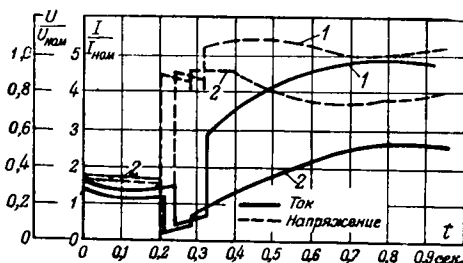


Рис. 6. Ток синхронного компенсатора и напряжение на шинах промежуточной подстанции при качаниях;  $P = 1$ . 1 —  $x_c = x'_d + x_m$ ;  $t_{откл} = 0,24$  сек; 2 —  $x_c = 0,6 (x'_d + x_m)$ ;  $t_{откл} = 0,2$  сек.

ра приводит к необходимости гашения больших колебаний компенсатора после отключения короткого замыкания. В связи с этим следует предусматривать в системе регулирования устройства, своевременно снимающие форсирование возбуждения и вводящие в закон регулирования составляющую, пропорциональную ускорению, с тем чтобы изменение напряжения возбудителя несколько опережало скольжение ротора.

**Статическая устойчивость.** Сравнение электропередач с промежуточными компенсаторами, имеющими различную степень компенсации сопротивления  $x'_d + x_m$ , производилось для условий наиболее тяжелого послеаварийного режима при одной отключенной цепи на втором участке электропередачи. Подведение системы к пределу мощности производилось при расчетах двумя способами: 1) значения э. д. с.  $E'_d$  у всех генераторов и компенсаторов принимались неизменными и равными значениям э. д. с. в исходном расчетном режиме электропередачи; 2) принималось, что напряжение на шинах передающей станции и промежуточной подстанции в утяжеленных, но устойчивых режимах поддерживается постоянным (регулирование по внешней характеристике). Предельный режим вычислялся по условию

$$\frac{dP}{d\delta} = 0$$

при  $E'_d = \text{const}$ .

Результаты исследования, приведенные на рис. 7, показывают, что при первом способе изменения запаса устойчивости в зависимости от степени компенсации происходит сильнее, чем при втором. В случае применения турбогенераторов в качестве синхронных компенсаторов уменьшение запаса статической устойчивости с уменьшением степени компенсации происходит более плавно.

**Устойчивость электромагнитного режима (самовозбуждение).** Преимущества схемы с промежуточными компенсированными синхронными компенсаторами могут быть реализованы при условии преодоления некоторых трудностей. Одна из этих трудностей связана с необходимостью применения специальных мероприятий для предотвращения самовозбуждения компенсатора при большой степени компенсации.

Возможность самовозбуждения синхронного компенсатора очевидна из рассмотрения представленной на рис. 8 эквивалентной схемы замещения системы, имеющей компенсированные синхрон-

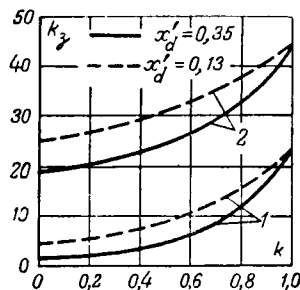


Рис. 7. Зависимость запаса статической устойчивости в послеаварийном режиме от степени компенсации

$x'_d + x_m$ .  
1 — внешняя и внутренняя характеристики  $E_d = \text{const}$ ; 2 — внешняя характеристика  $U = \text{const}$ , внутренняя характеристика  $E'_d = \text{const}$ .

ные компенсаторы. Составляющая собственного тока компенсатора для этой схемы определяется как

$$i_k \doteq i_k(p) = \frac{H(p)}{Z(p)},$$

или

$$i_k = i_0 + i_1 e^{\alpha_1 t} + i_2 e^{\alpha_2 t} + \dots + i_n e^{\alpha_n t},$$

где  $H(p)$  и  $Z(p)$  — операторные выражения, зависящие от параметров машин и присоединенной к ним электропередачи.

Как известно [Л. 2], при определенных условиях корни  $\alpha_1 \dots \alpha_n$  уравнения

$$Z(p) = 0$$

могут быть положительными или иметь положительные вещественные части. Это будет означать появление напряжений и токов, самопроизвольно непрерывно нарастающих и создающих в статоре поле, вращающееся синхронно с ротором (синхронное самовозбуждение) или имеющее некоторое скольжение относительно ротора (асинхронное самовозбуждение).

В этом нарастании напряжений и токов, теоретически неограниченном, а практически ограничиваемом насыщением стали генераторов и компенсаторов, и заключается процесс самовозбуждения.

Соотношение параметров простейшей цепи, при котором будет иметь место самовозбуждение, можно представить в виде «зоны самовозбуждения» [Л. 2], т. е. так, как это сделано на рис. 9, а. Как видно из этого рисунка, в идеальной цепи при  $R=0$  самовозбуждение может наступить при любой степени компенсации. Однако при  $x_c < x'_d$  самовозбуждение прекращается, если в цепь ввести сравнительно малое активное сопротивление. Напротив, при  $x_c \geq x'_d$  для прекращения самовозбуждения в цепь потребуется ввести значительное активное сопротивление. Вид характеристики зависит от конструкции компенсатора, которую надо выбрать оптимальной в смысле противодействия самовозбуждению.

Если перейти от упрощенной схемы рис. 9, а, в которой мы имели дело с короткозамкнутым неввозбужденным компенсатором, к схеме, представленной на рис. 9, б, где синхронный компенсатор присоединен параллельно системе, то необходимо

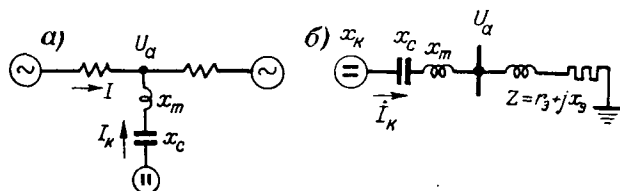


Рис. 8. Схемы замещения для определения условий самовозбуждения.

а — исходная схема; б — расчетная схема для определения характера собственного тока компенсатора.

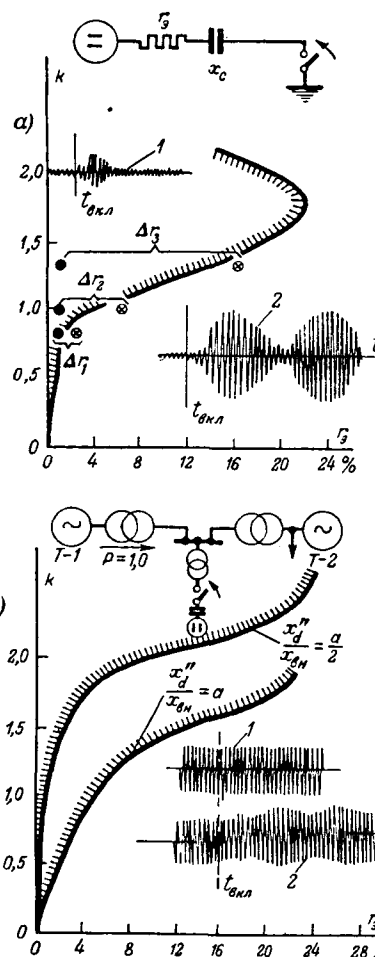


Рис. 9. Влияние активного сопротивления в цепи компенсатора на область самовозбуждения.

а — для простейшей схемы; б — для системы, схема которой представлена на рисунке, при различных соотношениях мощностей компенсатора и приемной системы или различных значениях параметров компенсатора; 1 — характер осциллограммы вне зоны самовозбуждения; 2 — то же в зоне самовозбуждения.

отметить следующее: а) наличие внешнего сопротивления (эквивалентного сопротивления системы) позволяет, не опасаясь самовозбуждения, увеличить допустимую степень компенсации; б) наличие возбуждения на компенсаторе и его параллельная работа с другими компенсаторами несколько меняют характер процесса по сравнению с его характером в случае упрощенной схемы рис. 9, а. В данном случае приходится одновременно с самовозбуждением рассматривать и тенденцию к самораскачиванию. Это приводит к необходимости анализировать уравнения более высокого порядка и указывает на расширение опасной зоны.

При заданном, желательном по условиям самовозбуждения запасе устойчивости может быть допущена тем большая степень компенсации, чем меньше  $x'_d$  и больше  $x_s$ . Эквивалентное сопротивление  $x_s$  дальних электропередач, связанных с мощными по сравнению с присоединяемыми к ним компенсаторами системами, бывает обычно мало. Поэтому для создания запаса устойчивости по условиям самовозбуж-

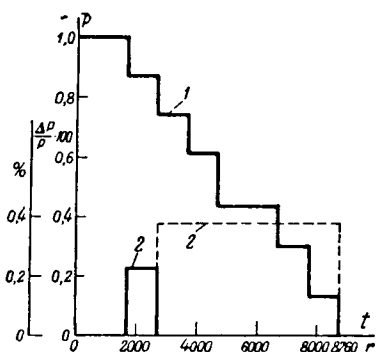


Рис. 10. Графики нагрузки электропередачи (1) и потерь мощности (2) в ней.

Пунктиром показан график потерь для случая, когда емкость и добавочное сопротивление не шунтируются.

дения приходится степень компенсации принимать ниже 100%. При коротких замыканиях, близких к месту присоединения компенсатора, можно шунтировать конденсаторы разрядником.

При наличии демпферных обмоток опасность самораскачивания исчезает, но зона самовозбуждения расширяется и принимает вид, показанный на рис. 9, б. Это расширение может привести к тому, что величина естественного активного сопротивления цепи окажется недостаточной для прекращения самовозбуждения. В этом случае в зоне  $x_c \leq x_d''$  самовозбуждение может быть прекращено введением активных сопротивлений  $\Delta r$ , включаемых последовательно с компенсирующими конденсаторами.

В ряде случаев целесообразно, чтобы добавочное сопротивление было нелинейным и включалось параллельно конденсаторам<sup>2</sup>. Тогда при его помощи можно будет ограничивать перенапряжения на конденсаторах при больших токах. На линиях длиной 1000...1200 км с промежуточными синхронными компенсаторами мощностью 0,3...0,4 и компенсирующей емкостной реактивностью  $x_c = 0,8(x_d'' + x_m)$  добавочное активное сопротивление должно быть равно 2...8%.

Наличие добавочного активного сопротивления в цепи синхронного компенсатора практически не увеличивает потерь энергии в электропередаче, так как компенсация сопротивления синхронного компенсатора и, следовательно, включение добавочного сопротивления необходимы лишь при передаче максимальной мощности, когда синхронный компенсатор не загружен. При передаче мощности, меньшей 0,8  $P_{ном}$ , компенсация не нужна. Если добавочное сопротивление в зависимости от необходимости в нем то вводится в цепь, то шунтируется, то при графике нагрузки, представленном на рис. 10, годовые потери в линии, включая промежуточную подстанцию, составят 5,32% передаваемой

<sup>2</sup> Включение может быть непосредственным или через специальные трансформаторы, автотрансформаторы и т. п. [Л. 1].

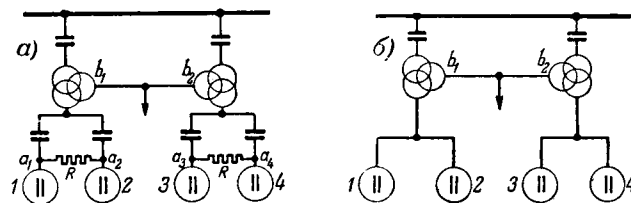


Рис. 11. Схемы включения синхронных компенсаторов. а — раздельная компенсация сопротивлений генераторов и трансформаторов; б — общая компенсация.

мой энергии. При этом потери в добавочном сопротивлении величиной 3% составят только 0,045%. При наличии на шинах промежуточной подстанции дросселя потери в добавочном сопротивлении снижаются в 10 раз, т. е. до 0,0045%.

Необходимо, однако, отметить, что режим работы, при котором добавочное сопротивление и емкость то вводятся в цепь, то шунтируются, осложняет настройку регуляторов возбуждения. Между прочим, такое осложнение имеет место и при продольной компенсации реактивности линии электропередачи. Если компенсирующую емкость в цепи синхронного компенсатора и добавочное сопротивление не шунтировать, а оставлять введенными в цепь и тогда, когда в них нет необходимости, то при наличии дросселя потери в них составят 0,05% передаваемой энергии.

На практике может потребоваться присоединение к линии электропередачи нескольких компенсированных емкостью синхронных компенсаторов, которые должны работать параллельно. Однако параллельная работа может затрудняться неустойчивостью двух машин, связанных емкостным сопротивлением [Л. 2] и их самовозбуждением.

Для устранения этих затруднений необходимо точки  $a_1$  и  $a_2$ ,  $a_3$  и  $a_4$  (рис. 11, а) соединить перемычкой. Для ограничения тока короткого замыкания на шинах компенсатора в эту перемычку можно ввести активное или реактивное сопротивление. Величина активного сопротивления не должна превышать 200...300, а реактивного 20...60%\* (отнесенного к мощности одного компенсатора). Для устранения взаимного самовозбуждения и неустойчивости групп 1-2 и 3-4 (рис. 11, а) необходимо иметь связь между точками  $b_1$  и  $b_2$ . Для устранения этих же явлений в схеме рис. 11, б достаточно иметь перемычку между точками  $b_1$  и  $b_2$ .

Устранение самовозбуждения облегчается в электропередачах, имеющих на промежуточных подстанциях значительные активные нагрузки.

В качестве средства устранения возможности самовозбуждения может служить применение синхронных компенсаторов с гладким ротором, имеющих две обмотки возбуждения: трехфазную и дополнительную поперечную. Такой компенсатор по конструкции приближается к асинхронному двигателю с фазным ротором, симметричным

\* Величины сопротивления подтверждены опытами, проведенными на динамической модели МЭИ.

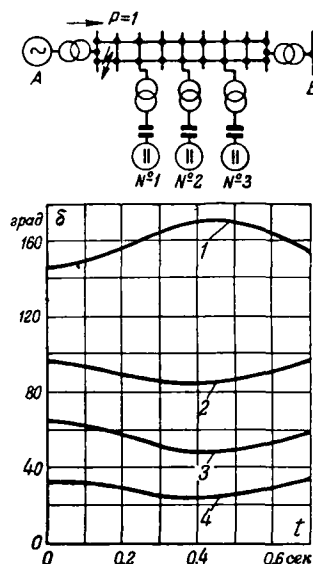


Рис. 12. Динамическая устойчивость электропередачи протяженностью 2 000 км. А — передающая станция; В — приемная система. Напряжение приемной системы  $U = \text{const}$ ;  $P_{\text{баз}} = 2P_k$ . График 1 угла  $\delta$  относится к передающей станции; 2 — к синхронному компенсатору № 1; 3 — к синхронному компенсатору № 2; 4 — к синхронному компенсатору № 3.

личению их мгновенной мощности при сравнительно небольшой перегрузке обмотки ротора по току; она значительно расширяет возможности электропередачи переменного тока в отношении дальности, так и в отношении величины передаваемой мощности. На рис. 12 даны результаты расчета динамической устойчивости двухцепной электропередачи длиной 2 000 км с тремя переключательными пунктами и тремя промежуточными подстанциями, на которых установлены синхронные компенсаторы. Сопротивление  $x_d' + x_{\text{лн}}$

в электрическом и магнитном отношении. Применение компенсаторов с гладким ротором делает невозможным синхронное самовозбуждение. Что же касается асинхронного самовозбуждения, то оно принимает характер плавного процесса, который легко ограничивается при помощи регулирования тока поперечной обмотки. Наличие указанных выше схемок возбуждения не только облегчает устранение самовозбуждения при помощи регуляторов, но и улучшает статическую и динамическую устойчивость, позволяя создать машину с перемещающимся по ротору полем возбуждения.

Компенсация реактивного сопротивления синхронных компенсаторов равносильна увеличению их мгновенной мощности при сравнительно небольшой перегрузке обмотки ротора по току; она значительно расширяет возможности электропередачи переменного тока в отношении дальности, так и в отношении величины передаваемой мощности. На рис. 12 даны результаты расчета динамической устойчивости двухцепной электропередачи длиной 2 000 км с тремя переключательными пунктами и тремя промежуточными подстанциями, на которых установлены синхронные компенсаторы. Сопротивление  $x_d' + x_{\text{лн}}$

компенсатора компенсировано при помощи статических конденсаторов.

Расчеты показывают, что при передаче натуральной мощности устойчивость сохраняется при двухфазном замыкании на землю длительностью 0,12 сек, несмотря на то, что э. д. с. генераторов передающей гЭС при нормальном режиме опережает напряжение приемной системы на 145, а при качаниях на 170°.

Мощность всех синхронных компенсаторов, которые потребуются установить на промежуточных подстанциях рассматриваемой электропередачи, составит 0,75, а статических конденсаторов 0,2. Если же в качестве мероприятия по увеличению пропускной способности этой электропередачи применить компенсацию индуктивного сопротивления линии, то пришлось бы компенсировать 75% этого сопротивления, что потребовало бы установки статических конденсаторов на общую мощность, не меньшую 2,2. Таким образом, необходимая мощность статических конденсаторов в 3 раза превосходит потребную мощность синхронных компенсаторов, стоимость же 1 кВа статических конденсаторов выше стоимости 1 кВа синхронных компенсаторов.

Более значительная разница в установленной мощности будет при передаче большей мощности, так как мощность статических конденсаторов для продольной компенсации возрастает пропорционально квадрату тока, тогда как необходимая мощность синхронных компенсаторов с компенсированным реактивным сопротивлением в меньшей степени зависит от передаваемой мощности.

#### Литература

1. Д. И. Азарьев, В. А. Веников и Н. Н. Соколов. Схемы дальних электропередач большой пропускной способности. Электричество, № 12, 1953.
2. В. А. Веников, Л. А. Жуков и Н. Д. Анисимова. Холостые режимы дальних электропередач. Электричество, № 7, 1953.

[3. 1. 1955]



## Опытная установка ионного возбуждения на мощной гидростанции

Кандидат техн. наук Е. Л. ЭТТИНГЕР, инж. Г. В. ЧАЛЫЙ

Электропривод

Инж. Е. М. ГЛУХ

Уралэлектроаппарат

**Введение.** Обеспечение статической и динамической устойчивости систем является одной из серьезнейших проблем передачи энергии на большие расстояния.

В ряде других возможных мероприятий по повышению устойчивости применение быстродействующих систем возбуждения синхронных генераторов выгодно отличается тем, что оно позволяет существенно повысить динамическую устойчивость без значительных дополнительных затрат.

Ряд исследований, проведенных на моделях и в эксплуатируемых энергосистемах, позволил сформулировать требования к системам возбуждения синхронных генераторов, работающих в мощных энергосистемах с длинными линиями электропередачи:

1. Быстродействие: 1) высокий «потолок» напряжения возбуждения (4 ... 5-кратное номинальному напряжению); 2) быстрое нарастание напряжения при форсировке возбуждения (не менее

5...7-кратного номинального напряжения в секунду); 3) возможность быстрого развозбуждения при регулировании; 4) быстрое гашение поля при аварийных режимах.

2. Гибкость, малая мощность управления и возможность применения любых регуляторов возбуждения.

### 3. Высокая надежность в эксплуатации.

4. Простота обслуживания и возможность полной автоматизации.

Применявшиеся системы возбуждения с электромашинными возбудителями не удовлетворяют перечисленным требованиям вследствие низкого «потолка» напряжения и большой инерционности. Система ионного возбуждения легко обеспечивает 4...5-кратный потолок напряжения возбуждения при постоянной времени порядка 5 мсек, чему соответствует скорость нарастания напряжения на роторе генератора при форсировке порядка 200-кратного номинального напряжения в секунду.

Работы по ионному возбуждению синхронных машин были начаты в 1938 г., в ВЭИ<sup>1</sup>. Война их прервала. Исследования были возобновлены в 1950 г. Сейчас действуют три опытно-промышленные установки:

1. На одной из тэц Мосэнерго для турбогенератора мощностью 3 000 квт. Установка выполнена силами ЦНИЭЛ МЭС и Мосэнерго.

2. Для компенсатора мощностью 30 000 *кв*а. Установка выполнена заводом «Уралэлектроаппарат» и Свердловэнерго.

3. На одной из гЭС Мосэнерго для гидрогенератора мощностью 55 000 *квт*. Установка разработана и выполнена силами треста «Электропривод» и завода «Уралэлектрораппарат» при активном участии работников гЭС и Мосэнерго.

В статье дается описание и излагаются результаты испытаний и опытной эксплуатации третьей по счету и последней по времени создания опытной установки в системе Мосэнерго.

**Основные схемы и принцип работы.** При разработке наиболее перспективными были признаны следующие два варианта:

1. Система независимого возбуждения с питанием выпрямителей от вспомогательного генератора переменного тока, расположенного на одном валу с главным генератором (рис. 1), или от отдельного «домашнего» генератора.

2. Система самовозбуждения с питанием выпрямителей от шин главного генератора через вольтодобавочные последовательные трансформаторы (рис. 2).

Преимущества системы независимого возбуждения: 1) полная автономность — независимость системы возбуждения от режима работы генератора и станции в целом; 2) простота; 3) сравнительно малая площадь, потребная для размещения оборудования. Недостатком этой системы

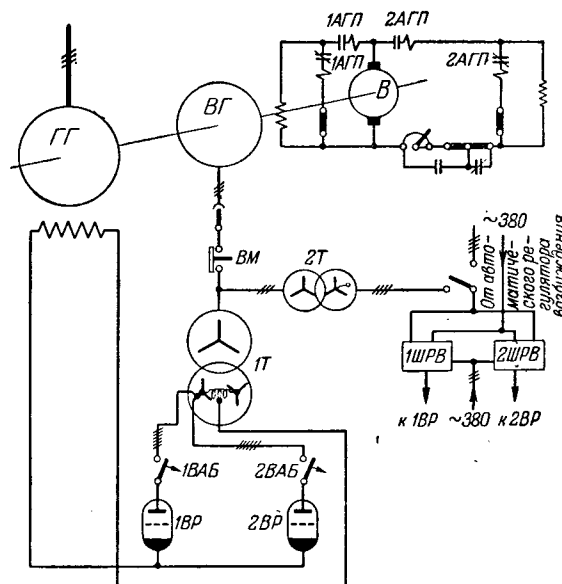


Рис. 1. Принципиальная схема первого варианта системы ионного возбуждения гидрогенератора.

ГГ — главный генератор; ВГ — вспомогательный генератор; В — возбудитель вспомогательного генератора; Т — выпрямительный трансформатор; 2Т — трансформатор собственных нужд; 1ВР — низковольтная группа вентилей; 2ВР — высоковольтная группа вентилей; ЦПРВ — шкаф управления выпрямителя 1ВР; 2ЦПРВ — шкаф управления выпрямителя 2ВР.

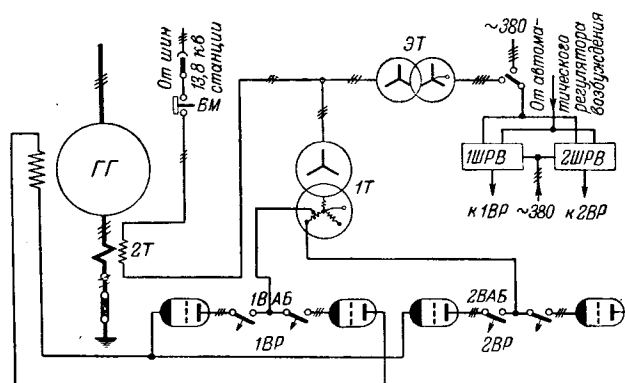


Рис. 2. Принципиальная схема второго варианта системы  
ионного возбуждения гидрогенератора.

ГГ — главный генератор; ИТ — выпрямительный трансформатор; 2Т — вольтодобавочный трансформатор; 3Т — трансформатор собственных нужд; 1ВР — низковольтная группа вентилялей; 2ВР — высоковольтная группа вентилялей; 1ШВР — шкаф управления выпрямителя 1ВР; 2ШВРВ — шкаф управления выпрямителя 2ВР.

является наличие специального вспомогательного генератора переменного тока и возбудителя.

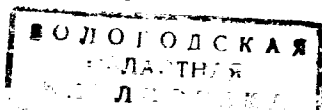
В системе самовозбуждения возбуждение осуществляется без вспомогательных вращающихся машин. Стоимость оборудования и его вес — меньшие. Однако схема коммутации этой системы сравнительно сложнее <sup>2</sup>.

В зависимости от величины потолка напряжения каждый из основных вариантов системы ионного возбуждения может быть выполнен с одной либо двумя группами клапанов.

<sup>1</sup> См. статью Е. Л. Эттингера в сборнике трудов ВЭИ „Электрические машины“, 1940.

2 Электричество, № 4.

<sup>2</sup> Другим недостатком этой системы является необходимость в отдельном источнике для кратковременного питания возбуждения генератора при первом пуске. В случае включения в сеть генераторов по способу самосинхронизации потребность в таком источнике отпадает.





При потолке напряжения возбуждения до 2,5...3-кратного в случае самовозбуждения целесообразно применять один шестифазный выпрямитель, соединенный по схеме с уравнильным реактором. Для системы независимого возбуждения следует применять трехфазную мостовую схему.

При нормальных режимах работы выпрямитель сильно зарегулирован (до 30...40% максимального напряжения); при форсировке выпрямитель полностью открывается и дает почти мгновенное нарастание напряжения до потолочного значения. Очевидно, что в нормальных режимах работы генератора выпрямитель работает с низким коэффициентом мощности и, следовательно, мощность вспомогательного генератора или выпрямительного трансформатора должна быть равна  $k$ -кратной номинальной мощности возбуждения синхронного генератора, где  $k$  — кратность потолка напряжения возбуждения. Недостатком схемы с одним выпрямителем является также большой скачок обратного напряжения на анодах при коммутации тока с анода на анод, что повышает вероятность обратных зажигания вентилей.

При потолке возбуждения выше 2,5...3-кратного целесообразно применять схемы с двумя группами вентилей: одна группа — «низковольтная» — обеспечивает возбуждение генератора при нормальных режимах работы; вторая — «высоковольтная» — обеспечивает форсировку и быстрое гашение поля генератора. В нормальных режимах вторая группа обтекается 20...30% выпрямленного тока, что необходимо для прогрева анодов.

Для питания двух групп вентилей у вспомогательного генератора или выпрямительного трансформатора имеются соответствующие отпайки. Часть обмотки, питающая высоковольтную группу вентилей, рассчитывается на малую длительную нагрузку и значительную кратковременную перегрузку, что позволяет снизить типовую мощность источника питания.

Опытная установка осуществлялась с целью испытаний систем, предназначенных для возбуждения генераторов, работающих через длинные линии передачи, что требовало 4...5-кратного потолка напряжения и двух групп вентилей. Однако такое напряжение было бы опасным для

изоляции ротора генератора, не рассчитанного на такую форсировку, вследствие чего установка была спроектирована и выполнена с двумя группами вентилей, но с кратностью потолка около 2,5. Такое понижение потолка не вносит принципиальных изменений в исследование системы.

**Описание установки.** На опытной установке предусмотрена возможность испытания как варианта самовозбуждения, так и независимого возбуждения.

Данные генератора: 55 000 кВт; 13 800 в; 62,5 об/мин; напряжение возбуждения 340 в; ток 1 170 а; ток возбуждения режима холостого хода 740 а. Постоянная времени при разомкнутом стартере 4,2 сек. На одном валу с главным генератором расположен вспомогательный генератор переменного тока мощностью 1 600 кВт, линейное напряжение 3 150 в. В случае питания от ионного возбудителя расчетное напряжение возбуждения главного генератора при форсировке составляет около 900 в, а ток возбуждения около 3 000 а.

**Схемы силовых цепей** (рис. 1 и 2). Для варианта независимого питания выпрямителей пришлось применить промежуточный трансформатор 1Т для возможности питания от вспомогательного генератора напряжением 3 150 в двух групп вентилей двумя различными по величине напряжениями: 380 в анодного напряжения для низковольтной группы и 1 245 в анодного напряжения для высоковольтной группы.

При полном открытии и номинальном токе возбуждения выпрямитель 1ВР дает выпрямленное напряжение 380 в и рассчитан на питание обмотки возбуждения гидрогенератора при нормальных режимах работы от холостого хода до 110% нагрузки. Выпрямитель 2ВР при полном открытии дает выпрямленное напряжение около 900 в и обеспечивает ударное возбуждение гидрогенератора с потолком около 2,6. Этот же выпрямитель обеспечивает и аварийное гашение поля генератора.

При нормальных режимах работы выпрямитель 2ВР сильно зарегулирован и, как указывалось, проводит лишь незначительный ток. При форсировке возбуждения угол регулирования выпрямителя 2ВР уменьшается до полного открытия вентилей и выпрямитель 2ВР берет на себя всю нагрузку. Для гашения поля генератора выпрямитель 1ВР заприрается, а выпрямитель 2ВР оказывается в инверторном режиме. Напряжение на кольцах ротора генератора, таким образом, меняет знак, и происходит быстрое гашение поля с отдачей энергии магнитного поля ротора вспомогательному генератору.

На рис. 3 показаны кривые выпрямленного напряжения выпрямителей при различных режимах работы. Для наглядности на рисунке показаны напряжения, соответствующие трехфазной схеме выпрямления, без учета коммутации вентилей.

В схеме самовозбуждения (рис. 2) выпрямительный трансформатор соединен по схеме звезда — звезда, а выпрямители — в трехфазную мо-

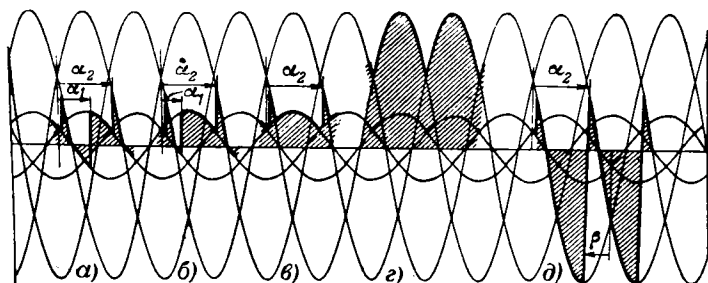


Рис. 3. Характеристика выпрямленного напряжения (три фазы).

а — холостой ход генератора ( $\alpha_1 \approx 65^\circ$ ;  $\alpha_2 = 125^\circ$ ); б — номинальный режим ( $\alpha_1 \approx 30 \dots 40^\circ$ ); в — максимальный режим ( $\alpha_1 = 0^\circ$ ;  $\alpha_2 = 0^\circ$ ); г — при полной форсировке ( $\alpha_1 = 0^\circ$ ;  $\alpha_2 = 0^\circ$ ); д — при гашении поля генератора ( $\alpha_2 = 125^\circ$ ;  $\alpha_1$  снимается).

стовую схему. Это дает возможность изучить на установке как схему с уравнильным реактором в варианте с независимым питанием, так и трехфазную мостовую схему в варианте самовозбуждения.

Вольтодобавочные трансформаторы 2Т выполнены с большим воздушным зазором и э. д. с. их вторичных обмоток примерно пропорциональна току первичных обмоток.

Напряжение на первичной обмотке выпрямительного трансформатора равно геометрической сумме двух напряжений — на шинах главного генератора и вторичных обмоток вольтодобавочных трансформаторов. Благодаря этому в нормальных режимах работы осуществляется некоторое компаундирование главного генератора. При коротких замыканиях, когда ток главного генератора сильно возрастает, а напряжение на шинах падает, на первичной обмотке выпрямительного трансформатора сохраняется напряжение, необходимое для питания выпрямителей. Регулирование напряжения возбуждения, ударное возбуждение и гашение поля производятся так же, как и в первом варианте — путем сеточного управления.

*Схема управления.* В схеме регулирования напряжения завода «Уралэлектроаппарат» в качестве источника запирающего напряжения (100 в) используются селеновые выпрямители, питаемые от отдельной обмотки трансформатора возбуждения выпрямителя. Отпирающие импульсы создаются «пик-генератором» из шести насыщающихся трансформаторов, соединенных по специальной схеме. Пик-генератор создает положительные импульсы с амплитудой 250 в при ширине их 30, 60, 90 или 120° в зависимости от схемы соединения и с крутизной нарастания напряжения около 25 в/град.

Для сдвига фазы отпирающих импульсов служит либо фазорегулятор, либо специальное фазосмещающее устройство в виде моста с постоянным сопротивлением в одном плече и дросселем насыщения в другом. При изменении индуктивности путем регулирования тока подмагничивания дросселя вектор напряжения на выходе моста поворачивается, не меняя своей величины. Фазосмещающие устройства завода «Уралэлектроаппарат» и треста «Электропривод» обеспечивают сдвиг напряжения на выходе моста на 140...150°, что полностью перекрывает необходимый диапазон регулирования возбуждения генератора во всех его режимах: от нуля напряжения до полной форсировки.

Фазорегуляторы предназначены для начальной настройки системы и ручного регулирования возбуждения. Автоматическое регулирование возбуждения в процессе нормальной работы генератора и при аварийных режимах осуществляется автоматическим регулятором возбуждения при помощи статических фазосмещающих устройств.

В системе ионного возбуждения регулятор действует на фазосмещающие устройства выпрямителей. В схеме с двумя группами вентиляей действие регулятора на низковольтную и высоко-

вольтную группы должно быть различным; кроме того, это действие должно изменяться в зависимости от режима работы генератора. Для соответствующего направления и преобразования воздействия регулятора предусмотрено специальное устройство — «приставка» к регулятору. На опытной установке использован электромашинный регулятор треста «Электропривод» с регулированием по отклонению напряжения и реактивного тока генератора, но могут быть применены и регуляторы других систем. Для простоты в дальнейшем изложении вместо всех величин, воздействующих на измерительный элемент того или иного применяемого регулятора возбуждения, будем говорить о «напряжении на входе регулятора», подразумевая под этим некоторое эквивалентное напряжение, оказывающее аналогичное действие на регулятор.

К системе автоматического управления возбуждением мощных синхронных генераторов предъявляются, в частности, следующие требования:

1. Автоматическое обеспечение устойчивого возбуждения генератора от минимального значения до максимального рабочего режима, соответствующего 110% номинальной нагрузки.

2. Автоматический перевод возбуждения генератора при выходе из строя автоматического регулятора возбуждения в режим, соответствующий номинальному режиму генератора.

3. Автоматическая пропорциональная форсировка возбуждения при коротких замыканиях и значительных посадках напряжения на шинах генератора при внезапных перегрузках.

4. Автоматическое интенсивное развозбуждение главного генератора в случаях, когда этого требует режим регулирования, например при качаниях генератора после отключения короткого замыкания или сбросе нагрузки. Автоматический регулятор возбуждения для разработанной системы должен иметь обычную двустороннюю зависимость изменения напряжения на выходе регулятора от изменения напряжения на входе. Примерная характеристика регулятора показана на рис. 4.

На рис. 5 показана схема автоматического регулирования возбуждения опытной установки. Фазосмещающее устройство вентиляей низковольтной группы имеет три подмагничивающие обмотки. Обмотка I питается от регулятора возбуждения через нелинейное сопротивление, и н. с. имеет характеристику, показанную на рис. 6,а. Обмотка II питается от аккумуляторной батареи или другого источника постоянного тока (рис. 6,б). Это постоянное смещение обеспечивает такой угол регулирования  $\alpha_1$ , при котором низковольтная группа вентиляей вместе с зарегулированной до  $\alpha_2 = 125^\circ$  высоковольтной дает выпрямленное напряжение, соответствующее току возбуждения главного генератора при номинальном режиме. Обмотка III питается от схемы сравнения напряжения регулятора и аккумуляторной батареи. Схема настраивается так, что ток в обмотке III появляется при некотором отрицательном значе-

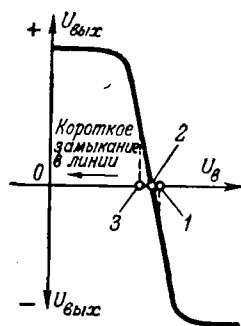


Рис. 4. Примерная характеристика регулятора возбуждения.

Точка 1 — холостой ход генератора; 2 — номинальный и 3 — максимальный режимы генератора ( $U_{вых}$  и  $U_{вх}$  — выходное и входное напряжения регулятора).

нии напряжения на выходе регулятора и возрастает при увеличении отрицательного напряжения на регуляторе (рис. 6, в).

При отрицательном напряжении на выходе регулятора н. с., создаваемая обмоткой III, по знаку противоположна н. с. обмотки I; таким образом, результирующая н. с. всех трех обмоток не получает отрицательного значения. Это необходимо для предотвращения неправильного действия системы, так как действие дросселей насыщения в фазосмещающих устройствах не зависит от знака результирующей н. с. подмагничивающих обмоток.

На рис. 7 показана результирующая н. с. подмагничивающих обмоток фазосмещающего устройства низковольтной группы вентиля. Такая характеристика автоматически обеспечивает: 1) максимальную точность регулирования и быстрое действие в зоне номинального режима генератора (прямолинейный участок характеристики); 2) автоматический перевод системы возбуждения в режим, соответствующий номинальному режиму генератора при отказе автоматического регулятора; 3) возможность автоматического снижения возбуждения генератора (воздействием регулятора) до нуля и интенсивного развозбуждения главного генератора.

На рис. 8 показана зависимость напряжения на кольцах ротора генератора от напряжения

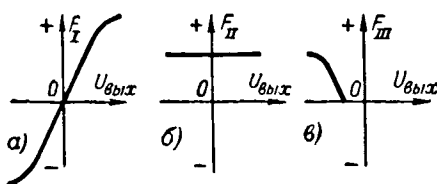


Рис. 6. Характеристики приставки к автоматическому регулятору возбуждения для низковольтной группы вентиля.

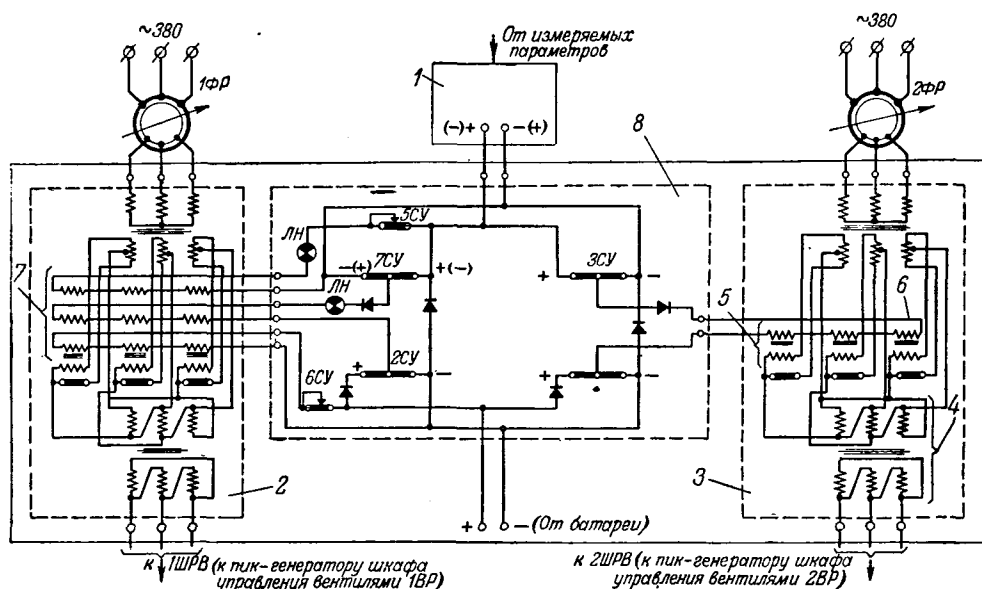


Рис. 5. Схема автоматического регулирования возбуждения опытной установки. 1 — автоматический регулятор возбуждения; 2 и 3 — фазосмещающие устройства вентиля 1ВР и 2ВР; 4 — выходной трансформатор фазосмещающего устройства; 5 — дроссель насыщения; 6 и 7 — обмотки подмагничивания (в 7 — сверху вниз — обмотки I, III, II), 8 — приставка.

на выходе регулятора. На характеристике обозначены точками основные режимы работы генератора и соответствующие углы регулирования выпрямителя 1ВР: при номинальном режиме  $\alpha_1 \approx 30^\circ$ ; при холостом ходе  $\alpha_1 \approx 60^\circ$ . При увеличении отрицательного напряжения на выходе регулятора возбуждения  $\alpha_1$  возрастает до  $140^\circ$  и группа 1ВР переходит в инверторный режим, чем достигается интенсивное развозбуждение генератора. При отрицательных напряжениях на выходе регулятора подмагничивающий ток дросселей фазосмещающего устройства группы 2ВР равен нулю и угол регулирования  $\alpha_2$  остается неизменным (примерно  $125^\circ$ ).

Фазосмещающее устройство вентиля высоковольтной группы 2ВР имеет одну подмагничивающую обмотку. Обмотка питается от схемы сравнения регулятора и аккумуляторной батареи (рис. 5) через селеновые вентили. Схема настраивается таким образом, что ток в обмотке появляется тогда, когда положительное напряжение на выходе регулятора достигнет некоторого опреде-

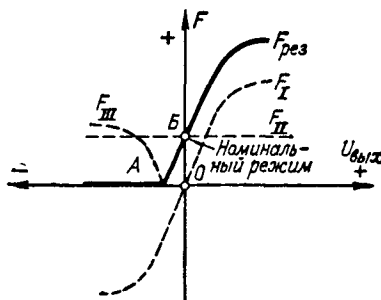


Рис. 7. Характеристика результирующей н. с.  $F_{рез}$  фазосмещающего устройства.

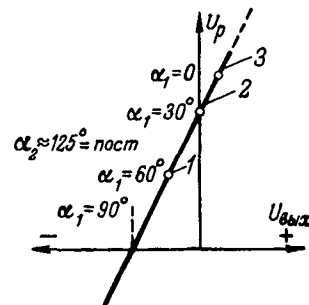


Рис. 8. Напряжение на кольцах ротора синхронного генератора в зависимости от напряжения на выходе регулятора  $U_{вых}$ . Точка 1 — холостой ход генератора; 2 — номинальный и 3 — максимальный режимы генератора.

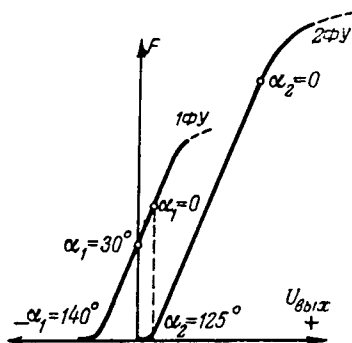


Рис. 9. Совмещенные характеристики приставки для обоих фазосмещающих устройств.

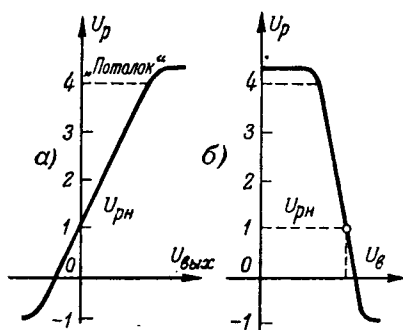


Рис. 10. Напряжение на кольцах ротора синхронного генератора в зависимости от напряжения на выходе регулятора (а) и напряжения на входе измерительного элемента регулятора (б).

ленного значения, и далее возрастает с увеличением напряжения регулятора. При увеличении подмагничивающего тока угол регулирования  $\alpha_2$  группы 2ВР от начального значения, установленного фазорегулятором 2ФР (125°), уменьшается до нуля. При этом выпрямленное напряжение увеличивается до потолочного значения; происходит пропорциональная форсировка возбуждения главного генератора. Это дает возможность осуществлять полную форсировку при коротком замыкании и частичную, пропорциональную форсировку при более или менее значительных падениях напряжения на генераторе и в режиме качания ротора после отключения короткого замыкания.

Совмещенные характеристики обоих фазосмещающих устройств приведены на рис. 9.

Общая характеристика напряжения на кольцах ротора генератора в зависимости от напряжения на выходе регулятора имеет вид, показанный на рис. 10, а. Характеристика напряжения на кольцах ротора генератора в зависимости от напряжения на входе измерительного элемента регулятора показана на рис. 10, б.

Рассмотренная схема автоматического регулирования возбуждения обеспечивает и автоматическое гашение поля. При остановке агрегата отключается автоматический регулятор возбуждения и одновременно разрывается цепь обмотки II фазосмещающего устройства низковольтной группы вентилях. Угол увеличивается до 140°, выпрямитель 1ВР переходит в инверторный режим, и происходит гашение поля.

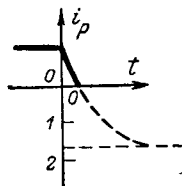


Рис. 11. Гашение поля генератора.

При срабатывании электрических защит генератора запираются сетки вентилях 1ВР, а вентили группы 2ВР остаются в инверторном режиме. В этом случае гашение поля происходит быстрее, так как анодное напряжение вентилях 2ВР в  $k$  раз выше напряжения вентилях 1ВР.

Процесс гашения поля в схеме ионного возбуждения иллюстрируется рис. 11.

**Защита и сигнализация.** В установке предусмотрена специальная защита оборудования собственно системы ионного возбуждения: 1) максимальная защита выпрямительной установки, воздействующая на масляные выключатели выпрямительного трансформатора и главного генератора; 2) газовая защита выпрямительного трансформатора; 3) защита выпрямителей от обратных зажиганиях быстродействующими анодными выключателями типа 6 × ВАБ-10 завода «Урал-электроаппарат»; 4) защита от перенапряжений, могущих возникнуть при обрыве дуги в выпрямителях, роговыми разрядниками с добавочными безиндуктивными сопротивлениями, включенными параллельно фазным обмоткам выпрямительного трансформатора, и дисковым разрядником, включенным параллельно обмотке ротора главного генератора (последовательно с гасительным сопротивлением).

Предусмотрена предупредительная сигнализация о состоянии отдельных элементов ионного возбудителя.

Возможность быстрого гашения поля при помощи вентилях позволяет отказаться от автомата гашения поля и перевести действующие на него защиты на запирание сеток выпрямителя 1ВР (при помощи контактора первой величины).

**Испытания установки**<sup>3</sup>. К настоящему времени полностью закончены испытания первого варианта установки — с независимым питанием выпрямителей. Эти испытания были разбиты на четыре этапа: 1) испытания отдельных элементов схемы; 2) испытания установки при работе на искусственную нагрузку; 3) то же на обмотку возбуждения гидрогенератора; 4) опытная промышленная эксплуатация. Описание первых двух этапов испытаний мы здесь опускаем. Отметим лишь, что, как показали опыты, отключение одного вентиля почти не сказывается на величине выпрямленного напряжения. Отключение двух вентилях, питаемых от одной звезды вторичной обмотки трансформатора, также практически не влияет на величину выпрямленного напряжения.

Испытания при работе на обмотку возбуждения генератора проводились при холостом ходе генератора (отключенном от сети) и при нагрузке. При отключенном от сети генераторе проверялись регулирование тока возбуждения и гашение поля. Форсировка осуществлялась при работе генератора на сеть без активной нагрузки.

<sup>3</sup> Помимо авторов, в испытаниях принимали участие инженеры Ю. А. Шмайн (ЦИЭЛ МЭС), Л. В. Красильников (Мосэнерго), А. Д. Колмауи, В. Д. Лаптева («Электропривод»), В. Я. Масольд (гэс) и др. Большую помощь в создании установки, в проведении испытаний и эксплуатации оказал Г. С. Сафразбекян (Мосэнерго).

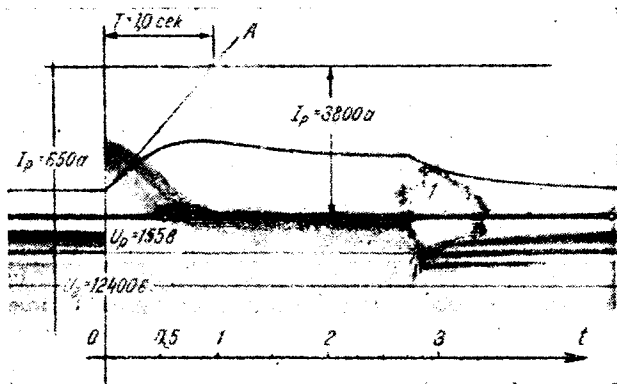


Рис. 12. Форсировка возбуждения генератора без форсировки вспомогательного генератора.

На рис. 12 приведена осциллограмма форсировки возбуждения главного генератора без форсировки возбуждения вспомогательного генератора. В точке 1 форсировка снималась. На рис. 13 дана осциллограмма форсировки возбуждения главного генератора при форсировке вспомогательного генератора. Форсировка вспомогательного генератора производилась системой регулирования напряжения, реагирующей на понижение напряжения вспомогательного генератора при нагрузке, возросшим током выпрямителей.

На осциллограмме рис. 14 показано гашение поля, отключенного от сети главного генератора.

Основные результаты испытаний по форсировке и гашению поля:

1. Максимальное значение напряжения на кольцах ротора при начале форсировки 1100 в. Время достижения этого напряжения с момента подачи импульса на форсировку составляет около 0,015 сек. Согласно осциллограммам наибольшее значение тока ротора без форсировки вспомогательного генератора составляет 1900 а, а при форсировке более 2850 а.

2. Полное время гашения поля со значения тока возбуждения, равного 110% номинального, составляет 1,1 сек.

Как видно из осциллограммы рис. 12, выпрямленное напряжение, получив почти мгновенно пограничное значение, в дальнейшем понижается, что в свою очередь ограничивает ток ротора. Причиной этого являются, с одной стороны, понижение напряжения вспомогательного генератора

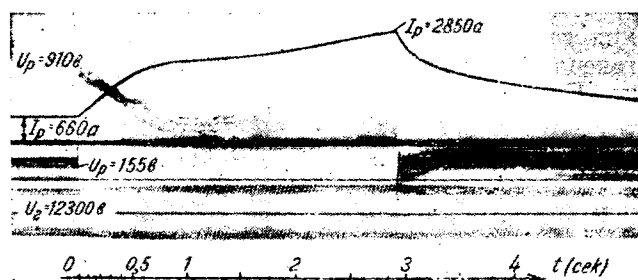


Рис. 13. Форсировка возбуждения генератора при форсировке вспомогательного генератора.

ра и, с другой — сильно наклонная внешняя характеристика выпрямителя 2ВР из-за наличия в схеме трансформатора 1Т и реактивностей вспомогательного генератора. Релейная форсировка вспомогательного генератора, срабатывающая только при достаточно большом понижении напряжения его на шинах, дает запоздалый эффект. Действительно, выпрямленное напряжение и ток в начале второй секунды начинают расти, однако если учесть, что длительность короткого замыкания составляет обычно 0,1 ... 0,25 сек, а первого полуцикла качаний угла после отключения короткого замыкания — в среднем около 0,5 ... 0,7 сек, то следует констатировать, что такой способ форсировки вспомогательного генератора не достигает цели. Возникают определенные требования к вспомогательному генератору, предназначенному для питания ионного возбудителя: минимальные реактивные сопротивления статора, высокий потолок возбуждения и высокая скорость нарастания напряжения. Для вспомогательного генератора желательна быстродействующая параметрическая форсировка возбуждения и — как минимум — релейная форсировка, по меньшей мере 2,5-кратная, вводящаяся одновременно с форсировкой главного генератора.

Из осциллограмм 12 и 13 видна также весьма важная особенность ионного возбуждения: реактивное сопротивление в анодных цепях вентилей, создающее наклон внешней характеристики, равноценно активному сопротивлению в цепи выпрямленного тока; наличие его дает существенное уменьшение постоянной времени роторной цепи генератора. Если напряжение вспомогательного генератора было бы неизменным (3150 в), — установившееся значение тока ротора было бы ~ 3300 а (рис. 12). Построив в точке А касательную к кривой нарастания тока, определим, что постоянная времени нарастания тока ротора при этом условии равна примерно 1 сек. Постоянная времени собственно ротора главного генератора при работе на сеть составляет 1,75 сек. Это весьма важное обстоятельство — снижение постоянной времени роторной цепи, обусловленное наклоном внешней характеристики выпрямительной установки, — необходимо учитывать при расчетах устойчивости генераторов с ионным возбуждением.

При этом, однако, следует учитывать и изменение относительного потолка напряжения возбуждения.

При нагруженном генераторе проверялась совместная работа системы ионного возбуждения и электромашинного регулятора треста «Электропривод». Наброс нагрузки производился отключением масляного выключателя генератора, работавшего в блоке с испытуемым генератором. До отключения масляного выключателя первый генератор имел реактивную нагрузку  $30 \cdot 10^3$  квар, а второй испытуемый —  $30 \cdot 10^3$  квт активной и  $27 \cdot 10^3$  квар реактивной нагрузки. Напряжение на шинах — 13,7 кв. После отключения первого генератора испытуемый генератор плавно набрал реактивную нагрузку до  $40 \cdot 10^3$  квар без промежуточных колебаний.

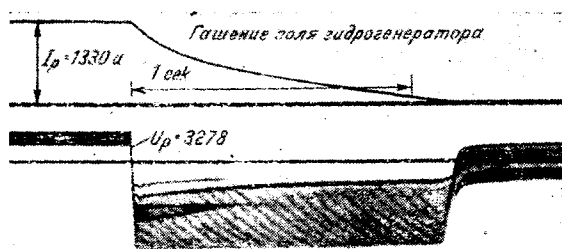
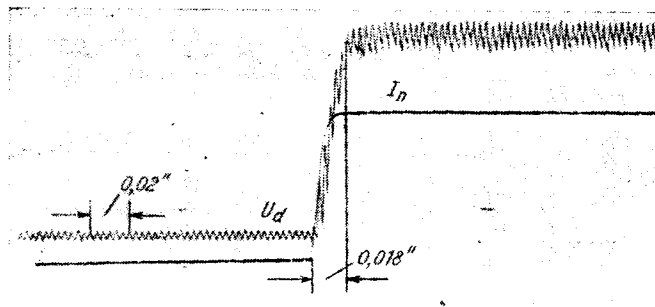


Рис. 14. Гашение поля главного генератора

Сброс нагрузки производился отключением масляного выключателя испытуемого генератора. До отключения генератор имел активную нагрузку  $32 \cdot 10^3 \text{ квт}$  и реактивную  $22 \cdot 10^3 \text{ квар}$ . Напряжение на шинах —  $13,7 \text{ кв}$ . После отключения генератора напряжение на шинах возросло до  $14,4$ , затем снизилось до  $13,7 \text{ кв}$ . При этом опыте скорость генератора возрастала с  $62,5$  до  $78 \text{ об/мин}$ . Такое необычно малое повышение напряжения генератора при внезапном сбросе около  $60\%$  его нагрузки также объясняется прежде всего большей «жесткостью» системы ионного возбуждения за счет во много раз увеличенного быстродействия возбудителя и значительного уменьшения постоянной времени цепи ротора генератора. Эта же «жесткость» ионного возбуждения наблюдалась неоднократно, например, при включении системы возбуждения с заранее заданной уставкой напряжения генератора. Заданное напряжение генератора устанавливалось с нуля за  $0,6 \dots 0,7 \text{ сек}$  без перерегулирования и промежуточных колебаний напряжения.

Во время испытаний также определялось быстродействие системы ионного возбуждения. На рис. 15 показана осциллограмма нарастания выпрямленного напряжения при подаче импульса на форсировку. В этом случае к обмотке подмагничивания дросселей фазосмещающего устройства форсировочной группы вентилях напряжение подавалось толчком ( $220 \text{ в}$ ). По осциллограмме запаздывание было  $0,018 \text{ сек}$ , что является суммарным запаздыванием всего ионного возбудителя. Однотипные многочисленные осциллограммы или подтверждали эту цифру, или показывали еще меньшее запаздывание — до  $0,012 \text{ сек}$ . Таким образом, экспериментально установлено, что постоянная времени промышленной системы ионного возбуждения, выполненной на металличе-

Рис. 15. Форсировка выпрямленного напряжения ( $U_d$  — выпрямленное напряжение;  $I_n$  — ток подмагничивания дросселей).

ских ртутных выпрямителях, равна примерно  $0,004 \dots 0,006 \text{ сек}$ , при мощности управляющего сигнала  $250 \text{ вт}$ .

После указанных испытаний генератор с системой ионного возбуждения был включен в опытную промышленную эксплуатацию. Опытная эксплуатация генератора в течение нескольких месяцев (более  $1600 \text{ час}$ ) показала надежную работу системы, четкость и быстродействие автоматического регулирования возбуждения.

Во время опытной эксплуатации, как и в процессе всех испытаний, не было ни одного случая обратного зажигания выпрямителей и аварийного отключения генератора по вине системы ионного возбуждения. Имели место два случая полного сброса нагрузки двух генераторов блока вследствие ложного срабатывания газовой защиты трансформатора блока. В обоих случаях, как и во время опытов по сбросу нагрузки, система предотвращала повышение напряжения генератора.

Разработанная система ионного возбуждения и первые результаты испытаний и опытной эксплуатации установки ионного возбуждения (вариант независимого возбуждения) были рассмотрены Постоянной комиссией по электрическим машинам, низковольтным аппаратам и электроприводу Электротехнической секции Технического совета МЭСЭП. В своем решении комиссия отметила, что разработанная система ионного возбуждения обладает рядом преимуществ перед машинными системами возбуждения и является наиболее прогрессивной системой возбуждения синхронных генераторов.

[26.11.1954]



# Экспериментальное исследование ресинхронизации генераторов

Доктор техн. наук И. М. МАРКОВИЧ и кандидат техн. наук С. А. СОВАЛОВ  
Москва

Вероятность перехода в установившийся асинхронный режим выпавшего из синхронизма генератора обосновывалась рядом авторов соображениями, базирующимися на рассмотрении статических характеристик зависимости вращающего момента турбины и асинхронного момента генератора от скольжения. Параметры возможного асинхронного режима, установившиеся средние значения момента и скольжения определялись по точке пересечения этих статических характеристик.

Однако опыт эксплуатации и экспериментальные исследования режима генераторов подтверждают наличие устойчивого асинхронного режима только при потере возбуждения. Параметры такого режима хорошо согласуются с теоретическим анализом, данным И. А. Сыромятниковым [Л. 1]. В то же время опыт эксплуатации давно уже подсказывал, что если выход генератора из синхронизма произошел не из-за потери возбуждения, а в результате нарушения динамической устойчивости, то во многих случаях генератор ресинхронизируется без вмешательства персонала. В связи с этим представлялось целесообразным произвести экспериментальное исследование поведения турбогенераторов и гидрогенераторов, выпавших из синхронизма в результате нарушения динамической устойчивости. В настоящей статье излагаются некоторые результаты такого исследования (проведенного в одной из энергосистем), положенные авторами на электротехнической секции Технического совета Министерства электростанций 2 июня 1952 г.

Испытания заключались во внезапном осуществлении трехфазного короткого замыкания на шинах высокого напряжения станции, на которые через трансформатор работал испытуемый генератор. Схема испытаний приведена на рис. 1.

В опытах с турбогенератором параметры схемы характеризовались следующими данными:

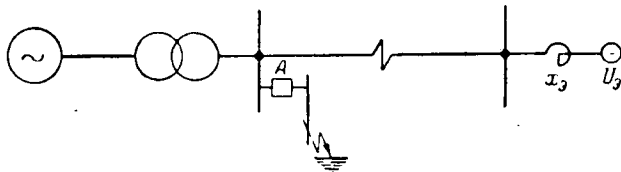


Рис. 1. Схема испытаний.

генератор Т-4376/142 мощностью 50 мвт,  $\cos \varphi = 0,85$ ,  $U_{ном} = 10,5$  кВ,  $I_{рот.ном} = 675$  а,  $x_d = 1,51$ ,  $x'_d = 0,26$ ,  $x''_d = 0,22$ ,  $x'_q = 0,31$ ,  $M = 15,5$  сек,  $T_0 = 7,4$  сек; трансформатор мощностью 55 мвта, 10,5/115 — 2,5%,  $x_m = 0,0943$ ; линия электропередачи, связывающая станцию с энергосистемой, напряжением 110 кВ, длиной 113 км выполнена проводом СА-95; энергосистема представлена приведенным к напряжению 110 кВ эквивалентным сопротивлением  $x_\theta = 6$  ом,  $U_\theta = 110$  кВ. Активная нагрузка генератора до испытания была равна 50 мвт, а реактивная — 18 мвар, напряжение 11 кВ, ток ротора  $I_{рот} = 560$  а. Генератор работал с электронным регулятором напряжения. Время, в течение которого длилось трехфазное короткое замыкание (от момента включения выключателя А до момента его отключения), 0,55 сек.

Кроме активной мощности, напряжений и токов статора и ротора, при испытаниях осциллографировалось изменение угла  $\delta_U$  между вектором напряжения статора и вектором напряжения другой секции шин 110 кВ — точки, электрически весьма удаленной от места короткого замыкания. Осциллографирование производилось при помощи однофазного шлейфа мощности, на который включались сопоставляемые напряжения.

На рис. 2 представлена осциллограмма испытания. Результаты обработки осциллограммы показаны на рис. 3. Здесь все величины отнесены к соответствующим значениям для исходного нормального режима.

После отключения короткого замыкания возникли резкие колебания тока, напряжения и мощности генератора, характерные для асинхронного режима, в связи с чем в соответствии с программой испытания персонал начал разгрузку генератора по активной мощности. Однако тут же было замечено, что произошла ресинхронизация и разгрузка была прекращена. После ресинхронизации имели место значительные, но быстро затухающие синхронные качания.

При восстановлении синхронного режима активная нагрузка генератора оказалась равной 45 тыс. кВт, т. е. в результате вмешательства

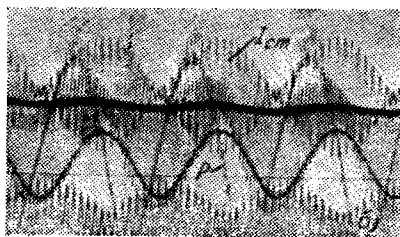
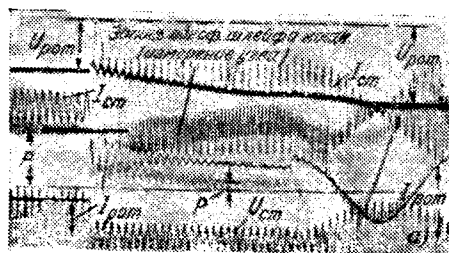


Рис. 2. Осциллограмма опыта ресинхронизации турбогенератора.

а — короткое замыкание и выход из синхронизма; б — асинхронный режим; в — ресинхронизация.



персонала генератор был разгружен всего на 5 тыс. кВт (10%).

Как видно из осциллограммы (рис. 3), ресинхронизация генератора произошла через 4 сек после начала короткого замыкания, после 9 циклов асинхронных качаний. Среднее за асинхронный цикл скольжение достигло максимального значения, равного 6,4%.

В опытах с гидрогенератором параметры схемы (рис. 1) характеризовались следующими данными: генератор СВ  $\frac{1250}{170}$  — 96 мощностью 55 мвт,  $\cos \varphi_{ном} = 0,8$ ,  $U_{ном} = 13,8$  кВ,  $I_{рот.ном} = 1170$  а,  $x_d = 0,77$ ,  $x_q = 0,605$ ,  $x'_d = 0,326$ ,  $x''_d = 0,302$ ,  $M = 10,24$  сек,  $T_0 = 5,45$  сек; трансформатор мощностью 69 мвта,  $13,8/242 \pm 5\%$ ,  $x_m = 0,135$ ; линия электропередачи, связывающая станцию с энергосистемой напряжением 220 кВ, длиной 207 км, выполнена проводами АСУ-300 и МП-240; энергосистема представлена приведенным к напряжению 220 кВ эквивалентным сопротивлением  $x_s = 27,5$  ом,  $U_s = 219$  кВ.

С гидрогенератором было произведено два опыта. В первом опыте гидрогенератор работал с электронным регулятором возбуждения, с быстродействующим возбуждением. При выходе генератора из синхронизма персонал должен был действовать в соответствии с эксплуатационной инструкцией, т. е. должен был уменьшить выпуск энергоносителя путем ограничения открытия направляющего аппарата гидротурбины. Во втором опыте электронный регулятор и быстродействующее возбуждение были отключены, а персонал не воздействовал на выпуск энергоносителя. Длительность трехфазного короткого замыкания в первом опыте составила около 0,55 сек, а во втором — около 0,57 сек. Активная нагрузка гидрогенератора до испытаний была максимально возможной по напору и составляла 41 тыс. кВт. Реактивная нагрузка 26 мвар, напряжение 13,3 кВ, ток ротора  $I_{рот} = 880$  а.

При испытании осциллографировался угол сдвига между напряжением вспомогательного генератора, расположенного на одном валу с главным гидрогенератором, и напряжением электрически удаленной точки — системы шин 220 кВ, не вошедшей в схему испытания.

В первом опыте после толчка при коротком замыкании наблюдался выход генератора из синхронизма с возникновением очень быстрых асин-

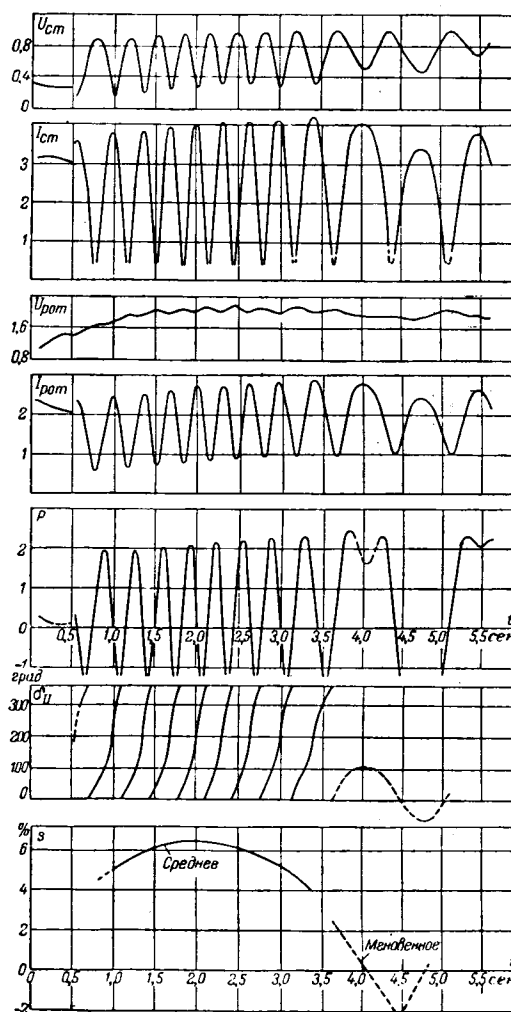


Рис. 3. Результаты обработки осциллограммы опыта ресинхронизации турбогенератора.

хронных качаний. Персонал приступил к разгрузке агрегата, но прекратил эту операцию, так как заметил по прибору, указывающему положение направляющего аппарата гидротурбины, что выпуск энергоносителя стал меньше впуска, соответствующего холостому ходу турбины. После большого числа циклов асинхронных качаний произошла ресинхронизация; синхронные качания были слабо затухающими. По прекращении качаний на генераторе установилась активная нагрузка, равная 35 мвт, т. е. генератор оказался разгруженным на 6 мвт.

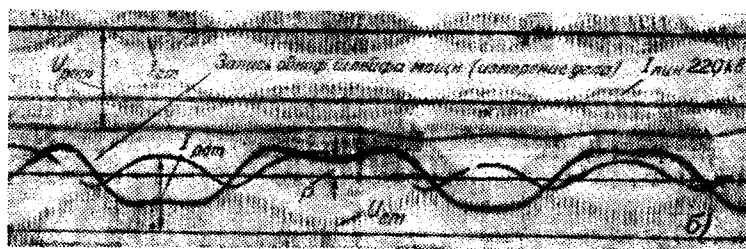
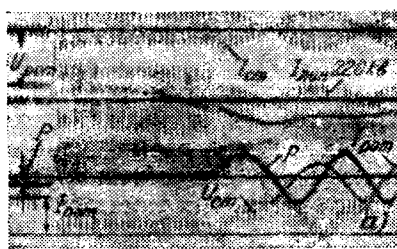


Рис. 4. Осциллограмма первого опыта ресинхронизации гидрогенератора.  
а — короткое замыкание и выход из синхронизма; б — ресинхронизация.

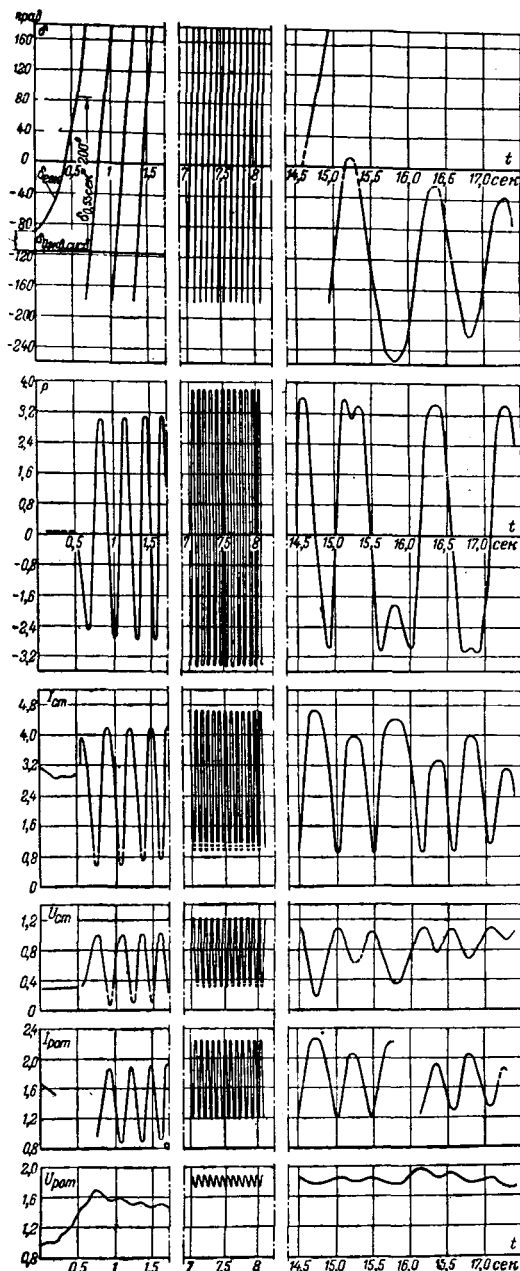


Рис. 5. Результаты обработки осциллограммы первого опыта ресинхронизации гидрогенератора.

На рис. 4 даны осциллограммы первого опыта для двух этапов процесса: а) для этапа короткого замыкания и выхода генератора из синхронизма и б) для этапа ресинхронизации. Результаты обработки осциллограмм показаны на рис. 5. Так же как и в предыдущем случае, все величины отнесены к соответствующим значениям для исходного нормального режима. Величина скольжения в момент отключения короткого замыкания достигла 3,5%, после чего продолжала быстро возрастать. Через 7...8 сек после начала короткого замыкания она достигла 28,6%. Далее скольжение стало уменьшаться и через 15,2...15,3 сек после начала короткого замыкания, после 138 циклов асинхронных колебаний скольжение прошло через нуль, т. е. произошла ресинхронизация.

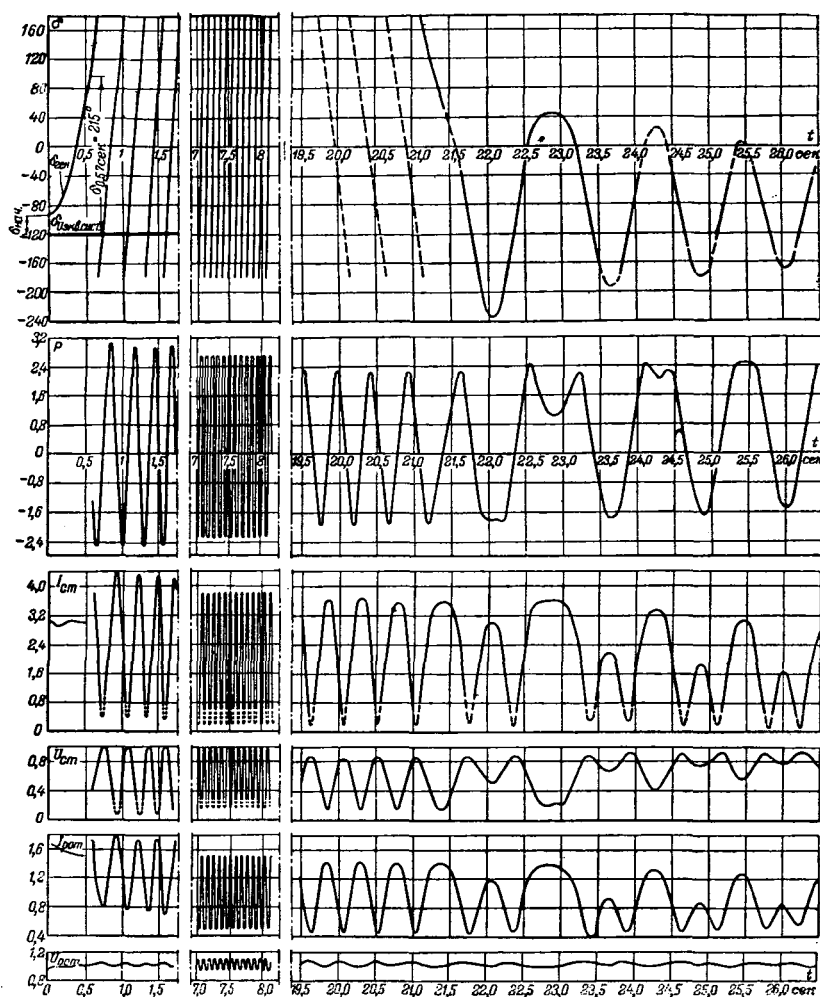


Рис. 6. Результаты обработки осциллограммы второго опыта ресинхронизации гидрогенератора.

Во втором опыте с гидрогенератором наблюдался более длительный, чем в первом, асинхронный режим, закончившийся также ресинхронизацией гидрогенератора. Результаты обработки осциллограммы второго опыта даны на рис. 6.

Во втором опыте максимальное скольжение достигло 32,5%. После 171 цикла асинхронных качаний при  $t = 17,2$  сек имел место возврат колебаний в генераторном режиме; однако ресинхронизация оказалась временной, и генератор вновь вышел из синхронизма при скорости, меньшей синхронной, т. е. перешел в режим выпавшего из синхронизма синхронного двигателя. Число асинхронных циклов в этом режиме было равно 8. Через 22 сек после начала короткого замыкания произошла окончательная ресинхронизация в режиме электродвигателя.

Сопоставление осциллограмм первого и второго опытов в той их части, которая соответствует асинхронному режиму во время наибольшего скольжения, показывает существенное различие в колебаниях электрических параметров (см. таблицу).

Опыты были проведены в условиях, когда мощность генераторов, выпавших из синхронизма, была во много раз меньше мощности энерго-

Наименование величин	Первый опыт	Второй опыт
Наибольшее среднее скольжение, % . . . .	28,6	32,5
Продолжительность асинхронного цикла, сек . . . . .	0,07	0,0615
Среднее напряжение ротора . . . . .	1,8 (1,35)	1 (0,77)
Колебания активной мощности . . . . .	+3,75 ... -3,45 (+2,8 ... -2,57)	+2,7 ... -2,3 (+2,02 ... -1,72)
Наибольшее значение тока статора . . . . .	4,6 (3,52)	3,8 (2,9)
Наибольшее значение напряжения статора	1 (0,96)	0,95 (0,93)
Колебания тока ротора	1,2 ... 2,25 (0,9 ... 1,68)	0,5 ... 1,5 (0,38 ... 1,15)

Примечание. Значения напряжения, тока и мощности отнесены к соответствующим значениям доаварийного режима, практически одинакового для обоих опытов; цифры в скобках отнесены к соответствующим номинальным значениям.

системы. Несмотря на это, во время опытов с гидрогенератором в системе наблюдались снижение напряжения на 3 ... 4% и заметные качания на электростанциях.

Для анализа процессов, наблюдавшихся при испытаниях гидрогенератора, и проверки осциллограмм были выполнены аналитические расчеты<sup>1</sup>, результаты которых были сопоставлены с результатами испытаний. Параметры расчетной схемы исходного режима были такими же, как и для схемы испытаний. Расчеты были выполнены для трех наиболее характерных этапов переходного процесса: а) для короткого замыкания и режима, имевшего место непосредственно после его отключения; б) для асинхронного режима при наибольшем скольжении генератора; в) для процесса ресинхронизации.

Расчеты для первого этапа процесса производились методом последовательных интервалов. При расчете учитывались переходные процессы в цепи ротора. Изменение напряжения ротора в переходном процессе было принято не по типовым характеристикам, а по осциллограмме, что позволило учесть действительное влияние регуляторов возбуждения и быстродействующего возбуждения<sup>2</sup>. В расчет вводились также дополнительные потери в цепях статора и ротора [Л. 4].

Результаты расчетов для первого этапа процесса применительно к первому опыту показаны на рис. 7, на котором для сопоставления пунктиром нанесены данные обработки осциллограмм, а также изменение напряжения ротора, взятое из осциллограммы опыта и принятое для расчета.

Как видно из рис. 7, расчет дает картину процесса во время короткого замыкания и в начале

асинхронного режима, близкую к той, которая получена из опыта.

Для анализа асинхронного режима гидрогенератора предварительно был произведен расчет переходного процесса в пределах одного цикла качаний для режима максимального скольжения в первом опыте. Результаты расчета показали, что отклонения от среднего значения  $E'_d$  (продольная составляющая э. д. с. за  $X'_d$  генератора) составляют десятые доли процента и что, следовательно,  $E'_d$  при столь значительном скольжении практически в пределах цикла остается неизменной. Изменение скольжения в пределах цикла также весьма мало, и его отклонение от среднего за цикл значения не превышает 1%.

При помощи расчетов для того же этапа испытаний, проведенных по обычной методике расчетов асинхронного режима при постоянном скольжении ( $s = 28,6\%$ ), были определены амплитудные значения мощности на зажимах генератора; они оказались равными +3,8 и -3,3 мощности доаварийного режима, что хорошо согласуется с данными опыта. Средняя величина асинхронной мощности при этом скольжении ничтожна, хотя ее амплитудные значения сравнительно велики ( $\sim 0,63$ ). Амплитудные значения тока статора, определенные без учета потерь и насыщения и отнесенные к току доаварийного режима, оказались равными: по данным расчета 5 (максимальное) и 1 (минимальное), по данным опыта соответственно 4, 6 и 1. Отношение амплитуды переменной составляющей тока ротора к среднему значению по данным расчета оказалось равным 0,3, т. е. совпало с данными опыта.

Расчеты для проверки характера процесса ресинхронизации в первом опыте проводились по методике, принимаемой обычно в расчетах динамической устойчивости. Начальные условия для расчета этого этапа переходного процесса (угол генератора, напряжение и ток ротора) были взяты из осциллограммы для момента, когда скольжение генератора было равно 5%. Так как мощность, развиваемая турбиной, непосредственно не измерялась, были проведены расчеты для ряда значений этой мощности. Наилучшее совпадение с данными опыта дал расчет, при котором мощность турбины принималась равной нулю. Это совпадение, как показывают данные, приведенные на рис. 8, имеет место не только для самого момента ресинхронизации, но и для последующего первого цикла синхронных качаний.

Аналогичные расчеты процесса ресинхронизации и сопоставление их результатов с результатами обработки осциллограмм были проведены и для второго опыта. Наилучшее совпадение с опытными данными дал расчет, при котором мощность турбины в момент успешной ресинхронизации принималась равной 13 мвт.

В опытах не осциллографировалось изменение положения клапанов паровой турбины и открытия направляющего аппарата гидротурбины. Однако изменение мощности, развиваемой турбина-

<sup>1</sup> В расчетах принимали участие Ю. С. Горбич и Н. А. Карамзина.

<sup>2</sup> Выполненные до опытов предварительные расчеты базировались на типовых расчетных характеристиках автоматического регулятора возбуждения.

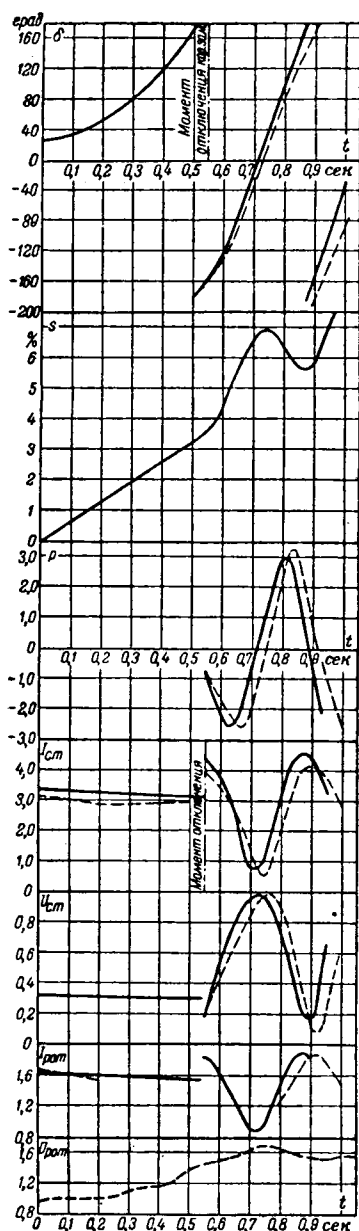


Рис. 7. Результаты расчетов для первого этапа процесса (короткое замыкание и выход из синхронизма) применительно к первому опыту с гидрогенератором.

ми, и, следовательно, изменение впуска энергоносителя могут быть приближенно оценены из расчета баланса мощности на валу турбины. По изменению скольжения гидрогенератора может быть определена избыточная мощность, равная производной кинетической энергии агрегата по времени. В момент  $t = 2$  сек после начала короткого замыкания эта величина превышает 30 мвт, к моменту  $t = 7,5$  сек она падает до нуля, а затем, изменив знак, достигает абсолютного значения 30 мвт. Основную часть электрической мощности, тормозящей вал, составляют потери, обусловленные постоянной составляющей тока ротора, а меньшую часть — потери, обусловленные

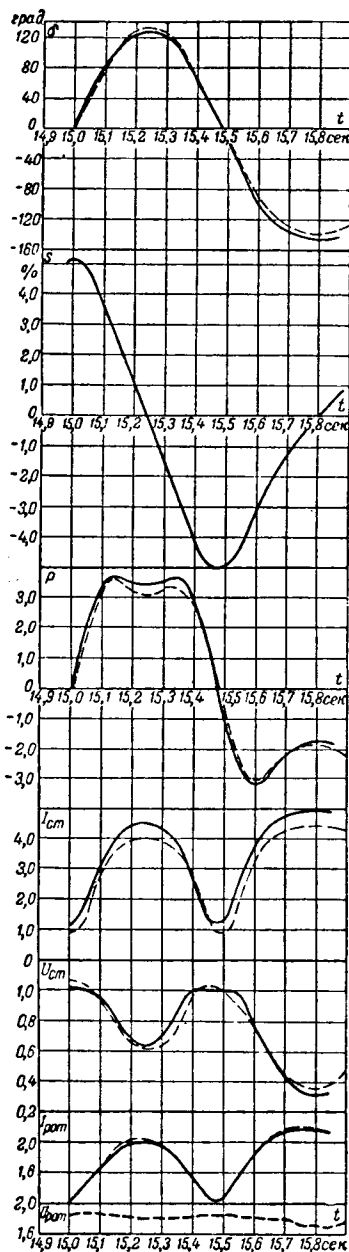


Рис. 8. Результаты расчетов для третьего этапа процесса (ресинхронизация) применительно к первому опыту с гидрогенератором.

переменной составляющей тока ротора, имеющей частоту  $s$ . Величина всей электрической мощности, тормозящей вал, изменяется в рассматриваемом промежутке времени (2...13 сек) от 9 до 13 мвт.

Расчеты показывают, что мощность, развиваемая турбиной, проходит через нулевое значение при  $t = 9$  сек. В дальнейшем турбина не только не развивает вращающего момента, но, наоборот, сама создает весьма значительную тормозящую мощность (порядка 18 мвт). Эта мощность, играющая существенную роль в ходе процесса ресинхронизации, обусловлена тормозящим действием лопаток гидротурбины, вращающихся в воде со скоростью выше номинальной при угле разворота, соответствующем рабочему режиму.

Для сравнения укажем, что аналогичный анализ для турбогенератора показывает, что в промежутке времени от 0,55 до 3,5 сек асинхронная мощность снижается от 6 до 3 мвт и вновь увеличивается примерно до 10 мвт. Из подсчета баланса мощности по валу агрегата следует, что впуск энергоносителя прекращается приблизительно через 3,5 сек после начала опыта.

Анализ результатов опытов и расчетов показывает, что наиболее существенным фактором, влияющим на ход процесса ресинхронизации, является инерционность системы регулирования турбины. Степень неравномерности статических характеристик обоих агрегатов равна примерно 5%. В опыте с турбогенератором величина скольжения такого порядка была достигнута через 1 сек после начала короткого замыкания. В связи с тем, что в эксплуатации регулирование мощности испытуемого гидрогенератора (автоматическое от регулятора частоты или ручное) осуществляется при помощи ограничителя открытия, а характеристика регулирования смещается так, что мощности нормального режима на статической характеристике соответствует частота, равная 104...105% нормальной, регулятор скорости гидрогенератора не мог вступить в действие, прежде чем скольжение гидрогенератора достигло 4...5%. Таким образом, полное закрытие направляющего аппарата по статической характеристике соответствовало скольжению, равному 9...10%.

В опытах с гидрогенератором такое скольжение было достигнуто через 1,5...1,7 сек после начала короткого замыкания.

Если бы регуляторы скорости были безинерционными и не имели запаздывания, то максимальное скольжение определялось бы, как указано выше, пересечением статической характеристики регулирования с характеристиками зависимости

электрической мощности генератора<sup>3</sup> от скольжения; оно было бы менее 5% для турбогенератора и менее 9...10% для гидрогенератора. Однако в действительности максимальное скольжение достигло 6,4% для турбогенератора и 28,6...32,5% для гидрогенератора, что характеризует запаздывание (инерционность) систем регулирования.

Запаздывание систем регулирования приводит к следующим последствиям.

а) В период короткого замыкания выпуск энергоносителя практически не изменяется, что в свою очередь приводит к значительному росту скольжения в этот период.

б) После отключения короткого замыкания скольжение продолжает увеличиваться, выпуск энергоносителя уменьшается. Скольжение, при котором теоретически возможен установившийся асинхронный режим, достигается генератором при большой скорости переходного процесса в системе регулирования турбины.

в) Только после того, как скольжение значительно превысит величину, соответствующую пересечению статических характеристик, регуляторы скорости успеют настолько закрыть выпуск энергоносителя, что наступит баланс моментов на валу агрегата. При этом скольжение генератора достигнет максимума. Однако этот баланс является временным, так как переходный процесс в системе регулирования к этому моменту не заканчивается и в силу инерции продолжается дальнейшее уменьшение впуска энергоносителя с перерегулированием до полного (или почти до полного) закрытия впуска энергоносителя. Скольжение после этого начинает быстро уменьшаться.

г) Вскоре после того, как скольжение турбогенератора снизилось до величины, меньшей 5%, регулятор скорости паровой турбины начинает увеличивать выпуск энергоносителя, и при дальнейшем быстром снижении скольжения генератор ресинхронизируется. Что же касается гидрогенератора, то его скольжение после прохождения через максимум должно значительно уменьшиться, чтобы система регулирования гидротурбины могла начать открытие впуска энергоносителя. Однако из-за инерционности этой системы регулятор не успеет повысить выпуск энергоносителя, скольжение будет снижаться и ресинхронизация произойдет при малом открытии направляющего аппарата.

Таким образом, инерционность регуляторов скорости является одним из важнейших факторов, обуславливающих ресинхронизацию генераторов, вышедших из синхронизма из-за нарушения динамической устойчивости.

Реактивное сопротивление связи с системой значительно снизило асинхронную мощность ге-

нераторов. Согласно характеристике, построенной для условий испытания, максимальное значение асинхронной мощности для турбогенератора равно 19,4 мвт или в относительных единицах 0,33, а для гидрогенератора — 10 мвт или в относительных единицах 0,145. Эти максимальные значения соответствуют скольжениям: 0,35% для турбогенератора и 0,1% для гидрогенератора. За время затянувшегося короткого замыкания, при котором нарушается динамическая устойчивость, скольжение успевает достигнуть таких значений, при которых после отключения короткого замыкания имеет место переход на падающую часть характеристики асинхронной мощности. С дальнейшим увеличением скольжения асинхронные мощности снижаются.

Таким образом, даже в опыте с турбогенератором асинхронная мощность не играла существенной роли в торможении ротора генератора. В опыте же с гидрогенератором, не имеющим успокоительных обмоток, она практически не играла никакой роли.

Анализ осциллограмм опытов с гидрогенератором показывает, что автоматические регуляторы возбуждения существенно влияют на характер процесса ресинхронизации. Их влияние сказывается на увеличении колебаний скольжения и на увеличении электрической мощности, тормозящей вал.

Различный характер процесса ресинхронизации в первом и втором опытах объясняется в основном наличием в первом опыте электронного регулятора, форсировавшего напряжение ротора до 1,8 его значения в нормальном режиме, что облегчило ресинхронизацию.

В заключение необходимо подчеркнуть, что возможность ресинхронизации без вмешательства персонала может иметь место лишь при нарушении динамической устойчивости; в случае нарушения статической устойчивости ресинхронизация выпавшего из синхронизма генератора невозможна без вмешательства персонала, если не устранены причины, вызвавшие нарушение статической устойчивости, как, например, перегрузка электропередачи, связанная с выпадением одного ее участка, снижение возбуждения или резкое снижение напряжения в приемной системе.

#### Литература

1. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1952.
2. П. С. Жданов. Устойчивость электрических систем. Госэнергоиздат, 1948.
3. В. А. Веников и Л. А. Жуков. Переходные процессы в электрических системах. Госэнергоиздат, 1953.
4. И. М. Маркович и С. А. Совалов. Экспериментальное исследование динамической устойчивости. Электричество, № 7, 1950.

[23.10.1954]

<sup>3</sup> Сумма средней асинхронной мощности и потерь мощности, зависящих от напряжения возбуждения.

# Механизм втягивания генератора в синхронизм при самосинхронизации

Кандидат техн. наук А. И. ГЛУШКО

Куйбышевский индустриальный институт

**Введение.** При включении в сеть гидрогенераторов по способу самосинхронизации после завершения процесса синхронизации очень часто наблюдается смещение ротора генератора на половину полюсного деления. На рис. 1 представлена осциллограмма такого включения. При подробном рассмотрении осциллограммы выявляется, что до четвертой секунды в цепи ротора генератора течет незначительный ток  $I_r$  постоянного направления, а ток статора, очевидно, определяется синхронным индуктивным сопротивлением генератора в поперечной оси  $x_q$ . Казалось, что процесс синхронизации закончился в этот момент. Однако на четвертой секунде ток ротора довольно резко меняет знак и затем спадает до нуля, при этом также падает и ток статора. Устанавливается новое синхронное положение ротора. Ток статора теперь определяется не поперечным синхронным сопротивлением  $x_q$ , а продольным синхронным сопротивлением генератора  $x_d$ .

Таким образом, в начальной стадии процесса устанавливается синхронный режим работы с углом ротора по отношению к вектору напряжения сети, близким к  $\frac{\pi}{2}$ . Затем это равновесие нарушается, ротор генератора смещается на половину полюсного деления и устанавливается новое состояние равновесия с углом ротора, близким либо к нулю, либо к  $\pi$ . Такое явление, конечно, можно наблюдать в чистом виде только в том случае, если возбуждение генератора подается с запозданием, однако при подаче возбуждения генератору одновременно с его включением в сеть этот процесс смещения ротора так же наблюдается, но направление смещения становится однозначным: ротор

всегда смещается в сторону нулевых значений угла.

Нельзя согласиться с утверждениями в [Л. 1 ... 3], что из всех действующих на ротор генератора моментов решающим в части дотягивания генератора до синхронной скорости является асинхронный момент. Значительная часть случаев самосинхронизации происходит без участия асинхронного момента и наличие этого момента дает лишь гарантию успешности метода самосинхронизации при любых начальных условиях включения. Если пренебречь моментом, создаваемым постоянной составляющей тока статора, в начальный период процесса самосинхронизации на ротор генератора будет действовать динамический момент явнополюсности

$$M_d = \frac{U^2 (x_q - x'_d)}{2x_q x'_d} \sin 2\theta. \quad (1)$$

Превращение этого момента в синхронный момент явнополюсности или в суммарный синхронный момент, когда возбуждение генератору подается одновременно с его включением в сеть, происходит не сразу, а с постоянной времени  $T'_d$ , составляющей для гидрогенераторов от 2 сек и больше. Таким образом, в первый период самосинхронизации можно считать, что этот начальный момент будет определять движение ротора генератора.

Рассмотрим пример (рис. 2). Пусть при  $t=0$  угол ротора равен  $\theta_0$  и включение происходит с начальным скольжением  $s_0$ . Тогда можно написать следующее условие втягивания генератора в синхронизм до появления действия асинхронного момента:

$$\frac{s_0^2 M}{2} + \text{пл. отп} \leq \text{пл. нкр},$$

где  $n$  — точка первого равновесия ротора. После превращения динамического момента явнополюс-

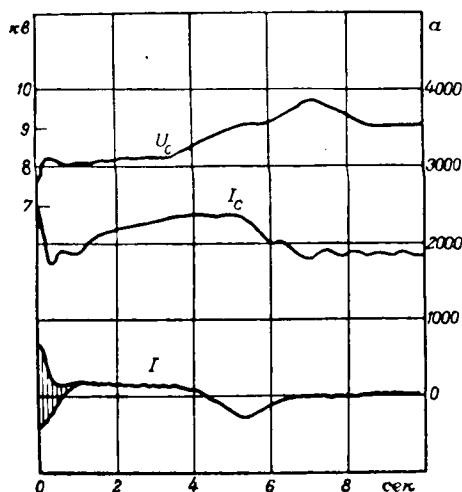


Рис. 1. Осциллограммы напряжения и токов статора и ротора гидрогенератора 30 мва при самосинхронизации.

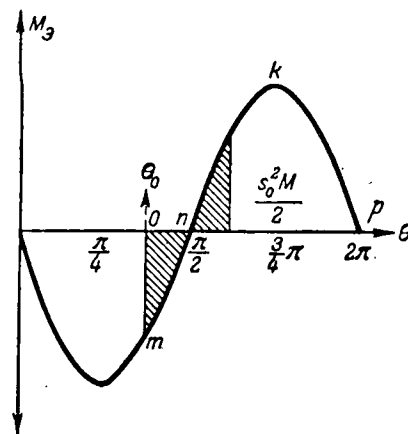


Рис. 2.

ности в статический синхронный момент происходит смещение ротора генератора на половину полюсного деления, о котором указывалось выше.

Весной 1954 г. при проведении на одной гидростанции опытов по автоматическому повторному включению по способу самосинхронизации автор наблюдал за процессом самосинхронизации по синхроскопу, фиксирующему фазный угол ротора генератора. Синхроскоп сравнивал фазу ротора генератора с фазой вектора напряжения системы. Напряжение, определяющее фазу ротора, было взято от специального синхронного генератора, установленного на одном валу с испытуемым генератором, фаза напряжения системы определялась по напряжению приемной подстанции, поданному через холостую линию электропередачи к месту испытаний. Во всех без исключения случаях, даже когда генератор перед синхронизацией делал несколько циклов скольжения, первоначальный синхронный режим устанавливался с углами ротора  $\pm \frac{\pi}{2}$ , в одном случае ротор в этом положении задержался на 6 сек.

**Начальная фаза самосинхронизации.** Генератор без демпферных обмоток. Переходные режимы работы синхронной машины с одним контуром на роторе в общем случае подчиняются системе следующих пяти уравнений:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{T_{ad}} + p\right) I_d x_d + (1+s) I_q x_q + p I_s &= U \sin \theta; \\ -(1+s) I_d x_d + \left(\frac{1}{T_{aq}} + p\right) I_q x_q - (1+s) I_s &= -U \cos \theta; \end{aligned}$$

$$p(x_d - x'_d) I_d + \left(\frac{1}{T_{do}} + p\right) I_s = \frac{U_s}{T_{do}};$$

$$I_q [I_s + (x_d - x_q) I_d] + M p s = M_m;$$

$$p\theta - s = 0,$$

где  $p$  — символ Хевисайда.

Постоянная слагающая тока статора практически не оказывает заметного влияния на электромеханический переходный режим работы генератора, поэтому в случае пренебрежения активным сопротивлением фаз статора система уравнений примет более простой вид:

$$\frac{dI_s}{dt} + \frac{1}{T'_d} I_s = \frac{U_s}{T'_d} + \frac{U(x_d - x'_d)}{x'_d} \sin \theta \frac{d\theta}{dt}; \quad (2)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{M_m}{M} - \frac{I_s U}{x_d M} \sin \theta - \frac{U^2(x_d - x_q)}{2x_d x_q M} \sin 2\theta. \quad (3)$$

Как известно, из этих уравнений нельзя получить аналитическое выражение угла в функции времени и обычно прибегают к численному их интегрированию. Для начального периода самосинхронизации можно найти зависимость угла  $\theta$  от времени, если в уравнении (2) положить  $T'_d = \infty$ , что равносильно пренебрежению активным сопротивлением цепи ротора. Для

первых трех-пяти десятых секунды действительный процесс будет хорошо отражаться уравнением, полученным из этих предположений. Уравнение для цепи ротора дает значение тока ротора:

$$I_s = -\frac{U(x_d - x'_d)}{x'_d} \cos \theta. \quad (4)$$

Уравнение движения ротора примет вид:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{M_m}{M} + \frac{U^2(x_q - x'_d)}{2x_q x'_d M} \sin 2\theta. \quad (5)$$

Решение этого уравнения для скольжения будет:

$$\begin{aligned} s = \sqrt{\frac{M_m}{M} 2\theta - \frac{U^2(x_q - x'_d)}{2x_q x'_d M} \cos 2\theta + s_o^2} - \\ - \frac{M_m}{M} 2\theta_o + \frac{U^2(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q M} \cos 2\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

Связь угла  $\theta$  и времени:

$$\begin{aligned} t = \int_{\theta_o}^{\theta} \frac{d\theta}{\sqrt{\frac{M_m}{M} 2\theta - \frac{U^2(x_q - x'_d)}{2x_q x'_d M} \cos 2\theta + s_o^2} - \\ - \frac{M_m}{M} 2\theta_o + \frac{U^2(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q M} \cos 2\theta}. \end{aligned} \quad (7)$$

Скольжение есть производная угла  $\theta$  по времени, поэтому из уравнения (6) можно определить максимальное значение  $\theta_m$ , положив  $s = 0$ .

Предварительно рассмотрим случай  $M_m = 0$ . Тогда уравнение для скольжения примет более простой вид:

$$s = \sqrt{s_o^2 + \frac{U(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q M} \cos 2\theta_o - \frac{U^2(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q M} \cos 2\theta}. \quad (8)$$

Для определения  $\theta_m$  получим уравнение:

$$\cos 2\theta_m = \frac{s_o^2 M}{q} + \cos 2\theta_o.$$

При  $\frac{s_o^2 M}{q} + \cos 2\theta_o > 1$  уравнение не может быть удовлетворено, и угол  $\theta$  непрерывно возрастает. В этом случае скольжение генератора не достигает значения, равного нулю, а скорость генератора — синхронной, следовательно, генератор не втягивается в синхронизм в начальной стадии процесса.

При  $\frac{s_o^2 M}{q} + \cos 2\theta_o < 1$  генератор втягивается в синхронизм в начальной стадии процесса самосинхронизации. Благоприятная область для самосинхронизации по начальным условиям



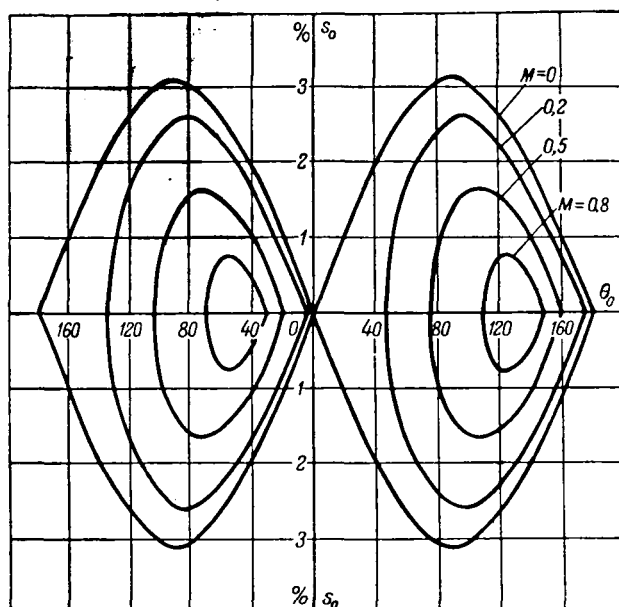


Рис. 3. Область благоприятных условий самосинхронизации (данные генератора:

$$x_d = 1; x_q = 0.65; x'_d = 0.3; M = 6 \text{ сек}.$$

определяется пограничным уравнением, связывающим начальное скольжение и начальный угол:

$$s_0 = \pm \sqrt{\frac{2q}{M} \sin \theta_0}. \quad (9)$$

На рис. 3 представлена область благоприятных условий для самосинхронизации, состоящая из двух частей, причем угол, с которым генератор втянется в синхронизм, может быть либо  $\frac{\pi}{2}$ , либо  $\frac{3}{2}\pi$ , в зависимости от начальных условий самосинхронизации. В случае включения генератора при начальных условиях, лежащих в пределах, ограниченных указанной областью, генератор, по существу, попадает в синхронный режим работы через 0,1...0,5 сек, так как полного цикла скольжения ротора не получается и генератор находится в режиме качаний вокруг значения угла, равного  $\pm \frac{\pi}{2}$  с амплитудой  $\theta_m$ .

Время втягивания в синхронизм начальным моментом определяется уравнением:

$$t = \frac{1}{n} \int_{\theta_0 - \frac{\pi}{2}}^{\theta_m - \frac{\pi}{2}} \frac{d\gamma}{\sqrt{1 - c^2 \sin^2 \gamma}} \quad (10)$$

и может быть определено по таблицам эллиптических интегралов, где  $\theta_m$ ,  $q$ ,  $n$  и  $c$  определяются из соотношений:

$$\cos \theta_m = \frac{s_0^2 M}{q} + \cos 2\theta_0; \quad q = \frac{U^2 (x_q - x'_d)}{2x_q x'_d};$$

$$n = \sqrt{s_0^2 + \frac{2q}{M} \cos^2 \theta_0}; \quad c = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{2q}{M}}.$$

На рис. 4 показана зависимость скольжения и угла от времени для начального скольжения  $s_0 = 2\%$  при включении с тремя начальными углами:  $\theta_0 = \frac{\pi}{4}$ ;  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$  и  $\theta_0 = 0$ . В первых двух случаях среднее значение скорости генератора равно синхронной и угол  $\theta$  колеблется в пределах  $\frac{\pi}{2} \pm \Delta\theta_m$ . В третьем случае угол  $\theta$  непрерывно возрастает, а скольжение меняется от  $s_{\max}$  до  $s_{\min}$ , не переходя через нуль.

Если избыточный момент на валу генератора не равен нулю, область благоприятных условий самосинхронизации может быть определена из уравнения:

$$s^2 = s_0^2 - \frac{M_m}{M} 2\theta_0 - \frac{2(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q M} \cos 2\theta_0 +$$

$$+ \frac{M_m}{M} 2\theta + \frac{U^2 (x_q - x'_d)}{2x'_d x_q M} \cos 2\theta. \quad (11)$$

Определяя корни уравнения (11) и подставляя их значение, мы для данного агрегата можем получить связь между двумя параметрами  $s_0$  и  $\theta_0$ , ограничивающую область благоприятных условий самосинхронизации. При этом возможны следующие случаи включения:

1. Уравнение не имеет решения относительно  $\theta$ , т. е. скольжение ни при каких  $\theta$  не достигает нуля. В этом случае в начальной стадии процесс не заканчивается синхронным движением ротора.

2. Уравнение может иметь ряд корней  $\theta$ . Ближайший наибольший корень в сторону возрастающих значений от  $\theta_c$  будет ограничивать благоприятную зону для самосинхронизации.

При положительных скольжениях уравнение, ограничивающее зону благоприятных условий самосинхронизации, полученное по второму

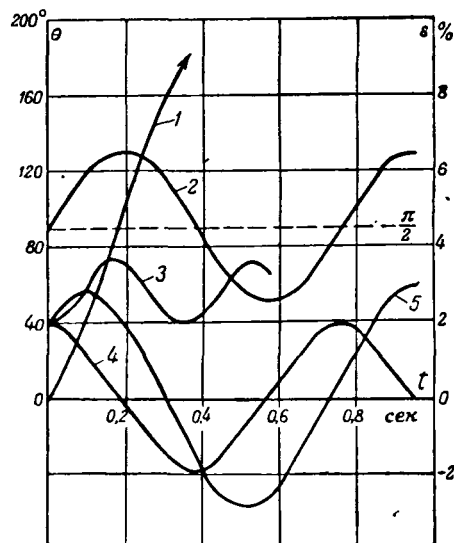


Рис. 4. Зависимость угла (кривые 1 и 2) и скольжения  $s$  (3, 4, 5) от времени при включении в сеть генератора без демпферной обмотки ( $s_0 = 2\%$ ).

1, 3 — начальный угол  $\theta_0 = 0$ ; 2, 4 —  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ ; 5 —  $\theta_0 = \frac{\pi}{4}$ .

критерию устойчивости проф. А. А. Горева, будет:

$$s_0 = + \sqrt{\frac{q}{M} \cos 2\theta_c - \frac{q}{M} \cos 2\theta_0 - \frac{2M_m}{M} (\pi - \theta_c - \theta_0)},$$

$\theta_c$  — угол синхронной работы.

Следует заметить, что выражение под корнем должно быть положительным, так как отрицательные его значения исключают синхронный режим работы. Знак перед корнем принят плюс по условиям выбора начального движения в сторону возрастающих значений угла. На рис. 3 нанесены зоны благоприятных условий синхронизации при действии избыточного момента. Из рассмотрения кривых видно, что с увеличением избыточного момента зоны сужаются, находясь в пределах области с нулевым избыточным моментом.

Таким образом, без утомительных вычислений численного решения дифференциальных уравнений мы выяснили ряд существенных вопросов, связанных с самосинхронизацией, а именно:

1. При углах включения в зоне, близкой к  $\pm \frac{\pi}{2}$ , и скольжениях до 2...3% при моменте на валу, равном нулю, генератор втягивается в синхронизм за время порядка 0,1...0,3 сек без участия асинхронного момента. Возбуждение закрепляет синхронный режим.

2. Синхронный режим в начальной стадии процесса всегда устанавливается с углами  $\pm \frac{\pi}{2}$  и только при длительном отсутствии возбуждения спустя 5...10 сек генератор может перейти на угол, равный нулю или  $\pi$ .

3. При включении с некоторым скольжением и избыточным моментом на валу генератора наличие момента затрудняет условия самосинхронизации.

4. Если включение происходит со скольжением  $s_0$  и  $\theta_0$ , лежащими вне области благоприятных условий самосинхронизации, то через некоторое время на ротор генератора начинает действовать асинхронный момент, который создает эти благоприятные условия. Генератор втягивается в синхронизм также с углом, близким к  $\pm \frac{\pi}{2}$ , так как динамический момент явнополюсности при этом продолжает действовать.

**Генератор с двумя контурами на роторе.** Если положить  $T'_d = \infty$ , иначе говоря, так же как для случая генератора с одним контуром на роторе принять ток ротора незатухающим, то может быть получено следующее выражение для момента электромагнитных сил:

$$M_s = - \frac{U^2 (x_q - x'_d)}{2x_q x'_d} \sin 2\theta +$$

$$+ s \frac{U^2}{2} \left\{ \left[ \frac{x'_d - x''_d}{x'_d x''_d} T''_d + \frac{x_q - x'_q}{x_q x'_q} T''_q \right] - \right.$$

$$\left. - \left[ \frac{x'_d - x''_d}{x'_d x''_d} T''_d - \frac{x_q - x'_q}{x_q x'_q} T''_q \right] \cos 2\theta \right\}.$$

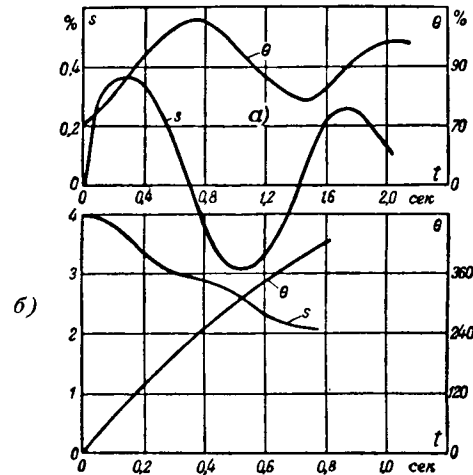


Рис. 5. Скольжение  $s$  и угол ротора  $\theta$  в функции времени при включении в сеть без возбуждения генератора с двумя контурами на роторе: а —  $\theta_0 = 70^\circ$ ,  $s_0 = 0$ ; б —  $\theta_0 = 0$ ,  $s_0 = 4\%$ .

Из рассмотрения этого уравнения видно, что, кроме динамического момента явнополюсности, на ротор генератора еще действует момент, пропорциональный скорости движения ротора. Составляющие моменты всегда направлены в сторону уменьшения скольжения генератора и процесс самосинхронизации уже в начальной стадии облегчается.

Решение уравнения движения ротора может быть получено методом последовательных приближений. На рис. 5 показано изменение во времени скольжения и угла ротора генератора для двух случаев включения. В случае а сразу же установился синхронный режим работы с постепенно затухающими качаниями ротора генератора вокруг значения угла  $\pm \frac{\pi}{2}$ . В случае б генератор продолжает работать в асинхронном режиме со все уменьшающимся скольжением.

#### Условные обозначения

- $I_a$  — ток возбуждения генератора;
- $I_d$  — продольная составляющая тока статора;
- $I_q$  — поперечная составляющая тока статора;
- $M_s$  — электромагнитный момент;
- $T'_d$  — постоянная времени затухания переходной составляющей тока статора;
- $T''_d$  — то же, сверхпереходной в продольной оси;
- $T''_q$  — то же, сверхпереходной в поперечной оси;
- $U$  — напряжение сети;
- $s$  — скольжение ротора генератора;
- $M$  — механическая постоянная генератора;
- $\theta$  — угол между поперечной осью генератора и синхронной осью.

#### Литература

1. А. Т. Крит и А. Г. Мамиконянц. Включение синхронных генераторов на параллельную работу по методу самосинхронизации. Сборник статей, Госэнергоиздат.
2. А. Г. Мамиконянц и И. А. Сыромятников. Включение синхронных генераторов на параллельную работу по методу самосинхронизации. Электрические станции, № 9, 1949.
3. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1952.

[27.9.1954]

# Один из вариантов городской электросети<sup>1</sup>

Инж. В. А. КОЗЛОВ

Ленинградская кабельная сеть

Техническое управление Министерства электростанций рекомендовало<sup>2</sup> для городов полузамкнутую или — по терминологии, принятой в статье А. А. Глазунова, И. С. Бессмертного и Ф. Ф. Воронцова [Л. 1], — продольно-замкнутую сеть, которая представляет собой сочетание петлевой сети высокого напряжения и замкнутой сети низкого напряжения. При этом сеть низкого напряжения питается от ряда (до 10 и более) сетевых трансформаторов, работающих параллельно.

В этой сети в качестве расчетных принимают следующие режимы: 1) каждое направление сети высокого напряжения питается с двух сторон; 2) в каждой группе работающих параллельно сетевых трансформаторов, питающих сеть низкого напряжения, один трансформатор считается вышедшим из работы.

Рассматриваемая сеть создает весьма надежные условия питания потребителей, но не обеспечивает бесперебойности их электроснабжения в ряде часто встречающихся случаев сетевых повреждений.

При рассмотрении различных схем авторы упомянутой выше статьи [Л. 1] высказали мнение о том, что резервы, предусматриваемые в городских сетях при осуществлении их по полузамкнутой схеме, недостаточно обоснованы, так как повреждение трансформаторов является весьма редким явлением. Подкрепим это мнение некоторыми данными.

Из статьи В. С. Кандахчана [Л. 2] видно, что в 1944 г. из каждой тысячи трансформаторов, установленных в сетях Министерства электростанций, в среднем было повреждено 2,1 трансформатора. Если считать, что основную массу трансформаторов (70...80%) составляют трансформаторы городских сетей, то удельная повреждаемость последних может быть оценена в 1,3...1,5 трансформатора на каждую тысячу. При этом следует заметить, что в 1944 г. условия для эксплуатации были весьма тяжелыми. Высокая надежность работы трансформаторов получила свое отражение и на страницах «Правил технической эксплуатации» [Л. 3] при их переработке в 1952 г. Период времени от одного капитального ремонта трансформатора до другого в новом издании Правил увеличен с 5 до 10 лет.

Сказанное свидетельствует о том, что условный режим, принимаемый для расчета сети низкого напряжения (выход из работы одного трансформатора группы), не является характерным для современного уровня эксплуатации сетей. Следовательно, резервы в сети, определяемые этим режимом, нецелесообразны. В связи с упомянутой выше рекомендацией в отношении внедрения полузамкнутых сетей встает вопрос

о таком перераспределении предусматриваемых в сетях резервов, которое позволило бы получить сеть, равноценную полузамкнутой в отношении затрат и превосходящую ее по техническим показателям.

Поставленному условию отвечает сеть, построенная по следующим принципам: 1) сеть низкого напряжения состоит из отдельных линий, по каждой из которых питается один дом (рис. 1); 2) сеть высокого напряжения выполнена так, что на стороне высокого напряжения каждой сетевой трансформаторной подстанции имеется устройство автоматического включения резерва (рис. 2). Построенная таким образом сеть обеспечивает бесперебойное электроснабжение потребителей при повреждениях в сети высокого напряжения. В отношении же сети низкого напряжения она аналогична двухлучевой сети [Л. 4].

Ввиду того что сравнение различных сетей, построенных применительно к некоторым идеализированным участкам города, как правило, не дает объективных результатов, ниже рассмотрен пример сети, выполненной для конкретного участка города с общей нагрузкой порядка 7 850 *кв*а. Участок застраивается различными по высоте и характеру потребления зданиями. Сравниваются два варианта сети участка: 1) полузамкнутая сеть и 2) сеть, выполненная по схеме, представленной на рис. 1 и 2. Технико-экономические показатели того и другого вариантов приведены в таблице.

Показатели	Полузамкнутая сеть	Сеть, представленная на рис. 1 и 2
Количество сетевых трансформаторных подстанций . . . . .	32	30
Установленная мощность трансформаторов, <i>кв</i> а . . . . .	10 440	9 880
Длина сети, м:		
низкого напряжения . . . . .	12 280	4 180
6 <i>кв</i> . . . . .	9 380	14 190
Суммарный расход меди на сеть низкого напряжения, сеть 6 <i>кв</i> и трансформаторы, <i>т</i> . . . . .	33,6	32,12
Суммарные потери мощности, <i>квт</i> . . . . .	252	244
Суммарные потери энергии, тыс. <i>квт</i> ч	689	656
Стоимость, тыс. руб.:		
сетевых трансформаторных подстанций . . . . .	1 634	1 689
сети низкого напряжения . . . . .	904	292
сети 6 <i>кв</i> . . . . .	856	1 293
станций, покрывающих потери мощности . . . . .	376	367
Суммарные капиталовложения, тыс. руб. . . . .	3 772	3 638
Годовые эксплуатационные расходы:		
по сетевым трансформаторным подстанциям (8%), тыс. руб. . . . .	131	135
по сети низкого напряжения (4%), тыс. руб. . . . .	36	12
по сети 6 <i>кв</i> (5%), тыс. руб. . . . .	43	65
Стоимость потерянной энергии, тыс. руб. . . . .	104	98
Суммарные годовые эксплуатационные расходы, тыс. руб. . . . .	314	310

<sup>1</sup> Печатается в порядке обсуждения.

<sup>2</sup> Решение Технического управления МЭС № 23 от 6 мая 1950 г.

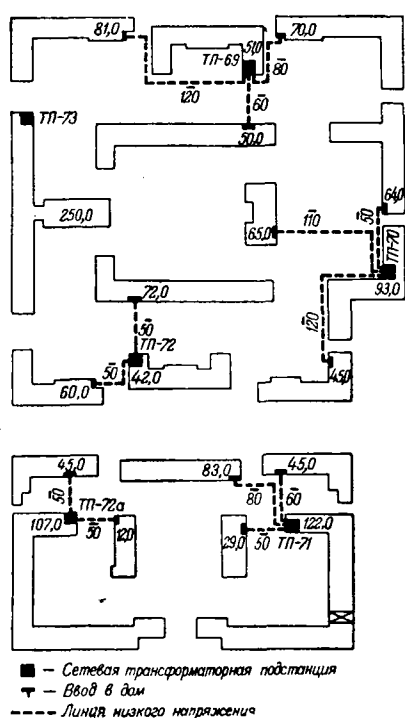


Рис. 1. Сеть низкого напряжения. Цифры с черточкой означают длины линий (м), а остальные цифры — нагрузки домов (квв).

Ввиду особых требований к бесперебойности электроснабжения потребителей трансформаторных подстанций 56, 57, 58, 75 и 77 (рис. 2) питание этих подстанций в обоих вариантах осуществлено по двухлучевой схеме. При втором варианте число вводов высокого напряжения в каждую сетевую подстанцию ограничивалось четырьмя, а длина вводов сети низкого напряже-

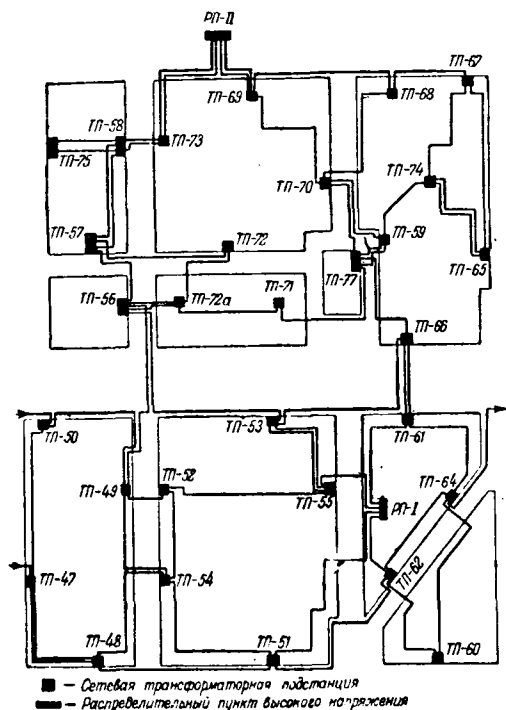


Рис. 2. Сеть высокого напряжения.

ния 100...120 м. Вся сеть при этом и другом варианте выполнена кабелем; кабели сечением, меньшим 50 мм<sup>2</sup>, для сети высокого напряжения не применялись.

Как видно из таблицы, предлагаемый вариант построения городской электрической сети имеет экономические показатели, равноценные с вариантом полузамкнутой сети.

Приведенный пример не служит достаточным доказательством равноценности полузамкнутой сети и сети, показанной на рис. 1 и 2, в любых условиях, но он показывает путь более рационального использования сетевых резервов. Если, однако, учесть, что предлагаемый вариант сети по сравнению с полузамкнутой сетью имеет простейшую сеть низкого напряжения, то имеются основания полагать, что равноценность рассматриваемых вариантов будет иметь место и при других условиях. Примерные расчеты, выполненные применительно к другим районам города, подтверждают это.

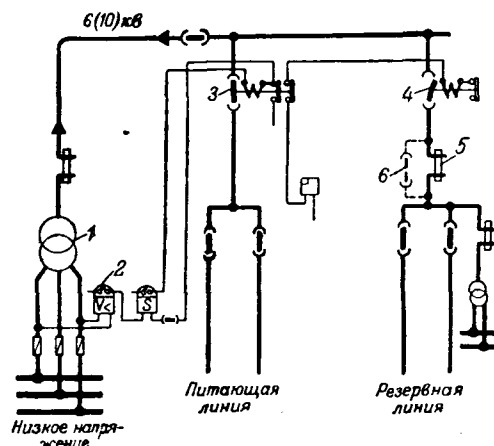


Рис. 3. Принципиальная схема автоматического включения резерва.

1 — сетевой трансформатор; 2 — реле минимального напряжения; 3 — выключатель нагрузки нормальный; 4 — выключатель нагрузки переделанный; 5 — предохранители типа ПК; 6 — шунтирующий разъединитель.

В предлагаемом варианте сеть высокого напряжения (рис. 2) выполняется в виде отдельных направлений с необходимым количеством дополнительных резервных связей. При повреждении одного из направлений все присоединенные к нему трансформаторы при помощи устройства автоматического включения резерва переключаются на резервные связи и их питание осуществляется от оставшихся в работе направлений. Такая схема дает возможность осуществлять электроснабжение потребителей от разных источников питания.

Устройство автоматического включения резерва осуществляется (рис. 3) при помощи двух выключателей нагрузки типа ВН-16, один из которых переделан в соответствии с рекомендацией, содержащейся в статье В. А. Козлова и В. Д. Еремеева [Л. 5], и работает автоматически на включение. При повреждении основной линии, питающей сетевую подстанцию, вторичное напряжение трансформатора 1 снижается до нуля, реле мини-

мального напряжения 2 замыкает свои контакты и с некоторой выдержкой времени происходит отключение выключателя нагрузки 3, а затем включение нагрузки 4. Таким образом, питание трансформатора переводится на резервную линию.

Выдержка времени  $t_a = t_2 + \Delta t$ , где  $t_2$  — выдержка времени головного выключателя поврежденного направления сети высокого напряжения;  $\Delta t$  — интервал селективности, равный 0,5...0,7 сек. Напряжение срабатывания принимается самым минимальным по местным условиям.

При коротком замыкании на шинах высокого напряжения устройство работает так же, как показано выше, но при этом перегорают предохранители 5, установленные на резервной линии, и трансформатор отделяется от источников питания. Параллельно предохранителям предусматривается установка шунтирующих разъединителей 6, которые включаются при необходимости питания потребителей питающего направления от резервных линий через рассматриваемую сетевую подстанцию. Необходимо заметить, что можно не устанавливать этих предохранителей и шунтирующего разъединителя, так как в городских электросетях повреждений сборных шин высокого напряжения не наблюдается.

Все оборудование устройства автоматического включения резерва размещается в трех сборных камерах высотой 2 500 мм, глубиной 1 000 мм и шириной 1 500 мм (камеры, в которых размещается оборудование, относящееся к питающей и резервной линиям), и 800 мм (камера, в которой размещается трансформатор напряжения). В зависимости от местных условий возможны и другие решения.

Область применения предлагаемого устройства определяется динамической устойчивостью выключателей типа ВН-16. Как известно, максимальная величина отключаемого ими сквозного тока короткого замыкания по данным завода-изготовителя составляет 25 ка. Токи короткого замыкания в подавляющем большинстве городских сетей ниже этого предела.

Предлагаемая схема может быть с успехом применена не только при строительстве новых, но и при реконструкции существующих сетей, так как основные работы во втором случае будут выполняться только в сети высокого напряжения. Реконструкция действующих сетевых трансфор-

торных подстанций не представляет особых затруднений, даже при наличии щитов высокого напряжения.

Преимуществом предлагаемой схемы является то, что она позволяет решить вопросы бесперебойности питания самостоятельных промышленных потребителей, питающихся от распределительных сетей высокого напряжения, а также смешанных потребителей с самостоятельными трансформаторами. Решение этих вопросов путем применения полузамкнутой схемы представляет значительные трудности. Предлагаемая схема может быть использована и для распределительных сетей крупных промышленных предприятий.

К достоинствам предлагаемого варианта сети следует также отнести отсутствие сложной сети низкого напряжения, простоту средств, при помощи которых выполняется автоматика, возможность обеспечения бесперебойности питания потребителей до осуществления всей сети в целом, простоту дальнейшего расширения сетей за пределами срока проектирования, простоту проектирования сети и внесения изменений в процессе проектирования, связанных с различными изменениями планировки, и т. п.

Единственным недостатком предлагаемого варианта сети является необходимость полного прекращения электроснабжения потребителей при производстве ремонтов сетевых трансформаторов или помещений сетевых трансформаторных подстанций. Однако можно избежать затруднений, связанных с этим недостатком, если предусмотреть создание в сети низкого напряжения аварийных перемычек. Можно также использовать существующий опыт эксплуатации радиальных сетей. Как известно, в этих сетях во время отключения сетевых трансформаторов для ремонта низкое напряжение подается от соседней подстанции по линии высокого напряжения.

#### Литература

1. А. А. Глазунов, И. С. Бессмертный и Ф. Ф. Воронцов. Основные положения построения схем городских электрических сетей. *Электричество*, № 12, 1952.
2. В. С. Кандачан. Повреждения силовых трансформаторов в 1944 г. *Электрические станции*, № 8, 1945.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Госэнергоиздат, 1953.
4. Э. С. Иохвидов и Г. В. Сербиновский. О схемах городских электросетей в связи с многоэтажным строительством. *Электричество*, № 12, 1951.
5. В. А. Козлов, В. Д. Еремеев. Применение выключателей нагрузки для автоматического включения резерва. *Электричество*, № 6, 1954.

[10. 3. 1954]



# Перспективы развития систем управления автоматическими линиями в машиностроении

Кандидат техн. наук, доц. И. И. ПЕТРОВ и кандидат техн. наук, доц. В. Г. ЗУСМАН

Москва

Январский Пленум Центрального Комитета Коммунистической партии Советского Союза и вторая сессия Верховного Совета СССР в своих решениях подчеркнули важнейшее значение всемерного и преимущественного развития тяжелой индустрии, на базе которой только и возможно успешное развитие всех отраслей народного хозяйства страны. Огромная роль в индустриализации принадлежит машиностроению. Комплексная автоматизация технологических процессов в машиностроении при широком использовании современных средств электроавтоматики является одним из основных направлений дальнейшего развития машиностроения. Автоматизация производственных процессов позволяет резко повысить производительность труда, улучшить качество продукции и снизить ее себестоимость.

Большие успехи в автоматизации технологических процессов достигнуты в области построения автоматических линий металлорежущих станков, главным образом в автотракторном машиностроении, для которого характерно серийно-массовое производство деталей.

В целях обобщения и анализа материалов по проектированию и эксплуатации систем электрического управления станочных линий Институт автоматики и телемеханики АН СССР совместно с Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков (ЭНИМС) рассмотрел 13 станочных линий, в большинстве выполненных в металле и сданных в эксплуатацию. В том числе были изучены линии, предназначенные для обработки: блока цилиндров мотора грузового автомобиля; картера коробки скоростей автомобильного мотора; головки блока цилиндров дизельного трактора; блок-картера; поршневых пальцев; роторов электродвигателей; автомобильных поршней на автоматическом заводе поршней.

**Особенности систем электрического управления автоматическими линиями станков.** В настоящее время система электроавтоматического управления является единственной системой, позволяющей наиболее удовлетворительно осуществлять автоматическое управление комплексом многих совместно работающих машин, что определяется следующими свойствами электроавтоматического управления:

1. Легко достигается заданная последовательность технологических операций и движений механизмов.

2. Отсутствуют затруднения в осуществлении взаимных связей в управлении машинами и механизмами, несмотря на большие расстояния между ними и особенности их взаимного расположения.

3. Сравнительно просто осуществляются централизация управления, контроль технологиче-

ских процессов и наблюдение за работой комплекса машин.

4. Легко перестраиваются цикл работы машин и режимы обработки при выдвижении новых технологических требований.

5. Обеспечивается высокая надежность работы системы управления и сравнительно легко и быстро устраняются неполадки, возникающие в процессе эксплуатации.

6. Весьма разнообразные схемы и системы управления легко комплектуются из ограниченного числа стандартных элементов и аппаратов.

Как правило, в автоматических линиях станков электрическое управление осуществляется в функции выполнения рабочими органами машины заданного перемещения, т. е. в функции пути. В частности, все схемы управления рассмотренных линий станков основаны на этом принципе. Построение схем в функции пути продиктовано необходимостью контроля перемещения инструмента, обрабатывающего деталь, и перемещения самой детали в транспортных, фиксирующих и других вспомогательных механизмах и устройствах.

Однако в отдельных узлах находит применение также автоматическое управление в функции давления, времени и скорости. Управление в функции давления применяется преимущественно для зажимных устройств и в системах смазки. Для осуществления «выстоя» отдельных механизмов линии (время, необходимое, например, для зачистки в процессе обработки) и контроля темпа работы линии используют управление в функции времени. Автоматизация процессов торможения асинхронных двигателей, контроль наличия движения режущего инструмента и меры снижения скорости при индексации (фиксированный останов) обычно осуществляются посредством управления в функции скорости.

В системах путевого управления основным командным аппаратом является путевой выключатель, непосредственно реагирующий на положение контролируемого органа машины или обрабатываемой детали. В транспортных устройствах положение перемещаемого изделия часто контролируется состоянием электрической цепи, которая замыкается самим изделием в зоне контроля.

В некоторых случаях применяются косвенные методы контроля положения рабочих органов. Например, при гидравлическом приводе и работе до упора используется повышение давления в гидравлической системе после достижения перемещаемым органом заданного положения. В этом случае командным аппаратом является реле давления.

Наиболее часто управление в функции пути реализуется в виде системы последовательного действия (управления), при котором команда на исполнение каждого последующего элемента цик-

ла подается в тот момент, когда предыдущий элемент уже выполнен.

Для многих систем характерно наличие замкнутых циклов управления каждым отдельным станком и взаимосвязей между этими циклами и системами управления транспортными и грузочными устройствами, а также линией в целом. Эти взаимосвязи в большинстве случаев устанавливаются подачей начального импульса к станкам от общей системы управления и подачей обратного импульса от станка в общую систему по завершении цикла обработки. Такой характер взаимосвязей позволяет при нарушении нормального режима работы на одном из станков закончить начатую обработку деталей на всех остальных станках, чем облегчается также выявление неисправностей, возникающих в линии.

Особенностью электрических схем управления является наличие в них узлов управления наладочным режимом линий. Наладочный режим необходим как для настройки отдельных станков и линии в целом, так и для первоначальной загрузки линии деталями, прошедшими предварительные стадии обработки, перед переключением линии на работу в автоматическом режиме. В автоматическом режиме органы управления наладочного режима отключаются и, таким образом, случайное или преднамеренное воздействие на эти органы не нарушает работы линии.

В схемах наиболее сложных автоматических линий предусматриваются специальные элементы, облегчающие место нахождение неисправности в электрическом оборудовании, например сигнальный светофор, указывающий станок, по вине которого произошла неполадка. В некоторых схемах управления станочными линиями предусматривались искатели повреждений в пределах отдельных агрегатов. Однако эксплуатация их себя не оправдала. Применение искателей целесообразно лишь при наличии в схеме цепочек с большим числом последовательно включенных элементов, состояние которых не всегда можно контролировать путем внешнего осмотра, либо доступ к которым затруднен. Необходимо учесть, что недостаточно продуманные схемы и конструкции искателей повреждений могут сами служить источником дополнительных нарушений нормальной работы схемы.

Весьма характерной особенностью рассмотренных автоматических станочных линий является ограниченность функций, выполняемых электроприводами станков и механизмов; эти функции сводятся, по существу, к пуску оборудования в ход, обеспечению его работы в установившемся режиме и — в отдельных случаях — к электрическому торможению и ступенчатому изменению скорости. Простота функций и предопределяет использование в качестве основных приводных электродвигателей для линий станков наиболее простых и надежных в эксплуатации электрических машин — трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Для большинства рассмотренных линий средняя мощность электродвигателя главного привода составляет 5...6 квт, а максимальная мощность не превосходит 30 квт.

**Недостатки существующих систем управления.** Основными электрическими аппаратами релейно-контакторных схем управления линиями являются: промежуточные реле, контакторы, путевые выключатели, реле различных назначений и командоаппараты (главным образом кнопки управления).

Анализ рассмотренных схем управления автоматических станочных линий показывает, что переход, например, от линий, предназначенных для обработки корпусных деталей со сравнительно простыми технологическими операциями (сверление, нарезание резьбы, расточка и зенкерование), к линиям для сложной механической обработки (точение, шлифование) сопровождается увеличением числа электрических аппаратов, приходящихся на один станок. В среднем для обработки корпусных деталей на один станок приходится: промежуточных реле 3,5, контакторов 3,3, путевых выключателей 11,0, реле различных назначений 3. На линиях с более сложной обработкой деталей, например по обработке автомобильных поршней (тел вращения), на один станок приходится: промежуточных реле 17, контакторов 7, путевых выключателей 12, реле различных назначений 8,8.

Однако наиболее важным результатом анализа схем управления станочными линиями является выявление того факта, что с усложнением технологических операций количество контактосрабатываний электрических аппаратов в единицу времени резко возрастает. Например, число контактосрабатываний аппаратуры на линии по обработке тел вращения (табл. 2) примерно в 4,5 раза больше, чем при обработке корпусных деталей (табл. 1), соответственно составляя 64 600 и 14 557 срабатываний в час. При этом линия по обработке блока цилиндров имеет в своем составе 11 станков, а линия по обработке поршней — всего семь. На автоматическом заводе автомобильных поршней общее число контактосрабатываний электрической аппаратуры для всех линий и агрегатов завода достигает 300 000 в час.

Таким образом, по мере усложнения процессов механической обработки изделий количество электрической аппаратуры, а также число контактосрабатываний резко возрастает, что неизбежно приводит к снижению надежности работы систем электрического управления и усложнению эксплуатации. Между тем вопросы надежности электрических систем управления имеют для автоматических линий станков первостепенное значение, так как всякая неисправность в узле электрической схемы или аппарате приводит к простоя участка или всей линии.

Наряду с этим сама природа контактного аппарата не может обеспечить бесперебойной работы схемы, в которой предусмотрено большое число срабатываний. По статистическим данным на каждые 1 000 000 срабатываний путевого выключателя с вполне исправной контактной системой приходится около десяти несрабатываний по



Таблица 1

## Число контактоиспользований электрической аппаратуры автоматической линии по обработке блока цилиндров (корпусная деталь)

Аппаратура	Количество аппаратов каждого наименования	Количество контактов		Число срабатываний аппаратов		Число срабатываний контактов				Суммарное число срабатываний контактов в силовых цепях и цепях управления за час.
		в силовых цепях	в цепях управления	за цикл	за час	в силовых цепях		в цепях управления		
						за цикл	за час	за цикл	за час	
Контакты . . . . .	34	93	176	26	678	78	2 035	138	3 600	5 635
Реле тепловые . . . . .	27	—	27	—	—	—	—	—	—	—
Реле времени . . . . .	9	—	15	6	156	—	—	—	313	313
Реле промежуточное . . . . .	29	—	111	20	522	—	—	77	2 009	2 009
Реле давления . . . . .	31	—	31	17	444	—	—	17	444	444
Путевые выключатели . . . . .	104	—	162	104	2 713	—	—	162	4 226	4 226
Командоаппараты . . . . .	3	—	62	18	470	—	—	74	1 930	1 930
Итого . . . . .	237	93	584	191	4 983	78	2 035	480	12 522	14 557

Таблица 2

## Число контактоиспользований электрической аппаратуры автоматической линии станков по обработке автомобильных поршней (тело вращения)

Аппаратура	Количество аппаратов каждого наименования	Количество контактов		Число срабатываний аппаратов		Число срабатываний контактов				Суммарное число срабатываний контактов в силовых цепях и цепях управления за час
		в силовых цепях	в цепях управления	за цикл	за час	в силовых цепях		в цепях управления		
						за цикл	за час	за цикл	за час	
Контакты . . . . .	41	120	53	12	1 200	70	7 000	50	5 000	12 000
Реле тепловые . . . . .	22	—	22	—	—	—	—	—	—	—
Реле времени . . . . .	8	—	10	7	700	—	—	18	1 800	1 800
Реле промежуточные . .	127	—	430	64	6 400	—	—	380	38 000	38 000
Реле давления . . . . .	6	—	7	6	600	—	—	14	1 400	1 400
Путевые выключатели .	63	—	93	40	4 000	—	—	114	11 400	11 400
Итого . . .	267	120	615	129	12 900	70	7 000	576	57 600	64 600

случайным и непредвиденным причинам. Кроме того, предельное, гарантийное по условиям износа контактов число срабатываний аппаратуры в ряде схем управления линиями станков оказывается уже недостаточным.

Не удается во многих случаях добиться и полной герметизации контактных аппаратов, выполняемых в водонепроницаемой оболочке. Между тем проникновение в аппарат охлаждающих эмульсий, масла, металлической пыли и т. п., в изобилии имеющихся в металлообрабатывающих цехах, снижает надежность работы контактной системы. Трудности в осуществлении полной герметизации нередко заставляют устанавливать аппаратуру в местах, где она не подвергается непосредственному воздействию охлаждающих эмульсий, масла и т. п., что, однако, приводит к усложнению кинематических связей между подвижными частями аппаратов и станков (например, между нажимным устройством путевого выключателя и подвижными упорами механизмов).

Проведенный ЭНИМС теоретический анализ вероятности простоев линии и результаты наблюдений показывают, что длительность простоев по вине электрооборудования сравнительно велика именно на линиях, которые осуществляют слож-

ные технологические процессы обработки деталей (точение, шлифование).

Возрастающая ненадежность релейно-контакторных систем управления автоматическими линиями станков по мере их усложнения является основным их недостатком. К другим недостаткам схем управления, работающим в функции пути (с последовательным действием), следует отнести: сложность электрических цепей и их наладки; необходимость установки большого числа путевых выключателей в рабочей зоне, что вредно отражается на их работоспособности; необходимость последовательного выполнения команд, что в некоторых случаях приводит к ощущению удлинению цикла, а следовательно, к снижению производительности; громоздкость панелей управления и большая протяженность и сложность электрических коммуникаций. Кроме того, необходимость периодических осмотров, зачистки и смены контактов электрических аппаратов при трудно доступном их расположении отрицательно сказывается на бесперебойности эксплуатации систем управления линиями.

Перечисленные коренные недостатки релейно-контакторных систем управления автоматическими линиями станков не могут быть устранены

путем улучшения систем этого типа, а требуют изыскания новых принципов электрического управления станочными линиями.

**Основные направления улучшения систем электрического управления автоматическими линиями станков.** *Применение бесконтактных электрических аппаратов.* Недостатки, присущие релейно-контакторным системам управления, могут быть в значительной мере устранены в случае применения в этих системах бесконтактной электрической аппаратуры.

Применение бесконтактных аппаратов в силовых цепях не вызывается необходимостью; кроме того, оно трудно осуществимо. Но целесообразно и практически вполне осуществимо использование средств бесконтактной автоматики в цепях управления, что радикально повысило бы надежность этих цепей.

Анализ электрических систем управления линиями станков показал, что преобладающими в цепях управления типами аппаратов являются путевые выключатели и промежуточные реле. Именно надежность этих аппаратов в значительной мере предопределяет бесперебойность работы системы управления в целом. Для бесперебойной эксплуатации линий особенно важна надежность путевых выключателей, число которых на линиях исчисляется десятками, а в некоторых случаях — сотнями штук. Будучи кинематически связаны с подвижными частями станков, эти аппараты устанавливаются непосредственно на механизмах линии, часто в трудно доступных для наблюдения и ремонта местах. Поэтому постепенная замена контактных путевых выключателей бесконтактными датчиками перемещения является одной из существенных задач повышения надежности электрических систем управления линиями станков.

Бесконтактные датчики перемещения могут быть построены с использованием самых различных принципов. В первую очередь следует указать на средства бесконтактной магнитной автоматики, в частности на магнитные реле. К числу бесконтактных датчиков могут быть отнесены датчики с изменяющимся сопротивлением, емкостью, взаимной индуктивностью, э. д. с. Однако до сих пор ни одна из систем перечисленных бесконтактных датчиков не применялась в электрических схемах управления линиями станков.

Большие возможности открываются в связи с интенсивным развитием и внедрением полупроводниковых германиевых и кремниевых диодов и триодов. Эти новые приборы, часто в сочетании с магнитной автоматикой, позволяют создать бесконтактные, весьма малогабаритные и надежные схемы управления.

При исследовании, оценке и выборе бесконтактных датчиков перемещения особое внимание следует уделить группе датчиков с изменяющейся индуктивностью, с нормальной и резонансной схемами включения. Эти типы датчиков, обеспечивая относительно большую мощность на выходе, позволяют включить электромагнитные реле непосредственно в цепь датчиков. Их постоянная времени невелика. Они устойчивы в работе при ударах, сотрясениях, вибрациях и нечувствитель-

ны к влиянию влаги, охлаждающих эмульсий, масла и т. п. Конструктивно их можно выполнить достаточно просто и надежно с относительно небольшими габаритами.

Большинство путевых выключателей автоматических линий станков коммутирует цепь катушек промежуточных электромагнитных реле. Поэтому представляется целесообразным построение полностью бесконтактных узлов схем управления, содержащих бесконтактные датчики перемещения и бесконтактные реле. Наибольший практический интерес представляет сочетание индуктивного датчика перемещения с бесконтактным магнитным реле (дрессельным, дифференциальным).

Значительный интерес представит применение в схемах управления бесконтактных систем датчиков и реле скорости и ускорения. Особого внимания заслуживает группа бесконтактных датчиков и реле для непрерывного контроля скорости с воспринимающими органами, основанными на механическом, электромеханическом и электрическом преобразовании. Следует рассмотреть и исследовать датчики и реле скорости, содержащие: 1) бесконтактный воспринимающий орган и контактные промежуточный и исполнительный органы; 2) бесконтактные воспринимающий, промежуточный и исполнительный органы. В качестве промежуточных и усилительных органов, очевидно, можно использовать контактные реле и датчики, когда они конструктивно не связаны с воспринимающим органом и их можно расположить в другом месте.

*Применение многоцепных, многокомандных и импульсно-распределительных устройств.* Одна из основных причин снижения надежности современных систем управления линиями — это большая насыщенность их электрическими аппаратами и значительные протяженность и разветвленность электрических коммуникаций. Поэтому весьма перспективно использование в системах управления телемеханических принципов. Особого внимания заслуживают импульсно-распределительные системы и системы с применением многоцепных и многокомандных устройств и аппаратов управления.

В существующих системах управления линиями станков за каждым датчиком и промежуточным реле закреплена определенная функция. В импульсно-распределительных системах, как известно, один датчик передает по одному каналу связи следующие друг за другом импульсы (команды) на специальное распределительное устройство. Устройство, заранее настроенное на выполнение заданных операций на линии, оказывает необходимое воздействие на исполнительные органы. В применении к отдельным узлам управления линиями подобного рода системы позволяют значительно сократить количество электрических аппаратов в схеме, а также протяженность электрических коммуникаций. Наибольшего эффекта следует ожидать от применения этой системы в тех случаях, когда для осуществления требуемого цикла работы отдельного узла необходима

подача значительного числа следующих друг за другом импульсов управления.

В настоящее время переналадка линий, связанная с необходимостью изменения цикла работы, весьма затруднена. Однако все более расширяющееся использование автоматических станочных линий в машиностроении неизбежно потребует их универсализации. Применение импульсно-распределительной системы обеспечивает простую и быструю переналадку схем управления.

Уменьшение количества релейной аппаратуры и числа контактоиспользований ее может быть также достигнуто применением специальных командоаппаратов в виде многоценных и многопозиционных аппаратов, коммутационное положение которых определяется числом импульсов, полученных от командных путевых аппаратов. Устройство подобного рода командоаппаратов весьма несложно. От небольшого электродвигателя через червячную передачу и сменные колеса движение передается на распределительный барабан, снабженный необходимым числом кулачков. Кулачки, воздействуя на рычаги, замыкают ту или иную цепь управления. За один оборот распределительного барабана осуществляется цикл управления.

Вращение барабана — прерывное: в зависимости от числа командных импульсов барабан поворачивается на определенный угол, что достигается наличием сменных колес. Прерывное движение командоаппарата осуществляется следующим образом: после подачи команды на включение двигателя командоаппарата приводной валик, независимо от угла, на который поворачивается барабан, делает один оборот и кулачком нажимает на путевой выключатель, который отключает двигатель и включает тормоз. В этом положении командоаппарат остается до получения следующего командного импульса, при котором вновь совершаются поворот распределительного барабана и соответствующие переключения в схеме управления.

Однако при большом числе импульсов в одном цикле управления габарит аппарата значительно возрастает вследствие увеличения диаметра распределительного барабана. Весьма целесообразно тогда применить командоаппарат с непрерывным вращением распределительного барабана, который переключает цепи управления (электрические, гидравлические или пневматические) в требуемой последовательности. Для обеспечения необходимой надежности в работе системы управления предусматривается контроль исполнения заданных команд, осуществляемый следующим образом: на барабане, сидящем на одном валу с командным распределительным барабаном, установлены кулачки, которые размыкают контакты цепи управления привода командоаппарата

в те моменты, в которые должны заканчиваться одни элементы цикла и начинаться следующие. Параллельно контактам, размыкаемым контрольным барабаном, включены нормально открытые контакты путевых выключателей, расположенные непосредственно у движущихся органов и таким образом контролируемые их положение. Контакты этих выключателей, если соответствующие элементы цикла выполнены, окажутся в момент размыкания контактов, управляемых барабаном, замкнутыми, и цепь управления привода командоаппарата и, следовательно, вращение распределительного барабана не будут прерваны. В противном случае, если какой-нибудь элемент цикла не выполнен в заданное время, цепь управления приводом командоаппарата разомкнется и останется разомкнутой до тех пор, пока элемент не будет полностью выполнен. Таким образом, при нормальной работе линии вращение командоаппарата будет непрерывным. Нарушения непрерывного вращения командоаппарата легко обнаруживаются путем введения сигнализации.

Такая система управления обладает рядом существенных достоинств: приемлемый габарит командоаппарата, даже при большом числе командных импульсов в цикле; возможность значительного уменьшения числа командных путевых аппаратов благодаря многократному использованию одного и того же путевого выключателя в разные моменты цикла; возможность ощутимого сокращения времени, необходимого на переключения в системе управления, путем выдачи командных импульсов с некоторым опережением параллельно с исполнением ранее выданной команды; значительное снижение числа промежуточных реле в схеме.

Сравнительный анализ двух вариантов схемы управления двухстаночной автоматической линией со сложным циклом показал, что при переходе от системы последовательного управления с применением релейно-контакторной аппаратуры к системе с командоаппаратом непрерывного вращения число путевых командных аппаратов снижается в 2 раза, а промежуточных реле — более чем в 3 раза.

*Применение электронной аппаратуры.* Электронные устройства в современных линиях станков до сих пор находят весьма ограниченное применение. Они используются преимущественно в виде отдельных приборов — электронных реле времени и потенциометров. Наиболее рациональными областями применения электронных устройств в станочных линиях следует считать: контроль размеров обрабатываемых деталей; контроль качества (чистоты) обрабатываемой поверхности; контроль положения и правильной установки обрабатываемой детали (фиксация).

[30. 10. 1954]



# Общий метод определения токов нагрузки тяговых двигателей

Кандидат техн. наук, доц. В. Е. СКОБЕЛЕВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Излагаемый метод позволяет на основании характеристик намагничивания машины получить данные для построения ее основных рабочих характеристик при различных значениях сопротивления реостата в цепи якоря, напряжения на зажимах цепи и степенях регулирования поля и одинаково пригоден для анализа как двигательного, так и генераторного режимов работы машины. Сравнительно с обычно применяемым расчетом указанных характеристик предлагаемый метод отличается простотой и в ряде случаев позволяет более точно учесть влияние реакции якоря на величину нагрузки машины.

Рассмотрим различные виды практически встречающихся задач.

**Двигатель последовательного возбуждения.** 1. Пусть дана характеристика намагничивания машины  $\frac{E}{n} = f(I)$  или  $\frac{E}{v} = f(I)$  (рис. 1) и требуется построить характеристику  $n = f(I)$  или  $v = f(I)$  при различных сопротивлениях в цепи двигателя и различных напряжениях на зажимах цепи.

Для установившегося режима можно написать:

$$\frac{U}{n} = \frac{E}{n} + \frac{R}{n} \cdot I, \quad (1)$$

где  $R$  — полное сопротивление якорной цепи двигателя;

$I$  — ток нагрузки.

Допустим, величина  $I$  задана; тогда отдельные члены уравнения (1) могут быть представлены отрезками:

$$Ob = \frac{E}{n}; \quad bc_1 = \frac{R}{n} I \quad \text{и} \quad Oc_1 = \frac{U}{n}.$$

Соединим точки  $a_1$  и  $c_1$  прямой и продолжим ее до пересечения с осью абсцисс в точке  $P$ . Тогда из подобия треугольников  $a_1bc_1$  и  $Oc_1P$  имеем:

$$OP = a_1b \frac{Oc_1}{bc_1} = \frac{U}{R}. \quad (2)$$

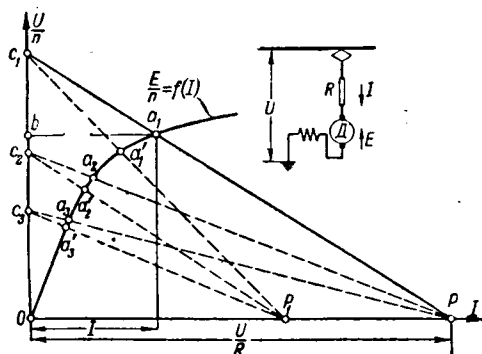


Рис. 1.

Отсюда следует метод определения тока нагрузки  $I$  при заданных  $U$ ,  $R$  и скорости вращения  $n$  двигателя.

На оси ординат откладывается отрезок  $Os_1 = \frac{U}{n}$ , на оси абсцисс  $OP = \frac{U}{R}$ , и проводится прямая  $c_1P$ . Точка пересечения  $a_1$  прямой  $c_1P$  с характеристикой  $\frac{E}{n} = f(I)$  определяет величину тока  $I$  при заданной скорости  $n$ .

Из выражения (2) следует, что если параметры цепи заданы, т. е.  $U = const$  и  $R = const$ , то точка  $P$  сохраняет свое положение неизменным и, следовательно, является полюсом, через который проходит семейство прямых  $cP$ .

Таким образом, откладывая на оси ординат ряд точек  $c_1, c_2, c_3, \dots$ , соответствующих выбранным  $n_1, n_2, n_3, \dots$ , и проводя через них прямые из полюса  $P$ , можно получить данные для построения характеристики  $n = f(I)$  при  $U = const$  и  $R = const$ .

При другом сопротивлении цепи якоря  $R_1$  следует только найти новое положение полюса  $P_1$  и из него провести лучи через те же точки  $c_1, c_2, c_3, \dots$ . Новые значения токов определяются абсциссами точек  $a'_1, a'_2, a'_3, \dots$ . Аналогичным образом поступают и при расчете характеристик для другого напряжения на зажимах цепи  $U_1$ . В этом случае точкам  $c_1, c_2, c_3, \dots$  и  $a'_1, a'_2, a'_3, \dots$  соответствуют иные значения скорости  $n$  или  $v$ .

Результаты расчета будут более точными, если кривая намагничивания  $\frac{E}{n} = f(I)$  относится к режиму нагрузки машины, а не к холостому ходу, так как при этом будет учтено влияние реакции якоря на основное поле.

2. Метод применим и для определения токов нагрузки двигателя при работе его с ослабленным полем, если известен коэффициент шунтирования обмотки возбуждения

$$k = \frac{I_s}{I}. \quad (3)$$

В этом случае уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{U}{n} = \frac{E}{n} + \frac{R}{n} \cdot \frac{I_s}{k}$$

и положение полюса определится как

$$OP = \frac{U}{R} \cdot k. \quad (2a)$$

Пользуясь рассматриваемым методом, можно найти значения токов возбуждения  $I_s$  при различных скоростях вращения якоря и от них перейти к токам нагрузки  $I$ , определяя их по формуле (3).



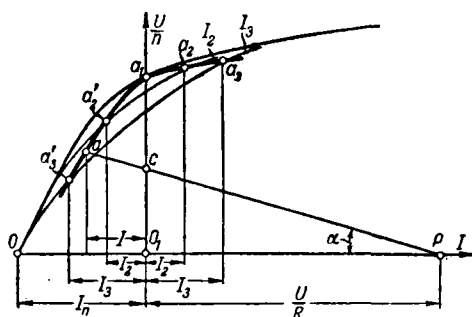


Рис. 4.

в) Откладывается отрезок  $O_1P = \frac{U}{R}$ , определяющий положение полюса  $P$ .

г) Задаются рядом значений скорости  $n_1, n_2, n_3, \dots$ , и на оси ординат откладываются отрезки

$$O_1c_1 = \frac{U}{n_1}; O_1c_2 = \frac{U}{n_2}; O_1c_3 = \frac{U}{n_3} \dots$$

д) Из полюса  $P$  через точки  $c_1, c_2, c_3, \dots$ , проводятся лучи до пересечения с кривой  $\frac{E}{n} = f(I)$ .

Абсциссы точек  $a_1, a_2, a_3, \dots$  пересечения лучей с характеристикой намагничивания определяют величины токов нагрузки при заданных скоростях вращения якоря машины. Если точки пересечения лежат справа от оси ординат, то полученные токи будут токами двигательного режима, если слева, — то режима рекуперативного торможения.

Для машин смешанного возбуждения исходная характеристика намагничивания  $\frac{E}{n} = f(AW)$  обычно дается для режима холостого хода, т. е. при  $I = 0$ . Если в расчетах пользоваться этой характеристикой, то влияние реакции якоря не будет учтено, вследствие чего могут иметь место расхождения между данными расчета и опыта. При аналитическом расчете характеристик  $n = f(I)$  учет влияния реакции якоря, особенно в двигателях смешанного возбуждения, представляется затруднительным, и поэтому часто удовлетворяются приближенными результатами, полученными из характеристики холостого хода.

В предлагаемом методе учет реакции якоря может быть произведен сравнительно просто путем введения рабочей характеристики намагничивания.

Для построения этой характеристики при заданном токе  $i$  необходимо располагать несколькими кривыми намагничивания (рис. 4), каждая из которых соответствует некоторому неизменному току нагрузки  $I_1, I_2, I_3, \dots$  в пределах от  $I_1 = 0$  до  $I_n = I_{\text{макс}}$ . Последние могут быть рассчитаны известными методами [Л. 2 и 3], но желательно, чтобы они были получены опытным путем. Так как современные тяговые двигатели снабжены дополнительными полю-

сами и щетки в них располагаются на нейтрали, то можно с достаточным основанием считать, что эти характеристики в равной мере отвечают как двигательному, так и генераторному режимам работы.

Способ построения рабочей характеристики намагничивания представлен на рис. 4.

Рассчитывается величина тока  $I_n = i \frac{\omega_n}{\omega_c}$  и через точку  $O_1$  проводится ось ординат, от которой влево и вправо откладываются величины токов  $I_2, I_3, \dots$ . Ординаты точек  $a_2, a_3, \dots$  определяют величины э. д. с. машины с учетом реакции якоря для двигательного режима, а точки  $a'_2, a'_3, \dots$  — для генераторного. Рабочая характеристика намагничивания получается путем проведения плавной кривой через указанные точки.

**Специальные схемы рекуперации.** В электрической тяге преимущественное распространение имеют двигатели последовательного возбуждения. Для осуществления рекуперативного торможения эти двигатели переводятся на другие системы возбуждения. Значительное распространение получила схема со стабилизирующим сопротивлением  $r_1$ , в которой обмотка возбуждения тяговой машины питается при рекуперации от специального возбудителя  $B$  (схема а рис. 5).

Нетрудно установить, что при неизменных  $\tau$  и  $r_1$  указанная схема обеспечивает двигателю характеристики, аналогичные характеристикам при смешанном возбуждении.

Предположим, что главное поле в машине создается двумя фиктивными обмотками (схема б рис. 5), из которых одна имеет  $\omega_c$  витков и обтекается током якоря  $I$ , а другая —  $\omega_n$  витков и обтекается неизменным током  $I_n$ . Для того чтобы результирующее действие фиктивных обмоток было равно действию реальной обмотки возбуждения машины, имеющей  $\omega$  витков и обтекаемой током  $I_\theta$ , необходимо соблюдение условия

$$I_\theta \omega = I_n \omega_n \pm I \omega_c \quad (5)$$

во всем диапазоне возможного изменения тока нагрузки  $I$ .

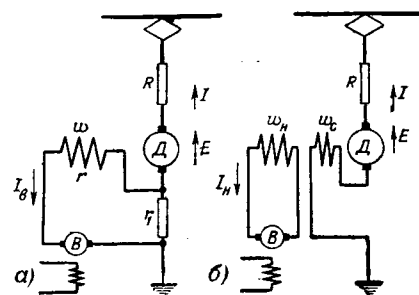


Рис. 5.

Из уравнения

$$U_s = I_s(r + r_1) + Ir_1 \quad (6)$$

следует, что при  $U_s = \text{const}$  между токами  $I_s$  и  $I$  существует линейная зависимость. Поэтому условие (5) будет выполняться для всех нагрузок, если оно будет соблюдено для двух значений нагрузки.

Рассмотрим следующие случаи:

а)  $I = 0$ . Тогда  $I_s w = I_n w_n$ , причем  $I_s = I_n$ .

Приняв во внимание условие (5), получим:

$$w_n = w \text{ и } I_n = \frac{U_s}{r_1 + r}. \quad (7)$$

б)  $U_s = 0$ . Схема со стабилизирующим сопротивлением приводится к схеме двигателя последовательного возбуждения с ослабленным полем, для которой  $I_s = I \frac{r_1}{r_1 + r}$ . Так как из условия (5)  $I_s w = I \cdot w_c$ , то

$$w_c = w \frac{r}{r_1 + r}. \quad (8)$$

Величина  $I_n$  не зависит от тока нагрузки  $I$  и витки  $w_n$  и  $w_c$  фиктивных обмоток при данных  $r$  и  $r_1$  неизменны. Следовательно, рассматриваемая схема рекуперации обеспечивает для тяговых машин характеристики машин смешанного возбуждения, данные обмоток которых и протекающие по ним токи определяются выражениями (7) и (8). Это позволяет полностью применить к схеме рекуперации со стабилизирующим сопротивлением метод расчета токов рекуперации, изложенный выше для машины смешанного возбуждения.

**Приложение.** Расчет характеристик тягового двигателя смешанного возбуждения ДК-202 Б. На рис. 6 представлены: характеристика намагничивания, справедливая для токов якоря от 0 до 100 а (кривая 1), нагрузочные характеристики для токов якоря 200 а (кривая 2) и 300 а (кривая 3). Данные двигателя: 86 квт, 600 в; числа витков обмоток возбуждения:  $w_c = 11,5$  и  $w_n = 1160$ ; сопротивления обмоток:  $r_a = 0,126$  ом;  $r_{\partial n} = 0,055$  ом и  $r_c = 0,028$  ом. На рис. 7

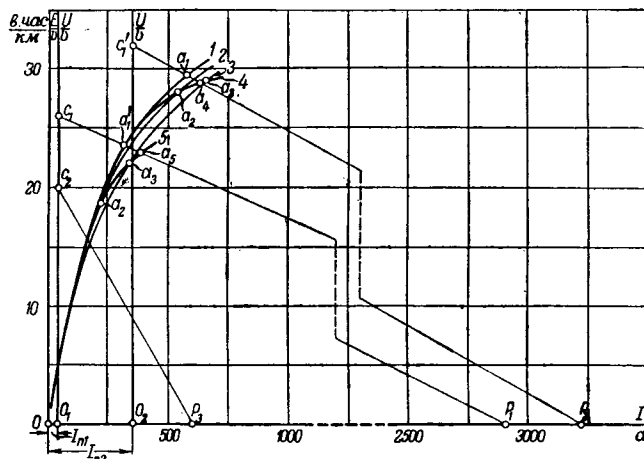


Рис. 6.

представлены скоростные характеристики двигателя, полученные из опыта, при токах возбуждения в параллельной обмотке  $i = 0,4$  а (кривая 1) и  $i = 3,5$  а (кривая 2).

Расчет токов нагрузки двигателя производим для случая питания его от сети 600 в при указанных токах возбуждения в параллельной обмотке.

Определяем величины приведенных токов и положения точек  $O_1$  и  $O_2$ :

$$\text{для } i = 0,4 \text{ а } I_{n1} = \frac{1160}{11,5} \cdot 0,4 = 40,3 \text{ а;}$$

$$\text{для } i = 3,5 \text{ а } I_{n2} = \frac{1160}{11,5} \cdot 3,5 = 353 \text{ а.}$$

Положения полюсов  $P_1$  и  $P_2$  относительно соответствующих начал  $O_1$  и  $O_2$  будут:

$$O_1 P_1 = O_2 P_2 = \frac{600}{0,209} = 2870 \text{ а.}$$

На кривой 2 рис. 6 находим точки  $a_2$ , отстоящие на величину тока 200 а от осей ординат, проходящих через точки  $O_1$  и  $O_2$ , и на кривой 3 — точки  $a_3$ , отстоящие на величину тока 300 а. Через эти точки проводим рабочие кривые намагничивания 5 и 4. В области рекуперативных токов они полностью совпадают с кривой 1, отклоняясь от нее в области токов двигательного режима. Это объясняется тем, что в режиме рекуперативного торможения машина мало насыщена, и поэтому реакция якоря практически не влияет на величину рабочего потока.

На рис. 6 показан пример построения лучей и определения токов нагрузки только для двух точек:  $c'_1$  при

$\frac{U}{v}, \text{ в. час/км}$		33	32	31	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10
$v, \text{ км/час}$		18,2	18,8	19,4	20	21,6	23,1	25	27,3	30	33,3	37,5	42,8	50	60
$I, \text{ а}$ при $i = 0,4 \text{ а}$	с учетом реакции якоря	—	—	—	—	—	340	277	222	178	143	115	93	72	52
	без учета реакции якоря	—	—	—	—	—	276	233	198	168	139	114	93	72	52
$I, \text{ а}$ при $i = 3,5 \text{ а}$	с учетом реакции якоря	330	275	224	181	101	35	20	68	110	144	176	203	226	250
	без учета реакции якоря	254	221	190	160	97	35	20	68	110	144	176	203	226	250



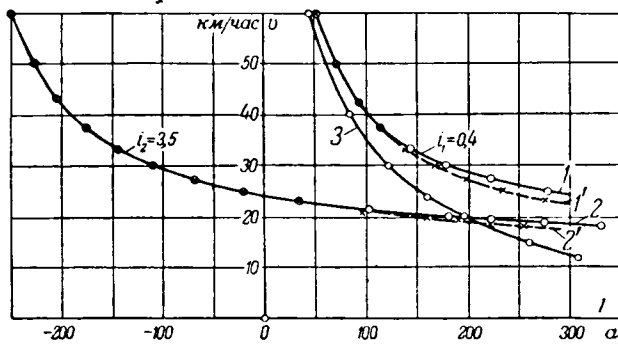


Рис. 7.

$\frac{U}{v} = 32 \frac{\text{в} \cdot \text{час}}{\text{км}}$  и  $c_1$  при  $\frac{U}{v} = 26 \frac{\text{в} \cdot \text{час}}{\text{км}}$ . Точки  $a_1$  и  $a'_1$  пересечения лучей с характеристикой  $I$  определяют величины токов нагрузки без учета реакции якоря, точки  $a_4$  и  $a_5$  пересечения лучей с характеристиками 4 и 5 — величины токов с учетом реакции якоря. Все полученные таким образом значения токов сведены в таблицу (см. стр. 45).

На рис. 7 нанесены полученные расчетом точки, причем точки, обозначенные кружком, получены при использовании рабочих характеристик намагничивания, а обозначенные крестиком — при использовании характеристики  $I$  рис. 6. Как видно, расчет по рабочим характеристикам намагничивания дает полное совпадение данных расчета с опытными, а использование характеристики холостого хода приводит к погрешностям в области больших токов нагрузки в двигательном режиме.

Для иллюстрации применения метода к случаю расчета характеристик при наличии добавочного сопротивления в цепи якоря произведен расчет характеристик машины при  $R = 1,07 \text{ ом}$  и  $i = 0,4 \text{ а}$ . Скоростная характеристика представлена в виде кривой 3 на рис. 7, а соответствующее построение иллюстрируется лучом  $c_2 P_3$  на рис. 6.

## Литература

1. В. Е. Розенфельд, Н. Н. Сидоров и С. Е. Кузин. Электрические железные дороги. Трансжелдориздат, 1951.
2. Л. М. Пятровский. Электрические машины. Госэнергоиздат, 1949.
3. В. Т. Касьянов. ВЭП, № 2, 1940.

[19. 10. 1954]



## Графоаналитический метод построения статических характеристик синхронных машин

Кандидат техн. наук Н. К. ЧУХИН

Московский энергетический институт им. Молотова

**Введение.** Предлагаемый в статье обобщенный графоаналитический метод построения статических характеристик насыщенных синхронных машин основан на замене нелинейных связей физических величин линейными и применении параметрических уравнений ненасыщенных синхронных машин.

По существу, новый метод соответствует векторной диаграмме н. с. для явнополюсной синхронной машины и является общим для неявнополюсной и явнополюсной машин. Для неявнополюсной машины результаты, полученные по обоим методам, должны полностью совпадать, если ошибки вычисления и построений будут одинаковы. Для явнополюсной машины метод векторных диаграмм дает большую погрешность, чем предлагаемый метод, по той причине, что в методе векторных диаграмм вследствие сложения полученного значения  $E_{aq}$  для ненасыщенной машины с действительным значением  $E_\delta$  продольная составляющая  $E_{\delta d}$  получается меньше действительного значения. Упрощенный графоаналитический метод соответствует упрощенной векторной диаграмме н. с. и его погрешность не превосходит 8%.

**Параметрические уравнения.** Решая комплексные уравнения ненасыщенных синхронных машин обычным способом или методом проекций, при помощи векторных диаграмм, можно,

пользуясь общепринятыми обозначениями, составить следующие параметрические уравнения:

$$E_s = I \left[ (x_{ad} - x_{aq}) \sin \psi + x_{aq} \frac{\cos \varphi_\delta}{\sin \theta_\delta} \right]; \quad (1)$$

$$E_i = I x_{aq} \left( \frac{\cos \varphi_\delta}{\tan \theta_\delta} - \sin \varphi_\delta \right); \quad (2)$$

$$E_i = U \sqrt{1 + \frac{2I(r \cos \varphi + x_s \sin \varphi)}{U} + \left(\frac{I}{U}\right)^2 (r^2 + x_s^2)}; \quad (3)$$

$$U = E_s \sqrt{1 + \frac{2I(r \cos \varphi + x_s \sin \varphi)}{E_\delta} - \left(\frac{I}{E_\delta}\right)^2 (r^2 + x_s^2)}; \quad (4)$$

$$\cos \varphi_\delta = \frac{U \cos \varphi + I r}{E_\delta}; \quad (5)$$

$$\sin \varphi_\delta = \frac{U \sin \varphi + I x_s}{E_\delta}; \quad (6)$$

$$\cos \varphi = \frac{E_\delta \cos \varphi_\delta - I r}{U}; \quad (7)$$

$$\sin \varphi = \frac{E_\delta \sin \varphi_\delta - I x_s}{U}; \quad (8)$$

$$\tan \theta_\delta = \frac{I x_{aq} \cos \varphi_\delta}{E_\delta + I x_{aq} \sin \varphi_\delta}. \quad (9)$$

Здесь

$$\theta = \theta_0 + \alpha; \quad (10)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \alpha. \quad (11)$$

Пренебрегая активным падением напряжения, из тех же комплексных уравнений можно получить:

$$E_s \approx I \left[ (x_d - x_q) \sin \psi + x_q \frac{\cos \varphi}{\sin \theta} \right]; \quad (12)$$

$$U \approx I x_q \left( \frac{\cos \varphi}{\operatorname{tg} \theta} - \sin \varphi \right); \quad (13)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I x_q \cos \varphi}{U + I x_q \sin \varphi}. \quad (14)$$

Вычитаем (13) из (12):

$$E_s - U \approx I \left[ (x_d - x_q) \sin (\theta + \varphi) + x_q \cos \varphi \left( \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \operatorname{tg} \varphi \right) \right]. \quad (15)$$

**Сущность метода.** Построение статических характеристик синхронных машин по заданным параметрам обычно сводится к определению двух величин из четырех ( $I_s$ ,  $I$ ,  $U$ ,  $\cos \varphi$ ) при двух постоянных. Для ненасыщенных синхронных машин все эти задачи можно решать аналитически при помощи параметрических уравнений, приведенных выше, так как при отсутствии насыщения в относительной системе единиц

$$E_s = k I_s. \quad (16)$$

Для насыщенных синхронных машин зависимость  $E_s = f(I_s)$  нелинейна и задается обычно графически, что значительно усложняет применение параметрических уравнений для построения статических характеристик. Приходится прибегать к искусственному приему, который заключается в замене действительных э. д. с. эквивалентными.

Допустим, что даны график (рис. 1) характеристики холостого хода  $E_s = f(I_s)$  и линейная функция  $E_{s,0} = k I_s$ , касательная к кривой  $E_s = f(I_s)$  и проходящая через начало координат. В этом случае одному и тому же действительному значению  $I_s$  будут соответствовать два значения  $E$ : одно — действительное значение э. д. с., найденное по графику  $E_s = f(I_s)$ ; другое, найденное по графику  $E_{s,0} = k I_s$ , будет эквивалентной э. д. с., которая получилась бы при отсутствии насыщения.

Отсюда следует, что по эквивалентным значениям э. д. с. можно определять действительные значения токов возбуждения и э. д. с. Если в параметрические уравнения (1), (2), (9), (12)...(15) подставить эквивалентные значения э. д. с. и напряжений, то они будут верны и для насыщенных синхронных машин. Так как эквивалентные э. д. с. пропорциональны соответствующим н. с., то векторная диаграмма

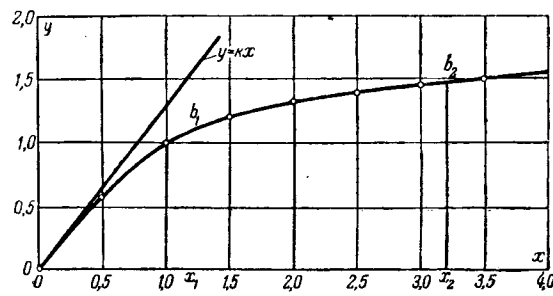


Рис. 1.

эквивалентных э. д. с., построенная по уравнению

$$\dot{E}_s = \dot{E}_0 + E_{aq} + \dot{E}_{ad},$$

при выборе соответствующих масштабов и повороте векторов на  $90^\circ$  полностью совпадает с векторной диаграммой действительных н. с. насыщенной синхронной машины, а следовательно, и угол  $\theta_0$  будет тоже действительным углом (с учетом насыщения).

Пренебрежение высшими гармониками и влиянием насыщения на  $k_d$  и  $k_q$  практически весьма незначительно сказывается на конечные результаты, что следует из сопоставления данных расчета и опыта, приведенных в приложении 2.

В качестве примера рассмотрим построение регулировочной характеристики явнополюсного синхронного генератора.

Дано:  $U_n$ ,  $I_n$ ,  $\cos \varphi_n$ ,  $x_{ad}$ ,  $x_{aq}$ ,  $r$ ,  $x_s$  и характеристика холостого хода. Требуется построить зависимость  $I_s = f(I)$  при  $U = \text{пост}$  и  $\cos \varphi = \text{пост}$ .

Ограничимся определением  $I_s$  для одного значения тока якоря. Расчет производится в относительной системе единиц в следующем порядке: 1) задаемся значением тока якоря и по уравнению (3) определяем  $E_0$ ; 2) по уравнению (5) или (6) находим угол  $\varphi_0$ ; 3) по  $E_0$  из характеристики холостого хода определяем соответствующее значение  $E_{0,0}$ ; 4) по уравнению (9) находим  $\theta_0$ ; 5) по уравнению (1) определяем  $E_{s,0}$  и 6) по уравнению (16) находим  $I_s$ .

Для стандартной характеристики холостого хода явнополюсного генератора  $k = 1,055$ .

Аналогично используются параметрические уравнения для построения всех других статических характеристик.

Применение предлагаемого метода для построения внешних характеристик привело бы к уравнению четвертой степени, что неприемлемо для инженерной практики. Поэтому для построения внешних характеристик автор предлагает упрощенный метод — по двум точкам.

В качестве примера рассмотрим построение внешней характеристики  $U = f(I)$  для убывающей нагрузки при  $I_s = \text{пост}$  и  $\cos \varphi = \text{пост}$ .

Одна точка внешней характеристики всегда известна. В нашем случае это точка  $b_1$  рис. 2. Вторая точка, соответствующая току  $I = 0$ , определяется по току  $I_s$ , который находится по заданным параметрам:  $\cos \varphi$ ,  $U$  и максимальной нагрузке, как и при расчете регулировочной характеристики. Внешней характеристикой будет часть характеристики холостого хода, заключенная между точками  $b_1$  и  $b_2$  (рис. 2). Масштаб напряжения остается тот же, что и для характеристики холостого хода, а масштаб тока определяется по отрезку  $x_1 x_2$ . По упрощенному методу отрезок  $x_1 x_2$  принимается пропорциональным току якоря, соответствующему напряжению при максимальной нагрузке. Как видно из уравнения (15), отрезок  $x_1 x_2$  про-

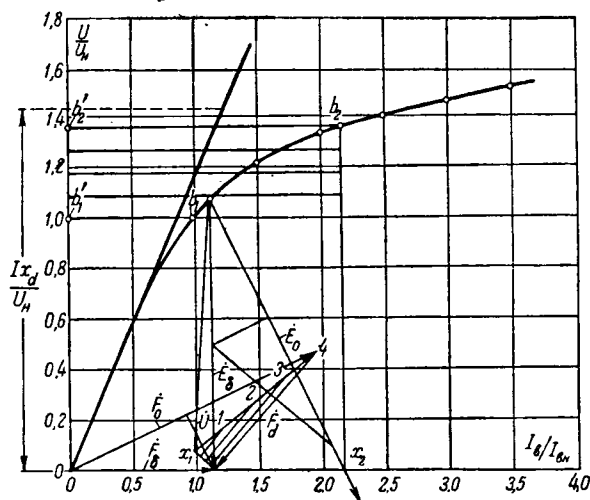


Рис. 2.

порционален току якоря только при  $\cos \varphi = 0$ , а при  $\cos \varphi = 1$  этот отрезок пропорционален квадрату тока якоря. Следовательно, по упрощенному методу наибольшая погрешность получается при  $\cos \varphi = 1$ .

Аналогично строится и регулировочная характеристика, показанная на рис. 2 в виде кривой  $b_1b_2$ , заключенной между ординатами  $b'_1b_1$  и  $b'_2b_2$ . Начало системы координат для регулировочной характеристики совпадает с точкой  $b'_1$ , и ось тока возбуждения пройдет через точку  $b_1$ , а ось тока якоря по направлению совпадает с осью напряжения. Масштаб тока якоря определяется по отрезку  $b'_1b'_2$ , как и для внешней характеристики.

**Заключение.** Сопоставление результатов расчетов регулировочных характеристик, полученных при помощи трех методов и приведенных в приложениях 1 и 2, показывает:

1. Сравнительно с методом векторных диаграмм, для явнополюсной машины предлагаемый неупрощенный метод дает более высокие значения  $I_{\phi}$ , что вполне соответствует существу этого метода.

2. Для неявнополюсной синхронной машины результаты, полученные при помощи неупрощенного метода, совпадают с результатами по методу векторных диаграмм, а упрощенный метод дает значительную отрицательную погрешность, что тоже является вполне естественным. Метод векторных диаграмм и предлагаемый неупрощенный метод по существу равноценны для неявнополюсных машин. Расхождение результатов возможно только за счет графических погрешностей в методе векторных диаграмм и погрешностей вычислений в методе автора.

3. Весьма незначительное расхождение между результатами расчета и опыта для явнополюсного генератора (приложения 1 и 2) объясняется тем, что в предлагаемом методе не учтены высшие гармоники и влияние насыщения на коэффициенты  $k_d$  и  $k_q$ .

**Приложение 1.** Расчет и построение регулировочной характеристики неявнополюсного генератора. Дано: турбогенератор Т2-3-2;  $P_N = 3000$  кат;  $U_N = 6,3$  кв;  $I_N = 344$  а;  $r = 0,0426$  ом;  $x_s = 1,12$  ом;  $x_d = 16,2$  ом;  $x_q = x_d$ ;  $\cos \varphi_N = 0,8$ .

1. Определяем параметры в относительной системе единиц:

$$\gamma_r = \frac{I_{N\phi} \cdot r}{U_{N\phi}} = \frac{344 \cdot 0,0426 \cdot \sqrt{3}}{6300} = 0,004;$$

$$\gamma_s = \frac{I_{Nq} \cdot x_s}{U_{N\phi}} = \frac{344 \cdot 1,12 \cdot \sqrt{3}}{6300} = 0,106;$$

$$\gamma_d = \frac{I_{N\phi} \cdot x_d}{U_{N\phi}} = \frac{344 \cdot 16,2 \cdot \sqrt{3}}{6300} = 1,53;$$

$$\gamma_{ad} = \gamma_d - \gamma_s = 1,53 - 0,106 = 1,424.$$

2. Находим  $\alpha_0 = \frac{E_0}{U_N}$  при нагрузке  $\beta = \frac{I}{I_N} = 1$ :

$$\alpha_0 = \alpha_v \sqrt{1 + \frac{2 \cdot \beta (\gamma_r \cos \varphi + \gamma_s \sin \varphi)}{\alpha_v} + \left(\frac{\beta}{\alpha_v}\right)^2 (\gamma_r^2 + \gamma_s^2)} =$$

$$= 1 \cdot \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 1 (0,004 \cdot 0,8 + 0,106 \cdot 0,6)}{1} + \left(\frac{1}{1}\right)^2 (0,004^2 + 0,106^2)} = 1,07.$$

3. Определяем угол  $\varphi$  между  $\dot{E}_0$  и  $\dot{I}$ :

$$\cos \varphi_0 = \frac{\alpha_v \cos \varphi + \beta \gamma_r}{\alpha_0} = \frac{1 \cdot 0,8 + 0,004}{1 \cdot 0,7} = 0,747;$$

по таблицам тригонометрических функций находим:

$$\varphi_0 = 41^\circ 40'.$$

4. По  $\alpha_0$  из характеристики холостого хода определяем соответствующую эквивалентную э. д. с.  $\alpha_{0g} = 1,32$ .

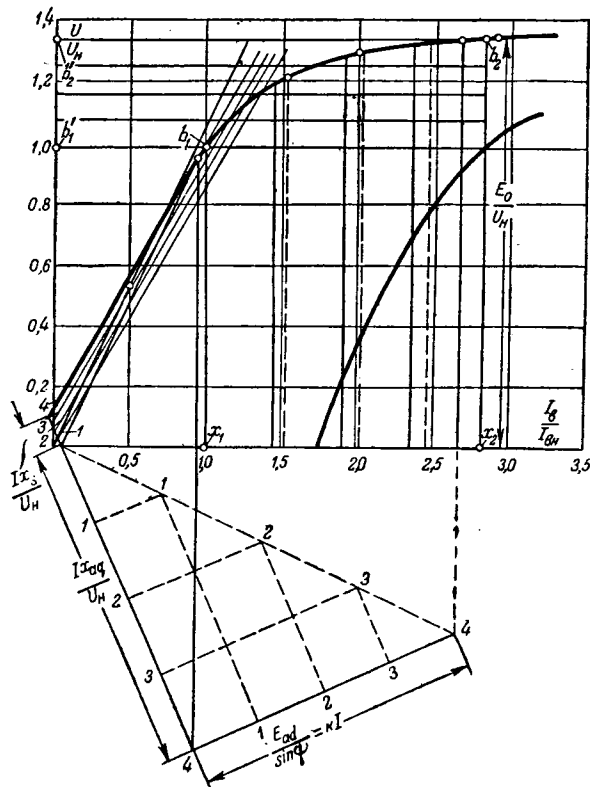


Рис. 3.

5. По уравнению (9) находим угол  $\theta_\delta$  между  $\vec{E}_\delta$  и  $\vec{E}_s$ :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_\delta &= \frac{\beta I_{aq} \cos \varphi_\delta}{\alpha_{\delta s} + \beta I_{aq} \sin \varphi_\delta} = \\ &= \frac{1 \cdot 1,424 \cdot 0,747}{1,32 + 1 \cdot 1,424 \cdot 0,665} = 0,47; \end{aligned}$$

по таблицам  $\theta_\delta = 25^\circ 11'$ ;  $\sin \theta_\delta = 0,425$ .

6. По уравнению (1) определяем  $\alpha_{\delta s} = \frac{E_{\delta s}}{U_n}$ :

$$\alpha_{\delta s} = \beta I_{aq} \frac{\cos \varphi_\delta}{\sin \theta_\delta} = 1 \cdot 1,424 \frac{0,747}{0,425} = 2,5.$$

7. По уравнению (16) находим ток возбуждения в относительных единицах:

$$\beta_s = \frac{I_s}{I_{sн}} = \frac{\alpha_{\delta s}}{K} = \frac{2,5}{1,16} = 2,16.$$

Другие точки рассчитываются таким же образом.

Построение регулировочной характеристики методом векторных диаграмм показано на рис. 2 и 3, по упрощенному методу — на рис. 2. Результаты сравнения помещены в таблице.

$\beta = \frac{I}{I_n}$	Метод векторных диаграмм		Первый метод автора		Второй метод автора	
	$\beta_s$	Погрешность, %	$\beta_s$	Погрешность, %	$\beta_s$	Погрешность, %
0	1	0	1	0	1	0
1,25	1,25	0	1,25	0	1,16	-7
0,5	1,52	0	1,52	0	1,39	-8
0,75	1,82	0	1,82	0	1,67	-8
1	2,16	0	2,16	0	2,16	0

**Приложение 2.** Расчет и построение регулировочной характеристики явнополюсного генератора. Номинальные параметры взяты из учебника Л. М. Пиотровского („Электрические машины“, Госэнергоиздат, стр. 321, 1949).

$$\begin{aligned} P_n &= 8750 \text{ квв; } U_n = 11 \text{ кв; } I_n = 460 \text{ а; } \cos \varphi_n = 0,8; \\ n &= 75 \text{ об/мин; } f = 50 \text{ гц; } r = 105 \text{ ом; } x_\delta = 2,52 \text{ ом; } \\ &\beta_{ad} = 0,57. \end{aligned}$$

По этим данным определяем параметры:

$$\gamma_r = \frac{I_{n\phi} \cdot r}{U_{n\phi}} = \frac{460 \cdot 0,105 \cdot \sqrt{3}}{1100} = 0,0076;$$

$$\gamma_s = \frac{I_{n\phi} x_s}{U_{n\phi}} = \frac{460 \cdot 2,52 \cdot \sqrt{3}}{1100} = 0,183;$$

$$\gamma_{ad} = \frac{I_{n\phi} \cdot x_{ad}}{U_{n\phi}} = k_{\beta ad} = 1,055 \cdot 0,57 = 0,6;$$

$$\gamma_{aq} = \frac{I_{n\phi} x_{aq}}{U_{n\phi}} = \frac{\gamma_d}{1,5} - \gamma_{sn} = \frac{0,6 + 0,183}{1,5} - 0,183 = 0,339.$$

1. По известным значениям  $U$ ,  $\cos \varphi$ ,  $r$  и  $x_s$  для  $I = I_n$  находим:

$$\frac{\alpha_s \sin \varphi + \beta \gamma_s}{\alpha_s \cos \varphi + \beta \gamma_r} = \frac{1,06 + 1 \cdot 0,183}{1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,0076} = 0,98.$$

По таблицам тригонометрических величин находим:

$$\varphi_\delta = 44^\circ 8'; \quad \sin \varphi_\delta = 0,696; \quad \cos \varphi_\delta = 0,717.$$

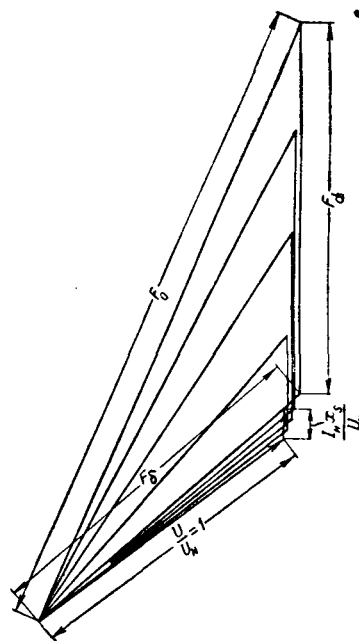


Рис. 4.

2. Определяем действительное значение  $E_\delta$  в относительных единицах:

$$\alpha_\delta = \frac{\alpha_s \sin \varphi + \beta \gamma_s}{\sin \varphi_\delta} = \frac{1 \cdot 0,6 + 1 \cdot 0,183}{0,696} = 1,125.$$

3. По действительному значению  $\alpha_\delta$  при помощи характеристики холостого хода определяют эквивалентное значение  $\alpha_{\delta s}$ :

$$\alpha_{\delta s} = 1,265.$$

4. Находим:

$$\operatorname{tg} \theta_\delta = \frac{\cos \varphi_\delta}{\frac{\alpha_{\delta s}}{\gamma_{aq}} + \sin \varphi_\delta} = \frac{0,717}{\frac{1,265}{1 \cdot 0,339} + 0,696} = \frac{0,717}{4,426} = 0,162.$$

По таблицам тригонометрических функций находим:  $\theta_\delta = 9^\circ 12'$ ;  $\sin \theta_\delta = 0,16$ .

5. Определяем эквивалентное значение э. д. с. холостого хода, соответствующее току возбуждения при номинальных нагрузке и напряжении:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \beta \left[ (\gamma_{ad} - \gamma_{aq}) \sin \psi + \gamma_{aq} \frac{\cos \varphi_\delta}{\sin \theta_\delta} \right] = \\ &= 1 \cdot [(0,6 - 0,334) \sin (53^\circ 20') + 0,339 \frac{0,717}{0,16}] = 1,73, \end{aligned}$$

где  $\psi = \varphi_\delta + \theta_\delta = 44^\circ 8' + 9^\circ 12' = 53^\circ 20'$ .

6. Определяем в относительных единицах ток возбуждения, соответствующий номинальной нагрузке при номинальном напряжении:

$$\beta_s = \frac{\alpha_s}{k} = \frac{1,73}{1,055} = 1,64.$$

По характеристике холостого хода соответствующая этому току возбуждения действительная э. д. с.  $E_\delta = 1,275$ . Изменение напряжения по расчету составляет  $\Delta U = 27,5\%$ ; по опытным данным  $\Delta U = 27,7\%$ . Расхождение на  $27,7 - 27,5 = 0,2\%$ .

Построение регулировочной характеристики методом векторных диаграмм и по упрощенному методу показано на рис. 3. По векторной диаграмме  $\frac{I_s}{I_{сн}} = 1,47$ .

[15. 11. 1954]

# Размеры контактных решеток при моделировании полей в электролитической ванне

Доктор техн. наук, проф. А. В. НЕТУШИЛ

Московский энергетический институт им. Молотова

При электрическом моделировании потенциальных полей в неоднородных средах, например в задачах гидродинамики [Л. 1], электротехники [Л. 2] или теплотехники, так же как и в случае моделирования потенциальных полей для условий, когда распределение потенциала или плотности тока <sup>1</sup> на границе задается некоторой функцией [Л. 3], в электролитической ванне устанавливается система электродов в виде ряда проводящих пластин или проволок, врезанных в непроводящую перегородку. Такая система, называемая контактным барьером или решеткой, обеспечивает необходимый контакт между двумя различными электролитами [Л. 1], снижение переходного сопротивления в месте резкого изменения толщины слоя электролита [Л. 2] и, наконец, заданное распределение потенциала или плотности тока на границе [Л. 3 и 4].

На рис. 1 схематически изображен участок такого контактного барьера, состоящего из проводящих пластин шириной  $a$ , установленных на расстоянии  $b$  одна от другой. Контактные пластины несколько искажают электрическое поле вблизи барьера, что проявляется в увеличении сопротивления для электрического поля, направленного перпендикулярно барьеру, и проводимости для электрического поля, направленного вдоль барьера. Чем меньше значения величин  $a$  и  $b$ , тем выше точность моделирования, так как падает удельный вес искажений.

Увеличение сопротивления в направлении, перпендикулярном поверхности барьера, так же как и увеличение проводимости вдоль его поверхности, можно скорректировать за счет толщины изоляционной стенки барьера  $\delta$  и соответствующего вынесения ряда электродов относительно геометрической линии границы (условный пункт на рис. 2) на  $\delta$ . Действительно, наличие изоляционной перегородки толщиной  $\delta$  приводит к уменьшению общего сопротивления электролита в направлении  $E_n$  на величину, пропорциональную  $\delta$ , и общей проводимости в направлении  $E_t$  также на величину, пропорциональную  $\delta$ .

Обоснование выбора размеров  $a$ ,  $b$  и  $\delta$  для случая контактной решетки, выполненной в виде ряда плоских контактных пластин, дал П. М. Егоров [Л. 5].

Рассмотрим электрическое поле вблизи контактной пластины для двух случаев направления электрического поля — нормально и тангенциально к поверхности барьера (рис. 2). Аналогично [Л. 6] из соображений симметрии легко установить, что если  $a=b$ , то электрические поля участков 1234 в двух рассматриваемых случаях

будут ортогональны, а линии равного потенциала и линии напряженности электрического поля меняются местами, так как граничные условия задания функций потока и потенциала соответственно меняются местами. Таким образом, геометрическое сопротивление в первом случае (рис. 2, I) и геометрическая проводимость во втором (рис. 2, II) выражаются совершенно одинаково:

$$\left( \frac{\varphi - \varphi_0}{\psi_2 - \psi_1} \right)_I = \frac{y}{2 \cdot a} + \Delta R_{0I} = \left( \frac{\psi - \psi_0}{\varphi_2 - \varphi_1} \right)_{II} = \frac{y}{2 \cdot a} + \Delta G_{0II}. \quad (1)$$

Следовательно, приращение геометрического сопротивления  $\Delta R_{0I}$  равно приращению геометрической проводимости  $\Delta G_{0II}$ . Если выбрать размер  $\delta$  таким образом, чтобы

$$\Delta R_{0I} = \Delta G_{0II} = \frac{\delta}{2a}, \quad (2)$$

то наличие изоляционной перегородки приведет к компенсации увеличения сопротивления в одном направлении и проводимости — в другом.

Для расчета величины  $\Delta R_{0I}$  рассмотрим комплексный потенциал поля в относительных единицах ( $w = \varphi + j\psi$ ), например в случае  $E = E_n$  (рис. 2, I).

Пользуясь методом конформных отображений, легко показать, что для этого случая между комплексной координатой точки  $z = x + jy$  и

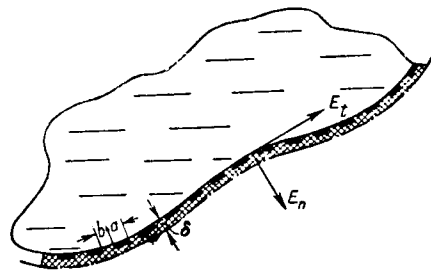


Рис. 1. Участок барьера в электролитической ванне.

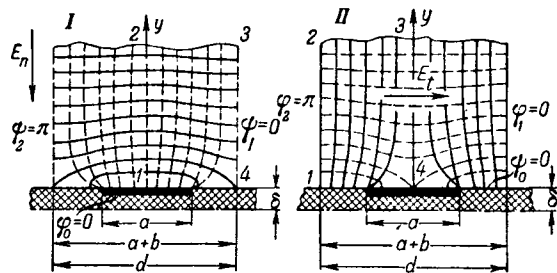


Рис. 2. Электрическое поле вблизи одной секции контактной плоской решетки.

<sup>1</sup> Такое моделирование применялось, например, К. М. Поливановым при моделировании полей постоянных магнитов с заданным распределением намагниченности.

I — при электрическом поле, направленном нормально к поверхности барьера; II — при электрическом поле, направленном вдоль поверхности барьера. (Сплошными линиями показаны линии равного потенциала, пунктиром — линии напряженности электрического поля.)

комплексным потенциалом  $w = \varphi + j\psi$  существует зависимость

$$\sin \frac{\pi z}{a+b} = \sin \frac{\pi a}{2(a+b)} \operatorname{ch} w. \quad (3)$$

При  $z = jy$  комплексный потенциал  $w = \varphi + j\frac{\pi}{2}$  и, следовательно, в случае, когда  $a = b$ ,

$$\operatorname{sh} \varphi = \sqrt{2} \operatorname{sh} \frac{\pi y}{2a}. \quad (4)$$

Для  $y \gg a$  после преобразований получаем:

$$\varphi = \frac{\pi y}{2a} + \frac{1}{2} \ln 2. \quad (5)$$

Следовательно, согласно (1), так как  $\psi_2 - \psi_1 = \pi$ , а  $\varphi_0 = 0$ ,

$$\Delta R_0 = \frac{1}{2\pi} \ln 2 = 0,11. \quad (6)$$

Контактный барьер будет вносить минимальные искажения, если согласно формулам (2) и (6)

$$\delta = 0,11 \cdot d \quad \text{и} \quad a = b = \frac{d}{2}, \quad (7)$$

где  $d$  — расстояние между осями соседних пластин.

К аналогичным выводам пришел и П. М. Егоров, исходя из несколько иных соображений и рассматривая более частную задачу компенсации искажающего влияния стенок.

Однако выполнению контактного барьера в виде ряда плоских пластин при технической простоте этого метода и хороших условиях зачистки контактных поверхностей свойственен один недостаток. Плотность электрического тока на поверхности контактной пластины неравномерна и на ее краях достигает теоретически бесконечно большого значения<sup>2</sup>, а практически — значения, во много раз превосходящего плотность тока в центре пластины. Таким образом, на краях контактных пластин возникают большие плотности тока, приводящие к интенсивному электролизу вблизи краев пластин и связанным с ним явлениям поляризации и окисления контактов, что создает дополнительные погрешности, учет которых представляет значительные трудности.

Значительно более равномерным оказывается распределение тока по поверхности электрода при выполнении его из проволоки круглого сечения. Рассмотрим, каковы должны быть соотношения размеров в этом случае для того, чтобы погрешности от влияния контактного барьера были минимальными.

Аналогично предыдущему, рассмотрим электрические поля, возникающие вблизи контактного барьера при различных направлениях электрического поля. Примерное распределение полей для двух случаев направления поля приведено

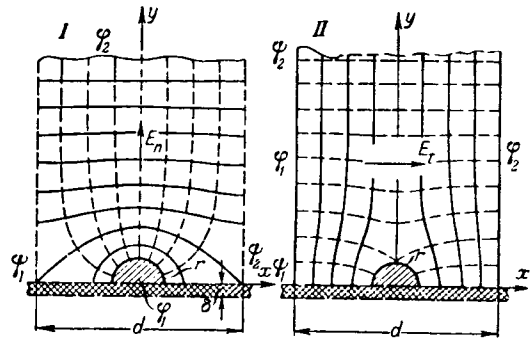


Рис. 3. Электрическое поле вблизи одной секции контактной круглой решетки.

I — при электрическом поле, направленном нормально к поверхности барьера; II — при электрическом поле, направленном вдоль поверхности барьера. (Сплошными линиями показаны линии равного потенциала, а пунктиром — линии напряженности электрического поля).

на рис. 3. Как видно из построений, теперь при переходе от одного случая к другому функции  $\psi$  и  $\varphi$  уже не меняются местами, и для выбора соотношений размеров  $r$ ,  $d$  и  $\delta$  (рис. 3) нельзя воспользоваться соображениями симметрии. Необходимо находить функции, выражающие поле для обоих случаев.

Для случая, изображенного на рис. 3, I, электрическое поле приближенно выражается известной комплексной функцией (например, [Л. 7], задачи 12 и 22 или [Л. 9], стр. 74):

$$w = A \ln \sin \frac{\pi z}{d}, \quad (8)$$

где  $A$  — постоянная, зависящая от  $E_n$ .

Аналогично можно показать, что функция

$$w = B \left[ \frac{z}{r} - \frac{\operatorname{ctg} \frac{\pi z}{d}}{\operatorname{ctg} \frac{\pi r}{d}} \right], \quad (9)$$

где  $B$  — постоянная, зависящая от  $E_r$ , — выражает поле, изображенное на рис. 3, II.

Выражения (8) и (9) точно описывают поля, изображенные на рис. 3, только при  $r \ll d$ . При  $r$ , соизмеримом с  $d$ , следует пользоваться более точными выражениями [Л. 8], однако, как будет показано ниже, для рассматриваемого случая точность выражений (8) и (9) достаточна.

Для выбора оптимальных значений  $r$  и  $\delta$  рассмотрим в первом случае сопротивление между электродом и пластиной, отстоящей на расстояние  $y$  от электрода при  $y \gg d$ , а во втором случае — проводимость между поверхностями с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  на участке, ограниченном линиями  $y = 0$  и прямой, отстоящей от поверхности барьера на расстояние  $y$ , также при  $y \gg d$ .

В первом случае геометрическое сопротивление

$$R_{01} = \frac{\varphi(0, y) - \varphi(0, r)}{\psi\left(\frac{d}{2}, 0\right) - \psi\left(-\frac{d}{2}, 0\right)} \approx \frac{y}{d} - \frac{1}{\pi} \ln 2 \operatorname{sh} \frac{\pi r}{d}, \quad (10)$$

<sup>2</sup> На рис. 2, I это находит отражение в виде выхода нескольких различных силовых линий из точки края пластины.

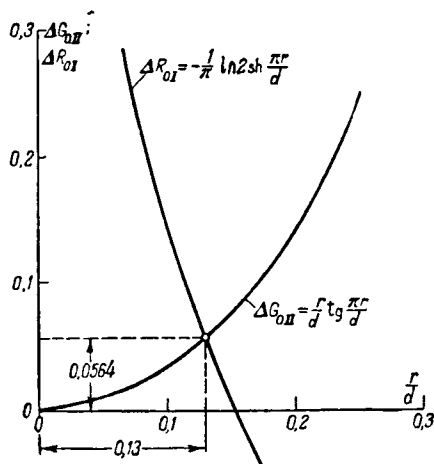


Рис. 4. Графическое решение трансцендентного уравнения (14).

а во втором случае геометрическая проводимость

$$G_{01} = \frac{\psi\left(\frac{d}{2}, y\right) - \psi\left(\frac{d}{2}, 0\right)}{\varphi\left(\frac{d}{2}, 0\right) - \varphi\left(-\frac{d}{2}, 0\right)} \approx \frac{y}{d} + \frac{r}{d} \operatorname{tg} \frac{\pi r}{d}. \quad (11)$$

Таким образом, в первом случае

$$\Delta R_{01} = -\frac{1}{\pi} \ln 2 \operatorname{sh} \frac{\pi r}{d}, \quad (12)$$

а во втором

$$\Delta G_{01} = \frac{r}{d} \operatorname{tg} \frac{\pi r}{d}. \quad (13)$$

Так же как и в рассмотренном примере, оптимальным условием выбора отношения  $\frac{r}{d}$  является равенство

$$\Delta R_{01} = \Delta G_{01}. \quad (14)$$

На рис. 4 показано графическое решение этого уравнения, дающее  $\frac{r}{d} = 0,13$  при  $\Delta R_{01} = \Delta G_{01} = 0,0564$ .

Итак, для получения минимальных погрешностей, обусловленных влиянием контактных барьеров, выполненных из круглых проволок, следует выбирать такие размеры изолирующих перегородок и контактных проволок, чтобы  $r = 0,13 \cdot d$ , а  $\delta = 0,0564 \cdot d$ .

Для проверки применимости уравнений (8) и (9) при решении данной задачи рассмотрим линию равного потенциала, выражаемого уравнением (8), проходящую через точку  $z = 0,13d$ . Линия пересекает ось  $y$  в точке  $z = \frac{d}{\pi} j \operatorname{arsh} \sin 0,13\pi = j0,124d$ . Из рассмотрения картины поля [Л. 9], выражаемого уравнением (8), легко видеть, что при совмещении этой линии с поверхностью электрода уравнение (8) выражает поле решетки, состоящей из ряда эллиптических цилиндров с эксцентриситетом  $e = \sqrt{1 - \left(\frac{124}{130}\right)^2} = 0,3$ . При

практическом выполнении электродов в виде проволок диаметром 2...3 мм такое значение эксцентриситета лежит в пределах точности изготовления электродов, так как дает расхождение в радиусах различных точек поверхности электродов порядка  $\pm 2,5\%$ , или  $\pm 0,04$  мм.

Для экспериментальной проверки соотношений (7) и (15) в лаборатории теоретических основ электротехники МЭИ студентами В. А. Афанасьевым, Г. П. Поповым и С. П. Поповым были в электролитической ванне определены зависимости  $\Delta R_{01}\left(\frac{b}{d}\right)$  и  $\Delta G_{01}\left(\frac{b}{d}\right)$  для полей, представленных на рис. 2, и  $\Delta R_{01}\left(\frac{r}{d}\right)$  и  $\Delta G_{01}\left(\frac{r}{d}\right)$  для полей, представленных на рис. 3. Условие  $\Delta R_{01} = \Delta G_{01}$  дало значения  $\frac{\delta}{d} \approx 0,11$ ;  $\frac{b}{d} \approx 0,47$  и  $\frac{a}{d} \approx 0,53$  для рис. 2 и  $\frac{\delta}{d} \approx 0,56$  и  $\frac{r}{d} \approx 0,13d$  для рис. 3. Таким образом, экспериментальная проверка подтверждает полную пригодность выражений (7) и (15) для выбора размеров электродов контактных барьеров обеих систем.

Если сравнить результаты, полученные для плоских пластин и круглых проволок, то можно заметить, что при переходе от плоских контактных пластин к полукруглым радиус полукруглых пластин  $r$  следует принять равным 0,26 ширины пластины  $\left(a = \frac{d}{2}\right)$ . Это близко соответствует замене пластины эквивалентным цилиндром, радиус которого обычно принимается равным четверти ширины пластины [Л. 9].

Для смещения поверхности изолирующего барьера относительно геометрической оси  $\delta$  при полукруглых контактных пластинах получается примерно в 2 раза меньшее значение ( $\delta = 0,056d$ ), чем при плоских пластинах ( $\delta = 0,11d$ ). Так как на практике обычно этого смещения не учитывают, то при полукруглых контактных пластинах получается в 2 раза меньшая дополнительная погрешность, чем при плоских пластинах.

#### Литература

1. С. А. Христианович, С. Г. Михлин и Б. Б. Левисон. Некоторые новые вопросы механики сплошных сред. Изд. АН СССР, 1933.
2. М. Donald. Электрическая аналогия в проектировании высоковольтных силовых трансформаторов. Proc. Inst. EI. Eng., т. 100, № 74, 1953.
3. Н. М. Бурдак. Моделирование переходных процессов водопонижения. Труды МЭИ, вып. XIV, 1953.
4. В. И. Аравин и С. Н. Нумеров. Фильтрационные расчеты. Стройиздат, 1948.
5. П. М. Егоров. Экспериментальное исследование потенциальных полей. Электричество, № 3, 1954.
6. А. В. Нетушил. Об одном элементарном соотношении в некоторых потенциальных полях. Электричество, № 3, 1951.
7. Под ред. К. А. Круга и др. Задачник по теоретическим основам электротехники. Госэнергоиздат, 1948.
8. В. Смайт. Электростатика и электродинамика, стр. 106, ИЛ, 1954.
9. Ф. Оллендорф. Токи в земле. ГНТИ, 1932.

[14. 1. 1955]



# Модуль упругости высоковольтного фарфора как характеристика механической прочности

Доктор техн. наук, проф. Н. Г. ДРОЗДОВ и кандидат техн. наук Ю. С. ЧАТНИАН

Московский энергетический институт им. Молотова

**Введение.** Фарфор — поликристаллический материал, содержащий также стекловидную фазу. Кристаллическая фаза состоит из ионных кристаллов  $\beta$ -кварца и муллита, а стекловидная фаза — из полевошпатового кремнеземистого стекла (зона оплавления кварца) и стекла, образовавшегося в процессе диссоциации глинистых продуктов.

В ионных кристаллах природа сил взаимодействия между частицами кристалла — ионная, в стекле же, кроме этих электростатических сил, имеются также гомеоплярные и остаточные, ван-дер-ваальсовы силы [Л. 1]. Для установления связи между модулем упругости и прочностью с учетом всех видов взаимодействия, в частности зависимости модуля упругости от межчастичного расстояния, нами рассматривался простейший случай твердых тел — кристаллы кубической сингонии типа АХ. Для такого кристалла для любого направления модуль упругости выражается как

$$E = \frac{z_1 z_2 e^2 k}{\psi r_o^4} S(n), \quad (1)$$

где  $z_1, z_2$  — валентность ионов;  $e$  — заряд электрона;  $\psi$  — коэффициент „рыхлости“;  $k$  — коэффициент Маделунга;  $r_o$  — межионное расстояние при равновесном состоянии;  $n$  — показатель степени межионного расстояния в уравнении энергии кристалла по Борну [Л. 2].

Та часть формулы, которая характеризует расположение ионов в решетке, нами выделена и обозначена символом  $S(n)$ . Коэффициент  $S(n)$  определяется по экспериментальному значению модуля упругости какого-либо одного типа кристалла [например, для NaCl  $S(n) = 1,34$ ]. Зная коэффициент  $S(n)$ , можно по формуле (1) найти модуль упругости других кристаллов той же сингонии. Таким образом, определенные значения модулей упругости давали хорошее совпадение с экспериментально установленными модулями упругости кристаллов.

Сравнивая выражения для модуля упругости с формулой для определения прочности на всестороннее растяжение

$$F = \frac{n-1}{n+3} \frac{z_1 z_2 e^2 k}{3 \cdot \psi r_o^4} \left( \frac{4}{n+3} \right)^{\frac{4}{n-1}}, \quad (2)$$

убеждаемся, что модуль упругости и прочность прямо пропорциональны. Расчет для кристаллов кубической сингонии типа АХ показал, что коэффициент пропорциональности равен в среднем десяти. Для ионной связи модуль упругости и прочность зависят от межионного расстояния также одинаковым образом.

Аналогичным образом были подсчитаны модуль упругости и прочность при наличии в кристалле гомеоплярных связей. При расчете

использовалось выражение энергии двух взаимодействующих атомов в виде функции Морзе. Подсчет модуля упругости и прочности для некоторых гомеоплярных сил в керамических материалах показал, что коэффициент пропорциональности между этими величинами также колеблется около десяти. Для остаточных связей, а также для некоторых кристаллов с химической связью П. П. Кобеко показал [3], что модуль упругости и прочность пропорциональны и коэффициент пропорциональности равен десяти. Для реальных тел значения прочности резко отличаются от вычисленных и коэффициент пропорциональности между модулем упругости и прочностью будет также сильно отличаться от теоретического. Однако во многих случаях прямая пропорциональность не нарушается [Л. 3, 4].

С целью определения зависимости между модулем упругости и прочностью высоковольтного фарфора, где преобладающий тип связи — ионный, нами были экспериментально определены на одних и тех же образцах модуль упругости и прочность на статический изгиб и исследованы влияния ряда технологических факторов и микроструктуры на эти характеристики.

**Метод измерения модуля упругости.** Для измерения модуля упругости образцов из керамических материалов был использован резонансный метод. Применительно к определению упругих модулей резонансный метод служит для возбуждения в образце собственных колебаний и одновременно измерения частоты этих колебаний. Известно, что частота собственных колебаний образца определяется его упругими и инерционными свойствами и способом закрепления образца. Поэтому, зная форму и размеры образца, плотность его материала и условия его закрепления, можно вычислить упругие модули материала.

Основную часть установки для определения частот собственных колебаний цилиндрических образцов диаметром 10 мм и длиной 300 мм составляет генератор звуковой частоты (рис. 1). Точность его градуировки, стабильность, а также способ отсчета предопределяют точность измерений частоты собственных колебаний, а следовательно, и модуля упругости. В качестве возбудителя колебаний в установке применен электромагнитный динамик с диффузором 2. Колебания образца снимает электромагнитный адаптер 3. Адаптер преобразует механические колебания образца в колебания электромагнитные. Усиленные усилителем переменного тока колебания вытекают детектором и через усилитель постоянного тока поступают на прибор, регистрирующий амплитуду колебаний. Усилительное устройство вместе с регистрирующим прибором смонтировано в кожухе 4.

Образец подвешивается в двух точках на асбестовых нитях с нихромовой петлей 5. Конец одной из нитей крепится к диффузору динамика,

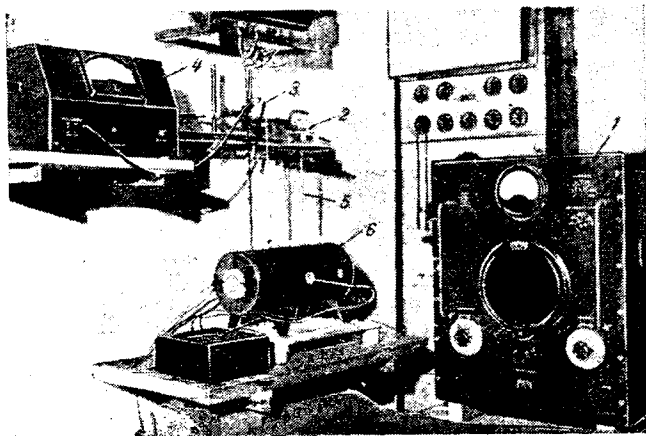


Рис. 1. Установка для определения собственных частот колебаний образцов фарфора.

1 — генератор звуковой частоты; 2 — динамик; 3 — адаптер; 4 — усилитель с прибором; 5 — асбестовая нить с нихромовой петлей; 6 — электропечь.

а конец другой — к игле адаптера. Способ закрепления образца следует выбирать из условия минимального его влияния на амплитуду и главным образом на частоту колебаний. При колебании диффузора в образце возникают поперечные колебания, имеющие пучности и узлы. Для цилиндрических образцов узлы располагаются на расстоянии 0,2242 длины образца от его концов. При сдвиге нитей вдоль образца на 5 мм относительно узлов можно вывести образец из равновесия и настроить его в резонанс с его собственной частотой. Отметим, что при сдвиге нитей вдоль образца, даже на удалении 10 мм от узловых точек, не обнаруживается изменений частоты.

Для определения изменения модуля упругости в зависимости от температуры образец помещался внутри трубчатой электропечи 6. Более равномерное распределение тепла в объеме печи достигалось установкой в ней стальной теплопроводящей рубашки.

Методика измерений собственной частоты образца при нормальных температурах и снятие частотной зависимости колебаний образца от температуры следующие: после закрепления образца включают питание установки и медленно изменяют частоту напряжения звукового генератора. Образец, возбуждаемый посредством нити от диффузора динамика, совершает механические колебания с частотой напряжения генератора. Когда частота генератора в процессе ее изменения достигает частоты собственных колебаний образца, наступает резонанс; амплитуда колебаний образца и связанной с ним иглы адаптера резко возрастает; резко увеличивается и напряжение, развиваемое адаптером. Напряжение резонанса отмечает регистрирующий прибор в виде максимального отклонения стрелки. Собственная частота колебаний образца определяется по шкале лимба генератора.

Образцы имели незначительные искривления и их поперечное сечение было овальным с разницей максимального и минимального диаметров, достигающей до 0,2 мм. С целью уменьшения по-

грешности, вносимой небольшой овальностью, из формулы для определения модуля упругости фарфоровых образцов был исключен диаметр, и она получила вид:

$$E = 1,01 \cdot 10^{-3} \frac{VQ}{V^2} f_o^2, \quad (3)$$

где  $l$  — длина образца, см;  $Q$  — его вес, г;  $V$  — объем, определявшийся путем гидростатического взвешивания, см<sup>3</sup>;  $f$  — собственная частота колебаний образца, установленная по описанной методике.

При определении относительных изменений модуля упругости в зависимости от температуры в формулу (3) подставляются одни и те же исходные значения объема  $V$  и длины  $l$ , так как поправка, вносимая термическим расширением, ничтожна.

Погрешность определения модуля упругости по формуле (3) для образцов длиной 300 мм, весом 50...60 г и объемом 22...27 см<sup>3</sup> составляет при эталонном способе измерения частоты около 2%, а при определении относительных изменений модуля упругости в зависимости от температуры — еще меньше, так как относительные изменения модуля упругости определяются на одном и том же образце и погрешность, обычно вносимая измерением размеров и веса, исключается. Кроме того, изменение частоты с температурой определяется, как и при эталонном способе, при помощи одного лишь конденсатора настройки, градуированного с точностью до 1 гц. При этих условиях общая погрешность снижается и лежит в пределах 0,5...0,8%.

При сопоставлении резонансного и обычно применяющегося статического методов определения абсолютных и относительных изменений модуля упругости в зависимости от температуры керамических материалов можно отметить следующие преимущества резонансного метода:

1. Большая точность определения как абсолютных величин, так и относительных изменений модуля упругости в зависимости от температуры.

2. Простая геометрическая форма образцов, что для исследования керамических изделий имеет большое значение.

3. Независимость при высоких температурах истинного значения модуля упругости от скорости и времени деформации (отсутствие влияния релаксационных процессов).

**Модуль упругости и прочность на статический изгиб.** Механическая прочность, которой обладает фарфор, тесно связана с процессом спекания черепка, с уплотнением его. Экспериментальные исследования обнаружили, что модуль упругости, как и прочность, тесно связан с процессом спекания черепка (рис. 2). Кроме того, оказалось, что модуль упругости и прочность высоковольтного фарфора тесно связаны с характером структуры обожженного черепка: чем однороднее структура черепка, тем больше модуль упругости, а также прочность.

С целью выяснения влияния глазури на модуль упругости и прочность высоковольтного фар-

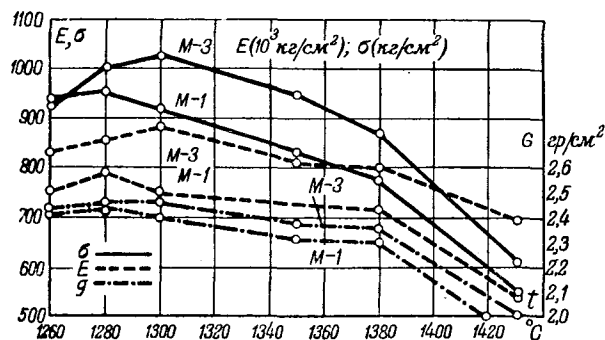


Рис. 2. Модуль упругости  $E$ , прочность на изгиб  $\sigma$  и объемный вес  $G$  в зависимости от конечной температуры обжига.

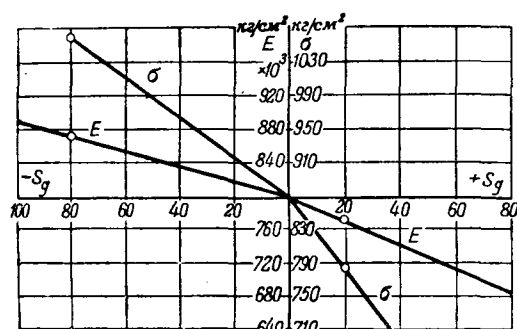


Рис. 3. Модуль упругости  $E$  и прочность на изгиб  $\sigma$  в зависимости от внутренних напряжений  $S_g$  в слое глазурь-черепок.

фора эти параметры были определены на образцах из высоковольтного фарфора, покрытых глазурями; были также определены внутренние напряжения в слое глазурь — черепок (рис. 3) по методике, разработанной в научно-исследовательском электрокерамическом институте (ГИЭКИ). Внутренние напряжения сжатия, обусловленные глазурями, повышают, а внутренние растягивающие напряжения уменьшают модуль упругости и прочность. Высоковольтный фарфор более чувствителен к растягивающим внутренним напряжениям, чем к напряжениям сжатию.

Для установления зависимости между модулем упругости и прочностью на изгиб высоковольтного фарфора были испытаны образцы из разных масс, обожженные при различных конечных температурах. Сперва определялся модуль упругости образца, а после образец разрезался на пять частей и каждая часть испытывалась на статический изгиб. Было испытано 40 серий образцов с различными значениями модуля упругости и прочности. В каждой серии модуль упру-

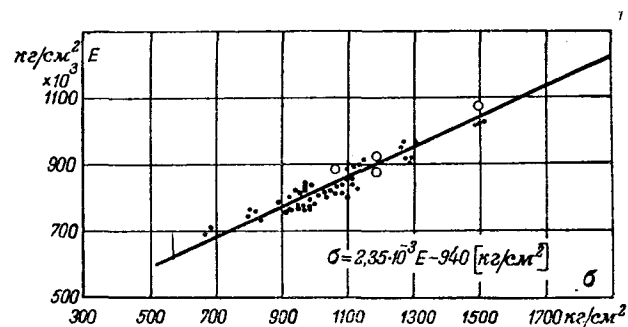


Рис. 4. Зависимость между модулем упругости  $E$  и прочностью на изгиб  $\sigma$  высоковольтного фарфора.

ги определялся как среднеарифметическое из значений для трех образцов, а прочность — как среднее для десяти образцов.

Модуль упругости и прочность высоковольтного фарфора прямо пропорциональны (рис. 4). По методу наименьших квадратов была получена эмпирическая формула, устанавливающая зависимость между модулем упругости и прочностью на изгиб:

$$\sigma = 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot E - 940 \text{ [кг/см}^2\text{]}.$$

Практика применения этой формулы показывает вполне удовлетворительное совпадение расчетных и фактических значений, полученных при испытании на изгиб (кружки на рис. 4). Однако в ряде случаев наблюдались отклонения в 8...10%, что указывает на необходимость дальнейшего накопления экспериментальных данных с целью уточнения зависимости между модулем упругости и прочностью на изгиб.

Таким образом, о прочности высоковольтного фарфора можно судить по его модулю упругости, который можно определить, не разрушая и не повреждая образца. Это обстоятельство позволяет путем определения на одном образце резонансным методом изменения модуля упругости под влиянием различных внешних факторов судить о поведении механической характеристики высоковольтного фарфора в этих же условиях.

#### Литература

1. Г. А. Степанов. К вопросу о структуре и свойствах силикатных материалов. Труды 4-го Совещания по экспериментальной минералогии и петрографии. Вып. 1, изд. АН СССР, 1951.
2. М. Борн и Гепперт-Мейер. Теория твердого тела. ОНТИ НКПТ СССР, 1938.
3. П. П. Кобеко. Аморфные вещества. Изд. АН СССР, 1952.
4. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Т. 1, изд. „Красное знамя“, Томск, 1937.

[23. 10. 1954]



# Электрические свойства стеатитовых материалов при повышенных температурах<sup>1</sup>

Кандидат техн. наук Х. С. ВАЛЕЕВ

Москва

В производстве различных высоковольтных и высокочастотных установочных деталей и изделий широкое применение получил стеатит.

Эксплуатационные параметры керамических высокочастотных материалов, таких как стеатит и ему подобные, и возможные области их использования при температуре до 100°С установлены ГОСТ 5458-50. На практике конструкторам часто приходится разрабатывать керамические изоляторы и изделия, предназначенные для использования в условиях, отличных от обусловленных стандартом, в том числе и при более высоких температурах. Между тем параметры стеатитовых материалов, характеризующие их поведение при повышенных температурах, еще недостаточно обследованы.

Для производства высоковольтных установочных деталей и изделий, как то: конденсаторов для высокочастотных электропечей, проходных изоляторов для ртутных выпрямителей, опорных изоляторов для аппаратуры, где требуется большая механическая прочность, и т. д., применяются стеатитовые массы марок ТК-21, СК-1, СКШ, М-7 и С-61. Эти массы различаются как по составу и свойствам, так и по технологии производства изделий из них. Наиболее широкое распространение получили марки ТК-21, СК-1 и СКШ.

Стеатитовый материал ТК-21, изготавливаемый на основе талька с кальциевой стеклофазой, используется для производства высоковольтных высокочастотных изоляторов с применением пластичной технологии: формовки, протяжки через мундштук, лепки и т. п. Из этого материала изготавливаются керамические изделия от малого до крупного габарита и достаточно сложной конфигурации.

Стеатитовые материалы С-61 и М-7 на основе талька с бариевой стеклофазой используются для изготовления высоковольтных высокочастотных изоляторов и других изделий: из материала С-61 изделия изготавливаются методом пластичной формовки, а из материала М-7 — методом литья в гипсовые формы.

Стеатитовые материалы СК-1 и СКШ — непластичные. Стеклофаза в обоих материалах содержит окись бария, а в материале СКШ, кроме того, имеются окислы железа за счет примесей, содержащихся в большом количестве в тальке, применяющемся для изготовления этого материала.

Керамические изделия и детали из материалов СК-1 и СКШ изготавливаются методами горячего литья под давлением или намораживанием в металлические формы. Метод горячего литья под давлением вакуумированного шликера наи-

более рациональный и распространенный, как позволяющий изготавливать малогабаритные изделия весьма сложной конфигурации с достаточно высокой точностью по размерам.

**Образцы и методика исследования.** При установлении параметров керамических материалов весьма важную роль играют форма, размеры и технология приготовления образцов для испытаний. Для получения сопоставимых результатов все образцы для испытания нами изготавливались теми же технологическими приемами, которые применяются для производства из них изделий. Размеры и форма образцов для стандартных испытаний соответствовали ГОСТ 5458-50. Некоторые параметры определялись на образцах других конфигураций. В частности, температурная зависимость  $\rho_n$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  при частоте 50 гц определялась на шлифованных дисках диаметром 100 мм и толщиной 1...2 мм с применением охранных колец. Зависимость  $\rho_n$  от напряженности электрического поля устанавливалась на образцах в виде конденсаторов горшкового типа с развитой поверхностью. Активные размеры (толщина и поверхность) такого конденсатора находились путем измерения его емкости и диэлектрической проницаемости испытуемого материала.

Пробивная напряженность электрического поля и ее температурная зависимость исследовались на образцах в виде дисков с лункой, обеспечивающих однородное электрическое поле в месте пробоя. Толщина образца в месте пробоя колебалась от 0,7 до 1 мм. Следует заметить, что образцы в виде плоских дисков с нанесенными электродами в его центре, рекомендуемые ГОСТ 5458-50 для определения  $E_{пр}$ , весьма неудачны; результаты, полученные на этих образцах, характеризуют не  $E_{пр}$ , а скорее степень неоднородности электрического поля. Следовало бы в установленном порядке предложить другие образцы, более пригодные.

Для изучения стойкости материалов к резким изменениям температуры использовались сплошные цилиндры диаметром и высотой 25 мм, как это принято в керамической технологии.

При измерении диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  использовались куметр типа КВ и мост переменного тока типа МДП. Для измерения  $\rho_n$  и  $\rho_n f(E)$  применялись высокоомный мегомметр типа RMLZ — 175, позволяющий измерить сопротивление до  $10^{13}$  ом, и метод непосредственного отсчета с применением зеркального гальванометра.

Температурные коэффициенты диэлектрической проницаемости и линейного расширения определялись на разработанных в Государственном электрокерамическом институте установках с применением гетеродинного волномера. Принцип определения температурного коэффициента расширения основан на измерении изменений

<sup>1</sup> Работа выполнена при участии М. Д. Мошкова и К. М. Стрельцова.

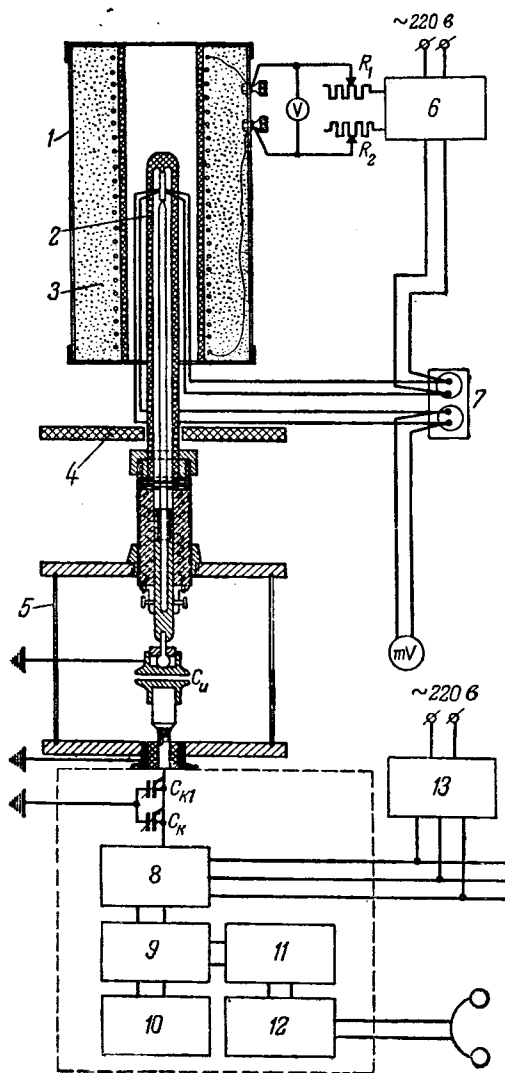


Рис. 1. Схема установки измерения температурного коэффициента линейного расширения с использованием гетеродинного волномера.

1 — образец; 2 — кварцевая трубка; 3 — кварцевый стержень; 4 — теплоизоляционный экран; 5 — экран; 6 — электронный терморегулятор; 7 — холодные спайки термопар; 8 — гетеродин; 9 — смеситель; 10 — кварцевый генератор; 11 — детектор; 12 — усилитель низкой частоты.

емкости воздушного конденсатора, одна из пластинок которого механически связана с измеряемым образцом (рис. 1). Расширению образца при нагревании сопутствует изменение емкости эталонного конденсатора, регистрируемое гетеродинным волномером. Такая установка позволяет измерять температурный коэффициент расширения как при отрицательных, так и при положительных температурах с чувствительностью до  $10^{-9} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$ .

Пробивная напряженность и ее температурная зависимость устанавливались на высоковольтной установке мощностью 5 кВа. При всех температурах пробой образцов производился в одной и той же среде — кремнийорганической жидкости, благодаря чему удалось повысить температуру до  $250^{\circ}\text{C}$  без явления разрядного характера. Подъем напряжения до пробивного значения

всегда осуществлялся через автоматический редуктор со скоростью 0,45 кв/сек. При каждом значении температуры пробивались не менее 10 образцов; иногда такие циклы измерений повторялись до 3 раз.

Количество стеклофазы определялось в полированных шлифах с применением травления [Л. 1], а показатель преломления — в иммерсионной жидкости<sup>2</sup>. Другие параметры определялись общепринятыми методами.

Известно, что диэлектрические и физико-механические свойства керамических материалов определяются как химической природой кристаллической и стекловидной фаз, так и их количественными соотношениями. Рассматриваемые нами стеатитовые материалы представляют собой совокупность кристаллической и стекловидной фаз. Основной кристаллической фазой для всех исследованных материалов является клинозистатит ( $\text{MgSiO}_3$ ) с показателем преломления  $N = 1,655 \dots \pm 0,002$ . Количественное соотношение между кристаллической и стекловидной фазами для различных стеатитовых материалов, как видно из табл. 1, колеблется в небольших пределах.

Таблица 1

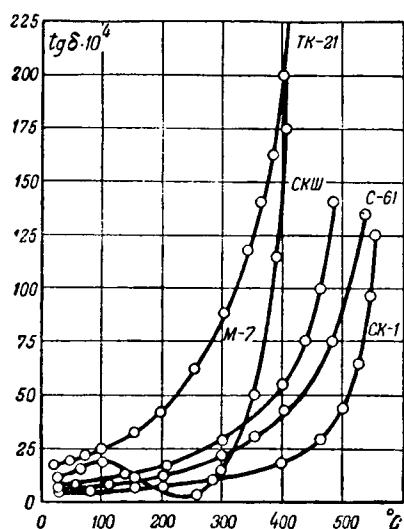
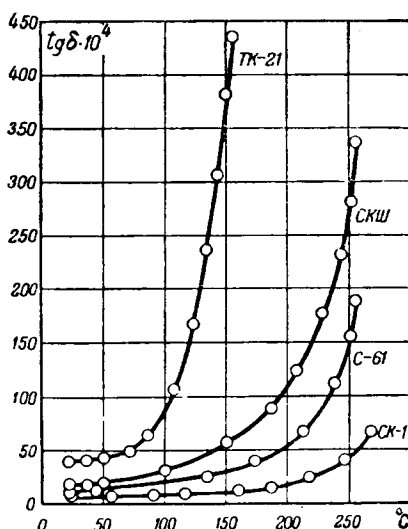
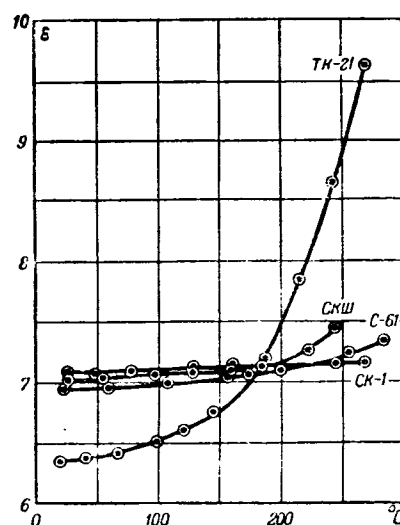
Марка массы	Показатель преломления стеклофазы $N$	Количество стеклофазы в материале, %	Характеристика стеклофазы
Т К-21 Заводской обжиг*	1,520	37	Кальциевая с относительно повышенным содержанием глинистых веществ
Лабораторный обжиг . . . . .	1,542	40	
С К-Ш Заводской обжиг	1,600	26	Бариевая с повышенным содержанием окислов железа
Лабораторный обжиг . . . . .	1,603	28	
М-7 Производственный обжиг . . . . .	1,575	35	Бариевая с пониженным содержанием глинистых веществ
С-61 Заводской обжиг	1,565	39	Бариевая с содержанием глинистых веществ
Лабораторный обжиг . . . . .	1,570	40	
СК-1 Производственный обжиг . . . . .	1,592	36	Бариевая с повышенным содержанием окиси бария

\* Заводские и производственные обжиги отличаются от лабораторных более длительными режимами нагрева и охлаждения образцов.

Характерно, что показатели преломления материалов с бариевой стеклофазой больше, чем кальциевой. Кроме того, с увеличением в составе материала глинистых веществ показатель стеклофазы  $N$  уменьшается.

Как известно, показатель преломления  $N$  связан с электронной поляризацией ионов и

<sup>2</sup> Количественное соотношение фаз и петрографические исследования проводил Э. И. Фрид — сотрудник руководимой автором лаборатории.

Рис. 2.  $\operatorname{tg} \delta$  в зависимости от температуры при частоте 1 мГц.Рис. 3.  $\operatorname{tg} \delta$  в зависимости от температуры при частоте 50 Гц.Рис. 4. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  в зависимости от температуры при частоте 50 Гц.

атомов ( $N^2 = \epsilon_\infty$ ), а перемещение их увеличивает и диэлектрическую проницаемость и диэлектрические потери, причем мера увеличения в сильной степени зависит от температуры.

На рис. 2...4 приведены температурные зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$  при частоте 50 Гц и 1 мГц для изучаемых материалов. Из кривых видно, что  $\operatorname{tg} \delta$  для масс ТК-21, СКШ и С-61 при 50 Гц больше, чем при 1 мГц, а характер изменения угла потерь с температурой при 1 мГц и 50 Гц одинаков для всех масс. При сравнительно малых температурах  $\operatorname{tg} \delta$  практически не изменяется, но при некоторой определенной для каждого материала температуре (температура заметного роста  $\operatorname{tg} \delta$ ), зависящей от частоты,

наблюдается резкое увеличение  $\operatorname{tg} \delta$ . Исключение составляет материал М-7, у которого в температурном ходе имеется минимум. Характерно, что температура заметного роста  $\operatorname{tg} \delta$  при 50 Гц значительно ниже (70°, 165°, 210° и 250°С соответственно для материалов ТК-21, СКШ, С-61 и СК-1), чем при 1 мГц (соответственно 225°, 410°, 435° и 490°С). Абсолютное значение  $\operatorname{tg} \delta$  от материала к материалу уменьшается с такой же последовательностью, с какой растет температура, соответствующая точке заметного роста  $\operatorname{tg} \delta$ .

Диэлектрическая проницаемость всех материалов при 50 Гц больше, чем при 1 мГц, и с увеличением температуры довольно медленно растет.

Зависимости удельного объемного сопротивления от температуры и напряженности электрического поля даны на рис. 5 и 6. Из рис. 5

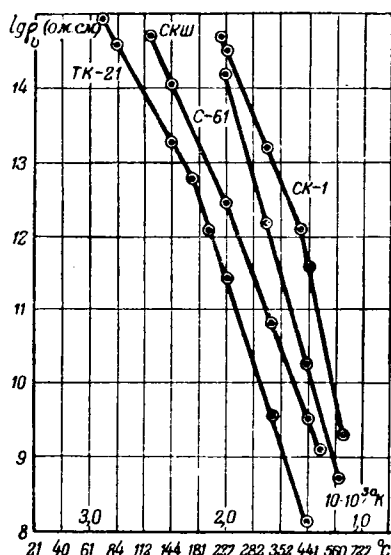


Рис. 5. Удельное объемное сопротивление в зависимости от температуры.

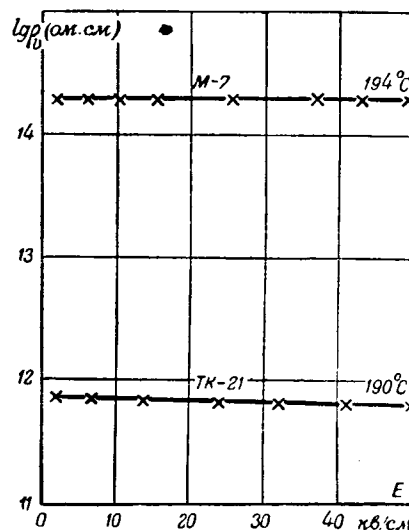


Рис. 6. Удельное объемное сопротивление в зависимости от напряженности поля.

видно, что удельное объемное сопротивление при переходе от одного материала к другому возрастает в той же последовательности, в какой уменьшается значение  $\lg \delta$ . Зависимость  $\rho_v = \varphi\left(\frac{1}{T}\right)$  — линейная, что свидетельствует об уменьшении  $\rho_v$  от температуры по логарифмическому закону. У материалов ТК-21 и СК-1 прямые  $\rho_v = \varphi\left(\frac{1}{T}\right)$  имеют изломы при температурах соответственно порядка 170° и 420°С в сторону более высоких температур. Значения энергии активации  $u$ , вычисленные по этим кривым, составляют для: ТК-21  $u=0,69$  и  $1,1$  эв (до и после излома); СК-1  $u=1,24$  и  $1,88$  эв; СКШ  $u=0,79$  и для С-61  $u=1,6$  эв.

Величина  $\rho_v$  всех материалов практически не зависит от напряженности электрического поля (до  $E=50$  кВ/см), что является закономерным [Л. 2] для твердых диэлектриков с ионным характером проводимости.

Полученные результаты измерения диэлектрических свойств  $\epsilon$ ;  $\lg \delta$ ;  $\rho_v$  стеатитовых материалов, очевидно, могут быть объяснены как результат процесса поляризации в кристаллической и стекловидной фазах.

Известно [Л. 3], что в большинстве твердых керамических материалов диэлектрическая проницаемость обусловлена быстро устанавливающейся поляризацией электронного и ионного смещения и тепловой ионной поляризацией, время установления которой значительно больше и зависит от частоты поля и температуры. Тепловая ионная поляризация вызвана наличием слабосвязанных ионов в составе материала. Различие свойств исследованных материалов объясняется составом и структурой стеклофазы материалов, так как кристаллическая фаза для всех материалов в основном остается постоянной.

Положительный знак  $TK\epsilon$  и условие  $\epsilon \gg N^2$  для всех материалов, очевидно, указывает на наличие значительной доли поляризации ионного смещения и тепловой ионной поляризации. Заниженное значение  $N$  и  $\epsilon$  в материале ТК-21 по сравнению с другими материалами, повидимому, объясняется также и меньшей электронной поляризуемостью ионов кальция ( $\alpha_e=0,531 \times 10^{-24}$  см<sup>3</sup>) по сравнению с электронной поляризуемостью ионов бария ( $\alpha_e=1,69 \cdot 10^{-24}$  см<sup>3</sup>), содержащихся в стеклофазе материалов.

Основным источником диэлектрических потерь в керамическом материале служит его стекловидная фаза, так как потери в кристаллической фазе в основном обусловлены проводимостью, которая невелика. Так же как и в стеклах, диэлектрические потери в стеклофазе могут складываться из потерь проводимости, релаксационных и структурных потерь [Л. 3]. Релаксационные потери в твердых диэлектриках, как известно, характеризуются частотным и температурным максимумами  $\lg \delta$ . Положение этих максимумов зависит от времени релаксации и энергии активации релаксирующих

частиц. В некоторых случаях максимум  $\lg \delta$  может быть размытым за счет резкого возрастания потери проводимости от температуры. В других случаях, когда проводимость мала, в частности для материала М-7, имеет место явно выраженный максимум  $\lg \delta$  при температуре около 100°С. Явно выраженные релаксационные потери в керамических материалах [Л. 4, 5] и в стекле [Л. 6] наблюдаются как при низких (50—80°К), так и при относительно высоких (800°К) температурах. Такие потери имеют место [Л. 6] также в чистом прозрачном кристаллическом тальке ( $3Mg \cdot 0,4SiO_2 \cdot H_2O$ ) и обусловлены ориентацией полярных молекул кристаллизационной воды.

В спеченных же стеатитовых материалах, где полностью отсутствует кристаллизационная вода, такие потери, очевидно, обусловлены колебаниями и перемещениями слабосвязанных ионов бария, кальция и щелочными ионами, содержащимися в стеклофазе. Колебания и перемещения ионов, повидимому, обусловлены энергией связи и размерами релаксирующих частиц. Стеклофаза материалов СК-1, С-61 и М-7 содержит ионы бария, ТК-21 — ионы кальция, а СКШ — ионы бария и железа. Радиусы ионов бария (1,35А°) больше ионов кальция (0,99 А°) и ионов железа (0,67 А°). Поэтому диэлектрические потери в стеатитах СК-1, С-61 и М-7 меньше, чем в ТК-21 и СКШ.

Диэлектрические потери в стеатитовых материалах, обусловленные электропроводностью, всегда имеются, но они малы (табл. 2).

Таблица 2

Индексы массы	$\rho_v$ (100°С), ом·см	$\epsilon$ (50 гц и 100°С)	$\lg \delta$ при 50° гц и 100°С	
			измеренный	расчетный
ТК-21	$2 \cdot 10^{14}$	6,5	$90 \cdot 10^{-4}$	$28 \cdot 10^{-6}$
СКШ	$1 \cdot 10^{15}$	7,03	$22 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$
С-61	$>10^{15}$	7,0	$12 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$
СК-1	$>10^{15}$	7,06	$7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Электрическая прочность сильно зависит от структуры и степени однородности диэлектрика. Для керамических материалов, состоящих из различных фаз и с закрытой пористостью, особенно характерна большая неоднородность. Закрытые поры образуются главным образом в момент спекания керамического материала, остаточное давление в них не более 30% атмосферного. В порах напряженность электрического поля превышает среднее поле в диэлектрике, и эта разница тем больше, чем выше диэлектрическая проницаемость. Разреженный газ в порах под действием электрического поля ионизируется и диэлектрик как бы заполняется проводящими частицами. При каком-то количестве пор напряженность поля в керамическом диэлектрике может значительно возрасти, что и приведет к пробое. Закрытая пористость керамического материала и, следовательно, уменьшение его  $E_{np}$  зависят от технологии изготовления образцов.



Таблица 3

Метод приготовления образцов	Действующее значение пробивной напряженности, кВ/мм			Отношения значений пробивной напряженности	
	наименьшее	среднее	наибольшее	наибольшего к наименьшему	наибольшего к среднему
Вакуумированная масса					
Формовка и токарная обработка	14,0	22,8	28,4	2,03	1,63
Формовка и лепка	17,0	25,0	29,0	1,71	1,47
Прессформовка	26,8	29,0	32,3	1,2	1,11
Невакуумированная масса					
Формовка и токарная обработка	10,6	13,4	20,6	1,94	1,54
Формовка и лепка	11,4	15,5	20,7	1,82	1,36
Прессформовка	16,4	19,5	22,8	1,39	1,19

Согласно табл. 3, наименьшая напряженность  $E_{пр}$  свойственна образцам, изготовленным из невакуумированной массы методом формовки с последующей обработкой их на токарном станке для получения заданной формы (вытачивание лунок), а наибольшая — образцам, изготовленным из вакуумированной массы методом прессформовки (формование лунок с вращающейся металлической сферой).

Высокие значения  $E_{пр}$  с небольшими разбросами получают также на образцах, приготовленных методом литья вакуумированного шликера в гипсовые и металлические формы. При исследовании  $E_{пр}$  стеатитовых материалов образцы были изготовлены теми технологическими приемами, которые обеспечивали возможность получения оптимальных значений  $E_{пр}$ .

Как отмечалось,  $E_{пр}$  и ее температурная зависимость исследовались как при переменном, так при постоянном напряжении. На рис. 7 приведены температурные зависимости  $E_{пр}$  при переменном напряжении для стеатитовых материалов СК-1, С-61, М-7, СКШ и ТК-21. Наибольшей напряженностью  $E_{пр}$  обладает материал СК-1, а наименьшей — ТК-21 (рис. 7). Температурный ход  $E_{пр}$  в интервале 20...250°C для

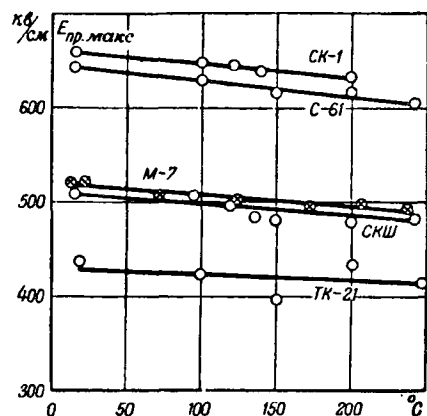


Рис. 7. Пробивное значение (амплитудное) напряженности электрического поля частоты 50 гц в зависимости от температуры.

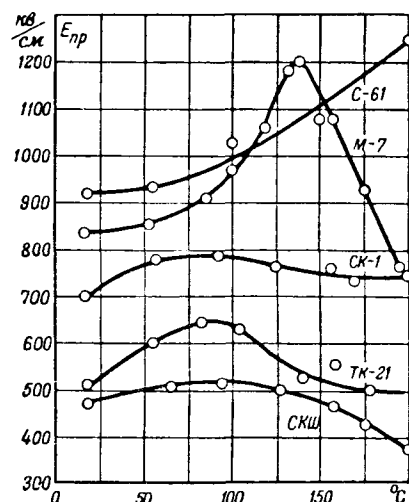


Рис. 8. Пробивное значение напряженности электрического поля в зависимости от частоты (постоянное поле).

всех материалов одинаков и значение  $E_{пр}$  при конечной температуре отличается от значения  $E_{пр}$  при 20°C не более чем на 5%.

На рис. 8 приведены температурные зависимости  $E_{пр}$  для этих же материалов при постоянном напряжении. Значения напряженности  $E_{пр}$  и характер ее изменения в зависимости от температуры резко отличаются при постоянном и при переменном напряжении. Прежде всего при постоянном напряжении для всех материалов имеет место общая закономерность, а именно  $E_{пр}$  с увеличением температуры сначала растет, затем, достигнув максимального значения при определенной для каждого материала температуре, начинает уменьшаться. Крутизна кривой различна для каждого материала. Далее, значение  $E_{пр}$  при постоянном напряжении значительно больше, чем при переменном. Характерно, что при постоянном напряжении наибольшим значением  $E_{пр}$  обладает материал С-61, а не материал СК-1, как это имеет место при переменном напряжении, а наименьшим — материал СКШ, а не ТК-21.

Аналогичный ход изменения  $E_{пр}$  от температуры при переменном и импульсном напряжении наблюдался и другими исследователями [Л. 8, 9] для простых кубических и смешанных кристаллов. Такой аномальный ход  $E_{пр}$  по температуре авторы объясняют изменением длины пути свободного пробега электронов под действием тепловой энергии. Однако справедливость этой и других теорий вызывает серьезные возражения.

Анализ различных теорий электрического пробоя дан в работе [Л. 10]. Следует заметить, что в настоящее время общепризнанной теории электрического пробоя нет. Исследования А. А. Воробьева и Е. К. Завадовской [Л. 11... 13] показали, что электрическая прочность кристаллов щелочно-галогидных соединений возрастает с увеличением энергии решетки, энергии

ионизации атома и энергии сродства атома к электрону, причем между величиной  $E_{np}$  и энергией решетки имеется линейная зависимость.

Температура мало влияет на величину энергии кристаллической решетки. В связи с этим увеличение электрической прочности с ростом температуры за счет увеличения тепловой энергии кристалла маловероятно. Экспериментально наблюдаемое значительное возрастание  $E_{np}$  с повышением температуры для различных кристаллов и для стеатитовых материалов при постоянном напряжении не согласуется с существующими теориями. Наблюдаемое для всех марок стеатитовых материалов повышенное значение электрической прочности и ее рост с увеличением температуры при постоянном напряжении и постоянство  $E_{np}$  с ростом температуры при переменном напряжении, очевидно, связано с процессом установления э. д. с. высоковольтной поляризации, т. е. со вторичными явлениями. Величина и время установления э. д. с. поляризации, как известно, зависят от однородности диэлектрика, от величины приложенного поля и от температуры, причем с увеличением температуры время установления поляризации уменьшается. С другой стороны, при повышенных температурах э. д. с. поляризации начинает уменьшаться вследствие рассасывания объемных зарядов. Образование э. д. с. поляризации приводит к уменьшению эффективного поля в диэлектрике. Поэтому пробой может произойти при более высоком напряжении, а степень установления э. д. с. поляризации и ее уменьшение с повышением температуры соответственно обуславливают в начале рост, а затем снижение электрической прочности неоднородного диэлектрика. Стеатиты С-61, М-7, ТК-21,готавливаемые из смесей сырых и обожженных материалов, менее однородны; время установления э. д. с. поляризации в них достигает до 10 и более минут, тогда как стеатиты СК-1 и СКШ,готавливаемые двукратным обжигом, более однородны и время установления э. д. с. поляризации в них не превышает 1 мин. Очевидно, по этой причине в первых трех материалах значение  $E_{np}$  при постоянном и переменном напряжениях значительно разнится, а в температурном ходе  $E_{np}$  имеет место явно выраженный максимум, тогда как в материалах СК-1, СКШ эти особенности выражены менее отчетливо.

Основные параметры стеатитовых материалов приведены в табл. 4. При выборе материала для конструирования и производства изоляторов следует иметь в виду, что приведенные в таблице значения параметров относятся к образцам, изготовляемым для испытания, и, естественно, не могут полностью распространяться на выпускаемые изделия, свойства которых, как известно, зависят и от ряда других факторов, не типичных для исследованных образцов. Необходимо также учитывать технологические возможности изготовления изделий и условия их работы в эксплуатации.

Материал ТК-21, как наиболее стойкий к резким изменениям температур, следует применять

Таблица 4

Сводная таблица электрических и физико-механических свойств стеатитовых материалов

Наименование свойств	ТК-21	СКШ-8326	С-61	СК-1
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ при частоте 50 гц . . .	6,4	7,0	6,9	7,05
То же, при частоте 1 мгц . . . . .	6,35	6,5	6,6	6,5
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости при частоте 2 мгц . . . . .	$+125 \cdot 10^{-6}$	$+90 \cdot 10^{-6}$	$+80 \cdot 10^{-6}$	$+80 \cdot 10^{-6}$
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ при частоте 1 мгц и температуре, °С:				
20 . . . . .	17	8	6	6
80 . . . . .	24	11	8	7
100 . . . . .	27	11	8	7
200 . . . . .	40	18	12	8
300 . . . . .	87	29	23	11
400 . . . . .	200	55	42	19
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ при частоте 50 гц и температуре, °С:				
20 . . . . .	40	17	9	6
100 . . . . .	90	22	14	7
200 . . . . .	1 000	84	53	16
Удельное объемное сопротивление $\rho_v$ , ом·см, при температуре, °С:				
100 . . . . .	$2 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	$> 10^{15}$	$> 10^{15}$
200 . . . . .	$7 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{15}$	$> 10^{15}$
300 . . . . .	$8 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{14}$
400 . . . . .	$3 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{12}$
Пробивная напряженность электрического поля (ампл.) при частоте 50 гц, кв/см, при температуре, °С:				
20 минимальная . . . . .	395	395	570	585
средняя . . . . .	425	570	640	645
100 минимальная . . . . .	385	395	540	540
средняя . . . . .	420	500	620	640
200 минимальная . . . . .	415	395	510	510
средняя . . . . .	575	485	610	630
Пробивная напряженность электрического поля при постоянном напряжении, кв/см, при температуре, °С:				
20 минимальная . . . . .	425	395	815	505
средняя . . . . .	510	470	925	700
100 минимальная . . . . .	530	405	875	500
средняя . . . . .	630	515	960	775
200 минимальная . . . . .	390	335	1 120	555
средняя . . . . .	500	385	1 230	750
Температурный коэффициент линейного расширения при температуре, °С:				
100 . . . . .	6,1	7	6,7	6,5
200 . . . . .	6,9	8,2	7,5	7,2
300 . . . . .	7,2	8,3	7,7	7,3
Предел прочности при статическом изгибе, кг/см <sup>2</sup> :				
средн. . . . .	1 590	1 470	1 470	1 560
мин. . . . .	1 460	1 380	1 490	1 380
Стойкость к термическим ударам, °С	134	118	114	112
Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	2,912	3,118	3,080	3,185
Температура обжига, °С . . . . .	1 290	1 310	1 320	1 190

для изготовления относительно крупногабаритных изоляторов для наружной установки. Материал СКШ по электрическим свойствам значи-

# Применение кремнийорганической изоляции в электрических машинах

Член-корр. АН СССР К. А. АНДРИАНОВ и кандидат техн. наук В. И. КАЛИТВЯНСКИЙ

Москва

Изоляция электрических машин и аппаратов в процессе эксплуатации подвергается комплексному воздействию электрического поля, нагрева, влаги, механических усилий, пониженных температур, а в некоторых отраслях промышленности также воздействию активных химических веществ, смазочных масел, паров бензина и др. При этом в изоляционных материалах возникают как обратимые, так и необратимые физико-химические процессы, приводящие к ухудшению физических, механических и диэлектрических характеристик изоляции.

Особенно сильное воздействие на изоляцию, содержащую органические компоненты, оказывает нагрев. Даже при допустимых для данного класса изоляции температурах в органической части изоляционных материалов происходит термоокислительная деструкция, приводящая к прогрессирующему ухудшению в первую очередь механических характеристик, а также влагостойкости и электрической прочности изоляции, т. е. к ее старению. Снижается надежность изоляции и увеличивается вероятность ее разрушения, а значит и статистическая вероятность выхода машины из строя.

В нормальных условиях эксплуатации, когда нагревы обмоток электрических машин и аппаратов не превосходят допустимых для данного класса изоляции, срок жизни изоляции достаточно велик. Это обеспечивает бесперебойную работу электрооборудования в течение 15—20 лет, после чего состояние изоляции настолько ухудшается, что она в большинстве случаев нуждается в замене.

Однако в ряде отраслей промышленности, таких, как угольная, металлургическая и химиче-

ская, а также на электрифицированном транспорте и пр. электрические машины часто работают в таких режимах, что изоляция их подвергается нагреву, который превосходит допустимый для данного класса изоляции при одновременном возможном воздействии повышенной влажности, а иногда и воды, значительных механических напряжений и коммутационных перенапряжений, а в некоторых случаях также воздействию активных химических реагентов, вибраций, ударов, пыли, копоти, низких температур и др. В этих условиях происходит интенсивная деструкция изоляционных органических материалов, сроки жизни изоляции резко сокращаются, что приводит к преждевременному выходу электрооборудования из строя.

По данным Министерства угольной промышленности, срок жизни изоляции врубных электродвигателей с изоляцией класса В в среднем не превышает 6 мес. По тем же данным по причине преждевременного выхода из строя изоляции ежегодно в системе Министерства угольной промышленности перематывается около трети эксплуатируемых электродвигателей. Статистические данные об аварийности электрических машин в металлургической промышленности [Л. 1] показывают, что средний срок службы электродвигателей без перемотки составляет около 2 лет, а в отдельных цехах с тяжелым режимом работы еще меньше. Невелик срок службы изоляции и у тяговых электродвигателей. По данным Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта средний пробег тяговых электродвигателей ДПЭ-340 до выхода из строя изоляции не превосходит 525 тыс. км, а в некоторых случаях он составляет всего 80 ... 100 тыс. км.

тально лучше, чем материал ТК-21, но менее стоек к резким изменениям температуры. Этот материал следует использовать для изготовления изделий для внутренней установки.

Материалы С-61 и М-7, обладающие высокими электрическими и механическими свойствами, пригодны для изготовления изделий относительно больших размеров. Изделия из этих материалов могут быть использованы для работы при температуре до 200°С при условии плавного подъема температуры.

Малогабаритные изделия заданной формы из материала СК-1 могут быть использованы для работы при температуре до 300°С при плавном ее нарастании.

Пользуясь случаем выразить благодарность проф. Н. Г. Дроздову за постоянный интерес и обсуждение затронутых в статье вопросов.

## Литература

1. Г. Н. Воронков и Э. И. Фрид. Статья в сборнике „Тальк“. Промстройиздат, 1952.

2. Я. И. Френкель. Современные представления о природе диэлектриков, Электричество, № 8, 1947.

3. Г. И. Сканапи. Диэлектрическая поляризация и потери в стеклах и керамических материалах с высокой диэлектрической проницаемостью. Госэнергоиздат, 1952.

4. Х. С. Валеев. Высоковольтные высокочастотные стеатитовые конденсаторы, Электричество, № 3, 1949.

5. Г. И. Сканапи и А. И. Демешина. ЖЭТФ, № 1, 1949.

6. В. А. Иоффе. ЖТФ, т. XXIV, вып. 4, 1954.

7. К. А. Водопьянов. ЖТФ, т. XXIV, вып. 1, 1954.

8. A. Hippel. J. Appl. Phys., 8, 815, 1937.

9. A. Hippel, R. S. Alger. Phys. Rev., 76, 127, 1949.

10. А. А. Воробьев и Е. К. Завадовская. Известия Томского политехнического института, т. 71, 1952.

11. А. В. Воробьев. Техника высоких напряжений, Госэнергоиздат, 1945.

12. А. А. Воробьев и Е. К. Завадовская. ДАН, 81, 375, 1951.

13. Е. К. Завадовская. ДАН, 82, 709, 1952; 82, 565, 1952.

[1.11.1954]



Возникает вопрос, почему же в приведенных выше, а также других случаях срок жизни изоляции электрооборудования невелик.

Основной причиной преждевременного выхода из строя изоляции электрооборудования, работающего в тяжелых условиях эксплуатации, является интенсивное разрушение ее органической части, приводящее к ухудшению механических и диэлектрических характеристик, а также влагостойкости. До настоящего времени для пропитки, склеивания и покрытия изоляцией электрических машин и аппаратов применяются органические высокомолекулярные продукты; смолы, лаки, эмали и компаунды. Так, для клейки слюдяных электроизолирующих материалов (миканитов, микаленты, микафолы) применяются битумно-масляные и глифталевые лаки. При воздействии повышенных температур в пленках этих лаков происходят термоокислительные процессы, приводящие к ухудшению эластичности, механической прочности, адгезии, влагостойкости, электрической прочности и других характеристик. Ухудшение характеристик лаковых пленок приводит к соответствующему ухудшению и изоляции в целом, а значит снижению ее надежности.

Пленки широко применяемых в электротехнической промышленности битумно-масляных лаков быстро теряют эластичность даже при 105° С. Так, пленка битумно-масляного лака № 458 уже через 6 час нагрева при 105° С дает трещины при перегибе образца на стержне диаметром 3 мм. Несколько более высокую теплостойкость имеют глифталевые лаки. Однако и эти лаки быстро стареют при температуре выше 120 ... 130° С. Поэтому применение органических лаков даже в сочетании со слюдой, асбестом и стекловолокном не дает возможности решения задач, связанных с повышением надежности и увеличением сроков службы изоляции электрических машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

Для получения более нагревостойкой и более надежной изоляции электрических машин необходимо заменить органические лаки и компаунды такими, которые в самых тяжелых условиях эксплуатации сохраняли бы свои характеристики на уровне, обеспечивающем их надежную работу. К числу таких материалов относятся кремнийорганические соединения (полиор-

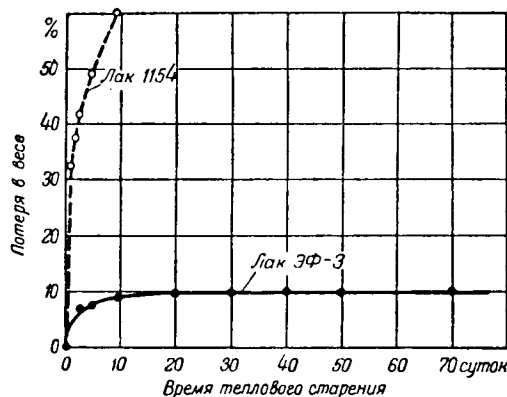


Рис. 1. Потеря в весе пленок лака ЭФ-3 и лака типа 1154 в процессе теплового старения.

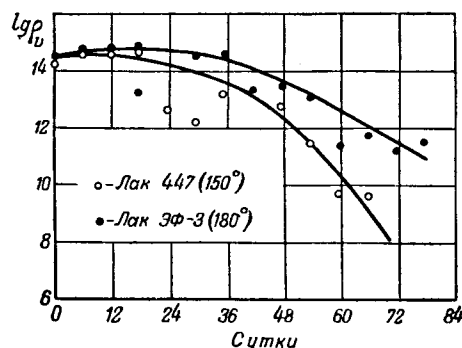


Рис. 2. Изменение объемного сопротивления лаковых пленок в процессе теплового старения (измерение сопротивления в ом-см производилось после двухсуточной выдержки в гигростате).

ганосилоксаны), которые находят все более широкое применение в Советском Союзе и за границей [Л. 2 ... 9].

Кремнийорганические лаки (ЭФ-3, ЭФ-5, К-44, К-47 и др.) обладают значительно более высокой нагревостойкостью по сравнению с органическими лаками. Если теплостойкость битумно-масляных лаков, определенная по потере эластичности пленки, не превосходит при температуре 100° С десятков часов, а глифталевых лаков — сотен часов, то у полиметилфенилсилоксановых лаков теплостойкость достигает сотен часов при температуре 200° С. Таким образом кремнийорганические лаки длительно сохраняют эластичность лаковой пленки при температуре, вдвое более высокой (200° С), чем у органических лаков (100° С).

Из кривых рис. 1, где приведена кривая потери веса пленок в процессе нагревания при 200° С кремнийорганического лака ЭФ-3, а также для сравнения пленок глифталевых лаков типа 1154 следует, что кремнийорганические лаки значительно более стойки к термоокислительной деструкции.

Влаго- и водостойкость пленок органических (битумно-масляных) высока только в исходном состоянии (после соответствующей сушки). При тепловом старении влаго- и водостойкость органических лаков резко уменьшается, в то время как у кремнийорганических лаков она сохраняется на высоком уровне (рис. 2).

Использование нагревостойких кремнийорганических лаков для изоляции электрических машин позволяет, с одной стороны, значительно повысить надежность и сроки жизни изоляции, с другой, — повысить на 50° С и выше рабочие нагревы обмоток по сравнению с изоляцией класса В, которая состоит из слюдяных, асбестовых или стекловолокнистых материалов, связанных, пропитанных и покрытых органическими лаками и компаундами.

Продолжительный опыт применения кремнийорганических материалов для изоляции электрических машин позволяет подвести некоторые итоги и сделать ряд весьма важных выводов. Ниже приводятся данные, характеризующие эффективность применения кремнийорганических материалов в ряде типов электрических машин.

**Врубные электродвигатели (МА-191/3, МА-191/10 и МА-191/11).** Условия эксплуатации электродвигателей врубных машин и угольных комбайнов значительно отличаются от условий работы электродвигателей в других отраслях промышленности как по характеру нагрузки (частые пуски и реверсы, значительные перегрузки), так и по тем крайне неблагоприятным условиям, в которых находятся эти электродвигатели (высокая влажность, возможность попадания на изоляцию шахтной воды, смазки из редуктора, угольной пыли).

Частые пуски и реверсы, а также перегрузки влекут за собой повышенные перегревы статорной обмотки врубных электродвигателей, что приводит к необратимому тепловому разрушению органической части изоляции, а значит и изоляции в целом. Поэтому даже при использовании для этих электродвигателей изоляции класса В (миканитовая компаундированная изоляция на органических лаках) срок их службы мал.

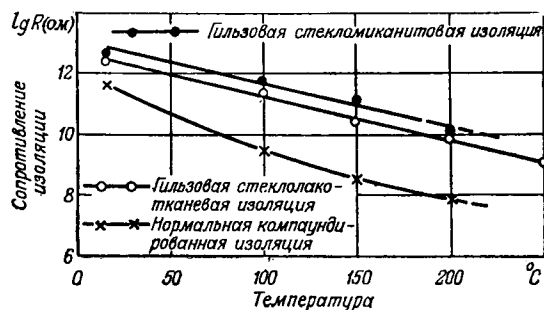


Рис. 3. Сопротивления основной изоляции секции в зависимости от температуры.

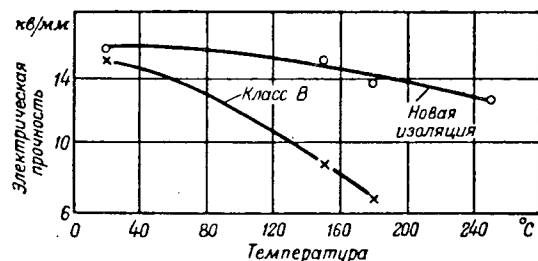


Рис. 4. Электрическая прочность основной изоляции секции в зависимости от температуры.

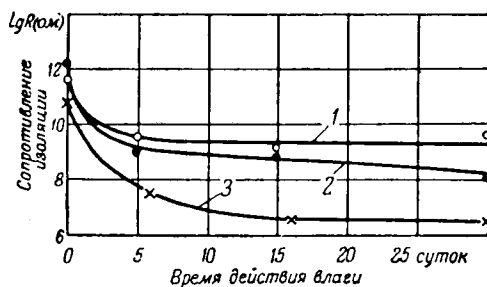


Рис. 5. Сопротивление основной изоляции секции в зависимости от длительности воздействия влаги.

1 — непрерывная стекломиканитовая изоляция; 2 — гильзовая стеклолакотканевая изоляция; 3 — гильзовая компаундированная изоляция класса В.

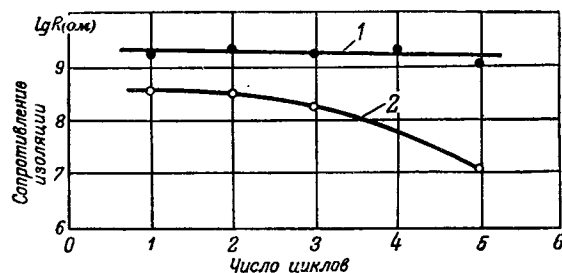


Рис. 6. Изменение сопротивления изоляции электродвигателя в процессе циклического воздействия повышенной температуры (5 суток в каждом цикле) и последующего выдерживания при 95...98% относительной влажности (трое суток в каждом цикле).

1 — кремнийорганическая изоляция, тепловое старение при 200° С; 2 — микалентная изоляция, тепловое старение при 125° С.

Уже прошло несколько лет, как советская промышленность разработала новую более совершенную изоляцию для врубных электродвигателей, базирующуюся на использовании кремнийорганических лаков в сочетании со слюдой и стекловолокнистыми материалами. Сравнительные испытания статорных секций с изоляцией класса В и секций, изолированных кремнийорганическими материалами, показали, что:

1) кремнийорганическая изоляция имеет более высокие электрические сопротивления и пробивную прочность по сравнению с миканитовой изоляцией класса В при повышенных температурах (рис. 3 и 4), а также после длительного воздействия влаги (рис. 5);

2) после 30-суточного выдерживания секций в термостате с температурой 200° С секции с кремнийорганической изоляцией сохраняют достаточно высокую электропрочность, в то время как изоляция класса В разрушается при этой температуре;

3) значительные преимущества кремнийорганической изоляции установлены также при циклическом воздействии повышенных нагревов (5 суток при 200° С) и высокой влажности [95...98% относительная влажность в течение трех суток (рис. 6)];

4) кремнийорганическая изоляция статорных секций более длительно сохраняет свою эластичность при повышенных температурах, чем секции с изоляцией класса В (рис. 7); эластичность изоляции характеризуется ее электрической прочностью после теплового старения и изгиба изоляции секции вокруг оправки диаметром 300 мм;

5) кремнийорганическая изоляция значительно лучше противостоит истиранию как в исходном состоянии, так и после теплового старения;

6) кремнийорганическая изоляция достаточно хорошо противостоит воздействию смазки (смесь машинного масла и солидола или консталина), что выгодно отличает ее от немаслостойкой компаундированной изоляции класса В.

Так как при испытании отдельных секций практически не представляется возможным полностью воспроизвести комплексное воздействие всех тех основных факторов (нагрев, электрическое поле, механические усилия, влага, смазка, угольная пыль и др.), которые имеют место в дей-

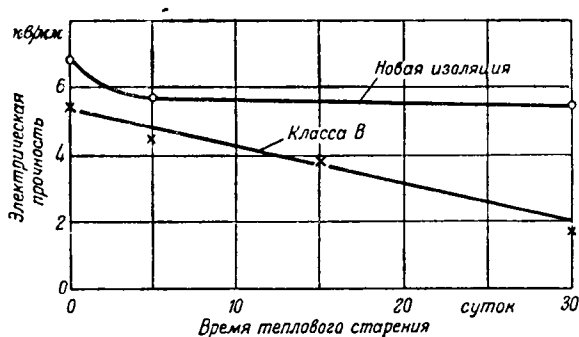


Рис. 7. Электрическая прочность основной изоляции секции после теплового старения и последующего изгиба вокруг оправки диаметром 300 мм.

ствительных условиях эксплуатации, то были проведены специальные сравнительные испытания врубных электродвигателей с кремнийорганической изоляцией и с изоляцией класса В. При этих испытаниях электродвигатели работали в следующих последовательно чередующихся режимах:

1. Режим непрерывных реверсов при номинальном напряжении и номинальной скорости вращения. В этом режиме температура обмотки врубных электродвигателей с кремнийорганической изоляцией достигала  $220^{\circ}\text{C}$ , а с обычной изоляцией доводилась только до  $130^{\circ}\text{C}$ , так как при более высокой температуре из этой изоляции вытекает битумный компаунд.

2. Форсированное охлаждение в режиме холостого хода при пониженном напряжении.

3. Введение внутрь статора смеси, состоящей из машинного масла (30%), солидола (30%), воды (25%) и угольной пыли (всего 10...15 л).

Испытание проводилось до выхода испытуемого врубного электродвигателя из строя по дефектности изоляции. Критерием для оценки состояния изоляции являлась величина сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса. Относительная степень надежности определялась общим количеством реверсов, которое выдерживал испытуемый электродвигатель до его выхода из строя по дефектности изоляции.

На рис. 8 приведены кривые, характеризующие относительную надежность кремнийорганической (кривые 1, 2) и обычной изоляции (кривые 3, 4). Из кривых следует, что срок службы

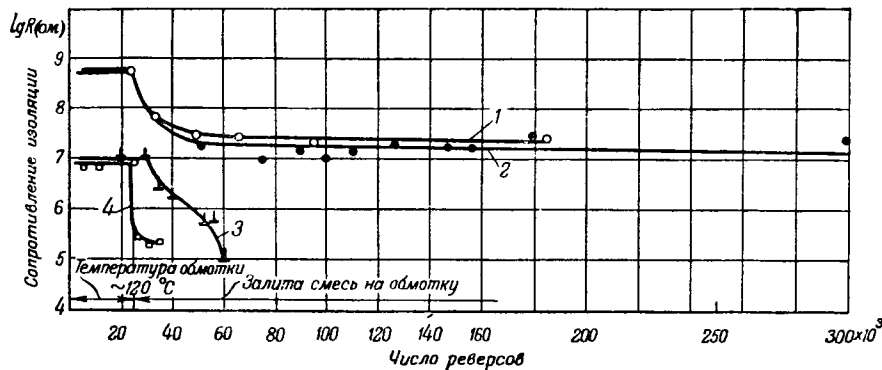


Рис. 8. Сопротивление изоляции врубных электродвигателей при циклическом испытании.

1 и 2 — кремнийорганическая изоляция; 3 и 4 — изоляция класса В.

кремнийорганической изоляции даже при более высоких перегревах (до  $200^{\circ}\text{C}$ ) значительно выше, чем при перегревах до  $100^{\circ}\text{C}$  у слюдяной изоляции, содержащей органические лаки и битумный компаунд.

Длительный опыт эксплуатации врубных электродвигателей с кремнийорганической изоляцией показал, что этот новый вид изоляции является значительно более надежным в наиболее тяжелых условиях эксплуатации. В ряде случаев в эксплуатации наблюдается выплавление алюминиевой роторной обмотки, тогда как кремнийорганическая изоляция статорной обмотки при этом сохраняет высокую надежность, и после замены ротора электродвигатель снова вводится в работу.

Несмотря на более высокую стоимость кремнийорганической изоляции, ее применение во врубных и других электродвигателях, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, дает значительный экономический эффект благодаря большому увеличению срока службы изоляции. Поэтому все врубные электродвигатели изготавливаются сейчас заводами электротехнической промышленности только с кремнийорганической изоляцией. Кремнийорганическая изоляция применяется также и при ремонтах врубных электродвигателей старой конструкции.

**Электродвигатели с влагостойкой изоляцией.** Воздействие допустимых и особенно повышенных нагревов на изоляцию, содержащую органические лаки и компаунды, приводит к снижению ее влагостойкости. Поэтому даже в тех случаях, когда изоляция электродвигателей выполнена на основе слюдяных материалов, содержащих органические компоненты, и в исходном состоянии обладает высокой влагостойкостью, она теряет первоначальную влагостойкость, а значит и надежность в условиях эксплуатации.

Значительное повышение надежности изоляции электрических машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, когда их изоляция подвергается воздействию высокой влажности, воды, значительных механических усилий (вибрация, удары), повышенных нагревов и пр., может быть достигнуто путем применения стеклослюдяной кремнийорганической изоляции.

В результате длительных сравнительных испытаний асинхронных электродвигателей с кремнийорганической изоляцией, а также с изоляцией классов А, В и ВС (стеклослюдяная изоляция на органических лаках), при которых изоляция подвергалась воздействию повышенных нагревов, высокой влажности, воды, паров масла, механических усилий и коммутационных перенапряжений, установлено, что:

1) сопротивление кремнийорганической изоляции в горячем состоянии значительно выше, чем у обычной, в том числе и у стеклослюдяной на органических лаках;

2) нагревостойкость кремнийорганической изоляции на  $70 \dots 80^\circ\text{C}$  выше, чем у изоляции класса А;

3) кремнийорганическая изоляция сохраняет высокую механическую прочность после длительного воздействия высоких температур ( $180^\circ\text{C}$  и выше);

4) кремнийорганическая изоляция имеет высокое сопротивление после увлажнения не только в исходном состоянии, а также, что весьма важно, после длительного теплового старения при повышенных температурах;

5) кремнийорганическая изоляция более водостойкая, чем стеклослюдавая изоляция на органических лаках;

6) кремнийорганическая изоляция сравнительно более огнестойкая;

7) применение кремнийорганической изоляции в электрических машинах при одинаковых перегревах, установленных для классов В и ВС, позволяет значительно повысить надежность изоляции по сравнению с изоляцией классов А, В и ВС в условиях комплексного воздействия высокой влажности, воды и механических усилий, возникающих при частых пусках и реверсах, переменных нагревах и охлаждениях, а также передаваемых извне (вибрации, удары).

**Роторы турбогенераторов.** Изоляция роторов турбогенераторов подвергается воздействию весьма значительных механических усилий, а также повышенных нагревов как в процессе изготовления (укладка роторной обмотки, запрессовки и запечки обмотки), так и в условиях эксплуатации. Действующий ГОСТ 533-51 ограничивает температуру роторных обмоток  $120 \dots 130^\circ\text{C}$  для изоляции класса В. Однако и при этих температурах в целлюлозных волокнистых материалах (бумажные подложки в микаленте), а также в органических лаках, входящих в состав изоляции класса В, происходит термоокислительная деструкция, приводящая к ухудшению механических характеристик этих материалов, а значит и всей изоляции. Соответственно снижается и степень надежности роторной изоляции, а значит увеличивается статическая вероятность выхода ее из строя. Существенное повышение надежности изоляции роторов турбогенераторов может быть достигнуто путем применения стеклослюдяных кремнийорганических материалов, которые практически не снижают свои исходные характеристики, в том числе механическую прочность при длительном воздействии повышенных нагревов.

Кремнийорганическая изоляция была впервые весьма успешно применена в роторах турбогенераторов при их капитальном ремонте [Л. 10]. Эксплуатационный опыт длительной безаварийной работы роторов турбогенераторов с кремнийорганической изоляцией подтверждает высокую надежность этого нового вида изоляции. Следует иметь в виду, что для витковой изоляции роторной обмотки была применена только липкая кремнийорганическая стеклослюда вместо микаленты, содержащей слюду.

Кремнийорганическая изоляция была также применена заводом «Электросила» вначале для

турбогенераторов мощностью 25 000 и 30 000 кВт (с водородным охлаждением), а затем для турбогенераторов мощностью 100 000 и 150 000 кВт. Применение кремнийорганической изоляции в роторах турбогенераторов повышает их надежность.

**Тяговые электродвигатели.** В процессе эксплуатации тяговых электродвигателей их изоляция подвергается комплексному воздействию: повышенных перегревов, обусловленных специфическими условиями их работы (частые пуски, необходимость в некоторые периоды развивать значительный вращающий момент), а также высоким использованием активных материалов, значительных механических усилий, влаги и электрических перенапряжений. Поэтому к материалам, применяемым для изоляции тяговых электродвигателей, предъявляются повышенные требования к их нагревостойкости, механической прочности, влагостойкости и диэлектрическим характеристикам. При применении для изоляции тяговых электродвигателей изоляции класса В, содержащей наряду с нагревостойкой слюдой целлюлозные волокнистые материалы (бумажные подложки микаленты и гибких миканитов), также и органические связующие и пропиточные и покровные составы, в органической части этой изоляции при повышенных температурах, которые могут достигать  $145 \dots 165^\circ\text{C}$  и выше, возникают термоокислительные процессы, приводящие к деструкции изоляции. При этом необратимо ухудшаются механические, электрические характеристики и влагостойкость, что приводит к снижению надежности изоляции и преждевременному выходу электродвигателя из строя.

Значительного увеличения надежности и срока службы тяговых электродвигателей можно достигнуть применением для их изоляции кремнийорганических материалов. Использование этих материалов позволяет не только повысить надежность и удлинить сроки службы изоляции тяговых электродвигателей, но и повысить их мощность в тех же габаритах.

Использование кремнийорганических материалов для изоляции тяговых электродвигателей и генераторов тепловоза ТЭ-2 дает возможность увеличить силу тяги на 60%. Применением кремнийорганических материалов для изоляции тяго-

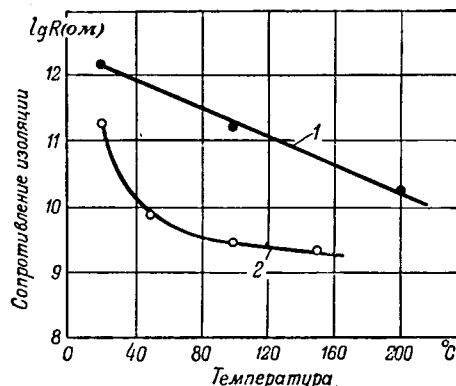


Рис. 9. Сопротивление изоляции якорных полусекций в зависимости от температуры.

1 — кремнийорганическая изоляция; 2 — микалентная изоляция на органических лаках.



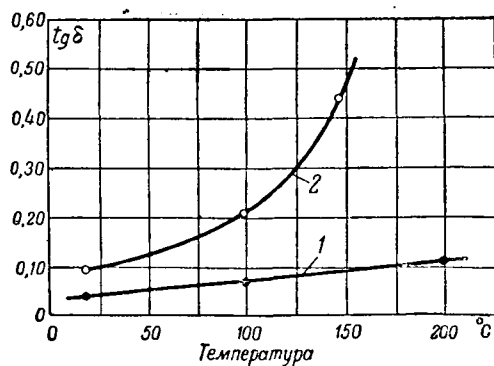


Рис. 10.  $\text{tg } \delta$  изоляции якорных полусекций в зависимости от температуры изоляции.

1 — кремнийорганическая изоляция; 2 — микалентная изоляция на органических лаках.

вых электродвигателей магистрального электровазона серии ВЛ значительно повышаются теплостойкость и влагостойкость.

Из рис. 9, где приведены кривые, характеризующие изменение сопротивления изоляции якорных полусекций электродвигателя ДПЭ-400 от температуры, следует, что при повышенных температурах сопротивление кремнийорганической изоляции (кривая 1) выше, чем у изоляции класса В (кривая 2). Тангенс угла диэлектрических потерь у кремнийорганической изоляции сравнительно мало изменяется с температурой и при 200°С не превосходит 0,12, в то время как у изоляции класса В наблюдается значительный рост  $\text{tg } \delta$  с температурой (рис. 10).

При циклическом воздействии на кремнийорганическую изоляцию повышенной температуры (нагрев трое суток при 180°С в каждом цикле), а также высокой влажности (выдерживание в течение двух суток в атмосфере с 98% относительной влажности в каждом цикле) сопротивление изоляции, измеренное после увлажнения, мало изменяется (рис. 11). Тангенс угла диэлектрических потерь при циклическом воздействии повышенных нагревов и увлажнении вначале даже несколько уменьшается вследствие дополнительной запечки кремнийорганических лаков, а затем он больше не подвергается изменению (рис. 12).

Стендовые испытания электродвигателей ДПЭ-400 показали, что применение нагревостойкой кремнийорганической изоляции позволяет по-

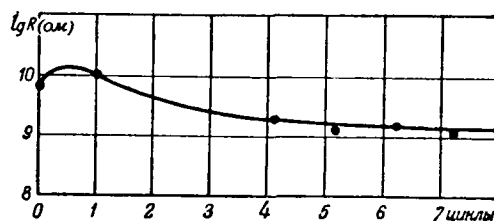


Рис. 11. Изменение сопротивления кремнийорганической изоляции якорных полусекций в процессе циклических воздействий повышенных нагревов (трое суток при 180°С в каждом цикле) и высокой влажности (двое суток при 95±3% относительной влажности в каждом цикле).

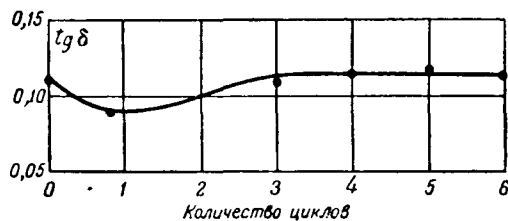


Рис. 12. Изменение  $\text{tg } \delta$  изоляции якорных полусекций электродвигателя типа ДПЭ-400 в процессе циклических воздействий повышенных нагревов (трое суток при 180°С в каждом цикле) и высокой влажности (двое суток при 95±3% относительной влажности в каждом цикле).

высить их мощность в часовом и длительном режимах до 133% при удовлетворительной коммутации.

**Высоковольтные машины переменного тока.** Нагревостойкость микалентной компаундированной изоляции ограничена низкой нагревостойкостью битумного компаунда, а также битумно-масляного клеящего лака (типа 441) и бумажных подложек микаленты. Повышение рабочих температур микалентной компаундированной изоляции лимитируется также значительным ростом тангенса угла диэлектрических потерь и снижением электрической прочности при температурах выше 100°С. Рост  $\text{tg } \delta$  и снижение электрической прочности микалентной изоляции с температурой в основном обусловлены значительным увеличением диэлектрических потерь в органической прослойке [Л. 11].

Существенного повышения нагревостойкости высоковольтной изоляции электрических машин можно достигнуть при использовании кремнийорганических лаков и компаундов. Кривые, характеризующие зависимость  $\text{tg } \delta$  диэлектрических потерь от температуры для кремнийорганической, а также микалентной компаундированной и гильзовой изоляции статорной секции электродвигателя с рабочим напряжением 6 кв (рис. 13), показывают, что у кремнийорганической изоляции не наблюдается резкого увеличения  $\text{tg } \delta$  вплоть до 150°С, в то время как у секций с микалентной компаундированной и особенно у гильзовой изоляции при температурах до 100°С он уже резко возрастает.

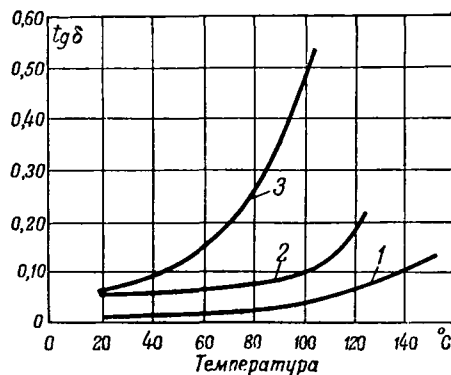


Рис. 13.  $\text{tg } \delta$  изоляции высоковольтных электрических машин в зависимости от температуры.

1 — кремнийорганическая изоляция; 2 — микалентная компаундированная; 3 — микафоллея на шеллаке.

Сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь кремнийорганической изоляции практически не изменяются при циклическом воздействии повышенных нагревов ( $200^{\circ}\text{C}$ ) и высокой влажности. Короностойкость кремнийорганической изоляции также значительно выше по сравнению с применяемой в настоящее время изоляцией с битумно-масляными лаками. Все это свидетельствует о тех больших возможностях, которые дает использование кремнийорганической изоляции в высоковольтных машинах.

**Выводы.** Данные по испытанию кремнийорганической изоляции, а также опыт эксплуатации электрических машин с кремнийорганической изоляцией дают основания для следующих выводов:

1. Кремнийорганическая изоляция сохраняет на высоком уровне диэлектрические характеристики при температурах до  $200^{\circ}\text{C}$ .

2. При длительном воздействии на кремнийорганическую изоляцию повышенных нагревов ( $180\text{--}200^{\circ}\text{C}$ ) она сохраняет механические и диэлектрические характеристики на уровне, обеспечивающем надежную работу в самых тяжелых условиях эксплуатации.

3. Кремнийорганическая изоляция обладает высокой влагостойкостью и водостойкостью как в исходном состоянии, так и после длительного воздействия повышенных нагревов ( $180\text{--}200^{\circ}\text{C}$ ).

4. Для кремнийорганической изоляции могут быть допущены длительные нагревы до  $180^{\circ}\text{C}$  и кратковременные до  $230\text{--}250^{\circ}\text{C}$ .

5. Кремнийорганическая изоляция — огнестойкая, дугостойкая и короностойкая.

6. Применение кремнийорганической изоляции в электрических машинах позволяет: 1) значительно повысить надежность и сроки службы изоляции в самых тяжелых условиях эксплуатации и 2) уменьшить габариты и удельные веса электрических машин.

7. Учитывая относительно высокую стоимость кремнийорганической изоляции, ее следует в первую очередь применять в таких электрических машинах, где применение этой изоляции дает технико-экономический эффект; как то: в угольной и металлургической промышленности, в электрифицированном транспорте и пр.

#### Литература

1. А. А. Тайц. Анализ аварий электромашин. Материалы научно-технической сессии по ремонту электрооборудования промышленных предприятий, МОНИТОЭ, 1946.
2. К. А. Андрианов и др. Новые теплостойкие диэлектрики — силиконы. Электричество, № 4, 1946.
3. К. А. Андрианов. Кремнийорганические полимерные соединения. Госэнергоиздат, ч. 1, 1946.
4. К. А. Андрианов и О. И. Грибанова. Кремнийорганические полимерные продукты для промышленности, ЦБТИ МЭИ, 1946.
5. К. А. Андрианов и М. В. Соболевский. Высокомолекулярные кремнийорганические соединения. Оборонгиз, 1949.
6. J. De Kiep, L. R. Hill, G. L. Moses. The Application of the Silicone Resins to Insulation for Electric Machinery. El. Eng., т. 64, № 3, 1945.
7. G. Grant, T. A. Kauppi, G. L. Moses. Investigation of Silicone Insulation on High-Temperature Railway Motor. Transactions of the American Institute of El. Eng., т. 66, стр. 305—310, 1947.
8. G. Grant, T. A. Kauppi, G. L. Moses, G. P. Gibson. Motor Tests Evaluate Thermal Endurance of Class H Insulation and Silicon Varnish, Transaction of the American Institute of El. Eng., т. 68, ч. II, стр. 1133—1138, 1949.
9. T. A. Kauppi, G. L. Moses, Organo-Silicon Compounds for Insulating Electric Machines. El. Eng., т. 64, № 3, 1945.
10. Ф. Ф. Овчаров и А. Г. Петраков. Теплоустойчивая изоляция для обмоток роторов крупных турбогенераторов. Электрические станции, № 7, 1954.
11. Г. И. Сканава. Физика диэлектриков, стр. 483—486, 1949.

[30.9.1954]



## За создание новых электрических аппаратов и распределительных устройств 110 кВ

Инж. Е. А. БУГРИНОВ

Мосэнергопроект

Аппараты и распределительные устройства сейчас разрабатываются отдельно, без взаимной увязки их конструкций. Между тем передовая техника требует создания новых и экономичных конструкций электрических аппаратов и распределительных устройств, взаимно приспособленных, надежных и удобных в эксплуатации и позволяющих осуществлять строительство индустриальными методами. Совместное конструирование электрических аппаратов и распределительных устройств приведет к созданию установок, отвечающих требованиям передовой техники.

Автор поставил себе цель совместную разработку конструкции нового электрического аппарата 110 кВ и компактного распределительного устройства, взаимно приспособленных. Для этой цели автор разработал схему объединенного отключающего аппарата 110 кВ, выполняющего функции выключателя, разъединителей и трансформатора тока. Такое совмещение функций позволило уменьшить размеры и упростить конструкцию распределительного устройства и сократить число изоляторов и шин.

В объединенном отключающем аппарате (рис. 1) использованы воздушный одноколунко-

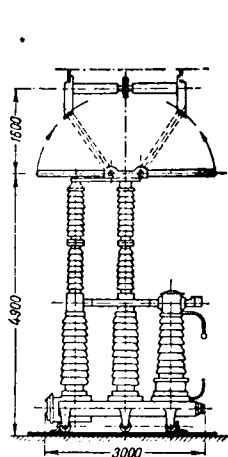


Рис. 1.

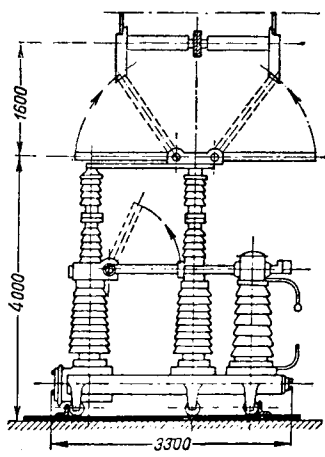


Рис. 2.

вый выключатель без разъединяющих ножей и трансформатор тока типа ТФНД-110. Разъединители выполняются специальной конструкции с воздушным дистанционным приводом. В случае установок с двойной системой сборных шин аппарат снабжается двумя шинными разъединителями.

Аппарат выполняется трехполюсным из трех отдельно установленных полюсов. Основанием каждого полюса служит нижний воздушный бак на тележке с катками. Впереди основания смонтирован воздушный одноколонковый выключатель. В середине аппарата установлена опорная колонка разъединителя, внутри которой осуществляется подвод воздуха к расположенным на верхней ее части пневматическим приводным механизмам разъединителя. Вертикально рубящего типа ножи разъединителя размещаются наверху опорной колонки. Верхний выводной зажим выключателя соединяется токопроводящей шиной с основанием ножей разъединителя. В отключенном состоянии ножи разъединителя принимают горизонтальное положение. Неподвижные контакты шинных разъединителей размещены отдельно от аппарата на горизонтальных изоляторах, расположенных выше аппарата с таким расчетом, чтобы при положении «включено» ножи разъединителя полностью входили в неподвижные контакты.

Для обеспечения правильного расположения аппарата относительно неподвижных контактов разъединителей аппарат смонтирован на направляющих, имеющих выверенные при монтаже упоры. В целях облегчения регулировки разъединителей контакту придана специальная форма, а поверхность соприкосновения — увеличенная, допускающая «игру» ножа в неподвижном контакте. Такое устройство контактов разъединителей обеспечивает полное соприкосновение ножей с неподвижными контактами после ремонтов, связанных с выкаткой фаз аппарата из камер в том случае, когда при обратной установке аппарата в камеру точная регулировка контактов исключается по той причине, что неподвижные контакты разъединителей могут находиться под напряжением.

Аппарат снабжен блокировкой выключателя и шинных разъединителей, исключающей возможность неправильного оперирования разъединителями при включенном выключателе.

На задней тележке аппарата к его баку прикреплен трансформатор тока. Один из зажимов трансформатора тока является вводным зажимом аппарата, а другой соединяется токопроводящей шиной с нижним зажимом выключателя. Шина огибает колонку разъединителей в месте соединения верхней и нижней ее частей.

Зажим трансформатора тока, являющийся вводным зажимом аппарата, может быть заменен неподвижным контактом одноколонкового разъединителя, нож которого устанавливается на опорном изоляторе рядом с аппаратом. Этот разъединитель используется в качестве линейного.

Шкаф управления выключателем и шинными разъединителями, а также размещения зажимов трансформатора тока установлен впереди воздушного бака аппарата. Агрегатный шкаф устанавливается со стороны оперативного коридора перед аппаратом на небольшом от него расстоянии.

Объединенный отключающий аппарат может иметь два исполнения в зависимости от взаимного расположения выключателя и разъединителя.

Описанное крайнее расположение выключателя позволяет удобно обслуживать его и иметь свободный доступ к воздушному хозяйству выключателя со стороны коридора обслуживания. Возможно исполнение аппарата с центральным расположением выключателя и боковым расположением разъединителей. В этом исполнении упрощается соединение трансформатора тока с выключателем, однако ухудшается доступ к воздушному хозяйству выключателя.

Для объединенного отключающего аппарата может быть использован воздушный выключатель ВВН-112 с разъединяющим ножом. Вместо опорной колонки для неподвижного контакта разъединяющего ножа устанавливается опорная колонка шинных разъединителей (рис. 2). Однако в этом случае аппарат получается менее удобным и неприспособленным к распределительному устройству, поэтому применение выключателя ВВН-112 для отключающего аппарата нецелесообразно и возможно только временно — до выпуска одноколонкового выключателя.

Применение объединенных отключающих аппаратов взамен отдельно устанавливаемых выключателей, шинных разъединителей, трансформаторов тока и соединяющей их шинной проводки уменьшает объем и упрощает конструкцию закрытых распределительных устройств. На рис. 3 приведен поперечный разрез по однорядному закрытому распределительному устройству 110 кВ с двойной системой сборных шин. Здание — одноэтажное, простое. Отключающие аппараты и линейные одноколонковые разъединители расположены в камерах в середине здания.

Неподвижные контакты одноколонковых разъединителей размещены на трансформаторах тока. Боковые коридоры предназначены для оперативного управления отключающими аппаратами и

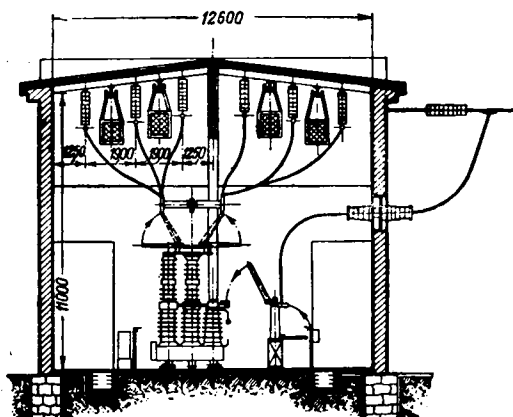


Рис. 3.

линейными разъединителями и транспорта оборудования. Лицевая сторона и шкафы управления отключающих аппаратов расположены со стороны, противоположной наружным выводам. Между камерами имеются легкие асбестоцементные перегородки на каркасе из профильной стали.

Сборные шины укреплены на подвесных изоляторах к перекрытию здания. Сборные шины и отпайки к шинным разъединителям выполнены гибким проводом, а короткие фигурные соединения между выключателями и наружными выводами — из труб. Для облегчения монтажа, осмотра и ремонта сборных шин при снятом напряжении предусмотрены подвесные тележки, передвигаемые по монорельсам вдоль перекрытия распределительного устройства.

Взаимно близкое расположение отключающих аппаратов, разъединителей и сборных шин упрощает и укорачивает шинную проводку. В качестве шиносоединительного, использован объединенный отключающий аппарат с одним комплектом шинных разъединителей, расположенных с передней его стороны; второй комплект шинных разъединителей в одноколонковом исполнении установлен рядом с трансформаторами тока, как и линейные разъединители. Шаг камер = 6 м.

Применение новой конструкции распределительного устройства позволяет сократить и упростить строительные и монтажные работы, а также широко применять индустриальные методы ведения работ.

Несложные монтажные работы на месте сводятся к установке на каждую камеру одного от-

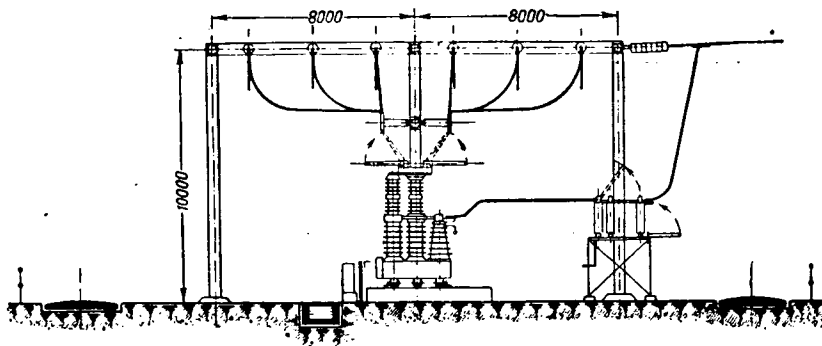


Рис. 4.

ключающего аппарата, одного линейного одноколонкового разъединителя и осуществлению короткой и несложной шинной проводки. Все остальные трудоемкие работы по монтажу отдельных аппаратов (выключателей, разъединителей, трансформаторов тока, соединяющей их шинной проводки и необходимых для ее крепления изоляторов) и цепей вторичных соединений в обычных распределительных устройствах, производящиеся на месте строительства без должной механизации работ, в предложенной конструкции осуществляются на заводах одновременно с изготовлением отключающих аппаратов в условиях, наиболее благоприятных для рационализации и механизации работ.

На рис. 4 приведено однорядное открытое распределительное устройство 110 кВ с применением объединенных отключающих аппаратов. Стальная конструкция — цельная. Ошиновка — гибкая; сборные шины крепятся при помощи натяжных гирлянд изоляторов к верхним траверзам.

Выводы осуществляются в обе стороны. Распределительное устройство имеет два прохода обслуживания, по сторонам которых устанавливаются шкафы управления аппаратами. Линейные разъединители с заземляющими ножами в нормальном исполнении устанавливаются на стульях позади аппаратов. Для транспорта аппаратов по бокам распределительного устройства прокладываются дорожки.

При большом количестве присоединений целесообразно применение двухрядных закрытых и открытых распределительных устройств, конструктивная разработка которых не представляет затруднений.

[20. 10. 1954]



## Опыт телемеханизации энергетической системы

Инж. М. И. ПЕСОЧИН и инж. М. П. УСИКОВ

Днепроэнерго

За последние годы произведены большие работы по внедрению устройств телемеханики в ряде энергетических систем СССР. Имеются новые оригинальные разработки в области аппаратуры телемеханики, выполненные ОРГРЭС, ЦНИЭЛ, Теплоэлектропроектом и заводом «Электропульт». Успехи, достигнутые в этой области, позволили перейти от телемеханизации отдельных объектов к комплексной телемеханизации энергетических систем.

Объем телемеханизации энергосистемы определяется прежде всего структурой оперативно-диспетчерского управления. В то же время внедрение телемеханики вносит существенные изменения в принципы оперативно-диспетчерского управления. В телемеханизированной системе в большей степени, чем в нетелемеханизированной, требуются четкое разделение обязанностей между различными категориями оперативного персонала и высокая степень самостоятельности действий этого персонала. Чрезмерная централизация управления нецелесообразна.

В объединенных энергетических системах существует трехступенчатая схема диспетчерского управления соответственно делению: объединение — система — сетевой район. Диспетчер сетевого района управляет вторичной сетью района, а также распределительной сетью основного напряжения нетранзитного значения. Диспетчер системы управляет основной сетью системы и работой всех станций системы, включая блок-станции промышленных предприятий; он также контролирует работу диспетчеров районов. Диспетчер объединенной диспетчерской службы управляет основными транзитными связями между системами, контролирует работу всех станций и управляет ими через диспетчеров систем.

Нередко в работе вышестоящего оперативного персонала систем проявляется тенденция к чрезмерной опеке над действиями подчиненного персонала. Вышестоящий оперативный дежурный подчас стремится контролировать любые действия подчиненного персонала. Такой чрезмерный контроль потребовал бы осуществления весьма значительного объема телемеханизации; одни и те же средства телеуправления, телесигнализации и телеизмерения пришлось бы размножить. Таким образом, организационные мероприятия по улучшению оперативного управления могут значительно сократить объемы и стоимость телемеханизации.

Объем телемеханизации управления подстанциями сети 35 кВ с районного диспетчерского пункта или с базисной подстанцией, а также объем телемеханизации управления отдельными небольшими гидроэлектростанциями определяются требованием полного сокращения дежурного персонала. При телемеханизации управления

подстанциями 110 и 220 кВ и районными станциями полного сокращения оперативного персонала не предполагается. Объемы оснащения средствами телемеханики энергетических систем, гидроэлектростанций, подстанций, управляемых с районных диспетчерских пунктов или опорных подстанций, определены «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей» (§ 770—772).

Однако до последнего времени из-за недостаточного опыта допускаются завышенные объемы телемеханизации энергетических систем. Например, при телемеханизации центральных диспетчерских пунктов предусматриваются телеуправление выключателями внутрисистемных и межсистемных транзитов и управление отдельными агрегатами гидроэлектростанций. При наличии на управляемых объектах персонала и различных устройств автоматики указанные средства телемеханики в нормальных эксплуатационных условиях не требуются диспетчеру. В аварийных условиях более ценными явились бы устройства автоматического пуска агрегатов и загрузки гидроэлектростанции при снижении частоты, а также устройства автоматической разгрузки транзитов при угрозе нарушения устойчивости и т. п.

В результате аварийного отключения межсистемных транзитных связей в одну энергосистему была прекращена передача мощности, равной 250 тыс. кВт. Благодаря наличию в системе автооператора, реагирующего на понижение частоты, четыре агрегата гидроэлектростанции были автоматически переведены из компенсаторного режима в генераторный и взяли на себя нагрузку. Таким образом, была предотвращена крупная системная авария. Если подобное нарушение режима ликвидировалось бы дежурным диспетчером при помощи телеуправления отдельными агрегатами, то на ликвидацию потребовалось бы значительно больше времени и последствия нарушения были бы серьезнее.

На гидроэлектростанции, регулирующей частоту в крупной энергосистеме, приходится выполнять большое число операций по переводу агрегатов из компенсаторного режима в генераторный и обратно. На многоагрегатных гидроэлектростанциях выполнение этих операций средствами телемеханики с центрального диспетчерского пункта весьма сложно, требует большого объема телеуправления и телеизмерений и излишне загружает диспетчера системы. Указанные операции должны выполняться персоналом гидроэлектростанции или автооператорами, которые должны быть разработаны.

При телемеханизации неосновных сетей 35, 10 и 6 кВ с учетом обеспечения надежной эксплуатации и получения наибольшего технико-экономического эффекта решающее значение имеют

следующие основные вопросы: 1) выбор рациональной схемы диспетчерского управления сетевым районом; 2) выбор оптимальных объемов телемеханизации и 3) организация нормальной эксплуатации телемеханизированных подстанций. Если первые два вопроса оказывают решающее влияние на объем капиталовложений, то третий вопрос имеет большое значение в отношении эффективности внедрения устройств телемеханики.

Известны две основные схемы диспетчерского управления: 1) схема централизованного диспетчерского управления сетевым районом с телемеханизацией районного диспетчерского пункта; 2) схема децентрализованного диспетчерского управления без телемеханизации районного диспетчерского пункта, при которой управление отдельными подстанциями осуществляется с базисных подстанций или электростанций.

Первая схема, обладая рядом преимуществ в отношении более высокой оперативности и производительности труда диспетчера районного диспетчерского пункта, имеет недостатки. При этой схеме, как правило, усложняются каналы телемеханики и увеличиваются затраты на осуществление устройств телемеханики примерно на 30...40%.

Наиболее рациональная схема диспетчерского управления сетевым районом должна выбираться, исходя из конкретных условий, с учетом конфигурации сети, территориального расположения подстанций, а также возможности осуществления простых и надежных каналов телемеханики. В случае сложной конфигурации сетевого района и большой его разбросанности иногда бывает целесообразным применение комбинированной схемы диспетчерского управления, при которой наряду с централизованным управлением с районного диспетчерского пункта имеется управление отдельными кустами подстанций с опорных подстанций или электростанций.

В одном сетевом районе подстанции и линии не образуют единой электрически связанной сети, а представляют собой отдельные кусты, питающиеся от опорных узловых подстанций. Ввиду этого признано целесообразным не телемеханизировать районный диспетчерский пункт, а управление телемеханизированными подстанциями 35 кВ осуществлять с соответствующих опорных подстанций. В другом сетевом районе вся сеть 35 кВ электрически связана, имеет несколько источников питания и сложную конфигурацию, поэтому было решено принять схему централизованного диспетчерского управления с телемеханизацией районного диспетчерского пункта. Для третьего сетевого района, сеть 35 кВ которого имеет сложную конфигурацию и большую протяженность, решено принять комбинированную схему диспетчерского управления.

Существенное влияние на уменьшение затрат на телемеханизацию подстанций 35, 10 и 6 кВ оказывают объемы телеуправления и телеизмерения.

Опыт показывает, что на некоторых подстанциях, а иногда и в сетевых районах операции при помощи только одних выключателей производят-

ся крайне редко; как правило, они производятся при помощи выключателей и разъединителей. Предусматривать на таких подстанциях телеуправление не следует. Но имеются подстанции и районы, на которых до 50% всех операций производится только при помощи выключателей (отыскание «земли», аварийная разгрузка, отключения по требованию потребителя и др.). На таких подстанциях телеуправление целесообразно.

Применение телесигнализации перегрузки трансформаторов вместо телеизмерения дает существенную экономию не только в стоимости телеизмерительной аппаратуры, но и в стоимости каналов и пульта районного диспетчерского пункта. Последний при меньших объемах телеуправления, телесигнализации и телеизмерения может быть более наглядным и менее громоздким.

Для питания устройств телемеханики следует применять переменный оперативный ток, так как это позволит существенно упростить и удешевить источники питания. При этом следует иметь в виду, что с исчезновением переменного тока исчезает и надобность в устройствах телемеханики.

Сокращение затрат на телемеханизацию в значительной степени зависит от разработки и внедрения простых, надежных и недорогих каналов телемеханики.

Существенная экономия может быть получена при строительстве новых телемеханизированных подстанций за счет сокращения кубатуры здания щита управления и вспомогательных помещений.

Правильная организация эксплуатации телемеханизированных подстанций имеет решающее значение для надежной работы оборудования и эффективности телемеханизации. Однако из-за отсутствия разработанных типовых положений этот вопрос в энергосистемах решается по-разному. Известны следующие основные формы организации эксплуатации телемеханизированных подстанций: 1) централизованное обслуживание всех телемеханизированных подстанций района выездной бригадой или дежурным по району; 2) одиночное дежурство на дому по каждой подстанции; 3) дежурство на подстанции при сокращенном количестве персонала (одиночное дежурство).

Первый вариант наиболее рационален в тех случаях, когда обслуживается большое число подстанций, не имеющих дежурного персонала, или когда подстанции расположены на небольшом расстоянии от районного диспетчерского пункта. Следует заметить, что время, необходимое для прибытия бригады на подстанцию, не должно превышать 15 мин. При больших расстояниях от подстанции до районного диспетчерского пункта целесообразно применить второй вариант, но в этом случае необходимо, чтобы персонал проживал в непосредственной близости от подстанции. Одиночное дежурство на подстанции является переходным этапом к дежурству на дому или централизованному обслуживанию. Выбирая тот или иной вариант обслуживания телемеханизированной подстанции в зависимости от конкретных условий, можно добиться сокращения численности оперативного персонала в 2—3 раза. При

этом имеется в виду, что ремонт оборудования подстанций района проводится централизованным порядком.

В одном сетевом районе в результате телемеханизации четырех подстанций численность оперативного персонала сокращена с 16 до 7 чел. (дежурные на дому). Дальнейшее сокращение оперативного персонала на этих подстанциях ограничивается условиями его загрузки (выходные дни, отпуска и т. д.), так как, помимо дежурства на дому, на него возлагаются осмотр подстанции и производство ряда мелких работ, как то: уборка помещения, кабельных каналов, взятие проб масла, замена масла, покраска и другие мелкие работы. После сокращения ответственность оставшегося персонала возросла, поэтому знания его должны непрерывно расти и быть более разносторонними. Оснащение подстанций устройствами телемеханики и автоматики в таком объеме, который является для данных условий оптимальным, позволяет полностью ликвидировать дежурство на подстанциях. Такие подстанции в отдельных районах уже имеются.

Сопоставление годовой экономии от сокращения численности персонала на телемеханизированных подстанциях с производственными затратами на телемеханизацию показывает, что затраты могут окупиться примерно в 3...4 года. Затраты на телемеханизацию строящихся подстанций, которые будут работать без дежурного персонала, окупятся экономией, получаемой от сокращения размеров щита управления и количества приборов, а также количества вспомогательных помещений.

Небольшой опыт эксплуатации устройств те-

лемеханики, который уже удалось накопить, показывает, что они являются эффективным средством сокращения численности оперативного персонала на подстанциях 35, 10 и 6 кв, а также на гидроэлектростанциях, сокращения аварийности по вине персонала, повышения оперативности в работе диспетчеров. В результате автоматизации и телемеханизации станций и подстанций энергосистемы численность персонала сокращена на 33 чел., годовой фонд зарплаты которых составлял 295,86 тыс. руб. За 20 мес. в энергосистеме произошло 31 нарушение нормального режима работы. Все эти нарушения диспетчер, как правило, обнаруживал при помощи средств телемеханики до того, как получал о них сообщения персонала по телефону. Это способствовало сокращению времени, затрачиваемого на ликвидацию нарушения, и уменьшению недоотпуска электроэнергии. В одном случае диспетчер при помощи устройств телесигнализации обнаружил неправильное действие персонала станции и предотвратил несинхронное включение станции.

Устройства телемеханики стали неотъемлемыми средствами в работе диспетчера. В аварийных условиях они приобретают значение, аналогичное значению устройств релейной защиты и автоматики. Устройства телемеханики способствуют улучшению работы персонала, повышают общую культуру эксплуатации энергетических систем.

В ходе эксплуатации были зафиксированы случаи сбоев в телеуправлении и телесигнализации, однако по отношению к большому числу произведенных операций эти случаи составляют доли процента.

[1. 10. 1954]



## Защита сооружений нефтяной промышленности от разрядов статического электричества

*Инж. Н. З. ПОКОНОВ*

*Министерство нефтяной промышленности*

На отдельных предприятиях нефтяной промышленности имели место искровые разряды в результате накопления зарядов от статического электричества. Заряды статического электричества обычно возникают в трубопроводах, аппаратах и емкостях вследствие электризации трением нефтепродуктов при их переливании, перемешивании, перекачке, а также при сливе по причине резкого разбрызгивания струи.

Защиту предприятий нефтяной промышленности от зарядов статического электричества следует рассматривать одновременно с комплексом мероприятий по защите от вторичных проявлений молний. Под вторичными проявлениями молнии обычно понимают эффект возникновения электростатических зарядов на сооружениях в результате атмосферных грозовых разрядов, происходящих вблизи них. Статические заряды грозо-

вого характера могут создать более высокие потенциалы, чем заряды от электризации трением.

Для защиты от воздействия вторичных проявлений молний и разрядов статического электричества вся металлическая аппаратура — резервуары, газгольдеры, нефтегазопроductопроводы, закрытые угольные транспортеры, сливно-наливные устройства, расположенные как вне, так и внутри помещений и предназначенные для переработки, хранения и транспортировки горючих жидкостей, газов и пылевидных продуктов, — подлежит обязательному заземлению. Устройство заземления с учетом опасности воздействия вторичных проявлений молнии должно осуществляться в виде контура, расположенного по периметру сооружения с общим сопротивлением растеканию не более 10 ом. Контур заземления выполняется в виде металлических проводников, соединяющих



все заземлители по периметру защищаемого сооружения.

Для целей заземления можно использовать защитные заземления электроустановок, а также надежные заземленные металлические конструктивные элементы зданий и сооружений (фермы, колонны, прогоны, трубы), за исключением трубопроводов, содержащих легковоспламеняющиеся жидкости и горючие газы. Если сооружение защищается только от зарядов статического электричества, то ввиду малости зарядных токов (миллиамперы) сопротивление устройства заземления может быть порядка 100 ом.

Периодическая проверка надежности заземления невзрывоопасных объектов производится измерителем сопротивления типа МС-07 раз в год. Измеритель заземления должен устанавливаться не ближе 25...30 м от действующих технологических установок. Во взрывоопасных помещениях для целей проверки заземления при монтаже устройства заземления следует предусмотреть выводы с зажимами к заземлителю вне взрывоопасного помещения.

Наполнение резервуаров и налив цистерн должны производиться обязательно под уровень жидкости, имеющейся в резервуаре, т. е. ввод трубопровода, подающего нефтепродукт в резервуар, или конец шланга, опускаемого в емкость, должен быть ниже уровня мертвого остатка. При первоначальном заполнении новых резервуаров или после их зачистки, когда нет мертвого остатка, необходимо принимать особые меры предосторожности: медленное наполнение и усиленное наблюдение. На поверхности жидкости не должно быть плавающих предметов; следует систематически производить очистку всех сосудов и резервуаров от скапливающихся в них отложений и грязи. Все резиновые шланги с металлическими наконечниками, предназначенные для налива в вагоны-цистерны, автоцистерны и бочко-тару, следует заземлять при помощи проволоки, обвитой по шлангу снаружи или пропущенной внутрь с припайкой одного ее конца к металлическим частям нефтепродуктопровода, а другого — к наконечнику шланга. Наконечники шлангов должны быть изготовлены из бронзы или алюминий-металлов, не дающих искры при ударе.

По нашему мнению, емкости, в которых хранятся высоковязкие нефтепродукты (топочный мазут, зеленые масла и др.), также должны иметь защиту от вторичных проявлений молний и статического электричества по той причине, что эти емкости имеют газоотводные трубки, через которые выходят пары нефтепродуктов взрывоопасной концентрации.

Заземление — не единственное мероприятие защиты нефтяных сооружений. Там, где по условиям технологического процесса возможно, необходимо осуществлять регулирование скорости

движения нефтепродуктов в трубопроводах и устранять причины, вызывающие или способствующие усилению турбулентного движения нефтепродукта, как, например: резкие переходы в сечениях трубопровода, сильно конические насадки, вентили и др.

Часто представляется возможным избежать образования статического электричества или уменьшить его интенсивность путем некоторого изменения технологического процесса без ущерба для нормальной работы производства и качества продукции. Например, внесение в процессе производства бензина некоторого количества весьма мелких частиц кожи прекращает явление электризации. Возможно использование и других безвредных реагентов, которые способны нейтрализовать возникающие при технологических процессах заряды статического электричества.

Статическое электричество возникает тогда, когда соприкасаются вещества с различными коэффициентами диэлектрических постоянных. Электростатические заряды, возникающие при электризации, пропорциональны разности диэлектрических коэффициентов соприкасающихся тел. Поэтому если окрасить трубопровод внутри таким веществом, которое имеет диэлектрический коэффициент, равный коэффициенту протекающего нефтепродукта, в этом трубопроводе не будут наводиться заряды статического электричества. Например, при окраске внутренних стенок трубопровода битумом с электропроводящей пылью алюминия, диэлектрическая постоянная которого равна постоянной протекающего нефтепродукта, в этом трубопроводе будет наводиться минимальное количество зарядов статического электричества.

Представляет большой практический интерес осуществление заземления самих нефтепродуктов в процессе их движения по трубопроводу и при сливо-наливных операциях. Такое заземление может быть осуществлено посредством металлической пластинки, один конец которой соединен с фланцевым соединением трубопровода, в свою очередь присоединенного к заземлителю. Сама же пластинка длиной порядка 0,5 м должна омываться нефтепродуктом.

Расстояния между заземленными точками должны быть примерно одинаковыми и составлять для магистральных трубопроводов около 500 м. На месте истечения нефтепродукта из трубопровода в резервуар следует рекомендовать установку заземленной металлической заглушки в виде сетки с отверстиями диаметром 5 см, укрепленной таким образом, что струя нефтепродукта прежде всего падает на заглушку с отверстиями. Для отвода в землю зарядов, проскальзывающих через сетку в резервуар, стенки резервуара должны быть заземлены в трех-четырёх местах.



## Труды М. О. Доливо-Добровольского в оценке его современниками

Профессор Я. Л. ФРАНКФУРТ

Москва

Представляют интерес некоторые сведения из зарубежных литературных источников прошлого века о жизни и деятельности Михаила Осиповича Доливо-Добровольского, заслуги которого перед мировой наукой и электротехникой были признаны и высоко оценены еще его современниками.

После поступления в 1887 г. на работу в АЕГ Доливо-Добровольский проявил себя как выдающийся инженер-конструктор. Уже в 1888 г. в различных литературных источниках приводятся описания созданных Доливо-Добровольским электроизмерительных приборов, техника которых находилась тогда еще в зачаточном состоянии. Выступивший на одном из заседаний Германского электротехнического общества (в дальнейшем VDE) в 1888 г. видный германский электрик В. Кольрауш отметил приборы системы Доливо-Добровольского как весьма хорошие [Л. 1]. В электротехническом ежегоднике К. Штрекера за 1888 г. [Л. 2] дается описание электроизмерительных приборов системы Доливо-Добровольского, заимствованное Штрекером из французского электротехнического журнала *La Lumière électrique*. В изданной в 1892 г. книге Э. Киттлера [Л. 3] приводится подробное описание принципа действия приборов системы Доливо-Добровольского.

Известный английский электрик Г. Капп в одной из своих лекций в Британском обществе искусств в феврале 1891 г. [Л. 4] так отмечал успешную творческую деятельность Доливо-Добровольского:

«...Внезапное повышение нагрузки электродвигателя не может быть покрыто мгновенно соответствующим изменением мощности, подводимой из питающей его сети; вследствие этого во время переходного периода, могущего продолжаться несколько секунд, возникают колебания характеристических величин. Чтобы устранить этот недостаток, Доливо-Добровольский создал своего рода успокоитель (демпфер) в виде большого безиндукционного сопротивления, постоянно приключенного параллельно к зажимам обмотки возбуждения генератора. Ненормальная волна напряжения, которая без этого устройства могла бы нарушить работу электродвигателя или повредить изоляцию машин, расходуется на нагрев этого сопротивления и нарушение режима быстро устраняется...»

В 1888 г. Доливо-Добровольский начал работать над осуществлением изобретенного им трехфазного асинхронного двигателя. О том, каково было отношение широких электротехнических

кругов того времени к переменному току вообще и существовавшему тогда электродвигателям этого рода тока, в частности, можно судить по следующим кратким выдержкам из статьи А. Кребса:

«...29 мая 1888 г. профессор Рюльман сделал в Германском электротехническом обществе доклад, в котором между прочим отметил большие потери холостого хода у трансформаторов, а также отсутствие практически применимого электродвигателя переменного тока. Он также высказался весьма пессимистически относительно переменного тока вообще. В дискуссии по этому докладу Вильгельм Сименс высказал мнение, что переменный ток может применяться для обширных районных сетей, но не для крупных городов. В том же духе высказался и Оскар Миллер, причем он особенно подчеркнул непригодность для практического применения электродвигателей переменного тока...» [Л. 5].

И там же: «...в самое последнее время удалось четыре провода системы Тесла свести к трем проводам и двигатель, построенный по этому принципу, показал значительные преимущества. Речь идет о двигателе системы Доливо-Добровольского. Этот двигатель обладает почти свойствами шунтового двигателя постоянного тока. Кроме того у него отсутствует вращающийся приемник тока. Конструкция его крайне проста и при мощности в  $\frac{1}{4}$  л. с. он имел к. п. д.

74%, т. е. величину, которую даже у двигателей постоянного тока указанной мощности вряд ли можно получить. К сожалению, это пока единственный существующий электродвигатель этого рода, так что нельзя еще судить, как поведут себя электродвигатели большой мощности этой системы. Но, если их пусковые свойства будут такими же, как у вышеуказанного малого двигателя, то можно сказать, что передача энергии переменным током достигла того совершенства, которую ему теперь приписывают сторонники этого рода тока. Однако мы имеем здесь систему не с двумя, а с тремя проводами...» [Л. 5].

Далее А. Кребс указывает, что он отрицает возможность практического применения переменного тока с двумя проводами для силовых целей: «... хотя развитие переменного тока для двигательных целей еще не завершено, но те поражающие успехи, которые достигнуты в области аккумуляторной техники (например, аккумуляторы системы Тюдора), внушили даже сторонникам переменного тока взгляд на последний как на пройденный этап и мнение, что

аккумуляторы заменят трансформаторы...» (подчеркнуто мною — Я. Ф.).

Таково в основном было отношение авторитетных электротехнических кругов к изобретенным Доливо-Добровольским трехфазному току и асинхронному двигателю вплоть до лета 1891 г., когда открылась Международная электротехническая выставка во Франкфурте-на-Майне.

Поводом к устройству этой выставки послужило следующее обстоятельство. В конце 80-х годов прошлого века было решено соорудить во Франкфурте-на-Майне электрическую станцию. Обербургмистру этого города трудно было сделать выбор между конкурировавшими тогда постоянным и переменным токами.

Для решения вопроса была создана комиссия из авторитетных специалистов в составе: Феррариса, Линдлея, Киттлера, Уппенборна и Вебера (Цюрих). Однако эта комиссия не смогла прийти к окончательному решению относительно подлежащей выбору системы передачи энергии. Тогда решено было устроить во Франкфурте в 1891 г. Международную электротехническую выставку, на которой конкурирующие системы могли бы выявить свои преимущества. По инициативе Оскара Миллера, бывшего руководящего сотрудника фирмы АЕГ (знавшего, следовательно, об открытии Доливо-Добровольским трехфазного тока и созданном им асинхронным двигателем), «...впервые, — читаем мы на стр. 86 [Л. 5], — в столь крупном масштабе была применена усовершенствованная система переменного тока Доливо-Добровольского, названная им «вращающимся током» (Drehstrom). Была сооружена связанная с выставкой электропередача указанной системы тока, протяжением 175 км при напряжении 15 000 в и к. п. д. около 75%. При этом были применены изобретенные также Доливо-Добровольским трансформаторы с магнитносвязанными тремя фазами, с сердечниками, расположенными по вершинам треугольника. Общепринятая в настоящее время конструкция с сердечниками, расположенными в одной плоскости, также изобретена Доливо-Добровольским в 1891 г....»

Однако и после открытия выставки некоторые видные в то время электрики еще весьма сдержанно отзывались о трехфазном токе и асинхронном двигателе. Так, например, в докладе английского профессора Форбса в августе 1891 г. в Кардифском отделении Британской ассоциации сказано:

«...Великий эксперимент, который должен быть сделан во Франкфурте, и который возбудил интерес электриков всего мира, должен служить не для того, чтобы доказать эффективность трансформации тока, а для того, чтобы доказать, что 30 000 в могут быть переданы на расстояние 112 миль по воздушным проводам... Я буду требовать строгого опыта, прежде чем я соглашусь, что многофазный двигатель имеет большие преимущества перед машиной Тесла. Мистер Добровольский утверждает, что его машина имеет то преимущество перед синхронным двигателем, что она не останавливается при перегрузках.

Однако после того как я испытал синхронизирующий альтернатор Мордея, я твердо убежден, что невозможно вывести его из синхронизма, перегружая его при обычных условиях... Чем больше вы его нагружаете, тем больше тока он воспринимает, чтобы держаться в синхронизме. Он ведет себя точно так же, как двигатель Тесла или Добровольского при одинаковых условиях...» [Л. 6].

Весьма авторитетные в то время электрики, повидимому, тогда еще не уяснили сущности изобретения Доливо-Добровольского, отличия предложенной им системы от других систем, основанных на вращающемся магнитном поле (Феррариса, Тесла). Г. Капп в лекции в марте 1891 г. говорил:

«...После опубликования открытия Феррариса, некоторые инженеры обратили свое внимание на электродвигатели с вращающимся полем, особенно на модификацию этого принципа, согласно которому применяются три комплекта катушек вместо двух комплектов. Насколько я в состоянии был проследить историю этого изобретения, первыми, предложившими применение трех катушек, были Тесла и Бредли. После них идет Венстром и почти одновременно с ним — Доливо-Добровольский...» [Л. 7].

Когда же линия передачи Лауффен-Франкфурт была введена в действие и на выставке стали работать асинхронные двигатели, отношение технических кругов к творениям Доливо-Добровольского резко изменилось в благоприятную сторону.

В ведущем в те годы во Франции электротехническом журнале *La Lumière électrique* появилась ряд статей с описанием принципа действия и конструкции асинхронных двигателей (в статьях они назывались двигателями Доливо-Добровольского) с положительными отзывами о них [Л. 8]. Г. Капп, описывая электропередачу Лауффен — Франкфурт, говорит о наиболее крупном из работавших на выставке асинхронных двигателей:

«...Очень малое сопротивление роторной обмотки связано с появлением очень большого тока в роторе при пуске двигателя... На первый взгляд это можно было бы рассматривать как существенный недостаток трехфазного двигателя, однако, Доливо-Добровольский устранил его весьма простым и остроумным устройством. Вместо того, чтобы замыкать роторные катушки при пуске двигателя на короткое, он включал в каждую из трех цепей жидкостное сопротивление» [Л. 9].

Несмотря на благоприятные отзывы о трехфазном токе, решение относительно системы тока для Франкфуртской электрической станции было принято только в 1893 г., причем против всякого ожидания предпочтение было отдано не трехфазному, а однофазному току. И это, несмотря на то, что к тому времени уже известны были весьма благоприятные результаты работы элек-

<sup>1</sup> Как показано ниже, Капп позже признал приоритет Доливо-Добровольского в изобретении «действительно применимого» трехфазного асинхронного двигателя.

тростанции трехфазного тока в Гайльборне<sup>2</sup> (ETZ, 1893, стр. 31). Объясняется это тем, что тогда еще преувеличивали усложнения, связанные с необходимостью применять три провода, и, кроме того, тогда еще рассчитывали на значительное усовершенствование однофазного двигателя (в пользу такой перспективы особенно настойчиво высказывался инженер фирмы Эрликон Чарльз Броун (ETZ, 1893, стр. 81)).

Все это показывает, с какими трудностями пришлось встретиться Доливо-Добровольскому на заре внедрения им своих изобретений. В большой степени влияло на это противодействие лиц, связанных с конкурировавшими с АЕГ фирмами.

М. О. Доливо-Добровольскому во время сооружения электропередачи Лауффен-Франкфурт, а также во время Франкфуртской выставки отводилась видная роль. В отчете [Л. 10] говорилось: «...Эрликон установил по одному, а АЕГ — по два трансформатора на обеих конечных подстанциях... Трансформаторы фирмы Эрликон были также изготовлены по патентам АЕГ» (т. е. по системе Доливо-Добровольского — Я. Ф.).

Как известно, к периоду Франкфуртской выставки был приурочен Международный электротехнический конгресс (7—12 сентября 1891 г.). Одним из видных участников этого конгресса был М. О. Доливо-Добровольский [Л. 11]. На конгрессе, во второй его секции (техника сильных токов), Доливо-Добровольский сделал доклад «Передача электрической работы посредством переменного тока»<sup>3</sup>.

Проф. Сильванус Томпсон описывает Франкфуртский конгресс в следующих выражениях:

«...Весь интерес конгресса был сосредоточен на многофазном переменном токе или, как его за просто называют, — «вращающем токе». Доливо-Добровольский докладывал о своих работах над двигателями переменного тока и объяснил принцип действия своего двигателя вращающегося тока. Он основывал свое объяснение разности фаз напряжений и токов, рассматривая весь ток разложенным на две цепи: одну в фазе с напряжением, другую в квадратуре с ним...» [Л. 13].

На первом общем собрании конгресса была организована 5-я секция для разработки законодательства в области электротехники, а для составления программы работ этой секции было предложено создать комиссию в составе: Кольрауша, Слаби, Сименса, Доливо-Добровольского и др.

О том, каково было состояние трансформаторостроения до того, как этим вопросом занялся Доливо-Добровольский, можно судить по следующей выдержке:

«...Опубликованные до 1891 г. сведения о потерях в стали, основывались на статических измерениях гистерезиса. Для учета вихревых то-

ков рекомендовалось добавлять от 25 до 70%. Первые указания о методе измерения действительных потерь в стали с помощью ваттметра содержатся в сделанном Доливо-Добровольским 22 марта 1892 г. в Электротехническом обществе докладе<sup>4</sup>. В этом докладе с особой ясностью и простотой даны те руководящие указания, которых следует придерживаться при проектировании и конструировании трансформаторов...» [Л. 5, стр. 29].

Таким образом, и в эту отрасль электромашиностроения М. О. Доливо-Добровольский внес свой ценный вклад. В результате М. О. Доливо-Добровольский стал известен как один из наиболее выдающихся электротехников того времени. Г. Капп, который, как указывалось выше, вначале весьма сдержанно высказывался о достижениях Доливо-Добровольского, в 4-м издании своей книги [Л. 14, стр. 160] в разделе «Саморегулирование электродвигателей» пишет:

«...Таких же успешных результатов достиг Доливо-Добровольский в установке для передачи силы в мастерских фирмы АЕГ. Здесь саморегулирование при значительных колебаниях нагрузки настолько совершенно, что оно может служить наилучшим доказательством правильности приведенной теории» (Доливо-Добровольского — Я. Ф.) И далее, правда в несколько своеобразной форме, Капп пишет относительно асинхронного двигателя:

«...Действительно применимые двигатели вращающегося тока (Drehstrom) впервые были изготовлены фирмой АЕГ, причем, главным образом, по инициативе своего шеф-инженера Доливо-Добровольского».

В 1892 г. Доливо-Добровольский вместе с Феррарисом и другими видными электриками того времени был избран в техническую комиссию Германского электротехнического общества, членом которой он состоял в течение ряда лет.

В конце ноября 1918 г. Доливо-Добровольский выступил со своим знаменитым докладом «О границах дальней передачи переменным током» (ETZ, 1919, стр. 1—4 и 84—87), произведшим огромную сенсацию в электротехнических кругах того времени, и те, которые раньше были ярыми противниками трехфазного тока, теперь стали его горячими сторонниками.

В апреле 1919 г. Доливо-Добровольский переехал в Дармштадт (а не Гейдельберг, как полагали некоторые), где по поручению фирмы АЕГ он продолжал разработку вопроса о передаче больших мощностей на дальние расстояния постоянным током сверхвысокого напряжения. К сожалению, ему не суждено было завершить этот ценный труд. Вследствие обострившейся сердечной болезни М. О. Доливо-Добровольский осенью 1919 г. был перевезен его родными в академическую больницу в Гейдельберге, где и скончался 15 ноября 1919 г.

Известие о смерти Доливо-Добровольского было воспринято в технических кругах с большой скорбью. В журнале ETZ (1920, № 1, стр. 12)

<sup>2</sup> При сооружении которой частично было использовано оборудование электропередачи Лауффен-Франкфурт.

<sup>3</sup> Доклад был напечатан в мало распространенном издании отчета [Л. 11, стр. 151—160] и остался мало известным широким кругам электриков. Между тем в нем М. О. Доливо-Добровольский развил основные положения теории переменного тока, сохранившиеся неизменными по сей день (подробнее об этом см. Л. 12).

<sup>4</sup> См. ETZ, 1892, стр. 222.

## ПОЛЕ КАК ВИД МАТЕРИИ

(Статья О. Б. Брона, *Электричество*, № 7, 1954; № 2 и 3, 1955)

Кандидат физ.-матем. наук, доц. Г. А. РЯЗАНОВ  
Ленинград

Материалистическое истолкование понятий теории электричества и соответствующее изменение всей трактовки электромагнитных явлений — одна из неотложных задач. При построении теории электричества тезис о материальности поля упоминается лишь во введении, а затем, как правило, забывается. Устаревшая терминология обычно употребляется без всяких оговорок и изложение часто ведется формально, с позиций энергетизма.

Однако предложения, содержащиеся в статье, во многом несистематичны, а некоторые из них встречают возражения. Определив электромагнитное поле как вид материи, мы обязаны разъяснить, за счет каких других видов материи оно возникает и во что оно превращается при своем исчезновении. Этот важный вопрос рассмотрен в статье неудовлетворительно. В основном автор лишь повторяет обычные рассуждения о «превращениях» энергии, массы и т. д. (делая упор на массу), говорит об их «распределении», «накоплении» и т. п. Но такие рассуждения сами по себе еще не означают материалистического истолкования электромагнитных явлений; с ними согласится и физик-идеалист. О том, как связать «превращения» массы, энергии и т. д., происходящие при взаимодействии материальных объектов, с представлением о *превращениях материи*, в статье не сказано ничего, а этот вопрос требует специального рассмотрения. В результате этого О. Б. Брон допускает ошибки, сводящие на нет его слова о превращении поля в вещество и вещества в поле. На стр. 9 и 10 автор дважды говорит (выделяя это курсивом!) о превращении поля в тепло! Но тепло представляет собой не вещество, а одну из форм движения вещества и, значит, автор говорит о превращениях материи в движение, что с точки зрения материализма неверно.

Непоследовательность автора неслучайна. Дело в том, что представление о взаимных превращениях вещества и электромагнитного поля, естественно возникающее при рассмотрении превращения электрона и позитрона в два фотона, при переходе к классической области явлений встре-

чает серьезное затруднение. Если в квантовой области мы имеем дело с явными превращениями (когда частицы вещества исчезают, а вместо них появляются частицы поля или наоборот), то в области классических явлений картина иная. Здесь исчезает или появляется только поле, но тела, участвующие в электромагнитных процессах (провода, пластины конденсаторов, диэлектрики, магнетики и т. д.), не превращаются нацело в поле и не возникают за счет него. Мы наблюдаем лишь изменения: скорости механического движения, интенсивности молекулярно-тепловых движения, поляризации, намагничивания и т. д. Создается впечатление, что поле, являющееся материальным объектом, в самом деле появляется за счет движения тел и при своем исчезновении в свою очередь вызывает лишь изменение их движения. Так, например, когда мы разряжаем конденсатор, то никаких новых материальных объектов взамен исчезнувшего поля не возникает. Происходит лишь нагревание проводника — увеличение интенсивности его внутреннего движения. Если мы скажем, что электрическое поле превратилось в вещество проводника, по которому прошел разрядный ток, то, поскольку число частиц, входящих в его состав, не изменилось, это утверждение останется непонятным. Одной ссылки на увеличение массы, как уже отмечалось, недостаточно; к тому же обнаружить увеличение массы проводника на опыте невозможно. Подобное затруднение мы встретим при истолковании любого электромагнитного процесса.

Преодоление этой трудности связано с представлением о количественном сравнении материальных объектов, относящихся к разным видам материи независимо от сравнения их общих свойств: массы, энергии и т. д. Здесь необходимо понятие *количества материи*, которое позволило бы рассматривать превращения одних видов материи в другие с количественной стороны, на основе закона сохранения материи. Если мы покажем, что исчезновение поля вызывает эквивалентное увеличение количества вещества, а его возникновение — соответствующее уменьшение количества вещества; если мы установим, что на сколько поля становится меньше, на столько же прибавляется вещества, и наоборот, то задача будет решена. Возражения против понятия количества материи вызваны тем, что оно обычно связывается со старыми мета-

покойному был посвящен обширный, глубоко прочувствованный некролог, в котором отмечались великие заслуги М. О. Доливо-Добровольского как творца трехфазного тока и создателя асинхронного двигателя. Аналогичный некролог был помещен в органе Союза германских инженеров (VDI, 1920, № 6, стр. 137). В различных зарубежных странах еще при жизни М. О. Доливо-Добровольского было признано громадное значение его работ для развития электротехники.

Как выдающийся специалист мирового значения М. О. Доливо-Добровольский значится с 1904 г. в известном Биографическо-литературном словаре Поггендорфа [Л. 15].

### Литература

1. Электротехнический ежегодник (*Jahrbuch für Elektrotechnik*), изд. проф. Г. Кребса и К. Граувинкеля, стр. 53, 1890.
2. K. Strecker. Успехи электротехники в 1888, стр. 351, 1889.

3. E. Kittler. Пособие по электротехнике, т. 1, изд. 2-е, стр. 217, 1892.
4. The Electrician, т. 27, № 690, стр. 395, 1891.
5. Исторические обзоры по электротехнике (*Geschichtliche Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik*). т. 1, стр. 29, 86, изд. VDE, 1928.
6. The Electrician, т. 27, № 694, стр. 504, 1891.
7. The Electrician, т. 27, № 693, стр. 486, 1891.
8. La Lumière Électrique, т. 39, № 5, стр. 292, 1891; т. 40, № 17, стр. 169 и т. 24, стр. 567.
9. The Electrician, т. 27, № 696, стр. 548, 1891.
10. Официальный отчет о Международной электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне. т. 1, стр. 375, 1891.
11. Отчет о работе общего собрания Международного электротехнического конгресса во Франкфурте в 1892 г.
12. О. Н. Веселовский. Роль М. О. Доливо-Добровольского в развитии теории переменного тока. *Электричество*, № 7, стр. 77, 1954.
13. The Electrician, т. 27, № 697, стр. 579, 1891.
14. Gisbert Kapp. Электрическая передача силы. 2-е изд. немецкого перевода с 4-го английского издания.
15. J. C. Poggendorff. Биографическо-литературный словарь. т. 4, стр. 340.

физическими представлениями о строении материи. О количестве материи принято говорить, как о чем-то само собой разумеющемся, т. е. по существу в том смысле, который придавал этому понятию Ньютон, допускавший существование «первоматерии» в виде абсолютно неизменных частиц. Такая точка зрения, конечно, не имеет ничего общего с нашими современными представлениями о существовании разных видов материи, о неисчерпаемости окружающего нас мира. Мы понимаем под материей не первичную субстанцию, принимающую лишь разные формы в зависимости от комбинаций, в которых сочетаются ее неизменные элементы, не материал, из которого построены все предметы окружающего мира, а сами эти предметы, взятые в абстракции от их конкретных свойств и рассматриваемые лишь как объективная реальность.

Однако превращения, наблюдаемые в камере Вильсона-Скобельцына, в фотопластинке Мысовского и др., открывают возможность непосредственного количественного сравнения качественно различных материальных объектов. Очевидно, что частица, порождающая три других частицы, больше каждой из них, что два фотона, образовавшиеся за счет электрона и позитрона, количественно эквивалентны этой паре частиц вещества, и т. д. Следовательно, можно ввести понятие о количественной характеристике материальных объектов в отношении их способности к превращению в другие материальные объекты, назвав ее количеством материи. Опытные факты, например размножение частиц в космических лучах, показывают, что эта характеристика зависит от состояния движения объекта. Если быстрый электрон превращается в десять медленных электронов и позитронов, то, очевидно, что он обладает соответственно большим количеством материи, чем каждая из этих частиц (в противном случае электроны и позитроны возникали бы за счет движения!). Количество материи оказывается органически связанным с количеством движения.

Это понятие количества материи можно распространить и на макроскопические объекты, на вещество и электромагнитное поле в их классическом понимании. Наиболее общими мерами количества материи, пригодными для сравнения объектов, относящихся к разным видам материи, являются масса и энергия, связанные соотношением  $E = mc^2$ . Их зависимость от скорости движения вполне отвечает представлению о зависимости количества материи от состояния движения объекта.

Таким образом, если исчезновение поля приводит к увеличению скорости движения некоторого тела, то это совсем не значит, что поле превращается в движение. Поскольку масса и энергия тела при этом возрастают, можно утверждать, что количества материи в теле становится больше, что поле превращается в само движущееся тело, в вещество. То же происходит и в тех случаях, когда исчезновение поля сопровождается нагреванием проводников; с повышением температуры количество материи в проводнике увеличивается. Поле превращается здесь не в тепло, являющееся формой движения, а в само вещество! Во внутреннее движение проводника при прохождении по нему электрического тока превращается не поле, а та форма движения, в которой поле пребывает. Хотя превращения материи и движения органически связаны, их нужно различать, так же как мы различаем сами понятия материи и движения.

Материалистическое истолкование электромагнитных явлений связано с новым определением понятия электрического заряда, основанным на представлении о взаимосвязи поля и вещества. В статье это определение не дано, и автор попрежнему говорит о зарядах в таком смысле, как если бы они представляли собой особый вид материи — не вещество и не поле.

Чтобы определить понятие электрического заряда, нужно сказать, что именно оно отражает в окружающем нас материальном мире. Отбросив представление об электрических субстанциях и последовательно рассматривая электромагнитные явления с точки зрения материальности поля, мы обнаружим, что теория электричества оперирует понятием заряда именно в тех случаях, когда имеет место взаимосвязь поля с веществом. Это понятие необходимо при рассмотрении действия на тела со стороны окружающего их электрического поля и его строения, при изучении процесса распространения электромагнитного поля, когда оно остается связанным с направляющей системой проводников, и т. д. Напротив, если поле не связано с веществом, как, например, при распространении свободного электромагнитного поля, то понятие заряда не требуется. Следовательно, понятие электрического заряда или количества электричества, первоначально означавшее количество некоторой субстанции, отражает взаимосвязь двух видов материи: вещества и электромагнитного поля. Современная теория в корне изменила смысл этого понятия, и термин, которым оно обозначается, теперь не соответствует его содержанию. Мы можем определить заряд как свойство тела или частицы быть окруженным электрическим полем и испытывать силовое воздействие со стороны электрического поля.

На стр. 8 сказано, что электрическое поле неизменяющихся зарядов и магнитное поле постоянных токов... могут двигаться ускоренно или замедленно. Это неверно. Поле, окружающее движущееся заряженное тело или движущийся заряженный проводник с током, нельзя рассматривать как объект, остающийся тождественным самому себе. Оно непрерывно *перераспределяется* по тем же законам, что и свободное поле; это находит свое выражение в появлении вектора Умова-Пойнтинга. Понятие о механическом движении как о простом перемещении в пространстве не распространяется на электромагнитное поле независимо от того, является ли оно свободным или связано с веществом.

Касаясь некоторых других недостатков статьи, следует указать на то, что рассматривать электромагнитное поле как сумму электрического и магнитного полей неверно, так как оно представляет собой единый вид материи. Этот вопрос требует обсуждения.

Предложение автора отказаться от термина «передача энергии» неудачно. Употребление этого термина можно сохранить, сочетая с правильным истолкованием процесса.

Предложение ввести термины «электрический волновой ток» и «магнитный волновой ток» носит формальный характер.

Определение электроемкости как «способности заряженных тел накапливать энергию и массу электрического поля» неудачно. Можно подумать, что энергия и масса накапливаются и внутри проводников, притом независимо от их разности потенциалов. Аналогичный недостаток содержится и в определении понятия индуктивности.

## НОВАЯ СХЕМА И КОНСТРУКЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

(Статья Л. И. Двоскина, *Электричество*, № 11, 1953, № 6 и 7, 1954)

Кандидат техн. наук Н. Н. КРАЧОВСКИЙ

Москва

Л. И. Двоскин совершенно правильно указывает на существенный недостаток типовой схемы тэц на напряжениях 6 или 10 кВ с двумя системами шин, заключающийся в том, что при ревизии одной из систем требуются многочисленные операции шинными разъединителями, ввиду чего повы-

шается вероятность ошибок персонала и как следствие вероятность тяжелых аварий на сборных шинах. Аварийная статистика показывает, что за последние годы 60...65% всех аварий в распределительных устройствах 3...10 кВ происходит из-за ошибочных действий персонала.

Новая схема, предлагаемая Л. И. Двоскиным, характеризуется наличием двух распределительных устройств: главного с одной секционированной реакторами системой шин и вспомогательного, комплектного, с одной системой

шин, связанной с главным распределительным устройством через групповые расщепленные реакторы, и рядом секций. Однако эту схему нельзя признать удачной, вследствие того что она предполагает наличие двух распределительных устройств, а также ввиду ее значительной сложности и недостаточной надежности.

Линии, питающие потребителей согласно указанной схеме, присоединяются к главным шинам через три последовательно включенных выключателя, что создает затруднения в отношении выдержек времени релейной защиты этих линий. Кроме того, вводятся дополнительные выключатели в ответвлениях от генераторов к групповым реакторам. Несколько вариантов включения реакторов, даваемых автором, показывает, что он сам, повидимому, не пришел к окончательному выводу, какое же решение является наилучшим. Сложность и нечеткость схемы в отношении управления противоречат общей тенденции упрощения схем, облегчения функций дежурного персонала и уменьшения его численности.

Л. И. Двоскин предлагает на линиях, по которым питаются потребители, не имеющие резерва питания по сети, устанавливать по два выключателя, присоединенных к разным групповым сборкам, питающимся через разные групповые реакторы. Такое предложение опорочивает самое идею комплексного распределительного устройства как устройства весьма надежного.

Известно, что для ревизии любой из выключателей комплексного распределительного устройства выкачивается и заменяется резервным. Эта операция может быть выполнена весьма быстро с очень кратковременным перерывом питания. Ревизия же шин комплексного распределительного устройства, поскольку они защищены от проникновения пыли, потребует весьма редко и может выполняться посекционно в периоды минимальных нагрузок, например в выходные дни; перерыв электроснабжения потребителей, питающихся по одиночным линиям, при этом будет небольшим.

Из сказанного следует, что бесперебойность питания потребителей по одиночным линиям в основном будет зависеть от надежности работы самих кабельных линий, а не от распределительного устройства тэц или понижающей подстанции. Поэтому дублирование выключателей на одиночных линиях, присоединенных к шинам комплексного распределительного устройства, совершенно излишне. К тому же подавляющее большинство потребителей питается не менее чем двумя линиями и кратковременный выход одной из них имеет второстепенное значение.

Как следует из приведенных в рассматриваемой статье чертежей, для размещения электрооборудования при новой конструкции распределительного устройства, так же как и при типовой, потребуются три этажа. Расположение главного распределительного устройства в одном этаже, а комплексного — в другом, несомненно, ухудшает условия эксплуатации. Отсутствие в статье планов отдельных этажей здания не позволяет сделать заключение о том, насколько хорошо используются помещения и действительно ли получается та значительная экономия в кубатуре здания, на которую указывает автор статьи.

Таким образом, предложение Л. И. Двоскина в отношении схемы и конструкции распределительного устройства нельзя признать приемлемым, но исходные положения этого предложения — одиночная система шин и применение комплексных распределительных устройств для потребителей — являются правильными. Как известно, аналогичные предложения делались и ранее, например мною в 1948 г. [Л. 1] и М. И. Славниным в 1950 г. [Л. 2], и были предметом обширной дискуссии. Упомянув об этом, Л. И. Двоскин почему-то без всяких к тому оснований утверждает, что распределительное устройство с одиночной системой шин не дешевле, а наоборот, дороже типового. Это противоречит подсчетам, приведенным в статье М. И. Славнина.

При наличии связи с сетью 110 кВ для тэц с тремя агрегатами по 25 мвт более целесообразной является схема, представленная на рисунке. Ее особенностью является удвоенное число секций, причем каждый генератор и трансформатор присоединяются к разным секциям через два выключателя, а линии — через один выключатель и ре-

актор — к одной из секций<sup>1</sup>. Число секционных реакторов удваивается, но их мощность и реактивность уменьшается (12,5 мвга,  $x_p = 5 \dots 6\%$ ). Шунтирующие выключатели становятся ненужными.

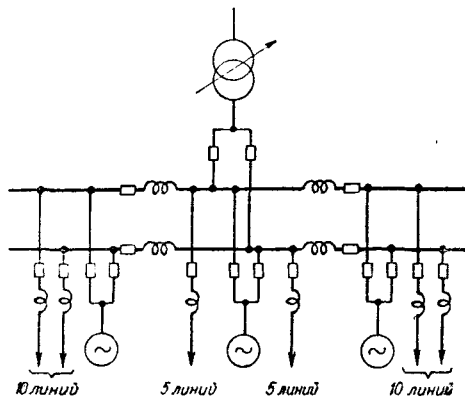
Так как общая нагрузка линий равна 60 мвт, то для выдачи излишней мощности тэц в сеть и получения мощности из сети при остановке одного из генераторов установка двух трансформаторов по 31,5 мвга представляется излишней. Достаточно установить один трансформатор мощностью 31,5 или 40,5 мвга. Установка двух трансформаторов не вносит принципиальных изменений в схему.

На всех питающих линиях целесообразно установить<sup>2</sup> комплексные распределительные устройства с выключателями МГГ-10. Одно такое распределительное устройство уже изготовлено нашей промышленностью.

При схеме, представленной на рисунке, мощность короткого замыкания на шинах крайних секций составляет около 500 мвга, а в цепях генераторов и секционных реакторов — около 300 мвга. Следовательно, выключатели МГГ-10 в данном случае могут быть применены. Лишь на среднем генераторе и повышающем трансформаторе потребуются выключатели МГГ-229.

По сравнению с типовой схемой и схемой, предложенной Л. И. Двоскиным, при рассматриваемой схеме потребуется следующее количество реакторов и выключателей, не считая устанавливаемых на питающих линиях:

	При типовой схеме	При схеме, предложенной Л. И. Двоскиным	При схеме, представленной на рисунке
Выключатели МГГ-229 . . . . .	12	9	4
Выключатели МГГ-10 . . . . .	—	6	8
Секционные реакторы 25 мвга . . . . .	2	2	—
Секционные реакторы 12,5 мвга . . . . .	—	—	4



Число трехполюсных разъединителей на 3...4 тыс. а уменьшается почти вдвое по сравнению с типовой схемой.

Присоединение генераторов и трансформаторов через два выключателя обеспечивает сохранение их в работе при аварии на шинах секции, чего нет при типовой схеме. Число линий, отключаемых при аварии на шинах секции, уменьшается вдвое. В отличие от схемы, предложенной Л. И. Двоскиным, при коротких замыканиях на питающих линиях за реакторами не происходит посадки напряжения на шинах секции.

Все электрическое оборудование при схеме, представленной на рисунке, может быть размещено в двух этажах.

<sup>1</sup> Схема допускает также присоединение одиночных линий к разным секциям через два выключателя, из которых нормально включен лишь один, т. е. так же, как это предлагает Л. И. Двоскин.

<sup>2</sup> Учитывая, что к каждой секции присоединяется лишь 5 или 6 питающих линий, а генераторы присоединяются через два выключателя, а также учитывая наличие межсекционных реакторов, можно, повидимому, применить комплексные распределительные устройства с выключателями ВМГ-133, что не будет противоречить в отношении разрывной мощности «Правилам устройства». При напряжении 10 кВ такое решение безусловно возможно, так как мощность отключения ВМГ-133 равна 350 мвга.



В нижнем этаже размещаются линейные и секционные реакторы, разъединители и кабельные муфты, а в верхнем — комплектное распределительное устройство, сборные ячейки с выключателями МГГ-10 (8 шт.) и МГГ-229 (4 шт.). Компоновку целесообразно выполнять двухрядной.

Поскольку все выключатели располагаются в одном этаже, функции персонала упрощаются, а надежность работы распределительного устройства, как это следует из изложенного выше, повышается по сравнению с типовой схемой и схемой, предложенной Л. И. Двоскиным.

### Литература

1. Н. Н. Крачковский. Анализ схем коммутации гидроэлектрических станций. Сборник Гидроэнергопроекта, № 10, 1948.

2. М. И. Славнин. Одиночная система шин на электрических станциях и подстанциях. Электрические станции, № 4, 1950.

### Электротехническая секция Ростовского отделения ВНИТОЭ

Схема и конструкция распределительного устройства электростанции, предложенные Л. И. Двоскиным, были поставлены на обсуждение электротехнической секции Ростовского отделения ВНИТОЭ. После обмена мнениями секция приняла следующее решение:

1. Предлагаемая схема с одинарной системой генераторных шин является в принципе приемлемой в условиях сильно развитой электросистемы с большим числом электростанций и достаточным количеством сетевых связей, обеспечивающих полноценное и надежное резервирование. В этих условиях упрощение схем электростанций имеет свои положительные качества, помимо снижения стоимости. В настоящее время уровень развития электросистем и насыщенности их источниками энергии и связями в большинстве случаев не позволяет считать допустимым отказ от двойной системы шин, и поэтому предлагаемая схема для массового применения является преждевременной.

2. Отказ от трансферной системы шин снижает надежность или чрезвычайно осложняет схему при обеспечении равноценной надежности со схемой при трансферной системе. При этом необходимо выполнить схему квадрата с размещением по его углам генератора, трансформатора связи, реактора с линией собственных нужд и линейного присоединения генераторного напряжения и в этот квадрат вписать четырехлучевую звезду, в средней точке которой располагается секция сборных шин данного генератора. Такая схема очень сложна и в диспетчерском и в конструктивном отношении.

Обязательным минимумом необходимо считать наличие сбросных перемычек между генератором и линейным присоединением, а также между трансформатором связи и реактором с линией собственных нужд. Ликвидация выключателя генераторного напряжения на присоединении трансформатора связи неприемлема с оперативной точки зрения. Присоединение собственных нужд к одной из линейных сборок недопустимо.

3. Необходимо изучить и рассмотреть вопрос о том, насколько целесообразно устанавливать расщепленные реакторы на линейных присоединениях, так как предварительно представляется более целесообразным устанавливать их в цепи генераторов или трансформаторов, питающих пару секций.

4. Технико-экономические расчеты, приведенные в статье Л. И. Двоскина, требуют уточнения, которое может снизить размер предлагаемой экономии в 2—3 раза.

5. Необходимо отметить, что серийное производство расщепленных реакторов не организовано, и его надо организовать в ближайшее время. По имеющимся сведениям годичная эксплуатация расщепленного реактора в цепи генератора мощностью 10 тыс. кВт и напряжением 6 кВ дала хорошие результаты.

6. Представляется целесообразным разделить конструктивно комплектное распределительное устройство и распределительное устройство основных соединений. В связи с этим необходимо разработать вариант двухэтажного генераторного распределительного устройства и одноэтажного помещения комплектного распределительного устройства, что позволит устранить излишнюю кубатуру зданий и получить более рациональную конструкцию с размещением тяжелого оборудования в нижних этажах.

7. Кроме того, отмечаются следующие недостатки предложенного нового типа распределительного устройства: а) при схеме квадрата с диагоналями существенно усложняются защиты и возникает необходимость в сложных блокировках; б) предлагаемая схема не дает возможности быстрого и простого выделения одного из генераторов на раздельную работу с системой, что лишает ее существенной для эксплуатации гибкости; в) для создания необходимой надежности и нормальных условий питания во время ремонта генератора или шинных разъединителей является по существу обязательным двойное питание каждого питаемого потребителя от разных генераторов; г) разделение выключателей, часть которых помещается на первом этаже, а часть — на третьем, приводит к созданию двух коридоров управления и увеличению общей длины контрольных кабелей на 15...20%; д) высота первого этажа (3 м) слишком занижена; она не допускает размещения сборного распределительного устройства или других типов распределительных устройств, кроме предусмотренного проектом комплектного распределительного устройства.

8. Надо считать целесообразной дальнейшую работу над упрощенными схемами и конструкциями главных распределительных устройств генераторного напряжения, с тем чтобы подготовить и опробовать в производственных условиях в течение ближайших 5—7 лет наиболее рациональную схему и конструкцию для массового внедрения в условиях достаточных резервов мощности и плотности генерирующих точек, а также достаточного количества резервных связей и производства необходимой аппаратуры (мощных двоясных реакторов и т. п.). Предложенные Л. И. Двоскиным схемы и конструкции в том виде, в каком они представлены в журнале «Электричество» (№ 11 за 1953 г.), не могут быть рекомендованы к осуществлению без существенной переработки.

## КНИГА „ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ“

(Рецензия С. Д. Волобринского и М. Н. Звездкина, *Электричество*, № 8, 1954)

Кандидат техн. наук, доц. И. Я. РЫШКОВСКИЙ,  
доц. К. Г. КУЧМА и кандидат техн. наук  
Р. И. МИРОШНИЧЕНКО

Днепропетровский институт  
инженеров железнодорожного транспорта и ЦИИИ МПС

В процессе работы над книгой «Тяговые подстанции» авторы встретились с серьезными трудностями, неизбежными при написании первого учебника по емкому и профилирующему курсу учебного плана техникумов Министерства путей сообщения. Книга действительно не свободна от недостатков, и авторы признательны рецензентам за критический разбор учебника (*Электричество*, № 8, 1954).

Однако авторы и редактор не могут согласиться с рядом замечаний. Так, рецензенты, говоря о достоинствах

книги, указывают, что последовательность изложения материала в основном соответствует программе курса техникумов, и одновременно утверждают, что наиболее существенным недостатком книги следует считать проявленное авторами учебника стремление охватить в нем весь круг вопросов, относящихся к электрической части тяговой подстанции. Как же по мнению рецензентов можно было бы написать учебник в соответствии с программой, что отмечается ими как достоинство книги, и в то же время не осветить весь круг вопросов, предусмотренных той же программой. Нельзя считать аргументом указание рецензентов на возможность использования учебника по электрооборудованию электростанций и подстанций Л. Н. Баптиданова и В. И. Тарасова. Едва ли целесообразно отсылать учащихся техникумов железнодорожного транспорта к

учебнику, написанному по программе для энерготехникумов МЭС и к тому же выпущенному в трех томах. Авторы исходили из того, что любой учебник даже для студентов вузов, а тем более для учащихся техникумов, должен быть небольшого объема с охватом именно «всего круга вопросов», предусмотренного программой курса. Известно, что это соответствует и рекомендациям МВО.

Касаясь содержания введения, рецензенты упрекают авторов в том, что они ни словом не обмолвились о предстоящем освоении системы электрической тяги на однофазном токе нормальной частоты. Рецензенты, видимо, не приняли во внимание гл. II книги, целиком посвященную тяговым подстанциям переменного тока (стр. 326).

В рецензии указывается, что методически было бы правильно начинать гл. 3 об аппаратуре с описания ее назначения, а не прямо с процесса гашения дуги в отключающих аппаратах. По нашему мнению, последовательность изложения материала гл. 3 методически построена правильно. Об этом также свидетельствует учебник «Электрическая часть станций и подстанций», написанный коллективом научных работников МЭИ под редакцией А. А. Глазунова.

В этой книге, издания 1951 г., глава об электрической дуге при отключении цепей предшествует главам об электрической аппаратуре. Такая же последовательность принята и в книгах Л. Н. Баптиданова и В. И. Тарасова, предназначенных для техникумов и обладающих, как справедливо указывают рецензенты, методическими достоинствами.

Далее, рецензенты считают, что утверждение авторов книги о применении реле прямого действия лишь на установках малой мощности неправильно и может в связи с расширением области применения оперативного переменного тока дезориентировать читателя. Но реле прямого действия применяются для выключателей с приводами типов КАМ, РБА и др., относящимися к приводам с ручным включением и автоматическим отключением, не требующим оперативного тока. Такие выключатели обычно применяются на небольших электрических станциях и подстанциях при условии, что ударный ток короткого замыкания не превосходит 30 000 а. При токах, значительно превосходящих указанную величину, и при включении на короткое замыкание в сети электродинамические усилия могут достигать таких значений, что включение вручную окажется невозможным или будет произведено медленно, с опасностью приваривания контактов.

Рецензенты указывают, что авторы книги не упомянули вовсе о таких видах защиты подстанций и контактной сети; как устройства, реагирующие на изменения тока и напряжения, короткозамыкатели, посты секционирования и др. На стр. 195 изложен принцип действия быстродействующих выключателей с индуктивными шунтами, реагирующими на различный характер изменения тока при режимах перегрузки и коротких замыканий. Правда, принцип работы изложен лаконично, так как индуктивные шунты ввиду ненадежного действия не получили распространения (стр. 197).

Что касается постов секционирования и короткозамыкателей как элементов контактной сети, то их устройство освещается в курсе «Электроснабжение электрических железных дорог», читаемом до курса «Тяговые подстанции». Поэтому авторы книги и не считали рациональным упомянуть об этих устройствах. Рецензенты должны были бы учесть и эту особенность учебного плана техникумов МПС.

В рецензии указывается, что авторы книги ориентируют читателей главным образом на выбор двойной системы шин, что не всегда оправдывается технико-экономическими и эксплуатационными соображениями. На стр. 293 по вопросу выбора системы шин сказано следующее: «Колличество сборных шин 110 кВ выбирается по соображениям надежности работы с учетом экономической целесообразности».

Двойная система шин, показанная на схемах, значительно повышает надежность, но повышает также и стоимость подстанции и применяется тогда, когда выход из строя подстанции при плановом ремонте шин или при аварии на них приводит к большому затруднению в питании электротяги или ответственных районных потребителей».

Надо иметь в виду, что электрические железные дороги относятся к потребителям первой категории и, следова-

тельно, перерывы в электроснабжении электропоездов недопустимы. Не случайно ряд сооруженных в СССР тяговых подстанций с первичным напряжением 110 кВ имеют две системы шин.

Что касается некоторых стилистических неудачных выражений, допущенных в книге, то этот недостаток не следовало обобщать и делать вывод о невнимательном отношении редактора книги к рукописи и о недостаточном контакте между авторами и редактором.

В заключение считаем необходимым отметить, что остальные критические замечания рецензентов, а также замечания преподавателей и инженерно-технических работников электрифицированных участков будут с благодарностью учтены авторами в процессе дальнейшей работы над книгой.

**Кандидат техн. наук, доц. С. Д. ВОЛОБРИНСКИЙ  
и инж. М. Н. ЗВЕЗДИН**

*Ленинградский институт  
инженеров железносоружного транспорта*

Возражая против ряда положений рецензии, авторы и редактор учебника в первую очередь оправдывают свою попытку охватить широкий круг вопросов в одной книге ссылкой на рекомендации МВО о всемерном сокращении объема учебников за счет исключения из них второстепенных материалов и излишних подробностей. Авторы и редактор, однако, все права, полагая, что выпущенный ими учебник объемом в 34 печатных листа удовлетворяет этим требованиям. Конспективность изложения отразилась на теоретическом уровне отдельных глав учебника.

Возражения авторов против использования студентами учебника Л. Н. Баптиданова и В. И. Тарасова при изучении таких вопросов, как токи короткого замыкания, аппаратура, релейная защита, только потому, что он написан по программе для техникумов МЭС, не основательны. При изложении этих общих вопросов в рецензируемом учебнике его авторы не внесли каких-либо методических изменений, если не считать резкого сокращения материала и конспективности изложения за счет исключения отнюдь не второстепенных вопросов (см. рецензию). То, что учебник Л. Н. Баптиданова и В. И. Тарасова издан в трех томах, создает лишь удобства при его использовании.

Отсутствие во введении к учебнику по профилирующей дисциплине какого бы то ни было упоминания о перспективах электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты не обосновано. Ссылка на текст стр. 326, приведенная выше авторами и редактором в их возражениях, гораздо лучше укладывается именно в рамки введения, чем в основной текст из 4 страниц сжатой гл. II, посвященной тяговым подстанциям переменного тока.

Между прочим, при внимательном рассмотрении помещенных в этой главе рисунков (фиг. 268—272) установлено, что они представляют собой фотографически точные копии рис. 104, 105/106, 113, 117 и 125 из книги К. Sachz „Die ortfesten Anlagen elektrischer Bahnen“, изданной в 1938 г. Можно сожалеть, что изложение близких к осуществлению перспектив новой системы тяги в Советском Союзе дано с использованием устаревшего материала.

Изложению вопросов работы и конструкций электрической аппаратуры (и в том числе гашению дуги) должно обязательно предшествовать хотя бы самое краткое и общее описание применяемой на подстанциях аппаратуры и ее назначения, как это и сделано в учебниках А. А. Глазунова, Л. Н. Баптиданова и В. И. Тарасова, и напрасно не сделано в рецензируемом учебнике.

Неудачна попытка авторов обосновать сделанное ими в книге неверное утверждение о применении приводов ПРБА с реле прямого действия лишь в установках малой мощности с ограничением допустимого ударного тока короткого замыкания величиной 30 000 а. В опубликованных справочных материалах и каталогах применение этих приводов определяется типом выключателя, а не величиной



ударного тока. Даже становясь на точку зрения авторов, следует сказать, что в установках тяговых подстанций на стороне 6—10 кВ ударные токи короткого замыкания в подавляющем числе случаев укладываются в цифру, приводимую авторами, т. е. 30 кА. Разумеется, что на тяговых подстанциях постоянного тока, имеющих в составе своих собственных нужд аккумуляторную батарею, вопрос применения оперативного переменного тока теряет свою актуальность, но все же это не значит, что учащиеся должны быть ориентированы только в этом узком направлении.

Вызывает удивление утверждение авторов, что «индуктивные шунты ввиду ненадежного действия не получили распространения». Как это видно из каталога на электрооборудование № 2412, изданного ЦБТИ, все быстродействующие автоматы типа ВАБ-2 на токи более 1000 А выпускаются заводами нашей промышленности с индуктивными шунтами. На линиях, питающих контактную сеть, и на постах секционирования электрических железных дорог в настоящее время применяются автоматы с такими шунтами.

Отказываясь от упоминания в учебнике по курсу «Тяговые подстанции» о постах секционирования и короткозамыкателях на том основании, что этот вид защиты от токов короткого замыкания рассматривается в ранее читаемом в техникумах курсе «Энергоснабжение электрических железных дорог», авторы и редактор учебника вместе с тем сочли необходимым и возможным привести на стр. 198—199 рецензируемой книги весьма подробное изложение и две схемы (фиг. 176 и 177) защиты от токов короткого замыкания при помощи вольтметровой блокировки, также излагаемой в курсе «Энергоснабжение электрических железных дорог».

По поводу выбора системы шин на стороне переменного тока тяговых подстанций следует сказать, что одинарная секционированная система пригодна для электроснабжения потребителей любой категории ответственности, при условии обеспечения резерва по сети. Как известно, тяговые потребители электрических железных дорог таким резервом (по контактной сети) всегда обеспечены. Преимуществен-

ное применение двойной системы шин при первичном напряжении 110 кВ на тяговых подстанциях объясняется наличием транзита энергии через шины 110 кВ, а также присоединением к тяговым подстанциям районных потребителей первой категории, а вовсе не высокой степенью ответственности тяговых нагрузок. Поэтому применение одинарной системы шин для тяговых подстанций возможно не в меньшей, а даже в большей степени, чем для промышленных предприятий, что и учитывается проектными организациями, но не учтено авторами и редактором учебника.

В отношении оценки роли редактора книги, данной в рецензии, мы считаем необходимым сказать следующее. В своих возражениях по рецензии авторы книги и ее редактор почему-то ограничили роль редактора книги, связывая его ответственность за недостатки книги только с «некоторыми стилистическими неудачными выражениями, допущенными в книге». Не говоря уже о том, что и этих стилистических неудач, как и опечаток, в книге не мало, напомним, что рецензенты поставили свой упрек редактору книги в недостаточно внимательном отношении его к рукописи учебника. Можно ли, например, считать, что редактор не отвечает вместе с авторами за наличие в книге ряда ошибок и за то, что, как сказано в рецензии, главы 2, 3 и 4, занимающие около одной трети (!) объема всей книги, «вряд ли могут оказаться полезными как основной учебный материал для учащихся на любой стадии их обучения (в техникуме или втузе)». Вряд ли можно было также при более внимательном редактировании учебника допустить помещение в нем конструктивных чертежей, выполненных в мелком масштабе и с ошибками, которые исключают возможность плодотворного использования этих схем и рисунков учащимися (например, фиг. 268, 311, 320, 321). Отсутствие единообразных обозначений в пределах рецензируемой книги также нельзя не поставить в вину ее редактору.

В заключение отметим, что, по нашему мнению, ни одно из выдвинутых в разборе книги положений ответными пояснениями авторов и редактора книги не опровергнуто.

#### ОТ РЕДАКЦИИ

*Редакция полагает, что приведенный выше обмен мнениями будет способствовать лучшему выяснению читателями значения ряда замечаний по книге, содержащихся в опубликованной в № 8 журнала «Электричество» рецензии, а также облегчит в дальнейшем работу авторов над соответствующим учебником по курсу «Тяговые подстанции» для техникумов МПС.*



## По страницам технических журналов

### ЗА РУБЕЖОМ

#### ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

За последнее время в периодической литературе и вкладах на мировой энергетической конференции 1954 г. в Рио-де-Жанейро (Бразилия) уделялось большое внимание работам по энергетическому использованию ветра и созданию различных конструкций ветроэлектрических установок. Ниже приводятся некоторые результаты работ германских ветроэнергетиков. По данным исследований метеоролога Суринга, из общего количества лучистой энергии солнца, воспринимаемой земной поверхностью и окружающей ее атмосферой и равной  $1484 \cdot 10^{18}$  катч в год, только 2...2,5% переходит в кинетическую энергию ветра, т. е. движущихся воздушных масс. Часть ветровой энергии преобразуется в энергию морских волн, и мысль об использовании этой энергии за последнее время сильно пропагандируется. Огромная часть ветровой энергии содержится в недоступных для использования слоях атмосферы, где на высоте порядка 10 км средняя скорость ветров колеблется

от 18 до 26 м/сек. В настоящее время построены типовые характеристики распределения скоростей ветров для различных высот.

Расчетами, в основу которых положена скорость ветра на высоте до 300 м, установлена мощность, теоретически доступная для энергетического использования и равная  $10^{12}$  квт.

Теоретические работы Х. Ханнеф и Клейнхенц и их практические работы по созданию ветроэлектрических установок с ветроколесом, поднятым на высоту 200...250 м вместо обычных 20...40 м, подтвердили целесообразность использования области больших высот.

В ряде работ указывается на целесообразность уплотненной установки на больших площадях однотипных ветродвигателей. Такая их установка способствует усилению перемешиванию воздушных потоков, что при сильном торможении более низких слоев вызывает турбулентность потока. Турбулентность в свою очередь, несмотря на кажущуюся противоречивость, создает условия для перехода энергии от более высоких, а следовательно, и более быстрых слоев воздуха, к более низким, что равносильно по энергоиспользованию подъему ветроколеса выше точки его фактической установки.

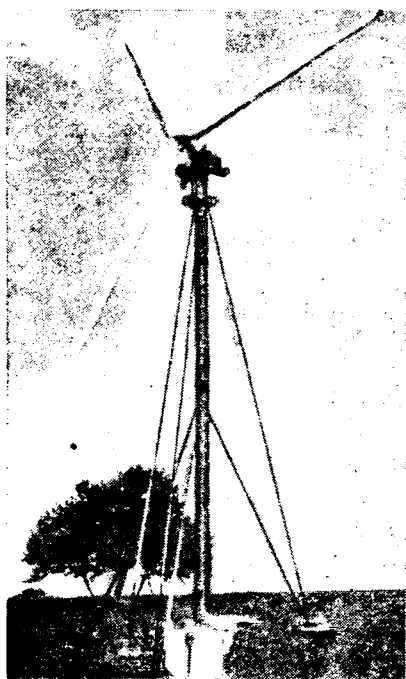


Рис. 1. Трехлопастная установка Алгайер мощностью 6 кВт при диаметре ветроколеса 10 м.

Стремление конструкторов к увеличению быстроходности за счет перехода к малолопастным конструкциям и улучшения аэродинамических форм лопасти до 1945 г. ограничивалось наибольшей быстроходностью 12, которой обладал ветродвигатель датской фирмы Шмидт. Бауэру удалось преодолеть этот рубеж и создать ротор однолопастного ветродвигателя с быстроходностью 20. Фирма Алгайер с 1948 г. серийно выпускает быстроходные трехлопастные ветроустановки различных модификаций (рис. 1).

Отмечено, что для увеличения быстроходности лопасть конструируется более узкой. Зависимость отношения средней ширины лопасти  $t$  к радиусу  $R$  от быстроходности характеризуется следующими данными:

Быстроходность	1	2	3	6	8	12
$t/R, \%$	120	40	11	6	3	1,3

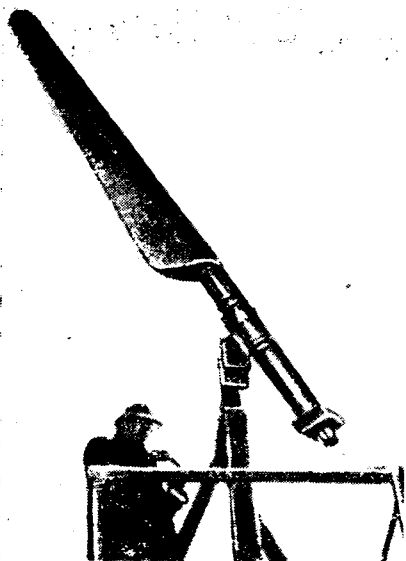


Рис. 2. Однолопастный ветродвигатель с полый лопастью и турбиной 600 вт.

Из этих данных следует, что при быстроходности 12 относительная ширина лопасти составляет примерно 1% от ее значения при быстроходности 1.

Хюттер на основе своих исследований ветроколес с большим коэффициентом использования энергии ветра подтвердил целесообразность создания ветродвигателей с полый лопастью, в которых используются центробежные потоки воздуха внутри крыла для привода воздушной турбины, связанной через короткий вал с генератором, одновременно служащим противовесом (рис. 2).

При рассмотрении рентабельности ветроэлектрических установок было установлено, что в местностях, где среднегодовая скорость ветра равна примерно 9 м/сек (побережье Северного моря), рентабельны установки любой мощности. Для остальных местностей можно принять, что с каждого квадратного метра площади, ометаемой ветроколесом, можно получить в год 480...520 кВтч электрической энергии. При этом ветродвигатель окупается за 5...8 лет. Сейчас уже не вызывает сомнений безусловная целесообразность установки ветроэлектростанций для работы совместно с двигателями внутреннего сгорания и практическая возможность устойчивой работы крупных ветроустановок параллельно с электрической сетью. Ветроэлектростанция с площадью, ометаемой ветроколесом в 500 м<sup>2</sup>, может выработать 250 тыс. кВтч электроэнергии в год.

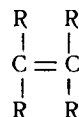
(U. Hütter. Brennstoff-Wärme-Kraft, стр. 270, № 7, 1954; World Power, Conference, 1954).

Кандидат техн. наук В. А. Константинов  
и инж. А. В. Михалков

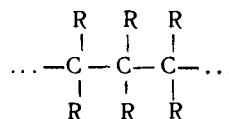
## РАЗВИТИЕ ВИНИЛЬНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

В союзной и зарубежной практике получили распространение винильные полимеры — диэлектрики: полиэтилен, полистирол, поливинилкарбазол, политетрафторэтилен и др. [Л. 1, 2]. В последнее время к этой группе диэлектриков добавился политрифторхлорэтилен [Л. 3 и 4].

Винильные полимеры получают из виниловых смол, имеющих следующую структурную формулу:



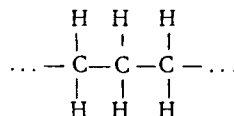
При расщеплении связей между двумя молекулами углерода образуется полимер



Все винильные диэлектрики являются термопластичными, хотя введение поперечных связей между радикалами  $R$  может придать им свойства термореактивных веществ.

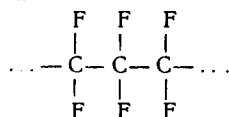
В зависимости от химической природы радикала  $R$  изменяются свойства полимера. В связи с этим интересно проследить эволюцию свойств винильных полимеров от полиэтилена до политрифторхлорэтилена.

Как известно, полиэтилен характеризуется формулой



Его температура плавления равна 110°С, хотя уже с 40°С можно обнаружить размягчение материала.

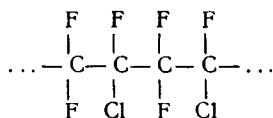
Замещая в этом соединении водород фтором, получаем политетрафторэтилен



Это вещество остается твердым до температуры 300°С, но формуется с большим трудом.

Дальнейшим шагом вперед является замещение в этом соединении одного атома фтора хлором, в результате чего получается политрифторхлорэтилен.

Его структурная формула



Этот материал имеет температуру плавления на 50... 100° ниже, чем политетрафторэтилен, но он хорошо обрабатывается. Этот диэлектрик не горюч, обладает превосходной теплостойкостью и может применяться в широком диапазоне температур от —160 до +180°С. За 24 часа он поглощает менее 0,9% воды. Он прозрачен в слое толщиной до 6 мм, в более толстых слоях полупрозрачен; не чувствителен к солнечному излучению; пропускает инфракрасные лучи. Его удельный вес равен 2,1 г/см<sup>3</sup>. Допускает смешивание с различными заполнителями и красителями; при смешивании с веществом, имеющим более высокий молекулярный вес, получается гибкий материал, обладающий высокой химической стабильностью.

Электрические свойства политрифторхлорэтилена следующие. Удельное объемное сопротивление 10<sup>18</sup> ом·см; значение кратковременной электрической прочности может доходить до 100 кВ/мм (при толщине образца 3 мм) и 200 кВ/мм (при толщине образца 0,13 мм).

Величина электрической проницаемости в зависимости от частоты и температуры колеблется от 2,5 до 3,1, а tg δ — от 0,04 до 0,07 (рис. 1). Увеличение tg δ при некоторых частотах объясняется асимметрией молекул, создаваемой атомом хлора.

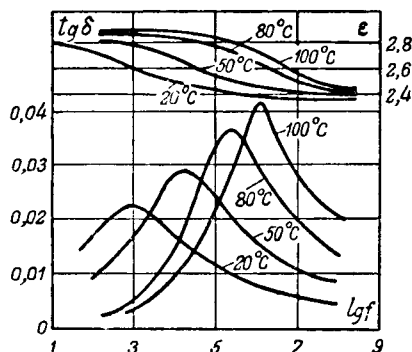
Химические свойства этого материала отличаются высокой стабильностью; на его свойства не влияет воздействие серной, соляной и азотной кислоты. В контакте с некоторыми галогидными соединениями и ароматическими веществами он набухает и приобретает пластичность.

Механические свойства политрифторхлорэтилена отличаются тем, что он оказывает хорошее сопротивление удару и легко поддается механической обработке. После прекращения сжатия материал приобретает первоначальную форму. Он имеет временное сопротивление разрыву 400 кг/см<sup>2</sup>; временное сопротивление сжатию достигает 560 кг/см<sup>2</sup>.

Механические свойства зависят от термообработки изделия после формовки. Так, твердость материала, первоначально равная 65 (по Шору), повышается до 75 после его пребывания в течение 24 час. при температуре 195°С.

Для формовки изделий из политрифторхлорэтилена пригодны все применяемые сейчас технологические процессы. Формовка сжатием осуществляется при температурах от 200 до 260°С, а литьем под давлением — при 260°С. Достоинством материала является его малая усадка.

Область применения этого материала весьма обширна. Вследствие удачного сочетания важнейших качеств: теплостойкости, химической стабильности, высоких электрических и механических свойств, возможностей формовки и обработки, этот материал быстро приобретает признание.



Зависимость tg δ и ε политрифторхлорэтилена от частоты.

Из него изготавливают изоляцию проводов, кабелей и конденсаторов, предназначенных для эксплуатации в условиях повышенной влажности и температуры. Кроме того, его применяют в двигателях, трансформаторах, измерительных и регулирующих устройствах и в радиотехнической аппаратуре.

Перспективы развития винильных диэлектриков заключаются не только в создании новых материалов, но и в улучшении свойств уже известных полимеров [Л. 4].

Так, достигнуто увеличение температуры размягчения полистирола путем совместной полимеризации его с нафтенной кислотой. Обработанный таким образом полистирол можно применять до температуры +120°С.

Другим способом увеличения температуры размягчения является приобретение полимером поперечных связей между молекулами путем бомбардировки материала нейтронами, выделяющимися при ядерных реакциях. Таким воздействием успешно подвергался полиэтилен и ряд других материалов.

Полученные результаты в развитии винильных диэлектриков открывают новые возможности их применения в электротехнической промышленности.

### Литература

1. М. М. Михайлов. Электроматериаловедение. Госэнергоиздат, 1953.
2. Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков и Б. М. Тареев. Электротехнические материалы. Госэнергоиздат, 1951.
3. P. Jolivet. Новые электроизоляционные материалы. RGE, стр. 267, № 6, 1953.
4. S. Whitehead, Прогресс диэлектриков. El. Review, стр. 1309, № 24, 1953.

Кандидат техн. наук В. М. Файницкий

### ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ В УСТАНОВКАХ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

В 1954 г. в Швеции пущена в эксплуатацию новая установка продольной компенсации, составленная из конденсаторов под давлением [Л. 1, 2]. Будучи включенной в линию передачи протяженностью 480 км на напряжение 380 кВ, установка позволяет повысить пропускную способность линии на 100 мвт, не нарушая условий устойчивости.

Указанная батарея состоит из 5200 конденсаторов мощностью около 20 квар каждый. Общая мощность батареи 105 мвар; она секционирована на две равные части.

Конденсаторы каждой фазы батареи смонтированы на изолированных от земли платформах. На каждой платформе установлено четыре ряда конденсаторов. Осуществлена объемная компоновка конденсаторов в батарее в несколько ярусов.

Для электрического соединения отдельных конденсаторов в параллельно-последовательные группы в значительной степени использованы корпуса самих конденсаторов, так как в данной конструкции только одна обкладка конденсатора имеет изолированный вывод, а другая непосредственно связана с корпусом. Этим достигается экономия выводов и ошиновки, а сама установка делается более компактной.

Исследования, проведенные в Советском Союзе [Л. 3], показали, что применение давления в конденсаторах резко повышает их эксплуатационную надежность. Это объясняется тем, что даже при увеличении рабочей напряженности поля в конденсаторе до 15 кВ/мм при наличии давления порядка 5 ат минимальная ионизирующая напряженность диэлектрика будет выше рабочей напряженности. Поэтому ионизационный износ изоляции в рабочем режиме в этих конденсаторах полностью исключен. Нагрузочная способность конденсаторов под давлением ограничивается не ионизацией, а условиями теплового пробоя

Наряду с этим увеличивается стойкость конденсаторов к кратковременным перенапряжениям, что очень важно для установок продольной компенсации. Допустимая кратность кратковременных перенапряжений для этих конденсаторов ограничивается не столько снижением ионизирующего напряжения, сколько возможностью электрического пробоя.

В конденсаторе под давлением достигается снижение удельного объема активных материалов по сравнению с конденсаторами с нормальным давлением масла внутри бака.

Учитывая результаты, достигнутые в развитии конденсаторов под давлением, вторая научно-техническая сессия по эксплуатации высоковольтной изоляции отметила необходимость разработки отечественной электропромышленностью конденсаторов под давлением [Л. 4].



## Заметки и письма

### О КАТЕГОРИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Согласно «Правилам устройства электротехнических установок» сельскохозяйственные потребители в отношении надежности их электроснабжения относятся к третьей категории. По нашему мнению, эта рекомендация не обоснована и должна быть пересмотрена.

Сельскохозяйственных потребителей можно разделить на две группы.

К первой группе относятся потребители, длительное прекращение подачи электроэнергии которым недопустимо, так как оно приводит к порче и уменьшению выпуска продукции. К таким потребителям принадлежат: инкубаторные станции, доильные установки, кормокухни, внутриферменный транспорт, молотильные пункты, мастерские мтс и совхозов, насосные установки водоснабжения, процессы первичной обработки молока, мобильные процессы полеводства (электропахота, уборка урожая электрокомбайнами), колхозные пекарни и т. п. Ко второй группе относятся сельскохозяйственные потребители, которые терпят длительные перебои в подаче электроэнергии, например колхозные мельницы, колхозные мастерские и т. п. Первая группа потребителей преобладает над второй.

Применение электричества в сельскохозяйственном производстве высвобождает рабочую силу, тракторы, живое тягло, двигатели внутреннего сгорания и позволяет использовать их на других участках работы. Однако существующее в настоящее время положение, когда все сельскохозяйственные потребители отнесены к третьей категории, не дает возможности реализовать это ввиду частых перебоев в электроснабжении. Высвободившуюся рабочую силу и оборудование приходится держать наготове на случай этих перебоев.

С созданием местных энергетических систем и присоединением сельскохозяйственных районов к сетям государственных энергосистем образуются крупные узлы сельскохозяйственных нагрузок. Более или менее длительное прекращение подачи электроэнергии к этим узлам может причинить существенный ущерб колхозам, мтс и совхозам и отрицательно сказаться на выполнении плана.

Если учесть, что большая часть сельских линий электропередачи является радиальной и что не все сельскохозяйственные объекты получают централизованное электроснабжение, а также территориальную разбросанность сельских потребителей, то станет очевидным, что обеспечение двустороннего питания последних потребует значительных дополнительных капиталовложений. Поэтому отнесение сельскохозяйственных потребителей в отношении надежности электроснабжения к первой категории нецелесообразно.

По нашему мнению, все сельскохозяйственные потребители, не терпящие длительного перебои в электроснабжении (первая группа), должны быть отнесены ко второй категории. Это позволит повысить надежность их электроснабжения без сколько-нибудь значительных капиталовложений. Остальных сельскохозяйственных потребителей (вторая группа) следовало бы отнести к третьей категории,

### Литература

1. Продольная емкостная компенсация линий электропередачи. Электричество, № 8, 1952.
2. Продольная емкостная компенсация дальних линий электропередачи, ASEA Joupal, стр. 54, № 4, 1954.
3. В. М. Файницкий. Износ изоляции бумажно-масляных конденсаторов и меры повышения их эксплуатационной надежности. Материалы второй научно-технической сессии по эксплуатации высоковольтной изоляции. Ростов-на-Дону, 1953.
4. Решения второй научно-технической сессии по эксплуатации высоковольтной изоляции. Ростов-на-Дону, 1954.

Кандидат техн. наук В. М. Файницкий

но, учитывая незначительный удельный вес и наличие их в каждом сельскохозяйственном объекте, целесообразно и эту группу потребителей отнести ко второй категории, т. е. считать, что к последней относятся все сельскохозяйственные потребители. Ввиду этого мы предлагаем внести соответствующие изменения в «Правила устройства электротехнических установок».

Кандидат техн. наук М. И. Калантаров

### ПОЛЬСКИЙ УЧЕНЫЙ К. ПОЛЛЯК — АВТОР ОДНОФАЗНОЙ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Автором однофазной мостовой схемы выпрямления, изображенной на рис. 1, считают обычно австрийского ученого профессора Гретца. Первое сообщение о работах Гретца над этой схемой появилось во второй половине 1897 г. в германском журнале ETZ, № 25.

Между тем, как сообщает польская печать<sup>1</sup>, однофазная мостовая схема была предложена еще в начале 1896 г. польским ученым, почетным доктором Варшавского политехнического института К. Полляком. За полтора года

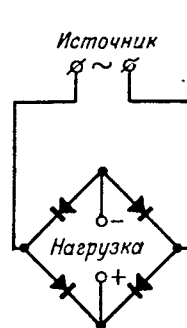


Рис. 1.

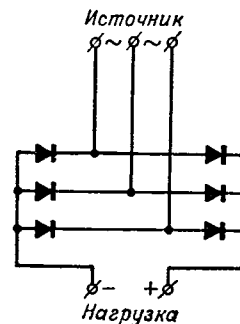


Рис. 2.

до опубликования сообщения о работе Гретца Полляк подал авторскую заявку на изобретение электролитического алюминиевого выпрямителя; в описательной части заявки была приведена схема двухполупериодного выпрямления с применением моста из четырех вентилей. 14.I.1896 г. Полляку был выдан германский патент № 96564 с приоритетом. Таким образом, однофазную мостовую схему по рис. 1 правильно назвать схемой Полляка.

Не лишне напомнить, что трехфазная мостовая схема выпрямления (рис. 2) была предложена и впервые практически осуществлена советским ученым А. Н. Ларионовым.

Кандидат техн. наук Я. М. Червоненкис

<sup>1</sup>Wiadomości Elektrotechniczne, стр. 236, № 12, 1954.

## ШВЕДСКИЕ ЭНЕРГЕТИКИ В СССР

В Советском Союзе в марте с. г. гостила группа руководящих работников Государственного управления энергетики Швеции во главе с г-ном Ю. О. Русском и г-ном Б. Г. Ратсманом. Шведские энергетики ознакомились с ведущим в СССР строительством гидроэлектростанций, с работой крупных действующих электростанций, с работами советских научно-исследовательских институтов, в частности по проблеме передачи электроэнергии на большие расстояния, вызвавшей значительный интерес у шведской

делегации. Перед отъездом из Москвы Заместитель Директора Государственного управления энергетики Швеции г-н Б. Г. Ратсман в своей речи выразил уверенность, что состоявшиеся поездки шведской делегации в СССР и делегации советских энергетиков в Швецию будут способствовать укреплению дружественных связей между СССР и Швецией и, что в дальнейшем обмен делегациями будет продолжен.

## КОНФЕРЕНЦИЯ ПО КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДАМ ИЗМЕРЕНИЙ

17—20 января с. г. в г. Львове состоялась научно-техническая конференция, организованная совместно с Львовским отделением ВНИТОмашприбор и кафедрой «Электрические измерения и приборы» Львовского политехнического института.

Доклады и сообщения, сделанные на конференции, были посвящены компенсационным методам измерений, имеющим актуальное значение для дальнейшего рационального конструирования соответствующих точных приборов для электрических измерений.

В работе конференции участвовали представители многих научных учреждений, заводов, поверочных организаций Советского Союза.

Общие вопросы компенсаторостроения и теории чувствительности компенсаторов постоянного тока были рассмотрены в докладах работников Львовского политехнического института доц. Б. С. Синицына, проф. К. Б. Карандеева, доц. В. А. Кочана и канд. техн. наук Л. П. Попко. Значительный интерес вызвал отчет доц. К. П. Широкова о разработанных во ВНИИМ новейших компенсационных установках, предназначенных для поверочных и заводских лабораторий.

Доклады инж. Б. А. Селибера, инж. С. Г. Рабиновича (Ленинград), проф. К. Б. Карандеева, канд. техн. наук Л. Я. Мизюка, Г. А. Штамбергера (ИМА АН УССР), доц. В. А. Кочана, инж. В. А. Лапы (киевский завод «Точэлектроприбор») и канд. техн. наук Л. А. Синицкого (г. Львов), посвященные вопросам создания и совершенствования автоматических и полуправоматических компенсаторов постоянного тока, вызвали активный обмен мнений.

Конференция одобрила работу инж. А. Ф. Городовского (краснодарский завод ЗИП) по созданию малогабаритных гальванометров с терморadiационным усилителем, отличающихся повышенной (до 100 раз) чувствительностью по сравнению с существующими малогабаритными переносными гальванометрами. Доц. А. М. Мелик-Шахназаров и инж. Г. Л. Горнштейн (киевский завод «Точэлектроприбор») посвятили свои доклады вопросам создания и производства компенсаторов переменного тока промышленной частоты (прямоугольно-координатных и полярных).

Вопросы рационального использования компенсационного метода измерений и сравнение с другими методами содержались в докладах члена-корр АН УССР, проф. А. Д. Нестеренко (Институт электротехники АН УССР), доц. В. А. Кочана, канд. техн. наук Л. П. Попко и инж. З. И. Зеликовского.

В результате состоявшегося обмена мнений по докладам и сообщениям конференция приняла решение, в котором были намечены основные направления проведения исследовательских и конструкторских работ в области компенсационных методов измерений, а также было обращено внимание Министерства электротехнической промышленности СССР на необходимость расширения выпуска комплектных компенсационных установок, полуправоматических компенсаторов типа Р2 и различной вспомогательной и специальной аппаратуры для создания совершенных компенсационных и автоматических устройств.

Для иногородних делегатов были организованы экскурсии на ряд заводов, а также по Львову — древнему украинскому городу.

*Кандидат техн. наук Л. П. Попко*



## Библиография

В. ГУТВИРТ. „ИЗ ДЕТСКИХ ЛЕТ НАШЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ“. Библиотека истории техники. 177 стр. Государственное издательство технической литературы. Прага, 1953. На чешском языке.

История техники, в частности история электротехники, в странах народной демократии еще недостаточно полно изучена и пока еще слабо освещена перед широкими кругами наших энергетиков. Между тем вопреки проводившемуся в бывшей австро-венгерской империи Габсбургов многовековому онемечиванию и преследованию национальных меньшинств многие представители последних занимали одно из первых мест в культурной и научной жизни госу-

дарства и между прочим оказали весьма заметное влияние на развитие электротехники в стране в целом. Рецензируемая книга посвящена определению вклада чехословаков.

Книга состоит из пятнадцати очерков-глав, частью посвященных научной и инженерной деятельности выдающихся чехословацких электриков, частью же — истории отдельных отраслей электротехники (слабых и сильных токов), и охватывает период с середины XVIII в. до 20-х годов

текущего столетия. Книга рассчитана на широкие круги читателей; текст иллюстрирован портретами ученых и оригинальными репродукциями.

В кратком введении отмечены основные вехи — от начальных опытов со статическим электричеством до успехов современной электроники. Наряду с другими в книге названы славные имена пионеров русской электротехники: Петрова, Попова, Доливо-Добровольского<sup>1</sup> и др., открытия которых знаменовали начало крупнейших завоеваний электрического тока. Начинания русских исследователей находили живой отклик среди чехословацких электриков, что выражалось как в практическом использовании и дальнейшей разработке русских изобретений (телеграф Шиллинга, свеча Яблочкова), так и в информации, помещавшейся в научной периодике («*Casopis ceskeho Musea*», «*Kronika prase*» и др.). Недостатком введения, как, впрочем, и последующего изложения материала, является преобладание чисто описательного метода без достаточно критической характеристики и анализа историко-экономических условий, в которых развивалась чешская электротехника.

Следующая глава повествует об одном из первых чешских естествоиспытателей, много занимавшемся электричеством — Прокопе Дивише (1698—1765). Его интересы простирались от электромедицинских опытов до наблюдений электрических разрядов в откачанных стеклянных трубках. В 1754 г. т. е. позже Ломоносова и Рихмана, и спустя 2 года после Франклина, но независимо от него, Дивиш изобрел молниеотвод, названный им «метеорологической машиной».

Четвертая глава книги посвящена основателю современной чешской физики, профессору Пражского университета Франтишку Петжине (1799—1855). Петжина с самого начала своих научных занятий обратился к проблемам электричества; его работы в этой отрасли знания во многом способствовали зарождению электротехники на родине ученого. Он предвидел неограниченные возможности в использовании электрической энергии и его усилия были сознательно направлены на практические приложения электромагнетизма. В 1847 г. Петжина писал: «Ни один раздел физики новейшего времени не принесет столько пользы науке и промышленности, сколько гальванизм» (стр. 33). Исследования Петжины касались главным образом двух важнейших направлений современной ему электротехники: электрического телеграфа и магнитоэлектрической машины. Из учеников Петжины по Пражскому университету автор отмечает Карела Зенгера (1830—1908) — профессора физики чешского отделения Пражского политехнического института (стр. 40—45). В истории чешской науки Зенгеру принадлежала заслуга тщательного изучения и экспериментального обоснования максвелловой электромагнитной теории.

Пространный очерк посвящен инженеру и предпринимателю Франтишку Кжижику (1847—1941), который изобрел в 1880 г. дифференциальную дуговую лампу — известную в свое время под названием «пльзенка». Она экспонировалась на парижских выставках 1881 и 1889 гг. Новшество, введенное чешским инженером, заключалось в придании сердечнику магнитной системы регулятора формы двойного конуса, что во всех положениях сердечника в катушке обеспечивало более плавное регулирование, чем в лампах других типов. Автор книги подчеркивает, что интерес, проявленный Кжижигом к электрическим источникам

света, был вызван поразительным эффектом свечей Яблочкова, которые конструктор «пльзенки» наблюдал в Париже до своего изобретения, на выставке 1878 г. Кжижик участвовал в разработке конструкции подвижного состава и проектов электроснабжения первых электрических железных дорог в Чехии и Австро-Венгрии. Следует отметить допущенную автором некоторую идеализацию личности Кжижика.

Одновременно с Кжижигом чешскую электропромышленность двигали вперед также Иозеф Донат (1858—1937), построивший в 1887 г. завод электрических машин в Брно, и Эмиль Кольбен (1862—1943) — талантливый инженер, бывший некоторое время шеф-конструктором швейцарской фирмы Броун-Бовери (стр. 75—91). Кольбен, будучи ревностным пропагандистом начинаний М. О. Доливо-Добровольского в деле применения трехфазного тока, внедрял в электрохозяйство Чехословакии передовые тенденции современной ему электротехники.

В последующих двух главах «Чешская дуговая лампа» и «Электрическая лампа накаливания» (стр. 92—121) дан обзор истории возникновения и усовершенствования электрического освещения и связанного с этим общего прогресса электротехники. Автор отмечает первостепенное значение свечи Яблочкова, возбудившей веру в великое будущее электрического света и давшей толчок для постановки и правильного решения проблемы промышленного производства и распределения электрической энергии. Обе главы изобилуют фактическим материалом, относящимся к периоду внедрения электрического освещения в Чехии и начальному этапу электрификации страны. Отметим два досадных пробела, допущенных здесь Гутвиртом. Упомянув о многочисленных, в том числе и чешских, изобретателях различных вариантов дуговых ламп, автор позабыл о В. Н. Чиколеве, приоритет которого в создании дифференциального регулятора общезвестен. Весьма двусмысленно автор высказался о вкладе А. Н. Лодыгина, являющегося первооткрывателем практически пригодной лампы накаливания (стр. 119). В связи с этим, учитывая отмеченную выше недооценку автором глубокого значения трудов знаменитого русского электротехника М. О. Доливо-Добровольского, приходится предъявить автору упрек в недостаточном уяснении действительной роли и приоритета ряда русских электриков: автор, повидимому, не освободился до конца от ранее широко распространенных предвзятых мнений в области истории электротехники, насаждавшихся в течение многих десятилетий буржуазной историографией.

Телеграфу, телефону и радио в книге уделено место в трех очерках, из которых можно получить довольно ясное представление о проникновении этих видов связи в чешскую экономику и культуру (стр. 133—169). Автор далее рассказывает о многих чехословацких инженерах (Домалипе, Колачке и др.), успешно работавших над освоением гениального изобретения А. С. Попова, приоритет которого, как неоднократно подчеркивается в книге, никогда не оспаривался чешскими учеными. Последняя глава книги посвящена Иозефу Мургашу (1864—1929), крупному изобретателю в области радио.

Отметим некоторые «технические» недостатки, затрудняющие пользование книгой. Главы в книге не пронумерованы; рисунки также не пронумерованы и помещены без ссылок на них в тексте; нет именного указателя; встречаются опечатки и, надо полагать, описки (стр. 123 и 172).

В заключение необходимо сказать, что появление популярной книги Гутвирта нужно всячески приветствовать; в случае ее переиздания автору следует устранить отмеченные выше недостатки.

Инж. Г. К. Цвезава



#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Н. А. Андрианов, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова,**  
**Н. Г. Дроздов** (главный редактор), **Е. Г. Комар, М. П. Костенко,**  
**И. А. Сыроматников** (зам. главного редактора), **А. М. Федосеев,**  
**М. Г. Чиликин, М. А. Шателен.**

## РАЗМЕРЫ КОНТАКТНЫХ РЕШЕТОК ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЕ

При электрическом моделировании потенциалных полей в неоднородных средах в гидродинамике, электротехнике, теплотехнике, так же как и при моделировании полей с известным распределением плотности тока или потенциала на границе, в электролитической ванне устанавливается система электродов в виде ряда плоских пластин или проволок, врезанных в непроводящую перегородку (контактный барьер или решетка). Это обеспечивает контакт между двумя различными электролитами, снижение переходного сопротивления в месте резкого изменения толщины слоя электролита или возможность задания распределения потенциала или нормальной составляющей плотности тока на границе.

## Д. И. Азарьев, Н. Н. Соколов, В. А. Веников 2

### ДАЛЬНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИНХРОННЫМИ КОМПЕНСАТОРАМИ

Дальние электропередачи, как правило, наиболее целесообразно выполнять с промежуточными подстанциями, связывающими электропередачу с местными системами.

Эффективность синхронных компенсаторов промежуточных подстанций в отношении увеличения пропускной способности передачи повышается с применением современных систем возбуждения и компенсацией индуктивного сопротивления компенсаторов статическими конденсаторами.

Эти мероприятия значительно расширяют возможности электропередач.

Применение компенсированных емкостью синхронных компенсаторов особенно рационально при очень

## НИЗКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ В ЖИЛЫХ И АДМИНИСТРАТИВНЫХ ЗДАНИЯХ

Дана критическая оценка американских электротехнических правил и норм, которые не содержат такой детализации, какой отличаются соответствующие германские нормы. Важное значение имеют электротехнические правила, изданные противопожарным страховым обществом США. Эта же организация производит приемку новых электрических установок, смонтированных в жилых или административных зданиях. Наиболее характерная черта этих установок — самое широкое применение стандартных деталей и узлов. Более всего распространены системы низкого напряжения: четырехпроводные — 216/125 и 460/266 в и трехпроводная 460 в. Первичные напряжения распределительной сети: 2 400, 4 160, 4 800, 7 200, 12 000 и 13 200 в. Стандартные трансформаторы — блоки, содержащие трехфазный трансформа-

## Н. К. Чухин 3

### ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ МАШИН

Дается обобщенный графоаналитический метод построения статических характеристик насыщенных синхронных машин, основанный на замене нелинейных связей физических величин линейными и на параметрических уравнениях ненасыщенной синхронной машины.

Приводятся примеры расчета регулировочных характеристик неявнополюсного и явнополюсного насыщенных синхронных генераторов двумя графоаналитическими методами (неупрощенным и упрощенным). Дается анализ результатов расчетов регулировочных характеристик неявнополюсного и явнополюсного насыщенных синхронных генераторов. Показываются построения внешних характеристик по двум конечным точкам.

## Е. Л. Эттингер, Г. В. Чалый, Е. М. Глух 2

### ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА ИОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ НА МОЩНОЙ ГИДРОСТАНЦИИ

Одним из мероприятий, позволяющих существенно повысить динамическую устойчивость мощных генераторов, работающих на нагрузку через длинные линии передачи, при одновременном снижении капиталовложений на такие дорогостоящие мероприятия, как серьезная компенсация, расщепление проводов и т. п., является применение систем возбуждения с высокой форсировочной способностью. Наиболее эффективной является система ионного возбуждения, позволяющая легко осуществлять 4...5-кратную форсировку напряжения возбуждения генератора при скорости нарастания его до 40...50 кВ/сек.

Описывается опытная установка ионного возбуждения гидрогенератора 55 тыс. кВт, разработанная и осу-

## В. Е. Скобелев 3

### ОБЩИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ НАГРУЗКИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Излагается графоаналитический метод определения токов нагрузки тяговых двигателей последовательного и смешанного возбуждения как в двигательном, так и тормозном режиме.

Метод позволяет на основании характеристик намагничивания машины получить данные для построения ее основных рабочих характеристик при различных значениях сопротивления якорной цепи, напряжениях на зажимах цепи и степенях регулирования поля.

При аналитическом расчете характеристик  $n = f(I)$  учет влияния реакции якоря, особенно в двигателях смешанного возбуждения, представляется затруднительным и поэтому часто удовлетворяются приближенными результатами, полученными из характеристики холосто-

## М. J. Lantz 2

### ВЛИЯНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТОЧКЕ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ НА ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Большая часть коротких замыканий в электрических сетях происходит через тело металлической опоры или на спуск заземления деревянной опоры. В тех случаях, когда отношение эквивалентного реактивного сопротивления системы (при замыкании на землю) к активному сопротивлению в точке замыкания на землю мало, учет сопротивления заземления опоры в точке короткого замыкания приводит к существенному снижению величины тока короткого замыкания.

В приведенном примере сопротивление заземления опор линии электропередачи равно 3...16 Ом. Ток замыкания на землю при коротком замыкании на подходе к подстанции при учете сопротивления заземления опоры составляет 25...90% от тока, рассчитанного без учета этого сопротивления.

## R. Modlinger 3

### ВОДОРОДНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Преимущество водородного охлаждения очевидно, если разобрать некоторые его свойства в сравнении с воздушным. Если предположить одинаковое нагревание охлаждающих сред — водорода и воздуха и считать, что к. п. д. вентиляторов одинаковы, то мощности, необходимые для пропускания и перемешивания охлаждающих сред, будут относиться, как 1:14. Другие газы, как гелий, метан или водяной пар, менее пригодны, а тем более двуокись углерода  $\text{CO}_2$ , где это отношение равно 1,53:1. При применении водородного охлаждения из-за малой кинематической вязкости водорода снижаются потери на трение ротора об охлаждающую среду

приблизительно до  $\frac{1}{9}$  величины трения о воздух при давлении 350 мм вод. ст.



тор 500 кв.а, 7 200/460 в, аппаратуру высокой и низкой стороны и оборудование для пяти низковольтных линий, имеют габариты  $1\,200 \times 2\,300 \times 4\,700$  мм. Проводка и аппараты приспособлены для стандартных жилых домов, которые, как правило, строятся из дерева. Провода имеют изоляцию из синтетических материалов, как-то: неопрен, полиэтилен и др. Доски для счетчиков на вводах почти нигде не применяются. В связи с широким применением электробытовых приборов в проводке предусматриваются для их питания отдельные линии.

ETZ-B, т. 6, № 11, стр. 411, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

Проведенный при помощи конформных отображений анализ погрешностей, вызванных влиянием контактного барьера, позволяет установить оптимальные соотношения размеров плоских и полуцилиндрических электродов. Для плоских электродов ширина пластины должна быть равна половине расстояния между осями соседних электродов, а радиус полуцилиндрического электрода должен быть равен 0,13 этого расстояния.

Экспериментальная проверка показывает хорошее совпадение теории с опытом.

Электричество, № 4, 1955.

Погрешность этого метода по сравнению с погрешностью упрощенного метода в промежуточных точках достигает максимального значения в 8%.

При помощи графоаналитического метода имеется возможность строить и анализировать все статические характеристики насыщенных синхронных неявнополюсных и явнополюсных машин.

Графоаналитический метод может быть использован при выполнении расчетных заданий, курсовом и дипломном проектах по синхронным машинам, а также в инженерных расчетах, где приходится иметь дело с нелинейными связями физических величин. Для неявнополюсных синхронных машин предлагаемый метод дает ту же точность, что и метод векторных диаграмм, а для явнополюсных машин — значения, более близкие к действительным.

Электричество, № 4, 1955.

дальних передачах, так как мощность синхронных компенсаторов увеличивается с увеличением длины меньше, чем мощность статических конденсаторов, необходимых для последовательной компенсации.

Дополнительным преимуществом является возможность снижения тока ротора в нормальном режиме и отсюда увеличение форсировок.

Самовозбуждение таких компенсаторов приостанавливается при введении в цепь статора активного сопротивления или при специальной конструкции синхронных компенсаторов. Условия самовозбуждения устанавливаются при помощи уравнений Горева-Парка, имеющих 7...9 порядок и учитывающих в общем случае как электромагнитные процессы, так и малые колебания ротора генератора. Анализ позволит, установив условия прекращения самовозбуждения, отыскать наиболее рациональную конструкцию синхронного компенсатора и наилучший способ регулирования возбуждения.

Электричество, № 4, 1955.

го хода. В предлагаемом методе учет реакции якоря может быть произведен сравнительно просто, путем введения рабочей характеристики намагничивания.

Показывается, что известная схема рекуперации со стабилизирующим сопротивлением может быть приведена к схеме двигателя смешанного возбуждения и к ней полностью применим предлагаемый метод определения токов нагрузки тяговых машин.

Электричество, № 4, 1955.

ществленная трестом «Электропривод» и заводом «Урал-электроаппарат» на мощной гидростанции.

Испытания и эксплуатация подтвердили достоинства ионного возбуждения с металлическими ртутными выпрямителями: а) высокое быстродействие (постоянная времени ионного возбудителя равна  $0,004 \div 0,006$  сек); б) быстрое гашение поля без разрыва цепи обмотки возбуждения (гашение поля с номинального тока возбуждения осуществляется менее чем за 1,0 сек); в) увеличение «жесткости» системы регулирования вследствие значительного уменьшения постоянной времени роторной цепи генератора при применении выпрямителей (на 30...45%); д) высокая надежность, простота и удобство эксплуатации.

Электричество, № 4, 1955.

Уменьшение этих двух видов потерь, составляющих основные потери генератора, имеет решающее значение для увеличения к. п. д., зависящего от генерированной мощности, в особенности при неполной нагрузке. При обычных температурах и давлениях теплоемкость водорода почти в 7 раз больше теплоемкости воздуха, что особенно важно для тонкого слоя охлаждающей среды между изоляцией и пластинами. Передача тепла от твердого тела к газообразному улучшается в 1,5 раза.

Ввиду того что электрическая прочность водорода составляет примерно 60% прочности воздуха, пробивное напряжение при применении водородного охлаждения значительно ниже, чем при воздушном. Как газ водород не активен, но в смеси с воздухом в количестве 4,1—75% при давлении 350 мм вод. ст. взрывоопасен.

ETZ-A, стр. 476, № 14, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

В мощных электрических системах токи коротких замыканий, происходящих вблизи электростанций, могут быть весьма значительны. При этом токи одно- или двухфазного замыкания на землю могут оказаться большими, чем при трехфазном коротком замыкании. Введение активного сопротивления в цепь короткого замыкания приводит к быстрому затуханию постоянной слагающей и снижает переменную слагающую до величины, равной или меньшей ее значения при симметричном коротком замыкании.

Изоляция троса от заземлений опор и подстанций позволяет значительно увеличить активное сопротивление, входящее в цепь короткого замыкания, и, следовательно, обеспечить снижение токов замыкания на землю.

Изоляция троса не должна перекрываться при коротких замыканиях на линии. При достаточно малых сопротивлениях заземлений опор будет обеспечено грозозащитное действие троса, так как при прямых ударах молнии в трос его изоляция будет перекрываться.

Tr. AIEE, т. 72, ч. III, стр. 1016, 1953.

(Э-во, 4, 1955)



## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

3

Описана конструкция генератора полностью закрытого типа мощностью 250 *ва*, 115 *в*, 1600 *гц* при 2400 *об/мин*, мощность которого при устройстве добавочной вентиляции может быть повышена до 1 *кв*. Ротор генератора укреплен на валу из немагнитной стали и снабжен полюсами из постоянных магнитов. На роторе помещена кольцевая катушка для намагничивания полюсов, по которой на заводе-изготовителе пропускается импульс тока в 100 *а*. Эта же катушка служит для повторного намагничивания полюсов после ремонта и сборки ротора. Испытания показали, что на магнетизм ротора не влияют даже тяжелые короткие замыкания в цепи статора. Для того чтобы можно было компенсировать отклонения в качестве материалов и неточности изготовления машины, на роторе помещены два сердечника и предусмотрена возможность смеще-

Е. А. Бугринов

4

## ЗА СОЗДАНИЕ НОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 110 *кв*

Передовая техника эксплуатации и индустриализации строительства требует создания новых современных конструкций электрических аппаратов и распределительных устройств 110 *кв*, взаимно приспособленных друг к другу.

В статье приведено описание предложенной автором схемы объединенного отключающего аппарата 110 *кв*, выполняющего функции выключателя, разъединителя и трансформатора тока, а также приспособленных к нему конструкций закрытых и открытых распределительных устройств 110 *кв*.

Применение нового отключающего аппарата упрощает конструкцию распределительного устройства, уменьшает его размеры и сокращает количество изоля-

Н. G. Halt

3

## О РАСЧЕТЕ ВЕНТИЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

На практике довольно часто имели место случаи, когда при испытании машины было установлено, что изготовленный по приближенным расчетам вентилятор оказывался слишком мощным, в результате чего в эксплуатации повышалась мощность потерь. Ввиду сложности условий вентиляции электрических машин весьма затруднительно представить их математическими выражениями. Однако это не должно быть причиной расчета вентиляторов только по приближенным формулам. Автор пытается указать путь для более точного расчета вентиляции, условия которой для каждой серии машины являются различными. Подвергнуты рассмотрению сопротивления воздушному потоку в открытых и закрытых продуваемых электрических машинах, а также в закрытых машинах с охлаждающими ребрами. Расчет сопро-

H. Ritz

4

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ СЕТЕЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

В шведской сети 380 *кв* установлены трансформаторы тока двух типов: горшковые шведской фирмы ASEA и проходные западногерманской фирмы Риз. Все трансформаторы тока шведской сети 380 *кв* удовлетворяют следующим требованиям. Испытательные одномоментные напряжения при 50 *гц* следующие: а) типовые для внутренней изоляции 860 *кв*; для внешней изоляции сухой 977 *кв*; для внешней изоляции «под дождем» 781 *кв*; б) контрольное 781 *кв*. Импульсное испытательное напряжение (типовое) при полной волне 1/50 *мксек* — 1775 *кв макс*. Кратность тока короткого замыкания в течение 1 *сек* — 84.

Измерительная нагрузка 40 *ва* при классе «0,6» (погрешности: тока 0,6%, угловая 40 *мин*). Предусмотрена возможность измерения напряжения сети с ис-

E. Grunder

3

## ПРОБЛЕМЫ ШУМА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Шум, производимый трансформаторами при работе, обуславливается вибрациями, которые создаются, с одной стороны, из-за перемагничивания листов сердечника, с другой, — вследствие действия магнитных сил в стыках. Шум трансформатора может быть сведен к минимуму путем надлежащего выбора максимального значения индукции и при помощи рациональной конструкции и монтажа на месте установки. Учитывая требования экономичности, в большинстве случаев довольствуются компромиссным решением.

Нормы, предписывающие определенные методы измерения шума трансформаторов и допустимые его уровни, изданы в США. В европейских странах эти нормы не являются обязательными, но ориентировочными. В статье даются основные понятия из области акустики и измерения шума и анализируются причины шума

E. T. B. Gross, K. J. Rao

3

## ТРАНСФОРМАТОР С ЗАЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НА СТОРОНЕ ТРЕУГОЛЬНИКА

Обычно в двухобмоточных трансформаторах одна из обмоток соединяется в треугольник. В случае необходимости заземления нейтралей в системах обоих напряжений применяют трансформатор с соединением обмоток по схеме звезда/звезда с добавочной обмоткой, соединенной в треугольник, либо устанавливают специальный заземляющий трансформатор.

Добавление ненагруженной, соединенной в треугольник обмотки вызывает увеличение размеров и удорожание трансформатора. Установка отдельного заземляющего трансформатора требует увеличения занимаемой площади, а потери холостого хода трансформатора вызывают снижение к. п. д. установки.

Применение специального трансформатора, описанного в рассматриваемой статье, позволяет уменьшить затраты на оборудование и снизить эксплуатационные

А. И. Глушко

3

## МЕХАНИЗМ ВТЯГИВАНИЯ ГЕНЕРАТОРА В СИНХРОНИЗМ ПО МЕТОДУ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ

При включении в сеть гидрогенераторов по методу самосинхронизации очень часто наблюдается смещение ротора генератора на половину полюсного деления после завершения процесса самосинхронизации. Это объясняется тем, что в начальной стадии процесс движения ротора генератора без демпферных обмоток определяется динамическим моментом явнотоплюсности. Превращение этого момента в синхронный момент явнотоплюсности или суммарный синхронный момент происходит с некоторой постоянной времени. В ряде случаев генератор успевает втянуться в синхронизм раньше, чем успеют затухнуть свободные токи и угол синхронной работы устанавливается близким к  $+180^\circ$ . С появлением синхронного момента происходит смещение ротора в соответствии с новой точкой равновесия.

E. Schröder

4

## СЕЛЕНОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ ДЛЯ ПИТАНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для питания низковольтных фабрично-заводских и транспортных установок постоянного тока от трехфазной сети в Германии изготавливаются селеновые выпрямители мощностью до 2500 *квт* с воздушным или масляным охлаждением. В отличие от ртутных выпрямителей к. п. д. селенового выпрямителя практически не зависит от напряжения. При напряжении 250 *в* и полной нагрузке оба типа выпрямителей имеют равный к. п. д. При нагрузках меньше номинальной к. п. д. ртутного выпрямителя остается близким к номиналу, а селенового — повышается.

Стоимость селенового выпрямителя примерно пропорциональна его мощности и мало зависит от напряжения. Напротив, стоимость 1 *квт* ртутного выпрямителя в диапазоне 115...600 *в* практически обратно про-

торов и шин. Значительно упрощаются монтажные работы на месте строительства, которые фактически сводятся к установке (на одну камеру) одного отключающего аппарата, одного линейного одноколонткового разъединителя и короткой и несложной шинной проводки.

Все остальные трудоемкие монтажные работы производятся на заводе, в условиях максимальной рационализации и механизации.

Электричество, № 4, 1955.

ния полюсов относительно сердечника. Это дает возможность некоторой регулировки магнитного потока при первоначальной наладке машины. Для улучшения внешней характеристики машины в обмотки ее статора включены последовательно статические конденсаторы, как это обычно делается в высокочастотных машинах. При таком устройстве падение напряжения между холостым ходом машины и полной нагрузкой составляет не более 20%. Основное назначение описанной машины — работа в качестве вспомогательного возбудителя турбогенератора, причем высокая частота подается магнитному усилителю в системе автоматического регулирования напряжения турбогенератора.

El. Times, т. 126, стр. 669, № 44, 1954.

Э-во, 4, 1955

пользованием емкости между первичной и вторичной обмотками, имеющей порядок сотен пикофард.

Общей чертой обеих конструкций является герметичность, обеспечивающая длительное сохранение высокой электрической прочности изоляции. Особенностью трансформаторов тока ASEA являются слои фольги, заложённые в бумажной изоляции. Полная высота 5,4 м (при высоте фарфора 4,2 м) допускает железнодорожную перевозку только в наклонном положении. Полный вес 3675 кг, причем вес масла составляет лишь около 10% этой величины.

Трансформатор тока фирмы Рид имеет меньший вес (3050 кг) и меньшую высоту (менее 4,5 м), допускающую железнодорожную перевозку в вертикальном положении.

ETZ-A, стр. 307, № 9, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

тивлений относится прежде всего к машинам малой мощности, так как для машин большой мощности требуется еще более точный расчет отдельных участков воздушного тракта. В статье приведен расчет необходимого количества воздуха, суммарного сопротивления воздушного тракта внутри машины, потребной мощности и основных размеров вентилятора. Указан способ экспериментального определения коэффициента потерь (коэффициента сопротивления) и кинематической вязкости воздуха в турбулентном потоке. Показано, что для расчета типовой серии вентиляторов (для серии электрических машин) имеется возможность при помощи основной модели вентилятора экспериментально определить соответствующие коэффициенты для всей серии моделей вентиляторов.

Deutsche Elektrotechnik, т. 8, стр. 383, № 11, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

расходы. Описываемый трансформатор имеет четыре обмотки: обмотка высшего напряжения, соединенная в звезду, обмотка низшего напряжения, соединенная в треугольник, и две дополнительные обмотки, соединенные в зигзаг и включенные параллельно обмотке, соединенной в треугольник. Обмотки, соединенные в зигзаг, располагаются симметрично обмоткам высшего и низшего напряжения и имеют одинаковое число витков. Обмотка, соединенная в треугольник, имеет втрое большее число витков, чем каждая из частей зигзага.

Трансформаторы вышеописанной конструкции, большей частью трехфазные, изготавливаются для напряжений первичной обмотки 13,2...1,5 кВ и для напряжений вторичной обмотки 4,3...24 кВ. Номинальная мощность трансформаторов составляет 5...62,5 мВА.

Trans. AIEE, т. 72, ч. III, стр. 156, 1953.

(Э-во, 4, 1955)

трансформаторов, важнейшей из которых является магнитострикция листов магнитопровода. Рассматривается влияние условий эксплуатации на величину шума, а именно влияние колебаний нагрузки и сетевого напряжения.

В отношении шума принято делить все трансформаторы на три категории: 1) мощностью до 300 кВА со сравнительно невысоким уровнем шума — до 55 дБ; 2) от 300 до 1 000 кВА; у этой категории уровень шума может превосходить 60 дБ, и так как эти трансформаторы чаще всего устанавливаются в населенных пунктах и промышленных предприятиях, то вопросу об устранении их шума приходится уделять повышенное внимание; 3) мощностью свыше 1 000 кВА; шум этих трансформаторов имеет второстепенное значение, так как они обычно устанавливаются в таких местах, где уровень шума и без того высок.

Bull. Oerlikon, стр. 23, № 303, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

порциональна выпрямленному напряжению. В германских условиях силовой селеновый выпрямитель дешевле неуправляемого ртутного при выпрямленных напряжениях до 460 В.

Итак, если регулирование выпрямленного напряжения не требуется, селеновый выпрямитель выгоднее ртутного как по к. п. д., так и по капитальным затратам при выпрямленных напряжениях до 250 В. В диапазоне напряжений 250...460 В выбор между обоими типами выпрямителей зависит от числа часов использования максимума и от стоимости энергии в месте установки. При напряжениях выше 460 В на данном этапе выгоднее применять ртутный выпрямитель. Если же требуется регулирование выпрямленного напряжения, граница между обоими типами выпрямителей сдвигается в пользу ртутного выпрямителя с сеточным управлением.

Siemens Zeitschrift, стр. 73, № 2, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

Рассмотрев уравнение движения ротора генератора без демпферных обмоток, можно установить определенные соотношения между начальными углом включения и скольжением, при которых синхронный режим устанавливается непосредственно после включения генератора в сеть. При этом полного цикла скольжения не наблюдается, и весь процесс самосинхронизации длится десятые доли секунды. Наиболее благоприятной областью самосинхронизации является включение с углами, лежащими близко к  $\pm 180^\circ$ . Если включение происходит вне области благоприятных условий, то в процессе самосинхронизации возникает асинхронный режим, создающий эти условия. При самосинхронизации генераторов с демпферными обмотками в начале пуска действует значительный демпферный момент, действие которого направлено в сторону уменьшения скольжения и процесс самосинхронизации облегчается.

Электричество, № 4, 1955.

### БАТАРЕЯ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Описывается новая конденсаторная батарея, установленная в лаборатории высоковольтных испытаний фирмы Вестингауз и предназначенная для испытания высоковольтных выключателей в различных режимах.

Основным элементом, из которого составляется батарея, является единичный конденсатор со следующими номинальными параметрами: мощность 25 *квар*; напряжение 2 400 *в*; ток 10,4 *а*; емкость 11,5 *мкф*.

Всего в батарее установлено 864 единичных конденсатора, что дает суммарную мощность 21 600 *квар*. Батарея конденсаторов может без нарушения нормальной работы выдерживать в течение 10 периодов 173% перегрузку, т. е. мощность 65 000 *квар*.

Схема батареи конструктивно выполняется таким образом, что путем несложных переключений от

### СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Водонаполненные трубы (например, фарфоровые) и шланги могут применяться в качестве зарядных и разрядных сопротивлений генераторов импульсного напряжения, в качестве сопротивлений делителей напряжения, для моделирования волновых сопротивлений воздушных линий и как тормозные сопротивления для замедления импульсного разряда при условии, если величина этих сопротивлений не зависит от напряжения, температуры, полярности и частоты. Прочие требования, предъявляемые к сопротивлениям при импульсных напряжениях, легко удовлетворить при помощи водонаполненных труб или шлангов, так как их сопротивление легко регулировать путем изменения концентрации электролита; кроме того, их можно экранировать, и благодаря удлиненной конструкции они обладают малой емкостью и индуктивностью. На основании теории электролитов

### РЕЛЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Статья посвящена описанию свойств, конструкций и возможностей применения реле тлеющего разряда, более известного в литературе под названием тиратрона с холодным катодом. Реле тлеющего разряда, обладая рядом положительных свойств, заслуживает несомненного внимания, в особенности в случае коммутации цепей малой мощности. К этим свойствам следует отнести постоянную готовность реле к действию без потребления тока и без ухудшения свойств в период покоя. Принцип действия подобных реле основан на общеизвестном коммутирующем свойстве газоразрядных приборов, представляющих собой в отсутствии разряда бесконечно большое сопротивление. Важным свойством реле является его высокая чувствительность, достигаемая введением в газоразрядный промежуток управляющего электрода (сетки). В ряде случаев для зажигания раз-

### ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ЯПОНИИ

Высоковольтные конденсаторы в Японии изготавливаются с изоляцией из крафт-бумаги толщиной 0,05...0,08 *мм*, пропитанной минеральным маслом под высоким вакуумом. Применение крафт-бумаги позволяет изготавливать дешевые конденсаторы мощностью до 500 *кВА* в единице. Для напряжений до 3 *кВ* конденсаторы изготавливаются трехфазными, для напряжений 11...77 *кВ* — однофазными. Конденсаторные батареи, соединяемые к линиям 33...154 *кВ*, устанавливаются на опорной изоляции.

Большая нагрузка линий электропередачи и низкая стоимость конденсаторов способствовали их широкому применению в сетях высокого напряжения. Общая мощность всех установленных в Японии конденсаторов высокого напряжения превышает 4 000 *МВА*. Около 50% из них применяется для регулирования напряжения.

### ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ ДЛЯ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Приводится описание устройства, позволяющего производить фотографирование последовательных стадий быстропротекающих процессов. Для осуществления быстросъемного затвора использовано явление Фарадея, заключающееся во вращении плоскости поляризации света, проходящего через вещество, помещенное в магнитное поле. Использование явления Фарадея позволило создать затвор, осуществляющий экспозицию до 2 *мксек*, а применение малоинерционного источника света дало возможность производить снимки через промежуток времени от 3 до 200 *мксек*. Основной частью прибора является ячейка Фарадея, состоящая из магнитной катушки, надетой на цилиндр из тяжелого стекла флинта, и двух перекрещивающихся никелей. В момент

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМИ ЛИНИЯМИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

На базе анализа наиболее сложных систем электрического управления автоматическими линиями металлорежущих станков в статье приводятся характерные особенности этих систем, выявляются их основные недостатки и намечаются пути дальнейшего их улучшения и развития. Указывается, что по мере усложнения способов механической обработки металлов на станочных линиях (переход от обработки корпусных деталей к обработке тел вращения) число электрических аппаратов в линии увеличивается и, что особенно важно, количество контактоисрабатываний аппаратов в единицу времени резко возрастает. Так, на линии по обработке блока цилиндров автомобильного мотора (корпусная деталь) число контактоисрабатываний составляет 14 557 в час, а на более сложной линии по обработке

### НОВЫЙ ДЕТЕКТОР УТЕЧКИ ВЗРЫВООПАСНЫХ ГАЗОВ

Описанный ниже детектор (датчик) способен обнаруживать присутствие водорода, а также других воспламеняющихся газов в количестве нескольких десятых долей или, иначе, утечку водорода из какого-нибудь резервуара в количестве около 16 *см<sup>3</sup>/час* при атмосферном давлении.

Принцип действия детектора основан на изменении поверхностной электрической проводимости некоторых нагретых керамических материалов в присутствии небольшого количества воспламеняющегося газа в воздухе.

Детектор состоит из керамической цилиндрической трубки диаметром 7 *мм* и длиной 45 *мм* с нарезкой. На трубку плотно намотана тонкая платиновая проволока, служащая нагревателем и «горячим» электродом детектора. Второй — «теплый» электрод детектора выступает

### ЭЛЕКТРОПРИВОД РЕВЕРСИВНЫХ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Рассматриваются реверсивные станы с двумя моталками. Отмечается, что старая система связи двигателя клетки и моталки посредством ременной передачи и муфты скольжения начинает возрождаться благодаря введению в практику электромагнитной муфты скольжения. При этом для привода моталки выбирается двигатель с регулируемой скоростью, изменение же скорости вала самой моталки осуществляется за счет автоматического регулирования тока возбуждения муфты. Дан расчет потерь в муфте в указанных условиях. Основное преимущество привода с электромагнитной муфтой скольжения заключается в уменьшении общего момента инерции на валу моталки. Однако система регулирования не упрощается по сравнению с чисто электрическими системами регулирования. Последние разделяются на три группы: 1) схемы с регулированием на постоянство тока; 2) схемы с синхронизацией вращения и 3) схемы с регулиро-

и ранее проделанных измерений даны практические указания, обеспечивающие получение сопротивлений, не зависящих от напряжения, температуры, полярности и частоты. Была также исследована возможность применения силитовых стержней 1...500 000 ом в качестве сопротивлений при импульсных напряжениях. У 80 из 100 исследованных стержней обнаружено непостоянство сопротивления, которое изменяется от очень высокой величины в середине стержня до небольшой величины у его концов. Вследствие этого при импульсной нагрузке стержень нагревается неравномерно и разрушается. Разрушение в большинстве случаев происходит уже при относительно малых нагрузках. Отмечаются также другие особенности силитовых стержней и указывается, что при сохранении формы стержней и практикуемого в настоящее время способа их изготовления они непригодны для применения в импульсных генераторах.

Deutsche Elektrotechnik, т. 8, стр. 414, № 11, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

Батареи конденсаторов секционированы для устранения заметных толчков напряжения при включении или отключении. В тех случаях, когда нежелательна перекомпенсация реактивной мощности, применяется включение реакторов параллельно конденсаторной батарее.

Благодаря низкой стоимости конденсаторов совместная установка реакторов и конденсаторов оказывается более выгодной, чем установка синхронных компенсаторов. По приведенным данным суммарная стоимость установки конденсаторной батареи мощностью 45 мгва и шунтирующего реактора мощностью 30 мгва вдвое меньше соответствующих затрат для синхронного компенсатора 45 мгва с водородным охлаждением. Годовые потери энергии в конденсаторах и реакторе составляют 8% от потерь в синхронном компенсаторе.

Исследования показали, что конденсаторы, используемые в качестве источника реактивной мощности, не вызывают снижения динамической устойчивости электрической системы.

CIGRE, доклад № 304, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

автомобильных поршней (тело вращения) число контактоиспытаний достигает уже 64 600 в час. На автоматическом заводе автомобильных поршней число контактоиспытаний на всех линиях и агрегатах завода составляет около 30 000 в час. Резкое увеличение числа контактоиспытаний аппаратуры в единицу времени по мере усложнения систем автоматического управления на машинах станков ведет к снижению надежности работы линий. В связи с этим в статье предлагается переходить от систем рележно-контактного управления к системам бесконтактного управления и в первую очередь заменить контактные датчики перемещения и промежуточные реле бесконтактными аппаратами. С целью дальнейшего упрощения систем и повышения их надежности рекомендуется широкое применение телемеханических принципов управления станочными линиями, в частности применение многоцепных, многокомандных, импульсно-распределительных и других устройств.

Электричество, № 4, 1955.

ванием на постоянство мощности. Приводится анализ этих схем и характеристик, которые они обеспечивают как в статических, так и в динамических режимах электропривода. Значительное место в статье отведено описанию механической части реверсивных станов холодной прокатки и технологическому процессу прокатки для выяснения вытекающих отсюда заданий для электрической части. В общем статья отражает преимущественно европейскую практику в рассматриваемой области

ELIN Zeitschrift, т. 6, стр. 116, № 3, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

руки возможно осуществление параллельных и последовательных соединений блоков конденсаторов в различных сочетаниях. Наличие дополнительных постоянных шин позволяет собирать трехфазную схему в звезду или треугольник. Каждый конденсатор снабжен плавкой вставкой. Группа из 18 единичных конденсаторов имеет общую плавкую вставку. В батарее установлены разрядники, предохраняющие конденсаторы от перенапряжений.

Установка данной батареи позволила получать более высокие испытательные напряжения и тем самым непосредственно испытывать выключатели на напряжения 230 кв. Кроме того, она позволяет воспроизводить условия отключения линий электропередач напряжением 330 кв, длиной до 480 км и линий 230 кв длиной до 720 км, а также кабелей напряжением до 138 кв и длиной до 16 км.

El. Eng., т. 73, стр. 225, № 3, 1954.

(Э-во, № 4, 1955)

ряда, т. е. для срабатывания реле, достаточен ток  $10^{-6}$ ... $10^{-8}$  а. Другим важным свойством реле является его малая чувствительность к колебаниям анодного напряжения. Время срабатывания такого реле составляет порядка  $10^{-5}$  сек. Ток, проходящий через реле после его срабатывания, в рассматриваемых автором конструкциях равен 10...20 ма в непрерывном режиме и 100 ма в импульсном. Мощность, выделяемая на нагрузке, включенной в цепь реле, может иметь порядок одного или нескольких ватт, что достаточно для срабатывания более мощного устройства, например электромагнитного реле. Реле тлеющего разряда находят применение в случае маломощных датчиков.

ETZ-B, № 2, стр. 43, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

разряда конденсатора через последовательно соединенные источник света и катушку затвор оказывается открытым. При этом перекрывается площадь, равная 10 см<sup>2</sup>. В качестве малоинерционного источника света применяется тонкая проволока, испаряющаяся при пропускании через нее тока большой силы. Фотографирование производится пятью фотографическими аппаратами, затворы которых открываются через заданные промежутки времени. Конструктивно ячейка Фарадея вместе с источником света выполнена в виде насадки, надеваемой на объектив. Для последовательного открытия затворов можно использовать задерживающие сопротивления. Приводятся фотографии, произведенные при помощи описанной системы: последовательные стадии разрыва шерстяного волокна, листа бумаги, распространения паров металла при распылении тонкой металлической проволоки.

Zeitschrift für angewandte Physik, т. 6, стр. 49, № 2, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

из торца керамической трубки. В цепи с источником постоянного тока 300 в находятся последовательно соединенные датчик и миллиамперметр, стрелка которого отклоняется при наличии газа в воздухе. Платиновый нагреватель, питающийся от того же источника 300 в, нагревает керамическую трубку до 300°С.

Материалом трубки является глинозем. Трубка при изготовлении нагревается примерно до 1350°С и при этой температуре пропитывается водным раствором некоторой соли.

Детектор ведет себя в цепи постоянного тока в некотором смысле как электролит (твердый). При напряжении намного ниже нормального (например, порядка 275 в) чувствительность датчика резко падает. При напряжении выше 325 в ток становится ненормально большим. Датчик работает лучше, если платиновый электрод является положительным полюсом.

El. Eng., т. 73, стр. 806, № 9, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

### ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ В ВОЗДУХЕ

Автор рассматривает некоторые общие закономерности пробоя воздуха напряжением переменного тока между произвольными электродами (имеющими некоторый радиус закругления). Все искровые промежутки разбиваются на 2 группы: к группе *a* относятся промежутки, образованные концентрическими цилиндрами, концентрическими шарами и т. п.; к группе *b* — обычные шаровые и подобные им промежутки.

Для промежутков группы *a* характерно прохождение через три области, резко различающиеся по механизму разряда. В первой области при наименьших расстояниях появление короны у внутреннего электрода повышает максимальную напряженность поля и приводит почти мгновенно к перекрытию промежутка искрой. При увеличении разрядного расстояния попадаем во вторую область, где возможно существование устойчивого коронного разряда, который предшествует искро-

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ

Опыт эксплуатации показывает, что генератор, вышедший из синхронизма в результате нарушения динамической устойчивости, во многих случаях, вопреки теории, ресинхронизируется без вмешательства персонала.

Испытания турбогенератора мощностью 50 тыс. кВт показали, что после отключения трехфазного короткого замыкания на шинах станции, длившегося 0,55 сек возникли асинхронные качания. Ресинхронизация турбогенератора произошла после 9 циклов этих качаний, т. е. через 4 сек после начала короткого замыкания.

Испытуемый гидрогенератор мощностью 55 тыс. кВт не имел успокоительных обмоток. В первом опыте он работал с регулятором возбуждения и устройством быстродействующего возбуждения; во втором опыте напряжение возбуждения сохранялось неизменным.

### ИМПУЛЬСНАЯ ИОНИЗАЦИЯ И ПРОБОИ

Приводятся результаты экспериментальных работ по импульсной ионизации и пробую трансформаторного масла и хлорбензола. Для исследований была применена фотографическая техника. Были исследованы два случая. В первом случае между дисковыми электродами, окруженными испытуемой жидкостью, находились пропитанный этой жидкостью электрокартон и фотографическая бумага. Один из электродов, у которого находилась фотобумага, был круглым, другой — квадратным. К электродам подводилась волна 1,5/40 мксек.

Для электрокартона, пропитанного минеральным маслом и погруженного в него, начало ионизации обнаруживалось при напряжении, равном 42% пробивного. При увеличении напряжения процесс ионизации становился более отчетливым, расширяясь в радиальном направлении. При этом излучался свет; напряжение и

### МОДУЛЬ УПРУГОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ФАРФОРА КАК ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Предлагается методика и описывается установка для определения модуля упругости керамических материалов резонансным способом. Погрешность определения модуля упругости по резонансному методу составляет при эталонном способе измерения частоты около 2%, а при определении относительных изменений модуля в зависимости от температуры еще меньше, так как эти изменения определяются на одном и том же образце и погрешность, обычно вносимая измерением размеров и веса, здесь исключается. Устанавливается, что между модулем упругости и прочностью на изгиб высоковольтного фарфора существует линейная связь.

По методу наименьших квадратов была получена эмпирическая формула, устанавливающая зависимость

### ИСПЫТАНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ

Увеличение производства изолированных проводов с алюминиевыми жилами потребовало серьезного изучения способов выполнения арматуры для оконцевания, ответвления и сращивания изолированных алюминиевых проводов. При испытаниях в течение нескольких лет арматура, смонтированная на проводе, подвергалась попеременно нагреванию током с последующим остыванием. При этом температура нагрева испытуемых образцов оказалась ниже температуры провода.

Опыты производились в лабораторных условиях без испытаний на коррозионную устойчивость для определения характеристик соединителей, предназначенных для работы при температуре проводов не выше 75°С

### ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

В тяжелых условиях эксплуатации происходит интенсивная термо-окислительная деструкция изоляционных органических материалов. Сроки жизни изоляции резко снижаются, что приводит к преждевременному выходу электрических машин из строя. Существенное повышение надежности и сроков жизни изоляции электрических машин, а также ее нагревостойкости может быть достигнуто применением кремнийорганических материалов. Кремнийорганическая изоляция с большим успехом применена во втулках электродвигателей, в электродвигателях с влагостойкой изоляцией для тяжелых условий работы, в роторах крупных турбогенераторов, в тяговых электродвигателях и других типах машин.

Приведенные данные по испытанию кремнийорганической изоляции, а также более чем четырехлетний

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРУБЧАТЫХ РАЗРЯДНИКОВ НА ЛИНИЯХ 13—138 кв

В статье обобщены итоги опыта эксплуатации трубчатых разрядников на основе опроса 50 электрических систем. По данным 36 компаний, охватывающих 36 тыс. установленных разрядников, 94% разрядников применяется для общей защиты линий, остальные 6% разрядников используются для защиты мест с ослабленной изоляцией.

На линиях напряжением выше 44 кв разрядники устанавливаются на всех фазах. На линиях до 35 кв распространена установка разрядников только на верхнем проводе, выполняющем защитные функции. Плотность установки разрядников при этой схеме принимается от одного разрядника на каждой опоре до одного разрядника на каждой пятой опоре. Среднее сопротивление заземлений опор составляет 1...100 ом, причем 57% систем указывают средние значения 15 ом или менее.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕАТИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В работе приведены результаты исследования свойств различных марок стеатита при температурах до 400°С.

Исследованиями установлено, что величины  $\epsilon$ ,  $Tg\delta$  и их температурные зависимости определяются составом стеклофазы, а не ее количеством. Материалы, содержащие большое количество глинистых веществ, обладают худшими диэлектрическими свойствами и в большей степени зависят от температуры и частоты приложенного электрического поля. Угол диэлектрических потерь в стеатитовых материалах в основном обусловлен колебаниями слабосвязанных ионов бария, кальция и щелочными ионами, содержащихся в стеклофазе, а не электропроводностью.

В первом опыте асинхронный режим длился около 15 сек, ресинхронизация произошла после 138 циклов асинхронных качаний. Во втором опыте ресинхронизация наступала после 171 цикла асинхронных качаний, а затем гидрогенератор вновь вышел из синхронизма при скорости меньше синхронной. После 8 циклов асинхронных качаний в этом режиме, т. е. через 22 сек после начала короткого замыкания произошла окончательная ресинхронизация гидрогенератора. Наибольшее скольжение, наблюдавшееся в первом опыте, составило 28,6%, а во втором — 32,5%.

Анализ результатов опыта и расчетов показал, что решающую роль в процессе ресинхронизации играет инерционность системы регулирования турбин.

Электричество, № 4, 1955.

вому перекрытию. При еще больших расстояниях, в третьей области, корона переходит перед пробоем в кистевой разряд.

Для промежутков группы *b* область устойчивой короны отсутствует. Для обеих групп в области кистевого разряда имеет место прямолинейный закон роста напряжения с расстоянием. Наклон прямых для любых электродов тот же, что и для электродов острие — острие. Это объясняется тем, что после возникновения кистевого разряда отдельные стримеры можно рассматривать как острия. Все семейство прямых для симметричных промежутков в третьей области приближенно выражается уравнением  $U_{np} = k(a + r_0)$ , где  $U_{np}$  — напряжение полного пробоя;  $a$  — разрядное расстояние;  $r_0$  — радиус электрода.

ETZ-A, стр. 293, № 9 1954.

(Э-во, 4, 1955)

между модулем упругости и прочностью на изгиб:  
 $\sigma = 2,35 \cdot 10^{-8} E - 940 \text{ (кг/см}^2\text{)}.$

Применение формулы показало вполне удовлетворительное совпадение расчетных и опытных значений, полученных при испытаниях на изгиб. Исследуются также влияния температуры обжига, структуры и глазурных покрытий на модуль упругости и механическую прочность.

Можно отметить следующие преимущества резонансного метода:

1. Большая точность определения как абсолютных величин, так и относительных изменений модуля упругости в зависимости от температуры.
2. Простая геометрическая форма образцов, что для исследования керамики имеет большое значение.
3. Независимость при высоких температурах истинного значения модуля упругости от скорости и времени деформации.

Электричество, № 4, 1955.

процесс ионизации не зависели от полярности приложенного напряжения.

Для электрокартона, пропитанного хлорбензолом и погруженного в него, фотографии показывают круговой характер ионизации в случае положительной полярности напряжения на круглом электроде и кустовидный в случае отрицательной. При этом ионизация имела большую плотность по сравнению с ионизацией в минеральном масле, а напряжение пробоя лишь незначительно превосходило напряжение начала ионизации. Последнее вследствие высокой электрической проницаемости хлорбензола было много выше, чем в минеральном масле.

Во втором случае электрокартон был заменен полистиролом, верхний электрод поднимался, а образовавшееся пространство заполнялось жидкостью. Электроды имели круглую форму. Начальная напряженность возрастала с 300 до 600 кВ/см при уменьшении толщины слоя масла с 3 до 0,8 мм и хорошо согласовалась с напряженностью 800 кВ/см, полученной для картона.

El. Eng., т. 73, стр. 636, № 7, 1954.

(Э-во, 4, 1955)

опыт эксплуатации электрических машин с кремнийорганической изоляцией показывает следующее:

1. Кремнийорганическая изоляция сохраняет на высоком уровне диэлектрические характеристики до 200° С.
2. При длительном воздействии на кремнийорганическую изоляцию повышенных нагревов (180—200° С) она сохраняет механические и диэлектрические характеристики на уровне, обеспечивающем надежную работу в самых тяжелых условиях эксплуатации.
3. Кремнийорганическая изоляция обладает высокой влаго- и водостойкостью как в исходном состоянии, так и после длительного воздействия повышенных нагревов (180—200° С).
4. Для кремнийорганической изоляции могут быть допущены длительные нагревы 180° С и кратковременные до 230...250° С.
5. Кремнийорганическая изоляция обладает высокой огнестойкостью и короностойкостью.

Электричество, № 4, 1955.

и в отсутствии заметной коррозии. Испытания показали, что характеристики арматуры, изготовленной из алюминия, лучше характеристик арматуры из других металлов, что частично объясняется соответствием коэффициентов теплового расширения проводов и соединителей. Применение соединителей, изготовленных из медных сплавов и обладающих меньшим, чем провод, коэффициентом расширения, приводит к увеличенному нагреву, что в дальнейшем вызывает увеличение деформации и текучести металла.

Покрытие компаундом контактных поверхностей прессыемых соединителей не является необходимым для сглаживания начального сопротивления, но желательно для защиты контактных поверхностей. Испытания нагревом показали, что изменение контактного сопротивления является более чувствительным индикатором ухудшения соединения, чем изменение температуры нагрева.

Tr. AIEE, т. 72, стр. 865, ч. III, 1953.

(Э-во, 4, 1955)

На основе исследования различных марок стеатита показано, что пробивная напряженность электрического поля  $E_{пр}$  в сильной степени зависит от формы и технологии изготовления образцов для испытаний и от скорости подъема, подаваемого на образец напряжения. Установлено, что для всех исследованных марок  $E_{пр}$  при постоянном напряжении больше, чем при переменной промышленной частоте. Обнаружено, что для всех марок стеатита при постоянном напряжении  $E_{пр}$  растет с увеличением температуры и, достигнув максимального значения при определенной для каждой марки температуре, затем уменьшается, тогда как при переменном напряжении  $E_{пр}$  вплоть до температуры 250° С практически не изменяется. В статье приведены все основные параметры стеатита.

Электричество, № 4, 1955.

Основными видами повреждения разрядников являются выгорание внутренней поверхности трубок, разрыв трубок, закорачивание внешних искровых промежутков или перекрытие по поверхности трубок. При одинаковой защищенности линии установка разрядников обходится на 10...30% дороже подвеса тросов.

По данным, охватывающим 6500 км-лет, среднее число отключений после установки разрядников снизилось на линиях 13...69 кВ на 76...81% и на линиях 100...138 кВ на 66%.

Около 50% эксплуатирующих компаний не считают целесообразным дальнейшее развитие защиты линий трубчатыми разрядниками. Дальнейшая тенденция в применении разрядников заключается в целесообразности установки разрядников на линиях до 35 кВ для общей защиты линии, а на линиях более высоких напряжений — только для защиты точек с ослабленной изоляцией.

Tr. AIEE, т. 72, стр. 151, ч. III, 1953

(Э-во, 4, 1955)



# НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ФОРМОЙ ВОЛН



Оборудование завода КРОМПТОН ПАРКИНСОН, изготовляющего трансформаторы, включает новейшую аппаратуру для импульсных испытаний. Установка эта генерирует 2 100 000 вольт с предусмотренной возможностью увеличения напряжения до 3 200 000 вольт.

Проектанты К. П. симулируют наиболее тяжелые рабочие условия напряжения, вызываемые волнами перенапряжений во всех частях обмотки и в приспособлениях для переключения ответвлений и, принимая в расчет щедрые допуски запаса, вырабатывают соответствующую конструкцию.

Осциллографы высокой скорости регистрируют амплитуду и форму волны перенапряжений, а также и сложную волновую кривую пульсации тока обмотки, и только результаты чрезвычайно тщательного сравнения последней до и после испытания могут убедить инженеров К. П., что трансформатор выдержал испытание удовлетворительно.

Это одна из причин почему трансформаторы К. П. завоевали мировую репутацию своей эффективностью и надёжностью.

Когда Вам потребуется ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ . . .

самое лучшее обратитесь к фирме

**Crompton Parkinson**  
LIMITED



ELECTRICAL EQUIPMENT

КОТОРАЯ ИЗГОТОВЛЯЕТ — ЭЛЕКТРО-МОТОРЫ ВСЕХ ТИПОВ. АЛЬТЕРНАТОРЫ. ГЕНЕРАТОРЫ. АППАРАТУРУ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА. ТРАНСФОРМАТОРЫ. КАБЕЛИ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. ЛАМПЫ. ОСВЕТИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. АККУМУЛЯТОРЫ. ТЯГОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.

CROMPTON PARKINSON LTD. · CROMPTON HOUSE · ALDWYCH · LONDON, W.C.2 · АНГЛИЯ  
ТЕЛЕГРАФНЫЙ АДРЕС: CROMPARK LONDON