

Основные проблемы развития теории и практики электрической сварки металлов в СССР

Академик В. П. НИКИТИН

Наука о сварке неразрывно связана с задачами развития сварочной техники. Сварка как процесс соединения металлов представляет собой сложный комплекс физических и химических явлений. Поэтому изучение процесса сварки металлов, а также работы сварного соединения в условиях эксплуатации связано с использованием ряда смежных научных дисциплин. В свою очередь развитие науки о сварке приводит к обогащению и развитию соприкасающихся с ней технических наук. Можно привести большое количество примеров такой взаимосвязи науки о сварке с другими техническими науками. Например, изучение вопросов свариваемости связано с разработкой новых марок конструкционной стали; изучение явлений в различных типах электрической дуги для сварки помогает решению вопросов электрического разряда в газах; исследование электрических сварочных машин и аппаратов способствует развитию общей теории равновесия электрических машин; разработка научных основ автоматизации сварочных процессов развивает некоторые положения автоматического регулирования и т. д.

Наука о сварке является молодой отраслью знания, которая получила свое развитие в СССР главным образом в годы наших пятилеток, особенно в послевоенный период. Этому развитию присущи все основные черты, характеризующие русскую технику, в которой широко и разносторонне поставленный опыт всегда сочетался с глубокой теоретической разработкой и созданием переломной теории.

Основным творческим методом развития советской науки и техники, в том числе и сварочной техники, является тесное содружество науки и производства, выражающееся в том, что решение актуальных проблем и практическое претворение в жизнь достигается в результате творческой, коллективной работы ученых, инженерно-технических работников и новаторов производства. Развитие сварочной техники в СССР всегда сочеталось и основывалось на результатах научной деятельности в области сварки, которую успешно

проводят как специальные исследовательские организации, так и отдельные заводские лаборатории и ведущие заводы.

Практическая направленность исследований отнюдь не означает забвения теоретических проблем. Наоборот, развитие теории происходило в результате тесной связи с практикой несравненно шире и многообразнее.

В СССР сформировались и окрепли ведущие научные направления в области сварки, к которым относятся: физико-металлургические и технологические основы сварки, прочность сварных соединений, научные основы электросварочного оборудования и автоматизации сварочных процессов.

Металлургические основы сварки развивались в связи с задачами получения высококачественного сварного соединения. Ряд работ этого направления позволил выявить закономерности взаимодействия между шлаком, металлом и газами при сварке стали плавлением, определить влияние отдельных элементов на процессы окисления и восстановления и установить основные принципы защиты и получения высококачественного наплавленного металла. В результате этих исследований были разработаны флюсы, необходимые для широкого применения автоматической сварки, и электродные покрытия, обеспечивающие высокие механические свойства швов при сварке сталей.

Важнейшей научной задачей металлургического направления в настоящее время является разработка кинетической теории физико-химических процессов при сварке. В связи с большой скоростью протекания этих процессов только кинетическая теория может дать надежную основу для регулирования процессов в жидкой ванне, методы управления первичной кристаллизацией швов, методы регулирования структурных и фазовых изменений в сварных соединениях при их непрерывном нагревании и охлаждении.

В тесной связи с разработкой основ теории металлургических процессов при сварке находится изучение физических процессов соединения ме-

таллов, которые должны составлять основы технологии сварки. Эти вопросы изучены еще совершенно недостаточно. Работы этого направления должны установить необходимые условия — температуру, время, внешнее давление, среду и пр. — для возникновения связи между атомами различных соединяемых металлов (сплавов); необходимо изучить роль в образовании соединения диффузии и поверхностных явлений на границе свариваемых металлов. К решению этих задач необходимо привлечь физиков.

Изучение механизма и условий возникновения связи между различными металлами при разных способах соединения позволит совместно с другими научными направлениями в сварке не только повысить качество соединения, но и создать ряд новых эффективных и высокопроизводительных способов соединения металлов и значительно двинуть вперед развитие сварочной техники.

В разработке вопросов прочности сварных конструкций советской наукой достаточно полно изучены прочность всевозможных соединений и элементов конструкций, разработаны теоретические положения о распределении усилий в сварных швах, исследована прочность сварных конструкций под действием статической, ударной и переменной нагрузок и разработаны методы рационального проектирования сварных конструкций. В последние годы советские ученые разработали научные основы теоретического и экспериментального исследования собственных напряжений и деформаций, вызываемых сваркой в конструкциях, и указали методы борьбы с деформациями.

В области теории электросварочного оборудования, являющейся особым и самостоятельным разделом науки о сварке, тесно связанным с электромеханикой, в СССР создано новое научное направление. Трудом советских ученых создана теория и разработаны основы выбора и расчета всех основных систем электрических машин и аппаратов для дуговой сварки.

В последние годы в связи с развитием автоматической сварки была широко начата научная разработка вопросов автоматизации сварочных процессов. Это прогрессивное направление в области сварки должно получить соответствующее развитие в ближайшие годы. Необходимо смелее внедрять в промышленность новые современные схемы и средства автоматизации сварки.

Современное состояние основных направлений науки о сварке со всей очевидностью показывает, что в СССР в настоящее время созданы научные основы для всесторонней разработки теории сварочных процессов. Такая теория позволит комплексно решить центральную проблему свариваемости металлов и металлических сплавов во всем ее объеме, создать научные методы разработки новых технологических процессов, разработать расчетные методы управления и регулирования процессов соединения металлов, обеспечивающие высокую производительность и качество сварного соединения.

Характеристика современного состояния сварочной техники значительно дополняет и разви-

вает анализ современного состояния науки о сварке.

В последние годы наиболее широкое применение в промышленности получила автоматическая сварка под флюсом. В настоящее время автоматическая сварка успешно применяется не только в стационарных цеховых условиях, но и на монтаже.

Развитие автоматической сварки характеризуется широкими масштабами внедрения и высоким техническим уровнем. Связанная с развитием автоматической сварки разработка совершенных флюсов для сварки малоуглеродистых, низколегированных и легированных сталей, разработка новых технологических процессов одно- и многодуговой сварки, разработка различных типов автоматов и трансформаторов, значительное повышение скорости и производительности сварки явились результатом большой исследовательской работы советских научных и заводских коллективов в области металлургии сварки, автоматического регулирования и технологии сварки.

Наряду с усовершенствованием и широким развитием существующих видов сварки в последние годы были разработаны и успешно осваиваются в промышленности новые способы сварки. Наиболее крупным достижением последнего времени являются разработанные в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР дуговой и электрошлаковый способы вертикальной сварки с принудительным формированием шва. Эти советские изобретения позволяют автоматизировать сварку на монтаже, осуществлять однопроходную сварку стали большой толщины (до 200 мм) и благодаря улучшению условий протекания металлургических процессов в сварочной ванне дают возможность повысить качество сварных соединений из углеродистых, низколегированных и легированных сталей. Разработка способов вертикальной сварки разрешает проблему цельносварного мостостроения с применением автоматической сварки как в заводских условиях, так и на монтаже.

В результате творческого содружества Института и работников производства впервые в мировой практике была осуществлена автоматическая сварка корпуса доменной печи на Запорожстали, однопроходная автоматическая сварка барабанов котлов высокого давления на Таганрогском котельном заводе и статоров мощных гидротурбин на Ново-Краматорском заводе им. Сталина. Изготовление многопролетного сварного моста в г. Киеве, названного именем Е. О. Патона, было выполнено целиком с применением автоматической сварки как в заводских условиях, так и на монтаже. При этом на монтаже применялась дуговая вертикальная автоматическая сварка с принудительным формированием шва. Дальнейшее повышение производительности автоматической сварки может быть достигнуто путем разработки и широкого применения различных способов многодуговой сварки и в первую очередь трехфазной сварки. Благодаря возможности отдельного регулирования процессов плавления электрода и изделия этот способ сварки обладает значи-

тельными преимуществами, которые позволяют расширить применение сварки специальных сталей и повысить производительность процессов сварки и наплавки.

Развитию применения сварки в ведущих отраслях машиностроения способствовали новые способы дуговой сварки в среде защитных газов (аргон, гелий, азот, углекислый газ) плавящимся и неплавящимся электродом. Эти способы получили применение для сварки тонколистовой нержавеющей стали, алюминиевых и магниевых сплавов. Дальнейшее развитие способов сварки в среде защитных газов позволит расширить область применения сварки различных металлов и сплавов в промышленности.

Полуавтоматическая шланговая сварка под флюсом в значительной степени заменила ручную сварку во многих отраслях промышленности и повысила производительность и качество сварочных работ.

Успешному развитию сварочной техники способствовала разработка новых типов оборудования, из которых в первую очередь необходимо отметить различные типы автоматических установок для сварки под флюсом, созданные Институтом электросварки им. Е. О. Патона АН УССР, заводом «Электрик» и Центральным научно-исследовательским институтом технологии машиностроения, а также создание Лабораторией электросварочных машин АН СССР совместно с заводами МЭП СССР единой серии однокорпусных сварочных трансформаторов типа СТН и СТАН для всех видов дуговой электросварки на переменном токе (ручной, полуавтоматической и автоматической).

В области сварочного трансформаторостроения, являющегося основой развития и применения дуговой электросварки на переменном токе, советской технике принадлежит первенство в создании комбинированного однокорпусного трансформатора — регулятора СТН, предложенного автором. Схема трансформатора СТН широко заимствована крупнейшими зарубежными фирмами (Вестингауз, Аллис Челмерс и др.).

В результате большой работы, проделанной промышленными и научно-исследовательскими организациями, в настоящее время промышленность СССР оснащена основным электросварочным оборудованием отечественной конструкции, превосходящим по надежности, простоте и экономичности лучшие зарубежные образцы. Современный уровень развития сварочной техники характеризуют также масштабы применения сварки в СССР, которые еще до второй мировой войны по объему и разнообразию применения сварки далеко опередили границу. В послевоенную пятилетку ведущим направлением в развитии сварочной техники было применение автоматической и полуавтоматической сварки, причем в некоторых отраслях промышленности эти способы почти полностью вытеснили ручную сварку.

В среднем на автоматическую сварку в настоящее время в некоторых отраслях машиностроения переведено около 60% сварочных работ. Наряду с широким применением сварки для изго-

товления котлов и сосудов высокого давления, подъемно-транспортных сооружений и механизмов, паровозов, вагонов, автомобилей и т. д. сварка стала ведущим технологическим процессом при строительстве таких крупнейших сооружений, как гидроэлектростанции, доменные печи, каркасы высотных зданий, корабли, мосты и т. п.

Отличительной чертой развития сварки в последние годы является применение сварки как основного технологического процесса в поточном производстве, автоматических линиях и новых промышленных методах строительства. В качестве примеров, определяющих современные направления и пути дальнейшего развития сварочной техники, можно привести следующее.

На Горьковском автозаводе им. Молотова создана и успешно работает автоматическая линия производства сварных автомобильных колес.

На Харцызском трубном заводе организовано поточное производство сварных труб большого диаметра на специальных автоматических трубо-сварочных станах с применением двухдуговых автоматов для сварки под флюсом. Достигнуто повышение производительности сварки в 10...20 раз и значительно улучшено качество труб. Освоена автоматическая сварка под флюсом магистральных трубопроводов и разработан способ автоматической сварки неповоротных стыков труб в любом пространственном положении.

Значительным достижением сварочной техники являются разработанные в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР промышленные методы строительства вертикальных цилиндрических резервуаров и некоторых других листовых конструкций путем автоматической сварки в заводских условиях крупных плоских полотнищ и сворачивания их в рулоны. Этот новый технологический процесс позволяет свести к минимуму сварку в монтажных условиях, значительно ускоряет процесс строительства и повышает качество сварных соединений в резервуаростроении.

Характеризуя современное состояние техники электрической сварки, необходимо подчеркнуть, что наибольшее развитие получила дуговая электрическая сварка металлов. В области электрической контактной сварки были проведены исследования по изучению и разработке теории процессов контактной сварки и созданию новых типов серийного оборудования. Однако проблема широкого применения контактной сварки еще ждет своего полного разрешения.

Актуальность развития контактной сварки особенно возрастает в связи с огромным размахом арматурно-сварочных работ на строительстве гидроэнергетических сооружений и переходом на промышленные методы строительства путем применения сборных железобетонных конструкций. Этот способ электрической сварки металлов является наиболее высокопроизводительным, позволяющим широко механизировать производство арматурных конструкций. Применение новых автоматизированных и агрегатных установок, созданных заводом «Электрик» для стыковой и точечной сварки арматуры и автоматической контактной сварки арматурных пакетов, сеток и ферм

в поточных линиях на арматурно-сварочных заводах и заводах сборных железобетонных конструкций, а также разработка технологических процессов сварки арматуры дает возможность организовать поточное производство арматуры железобетона крупными блоками в заводских условиях и значительно снизить объем сварочных работ на монтаже.

Возведение крупнейших гидроэнергетических сооружений поставило перед советской сварочной техникой задачу создания нового оборудования и разработки высокопроизводительных способов сварки и наплавки.

В результате совместной работы ленинградского завода «Электрик» и Лаборатории электросварочных машин АН СССР были созданы и выпущены новые машины мощностью 500 *кв*а типа МСГ-500 для стыковой контактной сварки арматуры железобетона диаметром до 100 мм. Все операции по сварке арматуры механизированы. Сварка стержней диаметром до 60 мм осуществляется автоматически, а свыше 60 мм — на полуавтоматическом режиме. Производительность машин — до 30 сварных стыков в час. Внедрение на строительстве гидротехнических сооружений этих новых машин позволяет в значительной мере механизировать процесс и применить индустриально-поточные методы изготовления арматурных конструкций. Замена применяющейся в настоящее время ручной дуговой сварки на контактную дает значительное повышение производительности и экономию металла, а также способствует улучшению качества сварного соединения.

На строительстве гидроэнергетических сооружений применяется огромное количество различных машин и механизмов. В связи с этим весьма важным является изыскание высокопроизводительной технологии ремонта, восстановления и повышения износостойкости деталей строительных и дорожных машин и механизмов. Применяемое в большинстве случаев восстановление изношенных деталей машин при помощи ручной дуговой наплавки малопроизводительное.

В Лаборатории электросварочных машин АН СССР был разработан новый способ автоматической наплавки под флюсом износостойких сплавов с применением трубчатых электродов, содержащих во внутренней полости трубки специальные ферросплавы и другие легирующие элементы. Совместно с ленинградским заводом «Электрик» была создана специальная автоматическая наплавочная установка, которая производит последовательно все операции: вальцовку стальной ленты в трубку и заполнение ее шихтой, подачу электродов, возбуждение электрической дуги и

осуществление наплавки изношенной детали. Разработанные в Лаборатории способ и аппаратура позволяют механизировать трудоемкие процессы наплавки, значительно повысить производительность (в 7...8 раз) и увеличить износостойкость деталей строительных машин и механизмов.

Бесспорно, что новый метод наплавки трубчатым электродом должен найти также широкое применение как при восстановлении, так и при повышении износостойкости рабочих органов других машин и механизмов в различных отраслях промышленности.

Развитие социалистической промышленности в послевоенный период характеризуется резко возросшим разнообразием применяемых в конструкциях металлов и сплавов. Перед сварочной техникой были поставлены задачи сварки высокопрочных сталей, цветных сплавов, обладающих особыми физическими и химическими свойствами. Сложные эксплуатационные условия конструкций, а также стремление к понижению коэффициента запаса прочности значительно ужесточили требования к качеству сварных соединений и технологии их изготовления. В связи с этим необходимо отметить, что проблема свариваемости металлов в настоящее время не разработана еще в такой степени, чтобы наука могла быстро разрешить вопросы осуществления качественной сварки новых металлов и сплавов, применяемых в промышленности. Задачей науки является установление единого метода оценки свариваемости металлов, которая позволяла бы регламентировать требования к качеству продукции, выпускаемой металлургической промышленностью.

Бесспорно, что важнейшая народнохозяйственная проблема освоения процессов соединения различных металлов и металлических сплавов, применяемых в промышленности, должно разрешаться комплексно. Наряду с дальнейшей научной разработкой и усовершенствованием существующих видов сварки необходимо широко развить исследования по изысканию принципиально новых высокопроизводительных способов соединения.

Разработка новых способов и дальнейшее развитие автоматической сварки ставят перед наукой задачу изучения и создания новых типов электросварочного оборудования и дальнейшей разработки научных основ автоматизации сварочных процессов, которая в настоящее время еще отстает от масштабов применения автоматической сварки.

Решение указанных выше важнейших задач развития науки о сварке будет способствовать развитию советской сварочной техники.

[6.10.1954]



Электромагнитные процессы в двухпроводной системе

П. И. КУЗНЕЦОВ и Р. Л. СТРАТОНОВИЧ

Москва

Со времени опубликования известной работы Ми [Л. 1] появилось большое число работ, рассматривающих установившуюся волну в симметричной двухпроводной линии. Но если работа Ми, отличаясь наибольшей общностью, давала громоздкий и мало удобный для практики метод расчета, то последующие работы достигали простоты ценой многих дополнительных ограничений, сужающих область применимости полученных результатов. В первую очередь сюда относится ограничение лишь теми случаями, когда диаметр проводов много меньше расстояния между ними.

Без введения дополнительных ограничений ведется рассмотрение указанной задачи в работе В. Ю. Ломоносова [Л. 2], в которой, однако, результаты не получены в виде каких-либо конкретных выражений (функций или рядов), так что задачу нельзя считать вполне решенной. Автор выводит бесконечную систему уравнений относительно бесконечного числа неизвестных, но не решает ее во всей совокупности. Для получения приближенного решения предлагается рассматривать лишь некоторое число (n) первых уравнений, положив высшие неизвестные равными нулю. К недостаткам подобного приема относятся: 1) неизвестность порядка погрешности приближенного решения (автор не рассматривает даже более общего вопроса о сходимости приближений при $n \rightarrow \infty$); 2) возрастание вычислительных трудностей с увеличением n , что делает вычисления при больших n практически невозможными. Поэтому, по сути дела, в работе В. Ю. Ломоносова задача решена лишь для случая не слишком близко расположенных проводов, когда можно ограничиться небольшим n .

Рядом авторов [Л. 3 ... 6] рассматривалась также задача расчета несимметричной двухпроводной линии. В одной из работ Я. Н. Фельда [Л. 3] получено точное решение в случае бесконечной проводимости проводов, а в другой его работе [Л. 4] найдено сопротивление потерь в несимметричной линии с конечной, но большой проводимостью проводов τ . Однако, насколько нам известно, полное решение задачи с любой степенью точности (в виде ряда по степеням $1/\tau$) еще не получено.

Нами предложен метод расчета многопроводной системы, не требующий каких-либо ограничений относительно геометрических соотношений в системе и более удобный для вычислений, чем другие методы той же степени общности. Этот метод использует то обстоятельство, что параметр скин-эффекта мал, и допускает обобщение на случай любого числа цилиндрических проводов с сечениями произвольной формы. Именно в таком общем виде он изложен в нашей работе [Л. 7]. В настоящей работе рассматривается применение этого общего метода к случаю двух проводов круглого сечения. В ней мы будем делать упор на практической стороне вопроса, приводя формулы, пригодные для расчетов; ряд вопросов, связанных с обоснованием излагаемого метода, мы опустим,

отсылая читателя к указанной нашей работе. В первой части настоящей статьи рассматривается простейшая волна в симметричной двухпроводной линии. Вторая часть посвящена волнам в несимметричной двухпроводной системе.

1. Система из двух одинаковых проводов.

Рассмотрим линию из двух одинаковых параллельных проводов круглого сечения радиусом a , расстояние между центрами сечений равно $2h$. Материал проводов характеризуется проводимостью σ_e , электрической проницаемостью ϵ_i и магнитной проницаемостью μ_i . Линия расположена в однородной среде с параметрами: проводимостью σ_e , электрической и магнитной проницаемостями ϵ_e , μ_e . Мы предполагаем, что параметры линии не зависят от продольной координаты z . Будем рассматривать установившийся электромагнитный процесс с зависимостью от времени, выражающейся множителем $e^{j\omega t}$. Этот процесс можно мыслить как гармоническую составляющую нестационарного процесса.

Введем в плоскости поперечного сечения $z = \text{const}$ биполярную систему координат u, v следующим образом:

$$u + jv = \ln \frac{x + jy + b}{x + jy - b}, \quad (1)$$

где x, y — декартовы координаты (плоскость XOZ проходит через оси проводов, ось OZ — продольная ось симметрии), и

$$b = a \operatorname{sh} \alpha = \sqrt{h^2 - a^2}; \quad \alpha = \operatorname{Arch} h/a.$$

Поверхности первого провода C_1 соответствует координатная линия $u = \alpha$, поверхности второго провода C_2 соответствует $u = -\alpha$.

Поперечные составляющие E_u, E_v, H_u, H_v векторов напряженности электрического и магнитного полей выражаются через продольные составляющие E_z, H_z следующим образом:

$$-x_e^2 E_{eu} = \frac{\gamma}{U} \frac{\partial E_{ez}}{\partial u} + \frac{\mu_e'}{U} \frac{\partial H_{ez}}{\partial v}; \quad (2)$$

$$-x_e^2 E_{ev} = \frac{\gamma}{U} \frac{\partial E_{ez}}{\partial v} - \frac{\mu_e'}{U} \frac{\partial H_{ez}}{\partial u}; \quad (3)$$

$$-x_e^2 H_{eu} = \frac{\gamma}{U} \frac{\partial H_{ez}}{\partial u} - \frac{\epsilon_e'}{U} \frac{\partial E_{ez}}{\partial v}; \quad (4)$$

$$-x_e^2 H_{ev} = \frac{\gamma}{U} \frac{\partial H_{ez}}{\partial v} + \frac{\epsilon_e'}{U} \frac{\partial E_{ez}}{\partial u}; \quad (5)$$

где U — коэффициент Ламе;

$$U = \frac{b}{\operatorname{ch} u - \cos v};$$

ϵ_e', μ_e' — комплексные электрическая и магнитная проницаемости внешней среды:

$$\epsilon_e' = \sigma_e + j\omega\epsilon_e; \quad \mu_e' = j\omega\mu_e; \quad (6)$$

γ — постоянная распространения $\left(\frac{\partial}{\partial z} = \gamma\right)$;

x_e — характеристическое число:

$$x_e^2 = \gamma^2 - \epsilon'_e \mu'_e. \quad (7)$$

Эти уравнения написаны для пространства вне проводов; все величины с индексом e относятся к внешней среде.

Внутри каждого провода мы будем пользоваться полярной системой координат ρ_i, φ_i ($i = 1, 2$), выбирая полюс в центре сечения. Пусть начала отсчета полярного и биполярного углов совпадают; направления возрастания углов φ_2 и v — одинаковые, углов φ_1 и v — противоположные.

Уравнения для внутренней среды, соответствующие уравнениям (2) ... (5), имеют следующий вид:

$$-x_i^2 E_{i\rho} = \gamma \frac{\partial E_{iz}}{\partial \rho} + \frac{\mu'_i}{\rho} \frac{\partial H_{iz}}{\partial \varphi}; \quad (8)$$

$$-x_i^2 E_{i\varphi} = \frac{\gamma}{\rho} \frac{\partial E_{iz}}{\partial \varphi} - \mu'_i \frac{\partial H_{iz}}{\partial \rho}; \quad (9)$$

$$-x_i^2 H_{i\rho} = \gamma \frac{\partial H_{iz}}{\partial \rho} - \frac{\epsilon'_i}{\rho} \frac{\partial E_{iz}}{\partial \varphi}; \quad (10)$$

$$-x_i^2 H_{i\varphi} = \frac{\gamma}{\rho} \frac{\partial H_{iz}}{\partial \varphi} + \epsilon'_i \frac{\partial E_{iz}}{\partial \rho}; \quad (11)$$

здесь

$$\epsilon'_i = \epsilon_i + j\omega\epsilon_i; \quad \mu'_i = j\omega\mu_i; \quad (12)$$

$$x_i^2 = \gamma^2 - \epsilon'_i \mu'_i. \quad (13)$$

Как известно, продольные составляющие E_z, H_z удовлетворяют уравнениям

$$\Delta_2 E_{ez} + x_e^2 E_{ez} = 0; \quad (14)$$

$$\Delta_2 H_{ez} + x_e^2 H_{ez} = 0; \quad (15)$$

$$\Delta_2 E_{iz} + x_i^2 E_{iz} = 0; \quad (16)$$

$$\Delta_2 H_{iz} + x_i^2 H_{iz} = 0, \quad (17)$$

где Δ_2 — двумерный оператор Лапласа (в координатах u и v или ρ_i, φ_i).

Мы сделаем два предположения:

$$|x_e h| \ll 1; \quad (18)$$

$$\left| \frac{x_e^2}{x_i^2} \right| \ll 1, \quad (19)$$

которые выполняются в весьма общем случае и лежат в основе всех работ по двухпроводной линии, включая и работу Ми [Л. 1].

Выполнение неравенства (18) позволяет в пространстве, окружающем провода, пользоваться вместо уравнений (14) и (15) уравнениями

$$\frac{\partial^2 E_{ez}}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 E_{ez}}{\partial v^2} = 0; \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 H_{ez}}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 H_{ez}}{\partial v^2} = 0. \quad (21)$$

Далее, пользуясь непрерывностью касательных составляющих на поверхности проводов

$$E_{ev}|_{C_{1,2}} = \pm E_{i\varphi}|_{C_{1,2}},$$

из уравнений (3) и (9) получаем:

$$\gamma \frac{1}{U} \frac{\partial E_{ez}}{\partial v} \left(\frac{1}{x_e^2} \mp \frac{1}{x_i^2} \right) - \left(\frac{\mu'_e}{x_e^2} \frac{1}{U} \frac{\partial H_{ez}}{\partial u} \mp \frac{\mu'_i}{x_i^2} \frac{\partial H_{iz}}{\partial \rho} \right) = 0$$

на C_1, C_2 .

Отсюда имеем:

$$\gamma \frac{1}{U} \frac{\partial E_{ez}}{\partial v} = \mu'_e \frac{1}{1 \mp x_e^2/x_i^2} \frac{\partial H_{ez}}{\partial u} \mp \mu'_i \frac{x_e^2}{x_i^2 \pm x_e^2} \frac{\partial H_{iz}}{\partial \rho},$$

т. е.

$$\gamma \frac{\partial E_{ez}}{\partial v} - \mu'_e \frac{\partial H_{ez}}{\partial u} = 0 \left(\frac{x_e^2}{x_i^2} \right) \text{ на } C_1, C_2.$$

Принимая во внимание неравенство (19), мы, следовательно, вправе считать, что

$$\gamma \frac{\partial E_{ez}}{\partial v} - \mu'_e \frac{\partial H_{ez}}{\partial u} = 0 \text{ на } C_1, C_2 \quad (22)$$

или

$$E_v|_{C_{1,2}} = 0. \quad (23)$$

Равенство (23) имеет большую общность; оно справедливо даже тогда, когда поля $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в остальном не походят на поля предельного случая бесконечной проводимости $\sigma_i = \infty$.

В общем случае E_z и H_z не принимают постоянного значения на C_1, C_2 . Построим такую функцию G , которая обладала бы свойством постоянства на C_1, C_2 . Определим F вне проводов как функцию, удовлетворяющую равенствам

$$\frac{\partial H_{ez}}{\partial v} = \frac{\partial F}{\partial u}; \quad (24)$$

$$-\frac{\partial H_{ez}}{\partial u} = \frac{\partial F}{\partial v}, \quad (25)$$

которые совместны вследствие уравнения (21). Обозначим:

$$G = \gamma E_{ez} + \mu'_e F. \quad (26)$$

Введенная, таким образом, функция G удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 G}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial v^2} = 0, \quad (27)$$

которое следует из равенства (20), (24), (25). При этом

$$\frac{\partial G}{\partial v} = 0 \text{ на } C_1, C_2 \quad (28)$$

вследствие равенств (22), (25), (26).

Функция G служит потенциалом для поперечного электрического поля. В самом деле, учитывая уравнения (2), (3), (24), (25), получаем:

$$\left. \begin{aligned} -x_e^2 E_{eu} &= \frac{1}{U} \frac{\partial G}{\partial u}; \\ -x_e^2 E_{ev} &= \frac{1}{U} \frac{\partial G}{\partial v}. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Обозначим через G_1 и G_2 постоянные значения, которые принимает G на поверхности первого и второго проводов в силу равенства (28). В симметричной двухпроводной системе простейшей волной является «антифазная» волна, для которой

$$G_1 = -G_2.$$

Эта волна возбуждается при подаче на провода противоположных потенциалов. Величина G_1 определяется разностью потенциалов

$$V = \int_{u=-a}^{u=a} E_i dl,$$

которая задает амплитуду волны. Вследствие равенства (29) имеем:

$$G_1 = -G_2 = \frac{x_e^2}{2} V. \quad (30)$$

Считая V заданной, находим G как решение уравнения (27) с граничными условиями (30). Указанное решение имеет вид:

$$G = \frac{u}{a} \frac{x_e^2}{2} V. \quad (31)$$

Определив G , можно найти поля в двухпроводной системе. Согласно равенству (29) получаем:

$$E_{eu} = -\frac{1}{U} \frac{1}{2a} V. \quad (32)$$

Принимая во внимание условие непрерывности нормальной составляющей вектора индукции на поверхности проводов

$$\epsilon'_e E_{eu}|_{u=\pm a} = \mp \epsilon'_i E_{ip}|_{\rho=\pm a}^*,$$

находим граничное значение для внутреннего электрического поля

$$E_{ip}|_{\rho=\pm a} = \pm \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \frac{V}{2a} \frac{1}{U} \Big|_{u=\pm a}. \quad (33)$$

Вследствие симметрии всей картины можно ограничиться рассмотрением лишь одного провода. Поэтому в дальнейшем будем выписывать выражения, относящиеся ко второму проводу.

Принимая во внимание уравнение (8) и разлагая $\frac{1}{U}|_{C_2}$ в тригонометрический ряд, запишем выражение (33) в виде:

$$\gamma \frac{\partial E_{iz}}{\partial \rho} \Big|_{\rho=a} + \frac{\mu'_i}{a} \frac{\partial H_{iz}}{\partial \varphi} \Big|_{\rho=a} = x_i^2 \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \frac{V}{2a} \cdot \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m e^{-m\alpha} \cos m\varphi \right]. \quad (34)$$

Можно произвести следующую оценку порядка величины:

$$\mu'_e \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \sim \mu'_e H_z \lesssim \gamma E_z \quad \text{на } C_2.$$

* Знак $(-)$ для случая $u = a$ берется вследствие противоположности направлений возрастания u и ρ на C_1 .

Поле E_{iz} внутри провода удовлетворяет уравнению (16), поэтому

$$\frac{\partial E_{iz}}{\partial \rho} \sim x_i E_{iz} \quad \text{на } C_2.$$

Сопоставляя приведенные оценки, приходим к выводу, что первый член в левой части выражения (34) приблизительно в $ax_i \frac{\mu_e}{\mu_i}$ раз больше, чем второй. Обычно проводимость σ_i достаточно велика, так что величина

$$|ax_i| \sim a |\omega \mu_i \mu_e|^{\frac{1}{2}}$$

в несколько раз больше единицы. Это дает основание для решения задачи в первом приближении положить:

$$\frac{\partial E_{iz}}{\partial \rho} \Big|_{\rho=a} = \frac{x_i^2}{\gamma} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \frac{V}{2a} \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m e^{-m\alpha} \cos m\varphi_i \right]. \quad (35)$$

Равенство (35) есть граничное условие для уравнения (16), решение которого имеет вид:

$$E_{iz} = \frac{x_i}{\gamma} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \frac{V}{2a} \left[\frac{J_0(x_i \rho)}{J'_0(x_i a)} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m e^{-m\alpha} \frac{J_m(x_i \rho)}{J'_m(x_i a)} \cos m\varphi \right]. \quad (36)$$

Полагая в выражении (36) $\rho = a$, мы найдем значение E_{iz} на границе раздела и вследствие непрерывности касательной компоненты

$$E_{ez}|_C = E_{iz}|_C$$

получим граничное условие для уравнения (20). Представим $E_z|_C$ в виде ряда Фурье по биполярному углу ψ . Для этого равенствами

$$\cos m\varphi = \sum_{n=0}^{\infty} C_{mn} \cos n\psi, \quad (m=0, 1, \dots) \quad (37)$$

введем коэффициенты C_{mn} , вычисляемые по формулам

$$C_{mn} = \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n}{dx^n} \left(\frac{e^{\alpha} x - 1}{e^{\alpha} - x} \right)^m \right]_{x=0}, \quad (38)$$

из которых, в частности, следует, что

$$C_{m0} = (-1)^m e^{-m\alpha}, \quad (m=0, 1, \dots); \\ C_{0n} = 0, \quad (n=1, 2, \dots). \quad (38a)$$

При помощи C_{mn} граничное условие для E_{ez} запишется в следующем виде:

$$E_z \Big|_{u=-a} = \frac{x_i}{\gamma} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \frac{V}{2a} \left[\frac{J_0(\xi)}{J'_0(\xi)} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-2m\alpha} \frac{J_m(\xi)}{J'_m(\xi)} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (-e^{-\alpha})^m \frac{J_m(\xi)}{J'_m(\xi)} C_{mn} \cos n\psi \right], \quad (39)$$

где $\xi = x_i a$.

Учитывая требования симметрии, будем искать решение уравнения (20) в следующей форме:

$$E_{ez} = p_0 u + \sum_{n=1}^{\infty} p_n \operatorname{sh} nu \cos nv, \quad (40)$$

причем коэффициенты p_n определяются из выражения (39) и оказываются равными:

$$p_0 = \frac{\kappa_1}{\gamma} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \frac{V}{2a\alpha^2} \left[\frac{J_0(\xi)}{J'_0(\xi)} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-2m\alpha} \frac{J_m(\xi)}{J'_m(\xi)} \right];$$

$$p_n = \frac{\kappa_1}{\gamma} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \frac{V}{a\alpha} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m e^{-m\alpha} \frac{J_m(\xi)}{J'_m(\xi)} \frac{C_{mn}}{\operatorname{sh} n\alpha},$$

$$(n=1, 2, \dots). \quad (41)$$

Подставив выражение (40) в равенство (22), получим граничное условие

$$\left. \frac{\partial H_{ez}}{\partial u} \right|_{u=-a} = -\frac{\gamma}{\mu_e} \sum_{n=1}^{\infty} n p_n \operatorname{sh} n\alpha \sin nv \quad (42)$$

для уравнения (21). Следовательно,

$$H_{ez} = \frac{\gamma}{\mu_e} \sum_{n=1}^{\infty} p_n \operatorname{ch} nu \sin nv. \quad (43)$$

Условие непрерывности $H_{ez}|_{C_2} = H_{iz}|_{C_2}$ дает граничное условие для поля H_{iz} внутри провода. Используя равенство

$$\sin nv = \sum_{m=1}^{\infty} d_{nm} \sin m\varphi, \quad (n=0, 1, \dots), \quad (44)$$

где

$$d_{nm} = \frac{1}{m!} \left[\frac{d^m}{dy^m} \left(\frac{e^{\alpha y} + 1}{e^{\alpha} + 1} \right)^n \right]_{y=0}, \quad (45)$$

преобразуем указанное граничное условие к полярному углу φ и, найдя H_{iz} как решение уравнения (17), получим:

$$H_{iz} = \frac{\gamma}{\mu_e} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} p_n \operatorname{ch} n\alpha d_{nm} \frac{J_m(x_i)}{J_m(x_i a)} \sin m\varphi. \quad (46)$$

До сих пор во все выражения входила постоянная распространения волны γ как некоторый (пока не определенный) параметр. Для его определения воспользуемся равенством

$$\oint_{C_2} \frac{\partial}{\partial u} (G - \gamma E_{ez}) dv = 0, \quad (47)$$

вытекающим из равенства (24) и однозначности функции F при учете выражения (26). Подставив в равенство (47) выражения (31) и (40), получим в первом приближении

$$\gamma p_0 = \frac{\kappa_1^2 V}{2\alpha} \quad (48)$$

или, принимая во внимание выражения (41) и (7),

$$\gamma^2 - \epsilon'_e \mu'_e = -\frac{\kappa_1}{a\alpha} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \left[\frac{J_0(\xi)}{J'_0(\xi)} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-2m\alpha} \frac{J_m(\xi)}{J'_m(\xi)} \right], \quad (49)$$

$$\xi = a\alpha_i.$$

Равенство (49), справедливое в первом приближении, имеет относительную погрешность порядка $|\xi|^{-2}$. Отсюда с той же степенью точности имеем:

$$\gamma = jk_e - \frac{1}{jk_e a^2} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \frac{\xi}{\alpha} \left[\frac{J_0(\xi)}{2J'_0(\xi)} + \sum_{m=1}^{\infty} e^{-2m\alpha} \frac{J_m(\xi)}{J'_m(\xi)} \right], \quad (49a)$$

где

$$k_e = \sqrt{-\epsilon'_e \mu'_e}; \quad \xi \approx a \sqrt{-\epsilon'_e \mu'_e} \approx a \sqrt{-j\omega\sigma_i \mu_1}.$$

Полученными формулами первого приближения можно удовлетвориться, если допустима относительная ошибка порядка $\left| \frac{1}{\alpha\xi} \right|^2$. Если требуется большая точность, то можно найти высшие приближения. Представим величины во втором приближении в виде суммы, например:

$$E_{iz}^{(2)} = E_{iz}^{(1)} + E_{iz}^2,$$

где $E_{iz}^{(1)}$ — найденное нами выражение в первом приближении (36), а E_{iz}^2 — поправка второго приближения. Вследствие выражения (34) будем иметь:

$$\gamma \frac{\partial E_{iz}^{(2)}}{\partial \rho} \Big|_{\rho=a} + \frac{\mu'_i}{a} \frac{\partial H_{iz}^{(1)}}{\partial \varphi} \Big|_{\rho=a} =$$

$$= \kappa_i^2 \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \frac{V}{2\alpha a} \cdot [1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-e^{-\alpha})^m \cos m\varphi],$$

откуда

$$\gamma \frac{\partial E_{iz}^2}{\partial \rho} \Big|_{\rho=a} = -\frac{\mu'_i}{a} \frac{\partial H_{iz}^{(1)}}{\partial \varphi} \Big|_{\rho=a}. \quad (50)$$

Подставив сюда выражение (46), найдем:

$$\frac{\partial E_{iz}^2}{\partial \rho} \Big|_{\rho=a} = -\frac{\mu'_i}{a\mu_e} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} p_n \operatorname{ch} n\alpha d_{nm} m \cos m\varphi.$$

Поправка E_{iz}^2 в свою очередь удовлетворяет уравнению (16), поэтому

$$E_{iz}^2 = -\frac{\mu'_i}{a\mu_e} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} p_n \operatorname{ch} n\alpha d_{nm} m \frac{J_m(\rho x_i)}{x_i J_m(ax_i)} \cos m\varphi. \quad (51)$$

Используя граничное условие

$$E_{iz}^2|_{\rho=a} = -\frac{\mu'_i}{a\mu_e} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} p_n \operatorname{ch} n\alpha d_{nm} m \times$$

$$\times \frac{J_m(\xi)}{x_i J'_m(\xi)} C_{mr} \cos r\varphi;$$

при решении уравнения

$$\Delta E_{ez}^2 = 0$$

получим поправку для внешней области:

$$E_{ez}^2 = \frac{\mu_i'}{a\mu_e'} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} p_n \operatorname{ch} n\alpha d_{nm} m \frac{J_m(\xi)}{x J_m'(\xi)} C_{m0} \frac{u}{a} + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{r=1}^{\infty} p_n \operatorname{ch} n\alpha d_{nm} m \frac{J_m(\xi)}{x J_m'(\xi)} C_{mr} \frac{\operatorname{sh} ru}{\operatorname{sh} r\alpha} \cos rv \right\}.$$

Далее в том же порядке, в каком определялись поля в первом приближении, можно находить H_{ez}^2 и H_{iz}^2 . Постоянная распространения во втором приближении находится из уравнения

$$\gamma \left[\rho_0 + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\mu_i}{\mu_e} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} p_n \operatorname{ch} n\alpha d_{nm} m \times \right. \\ \left. \times \frac{J_m(\xi)}{J_m'(\xi)} (-1)^m e^{-m\alpha} \right] = \frac{x_e^2 V}{a}.$$

Второе приближение определяется с относительной погрешностью порядка $\left(\frac{1}{\alpha^2} \frac{\mu_i}{\mu_e} \right)^3$. Продольные поля с относительной погрешностью $\left(\frac{1}{\alpha^2} \frac{\mu_i}{\mu_e} \right)^2$.

Аналогичным образом можно получать высшие поправки E_z^s , H_z^s ($E_z = \sum_s E_z^s$; $H_z = \sum_s H_z^s$), пользуясь граничными условиями

$$\gamma \frac{\partial E_{iz}^s}{\partial r} = -\frac{\mu_i'}{a} \frac{\partial H_{iz}^{s-1}}{\partial \varphi}, \quad \mu_e' \frac{\partial H_{ez}^s}{\partial u} = \gamma \frac{\partial E_{ez}^s}{\partial v} \text{ на } C_2$$

и соответствующими условиями непрерывности для каждого приближения на границе раздела. Указанные приближения сходятся как ряд по степеням величины $\frac{1}{\alpha^2} \frac{\mu_i}{\mu_e}$.

Произведем сравнение первого приближения нашего решения с результатами работы В. Ю. Ломоносова [Л. 2]. Обозначим:

$$\beta_m = J_m(\xi)/\xi J_{m+1}(\xi). \quad (m=0, 1, \dots);$$

$$\eta = \frac{\alpha}{\epsilon_e' \mu_e'} x_e^2 + \beta_0.$$

Через η постоянная распространения волны выражается следующим образом:

$$\gamma = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\beta_0 - \eta}{\alpha} - 1}.$$

Запишем равенство (49) в виде:

$$\eta - \beta_0 = -\frac{x_i^2}{\epsilon_i' \mu_e'} \left[-\beta_0 - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\beta_m}{1 - m^2 \beta_m} e^{-2m\alpha} \right],$$

но

$$x_i^2 = \gamma^2 - \epsilon_i' \mu_i' \approx -\epsilon_i' \mu_i'.$$

Далее, предполагая, что $\mu_e' = \mu_i'$, будем иметь:

$$\frac{x_i^2}{\epsilon_i' \mu_e'} = -1$$

и, следовательно,

$$\eta = -2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\beta_m}{1 - m^2 \beta_m} e^{-2m\alpha}. \quad (52)$$

Сравним это с результатом работы В. Ю. Ломоносова. В последней предлагается находить η путем приравнивания нулю определителя Δ_n усеченной системы уравнений. Приравнивание нулю определителя Δ_1 первого порядка дает $\eta = 0$. Приравниванием нулю второго определителя находится равенство

$$\eta = \frac{2\beta_1 e^{-\alpha}}{e^{-\alpha} + (2\beta_1 - 1) e^{\alpha}}. \quad (53)$$

Способ В. Ю. Ломоносова не дает возможности исследовать точность выражения (53), однако мы можем это сделать, воспользовавшись полученным нами равенством (52).

Поскольку в выражении (53) совершенно не входят члены с $\beta_2, \beta_3, \dots$ учитывающие вторую, третью и следующие гармоники, обусловленные эффектом близости, то выражение (53) заведомо имеет погрешность:

$$-\frac{2\beta_2}{1 - 2\beta_2} e^{-4\alpha} - \frac{2\beta_3}{1 - 3\beta_3} e^{-6\alpha} - \dots$$

Обозначая через β порядок величин $\beta_1, \beta_2, \dots$ ($\beta \approx |1/\xi|$), мы заключаем, что погрешность выражения (53) есть $O(\beta e^{-4\alpha})$ (относительная ошибка в определении η порядка $e^{-2\alpha}$). Но поскольку это так, то нет основания учитывать в знаменателе указанного выражения величину $e^{-\alpha}$, которая мала по сравнению с $(1 - 2\beta_1) e^{\alpha}$. Отбрасывая ее, мы получаем с той же степенью точности

$$\eta = -\frac{2\beta_1}{1 - 2\beta_1} e^{-2\alpha} [1 + O(e^{-2\alpha})].$$

Таких лишних членов, усложняющих выражение для η , затрудняющих решение, но ничего не дающих, становится особенно много при оперировании с определителями более высокого порядка. Вычисление определителя третьего порядка, если отбросить лишние члены, дает следующее выражение для η :

$$\eta = -\left[\frac{2\beta_1}{1 - 2\beta_1} e^{-2\alpha} + \left(\frac{2\beta_1}{1 - 2\beta_1} \right)^2 e^{-4\alpha} + \right. \\ \left. + \frac{2\beta_2}{1 - 4\beta_2} e^{-4\alpha} \right] [1 + O(e^{-4\alpha})]. \quad (54)$$

Если предположить, что β_1, β_2 малы, то выражение (54) совпадает с двумя первыми членами ряда (52). Вопрос о том, дают ли квадратичные по β члены выражения (54) некоторое уточнение, остается открытым, поскольку способ В. Ю. Ломоносова не дает возможности его решить.

Чтобы учесть по способу В. Ю. Ломоносова поправку, даваемую третьим членом $\frac{2\beta_3}{1 - 3\beta_3} e^{-6\alpha}$ выражения (52), нужно вычислять определитель четвертого порядка; для учета следующего члена придется оперировать с определителем пятого

порядка и т. д. Такое резкое возрастание трудности вычислений делает нахождение высших поправок по способу В. Ю. Ломоносова практически невозможным.

Из сказанного ясно, что способ, предложенный в настоящей работе, удобнее для расчета эффектов близости при малом α (h близко к a).

2. Несимметричная двухпроводная система.

Пусть теперь провода, из которых построена двухпроводная линия, имеют различные радиусы сечений a_1 и a_2 , а также различные проводимости σ_1 , σ_2 и другие параметры. Индексами 1 и 2 мы будем отмечать принадлежность к первому или соответственно ко второму проводу. В формулах, приложимых как к первому, так и ко второму проводу, будем пользоваться индексом i , которому можно придавать значения 1 или 2.

Пусть D — расстояние между центрами сечений проводов. Введем биполярную систему координат u, v с расстоянием между полюсами

$$2b = \frac{1}{D} (a_1^2 + a_2^2 + D^2 - 2a_1^2 a_2^2 - 2a_1^2 D^2 - 2a_2^2 D^2)^{\frac{1}{2}}.$$

Поверхности проводов будут совпадать с координатными поверхностями $u = \alpha_1$ и $u = \alpha_2$, где

$$\alpha_1 = \text{Arch} \frac{a_1^2 - a_2^2 + D^2}{2a_1 D}; \quad \alpha_2 = -\text{Arch} \frac{a_2^2 - a_1^2 + D^2}{2a_2 D}.$$

В первой части рассматривалась волна, возбуждаемая подачей разности потенциалов V , при этом абсолютное значение потенциалов не принималось во внимание. Суммарный ток в обоих проводах взаимно компенсировался. Однако можно представить себе случай, когда возвратным проводом служит некоторый третий провод (или земля), расположенный на большом расстоянии (много больше, чем $|1/\kappa_e|$). В этом случае двухпроводную линию можно считать «свободной», но тогда разности потенциалов V уже недостаточно для описания возбуждаемой волны. Поэтому мы будем характеризовать волну амплитудными значениями токов или зарядов в каждом проводе, т. е. величинами Q_1, Q_2 , определяемыми как

$$Q_i = \frac{(-1)^i}{2\pi} \oint_{C_i} E_u U dv, \quad (i=1, 2). \quad (55)$$

Функция G во внешнем пространстве находится путем решения уравнения Лапласа

$$\Delta_2 G = 0 \quad (56)$$

с условиями:

$$\left. \begin{aligned} 1) \frac{\partial G}{\partial v} \Big|_{C_i} &= 0, \quad (i=1, 2). \\ 2) \oint_{C_i} \frac{\partial G}{\partial u} dv &= (-1)^i 2\pi A_i; \\ A_i &= -\kappa_e^2 Q_i, \quad (i=1, 2). \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

Второе условие вытекает из выражения (55). Третье условие касается поведения функции G при большом расстоянии R от проводов и вы-

текает из рассмотрения точных уравнений (14) и (15). Решение последних при малом расстоянии от проводов (при $R \ll |1/\kappa_e|$) совпадает с тем решением уравнения Лапласа, которое при $R \rightarrow \infty$ стремится к функции, пропорциональной $-\ln \beta R$ ($\beta = 1/2j\gamma$, $\gamma = 1,781 \dots$). В применении к G это условие можно записать следующим образом:

$$3) G \rightarrow k \ln \beta R \quad \text{при } R \rightarrow \infty, \quad (58)$$

где k — некоторый коэффициент пропорциональности.

Будем искать решение уравнения (56) с условиями (57) и (58) в виде:

$$G = \sum_{i=1}^2 A_i \ln \beta \rho_i + \sum_{n=1}^{\infty} (g_n \text{sh } nu + h_n \text{ch } nu) \cos nv. \quad (59)$$

Соответствующие выкладки приводят к следующему результату:

$$G = \sum_{i=1}^2 A_i \left[\ln \beta \rho_i + \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{l+i}}{l} \left(\frac{a_{i \pm 1}}{D} \right)^l C_{ln}^{i \pm 1} \frac{\text{sh } n(u - \alpha_i)}{\text{sh } n(\alpha_1 - \alpha_2)} \cos nv \right], \quad (60)$$

где C_{ln}^i — коэффициент в формуле

$$\cos l\varphi_i = \sum_{n=0}^{\infty} C_{ln}^i \cos nv,$$

вычисляемые при помощи выражений (38) и (38а), в которые следует подставить $\alpha = |\alpha_i|$. Функция (60) принимает на поверхностях проводов постоянные значения:

$$\begin{aligned} G|_{u=\alpha_1} &= A_1 \ln \beta a_1 + A_2 \left[\ln \beta D - \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(-1)^l}{l} \left(\frac{a_1}{D} \right)^l C_{l0}^2 \right] = \\ &= A_1 \ln \beta a_1 + A_2 \ln \beta (D - a_1 e^{-\alpha_1}); \end{aligned} \quad (61)$$

$$G|_{u=\alpha_2} = A_1 \ln \beta (D - a_2 e^{-\alpha_2}) + A_2 \ln \beta a_2.$$

Нормальная компонента E_{ip} электрического поля выражается через производную от функции G по внешней нормали:

$$E_{ip} = -\frac{\epsilon_s'}{\epsilon_i'} E_{en} = -\frac{1}{\kappa_e^2} \frac{\epsilon_s'}{\epsilon_i'} \frac{\partial G}{\partial n} \quad \text{на } C_i. \quad (62)$$

У поверхности второго провода направление возрастания u совпадает с внешней нормалью, у поверхности первого оно противоположно направлению внешней нормали, поэтому

$$\frac{\partial G}{\partial n} \Big|_{C_i} = (-1)^i \frac{1}{U} \frac{\partial G}{\partial u} \Big|_{u=\alpha_i}.$$

Дифференцируя выражение (60), находим:

$$\frac{\partial G}{\partial n} \Big|_{c_i} = \frac{A_i}{a_i} - \frac{A_{i \pm 1}}{a_i} \sum_{m=1}^{\infty} \left(-\frac{a_i}{D} \right)^m \cos m\varphi +$$

$$+ (-1)^i \sum_{j=1}^2 \frac{A_j}{U_i} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{l+j}}{l} \left(\frac{a_{j \pm 1}}{D} \right)^l \times$$

$$\times C_{ln}^{j \pm 1} n \frac{\operatorname{ch} n (a_1 - a_2)}{\operatorname{sh} n (a_1 - a_2)} \cos nv, \quad (63)$$

где $U_i = U|_{c_i}$.

Пользуясь формулой

$$\frac{a}{U} \cos nv = \sum_{m=1}^{\infty} C_{mn} \cos m\varphi \quad (n=1, 2, \dots), \quad (64)$$

вывод которой дан в приложении I, преобразуем последнюю сумму в правой части уравнения (63) к полярному углу и, подставляя ее в выражение (62), получаем:

$$E_{ip} |_{c_i} = -\frac{1}{x_e^2} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{r_m^{ij}}{a_i} A_j \cos m\varphi_i, \quad (65)$$

где $r_0^{ij} = \delta_{ij}$; $\delta_{ij} = 0, (i \neq j)$; $\delta_{ij} = 1, (i = j)$

$$r_m^{ij} = \begin{cases} -\sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^l}{l} \left(\frac{a_{i \pm 1}}{D} \right)^l C_{ln}^{i \pm 1} n \frac{C_{mn}^i}{\operatorname{sh} n (a_1 - a_2)} \\ \text{при } i=j, \\ -(-1)^m \left(\frac{a_i}{D} \right)^m - \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^l}{l} \left(\frac{a_i}{D} \right)^l \times \\ \times C_{ln}^i n \operatorname{cth} n (a_1 - a_2) C_{mn}^i \text{ при } i \neq j. \end{cases} \quad (66)$$

Применяя тот же метод, что и в первой части, будем иметь в первом приближении

$$\frac{\partial E_{iz}}{\partial \rho_i} \Big|_{c_i} = \frac{1}{\gamma} \frac{x_i^2}{x_e^2} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{r_m^{ij}}{a_i} A_j \cos m\varphi_i. \quad (67)$$

Решение уравнения (16) с граничным условием (67) запишется в виде:

$$E_{iz} = \frac{1}{\gamma} \frac{x_i^2}{x_e^2} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{r_m^{ij}}{a_i} A_j \frac{J_m(x_i \rho_i)}{J'_m(x_i a_i)} \cos m\varphi_i; \quad (i=1, 2). \quad (68)$$

Отсюда, полагая $\rho_i = a_i$, находим граничное условие для внешней задачи

$$E_{ez} |_{c_i} = \sum_{m=0}^{\infty} S_n^i \cos nv, \quad (69)$$

где

$$S_n^i = \frac{1}{\gamma} \frac{x_i}{x_e^2} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{r_m^{ij}}{a_i} A_j \frac{J_m(x_i a_i)}{J'_m(x_i a_i)} C_{mn}^i. \quad (70)$$

Функцию E_{ez} , удовлетворяющую уравнению Лапласа, мы будем искать в форме

$$E_{ez} = \sum_{i=1}^2 B_i \left[\ln \beta \rho_i + \sum_{l,n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{l+i}}{l} \left(\frac{a_{i \pm 1}}{D} \right)^l \times \right.$$

$$\times C_{ln}^{i \pm 1} \frac{\operatorname{sh} n (u - a_i)}{\operatorname{sh} n (a_1 - a_2)} \cos nv \Big] +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} (p_n \operatorname{sh} nu + q_n \operatorname{ch} nu) \cos nv. \quad (71)$$

Здесь первая сумма принимает на C_i постоянные значения подобно тому, как функция (60) принимает постоянные значения (61). Учитывая это, получаем из условия (69) следующие равенства:

$$B_1 \ln \beta a_1 + B_2 \ln \beta (D - a_1 e^{-a_1}) = S_0^1; \quad (72)$$

$$B_1 \ln \beta (D - a_2 e^{-1 a_2}) + B_2 \ln \beta a_2 = S_0^2;$$

$$p_n \operatorname{sh} n a_i + q_n \operatorname{sh} n a_i = S_n^i, \quad (i=1, 2), \quad n=1, 2, \dots \quad (73)$$

из которых определяются B_1, B_2, p_n, q_n .

В том же порядке, что и в первой части, можно проводить дальнейшее рассмотрение. Обычно важнее всего уметь вычислять постоянную распространения. Перейдем к ее определению.

Подставив в равенство (47), записанное для первого и второго прозодов, выражения (60) и (71), получим:

$$A_1 = \gamma B_1; \quad A_2 = \gamma B_2. \quad (74)$$

Эти равенства справедливы не при всяких значениях A_1 и A_2 и γ . Делая подстановку $B_i = A_i/\gamma$ в равенства (72) и учитывая выражение (70), будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} A_1 [x_e^2 \ln \beta a_1 + k_{11}] + \\ + A_2 [x_e^2 \ln \beta (D - a_1 e^{-a_1}) + k_{12}] = 0; \\ A_1 [x_e^2 \ln \beta (D - a_2 e^{-1 a_2}) + k_{21}] + \\ + A_2 [x_e^2 \ln \beta a_2 + k_{22}] = 0, \end{aligned} \right\} \quad (75)$$

где

$$k_{ij} = \frac{x_i}{x_e^2} \frac{\epsilon'_e}{\epsilon'_i} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{r_m^{ij}}{a_i} (-1)^m e^{-m |a_i|} \frac{J_m(x_i a_i)}{J'_m(x_i a_i)}. \quad (76)$$

Уравнение, определяющее γ , мы получим как условие совместности равенств (75). Это уравнение дает два возможных значения постоянной распространения:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= (-k_e^2 + x_1)^{\frac{1}{2}} \approx j k_e + \frac{x_1}{2 j k_e}; \\ \gamma_2 &= (-k_e^2 + x_2)^{\frac{1}{2}} \approx j k_e + \frac{x_2}{2 j k_e}, \end{aligned} \right\} \quad (77)$$

где $k_e = \sqrt{-\varepsilon'_e \mu'_e}$; x_1, x_2 — корни квадратного уравнения:

$$\begin{aligned} & [x \ln \beta (D - a_1 e^{-\alpha_1}) + k_{12}] \times \\ & \times [x \ln \beta (D - a_2 e^{-\alpha_2}) + k_{21}] - [x \ln \beta a_1 + k_{11}] \times \\ & \times [x \ln \beta a_2 + k_{22}]. \end{aligned} \quad (78)$$

Величины $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ в уравнении (78) определяются при помощи выражения (76), куда следует подставить $\alpha_i^2 = -\varepsilon'_i \mu'_i$.

Две постоянные распространения соответствуют двум парциальным волнам, которые могут распространяться в системах: синфазной и антифазной. Эти парциальные волны характеризуются различным распределением потенциалов и токов между проводами. Так, для парциальной волны с постоянной распространения γ_1 согласно (75) имеем:

$$\begin{aligned} A_1 : A_2 &= [-x_1 \ln \beta a_2 - k_{22}] : \\ &: [x_1 \ln \beta (D - a_2 e^{-\alpha_2}) + k_{21}]. \end{aligned} \quad (79)$$

Это значит, что распределение амплитуд зарядов Q_1 и Q_2 и токов I_1 и I_2 по проводам характеризуется пропорцией:

$$\begin{aligned} Q_1 : Q_2 = I_1 : I_2 &= [-x_1 \ln \beta a_2 - k_{22}] : \\ &: [x_1 \ln \beta (D - a_2 e^{-\alpha_2}) + k_{21}]. \end{aligned} \quad (79a)$$

В то же время потенциалы проводов пропорциональны

$$\begin{aligned} V_1 : V_2 = G_1 : G_2 &= [I_1 \ln \beta a_1 + I_2 \ln \beta (D - a_1 e^{-\alpha_1})] : \\ &: [I_1 \ln \beta (D - a_2 e^{-\alpha_2}) + I_2 \ln \beta a_2]. \end{aligned} \quad (80)$$

Аналогичные соотношения пропорциональности имеют место для второй парциальной волны. Только при таких распределениях потенциалов и токов волна распространяется как единое целое, а не как суперпозиция диспергирующих волн. В общем же случае волна распадается на сумму парциальных волн, каждая из которых распространяется со своей скоростью, и поэтому форма волны при ее движении вдоль оси z искажается. При бесконечной проводимости проводов этого эффекта не наблюдается, так как все парциальные волны имеют одинаковую скорость. Конечность проводимости материала проводов приводит к появлению разности скоростей.

Волна, рассмотренная в первой части, является одной из двух парциальных волн в симметричной двухпроводной системе, а именно антифазной. Нетрудно показать, что относящиеся к ней формулы можно получить из более общей теории несимметричной двухпроводной системы, изложенной в последней части.

Если $\sigma \rightarrow \infty$, то результаты настоящего параграфа совпадают с результатами работы Я. Н. Фельда [Л. 3].

Приложение I. Выведем ряд формул, связывающих полярный и биполярный углы. Для поверхности C_1 имеем:

$$x + jy = h + ae^{i\varphi}; \quad u = a.$$

Подставив эти значения в уравнение (1), получим:

$$e^{a+iv} = \frac{e^a + e^{i\varphi}}{e^{-a} + e^{i\varphi}}$$

или, обозначив $e^{i\varphi} = x$, $e^{-i\varphi} = y$, $a^2 = \gamma$, получим:

$$x = \frac{\gamma y + 1}{y + \gamma}. \quad (I,1)$$

Так как функция

$$x^n = \left(\frac{\gamma y + 1}{y + \gamma} \right)^n$$

является аналитической при $|y| \leq 1$, то разложение ее в ряд Маклорена

$$x^n = \sum_{m=0}^{\infty} d_{nm} y^m, \quad (I,2)$$

где

$$d_{nm} = \frac{1}{m!} \left[\left(\frac{\gamma y + 1}{y + \gamma} \right)^n \right]_{y=0}^{(m)},$$

сходится на окружности $|y| = 1$ и отождествляется с рядом Фурье.

Взяв мнимую часть ряда (I,2), получим:

$$\sin n\varphi = - \sum_{m=1}^{\infty} d_{nm} \sin m\varphi$$

для первого провода и равенство (44) для второго.

Решая уравнение (I,1) относительно y и беря действительную часть разложения Маклорена

$$y^m = C_{mn} x^n,$$

убеждаемся аналогичным же образом в справедливости равенств (37) и (38).

Вычисляя C_{mn}, d_{nm} при помощи выражений (38) и (45) с использованием биномиальной формулы, находим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{m} C_{mn} &= \frac{1}{n} d_{nm} = \\ &= \sum_{k=0}^{k>m, n} \frac{(m+n-k-1)!}{k!(m-k)!(n-k)!} (-1)^{m-k} e^{a(2k-m-n)}. \end{aligned} \quad (I,3)$$

Представим в виде ряда Фурье по углу φ функцию

$$\frac{a}{U} \cos n\varphi = \frac{dv}{d\varphi} \cos n\varphi, \quad (n = 1, 2, \dots).$$

Как известно, коэффициенты разложения

$$\frac{dv}{d\varphi} \cos n\varphi = \frac{f_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} f_m \cos m\varphi$$

равны

$$f_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{dv}{d\varphi} \cos \varphi \right) \cos m\varphi d\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \cos m\varphi \cos n\varphi dv.$$

Подставляя сюда выражение (37), получаем:

$$f_m = C_{mn}, \quad (m = 0, 1, \dots),$$

что доказывает формулу (64) (так как $C_{0n} = 0$). Аналогичный прием может быть применен для доказательства разложения

$$\frac{a}{U} = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} C_{m0} \cos m\varphi.$$

Приложение II. Получим выражение (60) как решение уравнения (56) с условиями (57) и (58). Найдем, какие значения принимает на C_1, C_2 функция

$$G_0 = A_1 \ln \beta a_1 + A_2 \ln \beta a_2, \quad (II,1)$$

удовлетворяющая уравнению (56) и условиям (57,2) и (58). Учитывая начало отсчета полярного угла, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \ln \beta a_1^2 |_{C_1} &= \frac{1}{2} \ln (D^2 + a_1^2 + 2Da_1 \cos \varphi_1) = \\ &= \ln D + \frac{1}{2} \ln (1 + p^2 + 2p \cos \varphi_1), \end{aligned}$$

где $p = \frac{a_1}{D}$.

Пользуясь формулой

$$\ln (1 + p^2 + 2p \cos \varphi_1) = -2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l} (-p)^l \cos l\varphi_1, \quad (p < 1),$$

получаем отсюда

$$\ln \beta a_1 |_{C_1} = \ln D - \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l} \left(-\frac{a_1}{D}\right)^l \cos l\varphi_1.$$

Учитывая это и аналогичное выражение для $\ln \beta a_2 |_{C_2}$, имеем после перехода к биполярному углу:

$$G_0 |_{C_1} = A_1 \ln \beta a_1 + A_2 \left[\ln \beta D - \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l} \left(-\frac{a_1}{D}\right)^l C_{ln}^1 \cos n\varphi_1 \right];$$

$$G_0 |_{C_2} = A_1 \left[\ln \beta D - \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l} \left(-\frac{a_2}{D}\right)^l C_{ln}^2 \cos n\varphi_2 \right] + A_2 \ln \beta a_2.$$

Следовательно, для получения функции G , удовлетворяющей условию (57, 1), нужно добавить к G_0 гармоническую функцию вида:

$$G_1 = \sum_{n=1}^{\infty} (g_n \operatorname{sh} nu + h_n \operatorname{ch} nu) \cos n\varphi$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} G_1 |_{C_1} &= A_2 \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{l} \left(-\frac{a_1}{D}\right)^l C_{ln}^1 \cos n\varphi; \\ G_1 |_{C_2} &= A_1 \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{l} \left(-\frac{a_2}{D}\right)^l C_{ln}^2 \cos n\varphi. \end{aligned}$$

Используя эти условия, находим:

$$\begin{aligned} G_1 &= A_2 \sum_{l, n=1}^{\infty} \frac{1}{l} \left(-\frac{a_1}{D}\right)^l C_{ln}^1 \frac{\operatorname{sh} n(u - a_2)}{\operatorname{sh} n(a_1 - a_2)} \cos n\varphi + \\ &+ A_1 \sum_{l, n=1}^{\infty} \frac{1}{l} \left(-\frac{a_2}{D}\right)^l C_{ln}^2 \frac{\operatorname{sh} n(a_1 - u)}{\operatorname{sh} n(a_1 - a_2)} \cos n\varphi. \quad (II,2) \end{aligned}$$

Сложив (II,1) и (II,2), получим выражение (60).

Литература

1. G. Mie. Elektrische Wellen an zwei parallelen Drähten, Annalen der Physik, т. 2, стр. 201—249, 1900.
2. В. Ю. Ломоносов. Электромагнитное поле двухпроводной линии. Труды Ивановского энергетического института, вып. IV, стр. 223—247. Госэнергоиздат, 1951.
3. Я. Н. Фельд. Однотактные и двухтактные волны вдоль двухпроводной линии. Научно-технический сборник ЛЭТИС, стр. 21—36, № 18, 1937.
4. Я. Н. Фельд. Потери в фидерных устройствах. ЖТФ, т. X, вып. 9, 1940.
5. В. В. Татаринев. Распространение и отражение колебаний в асимметричных фидерах без потерь. Известия АН СССР, ОТН, № 3 и 10, 1939.
6. В. А. Судakov. Волноводные свойства двухпроводной линии передачи и неаксиального кабеля. Сборник научных работ по проводной связи № 1. Издательство Академии наук СССР, 1949.
7. П. И. Кузнецов и Р. Л. Стратонович. Электромагнитные процессы в многопроводной системе. Известия АН СССР, ОТН, № 9, 1954.

[18.8.1954]



Некоторые вопросы современного выключателестроения

Доктор техн. наук, проф. Г. В. БУТКЕВИЧ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Рост мощностей короткого замыкания и рабочих напряжений энергосистем непрерывно усложняет функции выключателя и повышает его ответственность как коммутационного и защитного аппарата.

Конструирование новых типов выключателей и их маркировка по отключающей способности все более и более усложняются вследствие того, что разрыв между ударной мощностью специальных лабораторных установок и номинальной отключающей способностью выключателя продолжает расти. Сейчас нет ни одной лаборатории в мире, в которой можно было бы испытать мощный современный выключатель в натуральном режиме. Возникает настоятельная необходимость проводить изыскания различных искусственных режимов, имитирующих натуральные с той или иной степенью приближения.

При таком положении совершенно очевидно, что сейчас конструктору при создании новых типов мощных выключателей необходимо предусмотреть в самой конструкции реальную возможность ее испытания. Конструктору следует выбирать и создавать такие дугогасительные устройства для выключателя, которые позволяли бы их дробить при испытаниях на элементы. Очевидно, должна существовать уверенность в том, что это допустимо делать, т. е. что всегда в процессе выключения заведомо обеспечен известный режим распределения напряжения между элементами дугогасительного устройства и что обеспечена взаимная независимость действия (в газодинамическом, электродинамическом и других отношениях) отдельных элементов. При таких условиях представится возможность подвергнуть всестороннему испытанию отдельно взятый элемент (раз-

рыв) дугогасительной системы, используя источники энергии с пониженным напряжением, а следовательно, и относительно небольшой мощностью.

Имеется другой круг вопросов — нормативного характера, разрешение которых также весьма важно для дальнейшего успешного развития выключателестроения: необходимо уточнить некоторые параметры, которые непосредственно или косвенно определяют отключающую способность выключателя и которые до сего времени не получили надлежащего уточнения в Советском стандарте на высоковольтные выключатели. Рассмотрим наиболее актуальные на наш взгляд вопросы этого комплекса.

Скорость восстановления напряжения при испытании выключателя. В советском стандарте на выключатели отсутствуют какие-либо руководящие указания или рекомендации по выбору скорости восстановления напряжения для того или иного класса выключателя при его испытании.

В настоящее время опыты с новыми конструкциями ведутся без всякого учета этого фактора. Очевидно, что испытания выключателя в условиях чрезмерно сниженных скоростей восстановления напряжения не гарантирует удовлетворительную его работу в сетях. Испытания в очень жестких схемах, предъявляя к аппарату чрезмерные требования, создают препятствия на пути к разработке удовлетворительной и экономически целесообразной конструкции.

Выбор скорости восстановления напряжения (или собственной частоты, что одно и то же¹) — вопрос не простой. Конечно, эта скорость не должна быть наивысшей из наблюдаемых в единичных случаях для данного класса выключателя, но и не средней для всего диапазона частот. Так примитивно этот вопрос нельзя решать. Обычно разработке рекомендаций предшествует анализ реальных сетей при максимальных значениях мощностей короткого замыкания и 50% этих значений. На основе этого анализа строится функция распределения по частотам всех выключателей данного класса.

На двенадцатом конгрессе CJGRE в 1948 г. в докладе № 138 представителей Комитета по выключателям Ruppikofer and Juillard [Л. 1] была приведена таблица собственных частот восстанавливающегося напряжения, в основном разработанная в Швейцарии и в несколько более полном виде рекомендованная для включения в международный стандарт на выключатели (табл. 1).

В табл. 1 даны значения собственных частот для 100 и 50% номинальной мощности отключения выключателя, которые должны приниматься при испытании на отключающую способность.

¹ Между средней скоростью восстановления напряжения и собственной частотой колебания f_2 существует простая зависимость:

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{cp} = 4f_0 u_0 \cdot 10^{-6} [в/мксек],$$

где u_0 — мгновенное значение напряжения промышленной частоты, соответствующее моменту прохождения тока через нуль. Для первой рвущей фазы при трехфазном коротком замыкании эта величина может достигнуть полуторакратного значения амплитуды фазного напряжения.

Таблица 1

Рекомендованные ряды собственных при испытании частот выключателей на отключающую способность (конгресс CJGRE, 1948, Комитет по выключателям)

Номинальное напряжение выключателя, кВ	6	10	20	30	45	60	80	110	150	220
f_0 при 100% номинальной мощности отключения, кгц	4	3	1,8	1,4	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4
f_0 при 50% номинальной мощности отключения, кгц	20	15	9	7	5,5	4,5	3,5	3,0	2,5	2,0

В 1952 г. на четырнадцатом конгрессе CJGRE был опубликован доклад [Л. 2] О. S. Johansen (ASEA), в котором на основе анализа шведских сетей приведены (табл. 2) рекомендуемые значения собственных частот для различных номинальных напряжений.

В табл. 2 до номинального напряжения 30 кВ включительно приводятся два ряда цифр: для выключателей с номинальной мощностью отключения менее 500 мгва и выше 500 мгва.

Таблица 2

Ряды собственных частот при номинальной мощности отключения (рекомендованы в Швеции)

Номинальное напряжение, кВ	6	10	20	30	50	130	220
f_0 при мощности 500 мгва и ниже, кгц	20	12	6	4	—	—	—
f_0 при мощности выше 500 мгва, кгц	10	6	3	2	1,2	0,9	0,55

Для выключателей с номинальной мощностью отключения, равной или меньшей 500 мгва, и для мощностей отключения в 60% от номинальной рекомендовано принимать скорость восстановления напряжения в 2000 в/мксек. Для выключателей, мощностью выше 500 мгва, рекомендуется скорость, пятикратная указанной в табл. 2 для 60% мощности: иначе говоря, при переходе от 100 к 60% мощности отключения предлагается коэффициент увеличения частоты тот же, что и рекомендованный Комитетом CJGRE для международного стандарта (табл. 1).

Табл. 1 построена довольно удачно, однако значения частот, относящиеся к 100%-ным мощностям короткого замыкания, следует, повидимому, несколько увеличить применительно к условиям в Советском Союзе. Советский опыт испытаний выключателей различного типа показывает, что выключатели часто не без труда преодолевают 50%-ную мощность при частотах, рекомендуемых табл. 1, и автоматически, сравнительно

легко проходят 100%-ную мощность при соответствующих частотах.

Таким образом, табл. 1, рекомендованная для международного стандарта, в части ряда цифр для 50% мощности отключения не вызывает сомнений, но ряд собственных частот для 100% мощности следует корректировать, приблизив их к величинам, рекомендованным в Швеции. С учетом этих замечаний можно было рекомендовать принять в качестве нормативов для испытаний выключателей в СССР ряды собственных частот, данные в табл. 3.

Таблица 3

Проект таблицы нормированных значений собственных частот для выключателей советского производства

Номинальное напряжение выключателя, кВ	6	10	20	35	110	154	220
f_0 при 100% номинальной мощности отключения, кгц	8,0	6,0	3,0	2,0	1,0	0,8	0,6
f_0 при 50% номинальной мощности отключения, кгц	20	15	9,0	7,0	3,0	2,5	2,0

Предлагаемые ряды значений собственных частот, повидимому, перекроют более 90% всех установок выключателей в различных сетях Советского Союза. Эти нормативы послужили бы организующим началом в деле испытания выключателей на отключающую способность и внесли бы известное единообразие в испытания, проводимые различными организациями.

Однако наличие таких нормативов вовсе не исключает необходимости безотлагательно приступить к анализу наших сетей с точки зрения распределения всех сетевых выключателей по скоростям восстановления напряжения, что позволило бы более обоснованно установить значения собственных частот при испытании выключателей для 100 и 50% мощности отключения. Пока эти уточнения не проведены, следует принять в новой предстоящей редакции стандарта значения собственных частот, примерно указанные в табл. 3.

Весьма желательно принять также некоторый критерий для оценки амплитуды восстанавливающегося напряжения, так как некоторые типы выключателей весьма чувствительны не столько к скорости подъема напряжения, сколько к его амплитуде. Нужно, однако, отметить, что для нормализации коэффициента амплитуды — коэффициента, характеризующего превышение амплитуды высокочастотных колебаний над амплитудой промышленной частоты, нет еще пока достаточных данных.

Об учете при испытании аperiodической составляющей в токе короткого замыкания. Действующий ГОСТ 687-41 на выключатели предусматривает возможность при испытании выключателей на отключающую способность учитывать

аperiodическую (постоянную) составляющую, определяя расчетный отключаемый ток по формуле:

$$I_e = \sqrt{I_a^2 + I_c^2},$$

где I_a — действующее значение симметричного тока в первый период после расхождения контактов;

I_c — среднее значение аperiodической составляющей за первый период после расхождения контактов.

При сравнительно большом значении аperiodической составляющей действующее значение полного тока может существенно превзойти значение периодической составляющей, в пределе в 1,73 раза. Вследствие затухания этот предел не достигается, но тем не менее при соответствующей настройке лабораторной схемы управления можно получить расхождение контактов на первом же полупериоде короткого замыкания, когда аperiodическая составляющая может быть весьма значительной и полный ток будет на 50% больше тока периодической составляющей.

Таким образом ГОСТ 687-41 позволяет при «умелом» проведении испытаний существенно повысить номинальную отключающую способность выключателя за счет аperiodической составляющей. Посмотрим, достаточно ли это закономерно.

В эксплуатации в отключаемом токе на момент отключения почти всегда отсутствует аperiodическая составляющая, так как время действия защиты и собственное время выключателя дают в сумме такое время, в течение которого аperiodическая составляющая тока полностью или почти полностью затухает (до 10...15%). Таким образом, можно считать, что в реальных сетях выключатель не нагружается во время отключения аperiodической составляющей. Вместе с тем анализ процесса гашения дуги в выключателе при наличии аperiodической составляющей показывает, что наличие аperiodической составляющей в токе не только не утяжеляет процесс гашения дуги, как это часто полагают, а, наоборот, существенно его облегчает.

Если сравнить равные действующие значения тока при наличии и отсутствии аperiodической составляющей, то можно заведомо сказать, что при отсутствии аperiodической составляющей процесс гашения дуги может оказаться существенно более тяжелым для ряда дугогасящих систем, особенно для воздушных выключателей.

В самом деле, при наличии аperiodической составляющей в токе короткого замыкания момент прохождения тока через нуль значительно сдвигается по отношению к кривой напряжения и приближается, таким образом, к моменту прохождения напряжения через нуль. Иначе говоря, скорость восстановления напряжения на промежутке может очень заметно снизиться. Это первое весьма существенное обстоятельство, приводящее к облегчению работы дугогасящей системы. Второе облегчающее обстоятельство состоит

в том, что апериодическая составляющая заметно снижает скорость подхода тока к нулю.

Таким образом, если дуга подвергается достаточно интенсивному обдуванию и продукты ионизации непрерывно удаляются из дугового промежутка, то нетрудно видеть, что снижение скорости подхода тока к нулю позволяет «вступить» дуговому столбу в «нулевую паузу» с меньшим запасом тепловой энергии (т. е. с меньшим диаметром канала, с меньшей температурой газа) и, следовательно, с большими возможностями в отношении деионизации остатков дугового канала к моменту восстановления напряжения на промежутке.

Вот эти два важных соображения, которые говорят о существенном облегчении процесса гашения, вносимом апериодической составляющей при обрыве дуги.

Однако было бы неправильно полагать, что наличие апериодической составляющей никогда не утяжеляет процесса гашения. Если мы сравним случаи равенства действующих значений тока при и в отсутствии апериодической составляющей, то все же количество энергии, которое способно выделиться в дуговом промежутке за время горения дуги, при наличии апериодической составляющей может оказаться больше, чем без нее. Действительно, когда процесс размыкания контактов выключателя начнется в самом начале большей полуволны или в конце предыдущей меньшей, то длительность горения дуги может составить в пределе почти целый период (0,02 сек), в то время как при отсутствии апериодической составляющей это время горения могло быть равным только 0,01 сек.

Какие факторы, облегчающие или утяжеляющие работу выключателя, будут превалировать, — это зависит от дугогасящей системы, ее принципа действия, конструкции и т. п.

Нельзя и даже опасно утверждать, что выключатель, испытанный в условиях, когда в токе имела место значительная апериодическая составляющая, будет надежно работать при том же действующем значении тока при отсутствии апериодической составляющей. Чтобы исключить возможные серьезные ошибки при маркировке выключателя в отношении его отключающей способности, необходимо вести испытание выключателей по возможности только при симметричном токе. Апериодическая же составляющая при испытании выключателей должна исключаться, так как ее влияние, как мы видели, может оказать существенное облегчающее действие, а в отдельных случаях, наоборот — действие утяжеляющее условия гашения дуги в выключателе.

При выборе выключателя расчет мощностей короткого замыкания следует проводить также без учета апериодической составляющей в токе, если ее значение не превосходит 25% амплитуды периодической составляющей, т. е. во всех практических встречающихся случаях работы выключателя. Учитывать апериодическую составляющую при выборе выключателя следует только тогда, когда ее значение превзойдет 25...30%, в особых специальных случаях работы схемы.

Однако некоторые аппараты, например предохранители и трубчатые разрядники, в действительных условиях работают при наличии апериодической составляющей в дуге и они обязательно должны испытываться как при наличии, так и при отсутствии апериодической составляющей. Для этих аппаратов отключающая способность должна оцениваться с учетом апериодической составляющей как при испытаниях, так и при выборе аппарата. При испытаниях аппаратов этого типа продолжительность действия часто достигает одного полупериода, и действующее значение тока можно поэтому оценивать как наибольшую амплитуду, фактически достигнутую или ожидаемую (при токоограничении), деленную на $\sqrt{2}$.

Термическая и электродинамическая устойчивость. Термическая устойчивость дает представление о способности аппарата в замкнутом состоянии пропустить через себя ток короткого замыкания в течение определенного промежутка времени. Термическая устойчивость обычно характеризуется так называемыми односекундным, пятисекундным или десятисекундным токами.

Стандарт допускает пересчет значения тока термической устойчивости с одной длительности его протекания на другую, пользуясь соотношением

$$I_1^2 t_1 = I_2^2 t_2. \quad (1)$$

Этот пересчет основан на предположении, что количество тепла, выделяющегося в токоведущих частях, остается неизменным. Далее обычно полагают, что сопротивление токоведущих частей остается в том и другом случаях неизменным и поэтому

$$I_1^2 t_1 = I_2^2 t_2 \quad \text{или} \quad I_1 = I_2 \sqrt{\frac{t_2}{t_1}}. \quad (2)$$

Пересчет допускается в широких пределах и только непозволительно, чтобы действующее и амплитудное значения сквозного тока не превосходили бы соответствующие значения предельного сквозного тока для сколь угодно короткого промежутка времени.

Следует отметить, что все эти положения, несмотря на их длительное узаконенное существование и применение, являются необоснованными и даже — ошибочными: пересчет тока с одной длительности на другую справедлив только для однородного проводника, где за время протекания тока практически отсутствуют уравнивающие тепловые потоки.

В действительности вопрос несравненно сложнее. Выключатель имеет довольно резко меняющиеся сечения токоведущих частей, устанавливаемые по конструктивным соображениям или по соображениям нагрева аппарата при длительном режиме работы. Вследствие этого возможны значительные перепады температуры между отдельными близко расположенными точками токоведущей системы, а следовательно, появление выравнивающих тепловых потоков.

Вследствие наличия неустановившихся выравнивающих тепловых потоков нельзя считать безразличным, течет ли через токоведущие и кон-

тактные части выключателя ток односекундный 1 сек или десятисекундный 10 сек. Если исходить из приведенной формулы (2), то расчетный односекундный ток превосходит десятисекундный ток более чем в 3 раза, а поглощаемая тепловая мощность при односекундном токе больше в 10 раз мощности при десятисекундном токе, в предположении, что сопротивления отдельных участков цепи неизменны как при том, так и другом токе. Части, более нагретые, быстро передают тепло частям, менее нагретым, и чем продолжительнее процесс нагрева, тем сильнее сказывается явление выравнивания температур между частями и тем выше, следовательно, получается термическая устойчивость.

В действительности дело осложняется еще тем, что сопротивление отдельных частей и особенно переходное сопротивление контактов являются функцией тока и обычно оно растет с током за счет появления электродинамических сил, стремящихся разобщить контакты.

Можно утверждать, и это вполне согласуется с опытом, что термическая устойчивость при токах малой длительности оказывается всегда меньшей, чем при токах большей длительности. Отсюда вытекает такое существенное следствие: испытание аппаратов сквозными токами на термическую устойчивость должно проводиться при том наибольшем токе, который реально будет через него протекать в эксплуатации, а именно при предельном токе отключения выключателя. Пересчет токов можно допускать лишь в небольших пределах (20...25%).

При таком способе оценки термической устойчивости необходимо только установить, какое время должен выключатель выдерживать сквозной ток, равный предельному току отключения (1, 2 или 3 сек). Длительность протекания сквозного тока может быть стандартизирована для различных классов выключателей.

Следует отметить, что появление различных испытательных токов (односекундного, пятисекундного и др.) исторически объясняется отсутствием достаточно мощных установок, позволяющих поставить опыты со сквозным током в условиях, приближающихся к действительным.

Следует иметь в виду, что испытание аппаратов, например десятисекундным током, может не обеспечить его надежной работы при действительных сквозных токах, которым будет подвергаться аппарат в эксплуатации, хотя при испытании и будет сохранено соотношение времен, определяемое равенством $I_1^2 t_1 = I_2^2 t_2$.

Правильно, кроме того, ставит филиал ВЭИ вопрос о необходимости проводить совмещенные (в одном опыте) испытания на электродинамическую и термическую устойчивость. Такие испытания максимально приблизят условия испытания аппарата к действительным, и следует приветствовать внедрение такой методики в практику типовых испытаний выключателей.

Схемы для испытания на отключающую способность. Необходимо дополнить стандарт новыми методами испытания выключателей, например синтетическими, оговорив определенные условия их применения, а именно: точность синхронизации при наложении импульса высокого напряжения, значение реактивности в цепи восстанавливающегося напряжения, меру допустимой несинусоидальности главного тока и пр. Следует признать ненормальным создавшееся положение, когда маркировка выключателей по отключающей способности производится на основании испытаний по неустойчивой методике. Между тем накопленный материал по испытанию выключателей с малой длительностью горения дуги показывает, что синтетический метод представляет собой могучее средство для достижения весьма значительных мощностей отключения.

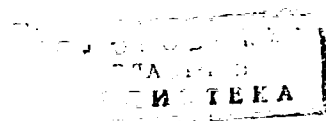
Необходимо решить вопрос о нормализации испытаний выключателей в режиме холостой линии. От испытания выключателей на отключение холостых линий в действующих сетях необходимо, как правило, отказываться, так как это весьма осложняет процесс разработки новых типов выключателей. Опыт показывает, что имитация режима отключения холостой линии вполне возможна в лабораторных условиях без затраты значительных средств. Необходимо установить, какие длины линий выключатели различного класса должны отключать, иначе говоря, указать емкостные токи для различных напряжений и возможные повышения напряжения на шинах перед отключением. Следует ввести нормативную лабораторную эквивалентную схему отключения холостой линии, и эта схема должна быть узаконена наряду со схемой испытания выключателей на отключающую способность.

Литература

1. Puppikofer and Juillard. Report on the Activities of the International committee for the Study of Circuit Breakers from 1 July 1946 to 1 July 1948 (CJGRE, 1948, Report № 138).

2. O. S. Johansen (ASEA) CJGRE 1952, Report № 104.

[10.12.1954]



Основные соотношения в трехфазной сварочной дуге

Доктор техн. наук, проф. Н. С. СИУНОВ и кандидат техн. наук Р. Н. УРМАНОВ

Уральский политехнический институт им. Кирова

Существенные преимущества трехфазной дуговой сварки ставят ее в ряд передовых технологических методов. Решения XIX съезда КПСС предусматривают значительный рост производительности, поэтому дальнейшее исследование и совершенствование высокопроизводительного метода сварки трехфазной дугой имеет важное народнохозяйственное значение.

На первый план в трехфазной сварочной дуге выступают теплоэнергетические вопросы, связанные с необходимостью наиболее рационально использовать энергию отдельных дуг в различных технологических режимах сварки. Одно из существенных преимуществ трехфазной сварки — это возможность регулирования распределения тепловой энергии между отдельными дугами [Л. 1].

Определение основных соотношений между электрическими величинами трехфазной сварочной дуги имеет решающее значение для установления заданного режима сварки, а также для выбора и проектирования специального электрооборудования. В статье рассматриваются некоторые итоги работ по изучению трехфазной сварочной дуги, проведенных за последние годы на кафедре электрических машин УПИ им. Кирова.

Эквивалентная векторная диаграмма. Трехфазная сварочная дуга является совокупностью трех дуг: межэлектродной и двух дуг между деталью и каждым из электродов. Эту трехфазную дугу следует рассматривать как электрическую нагрузку из нелинейных активных сопротивлений, соединенных в треугольник.

Исследование трехфазной сварочной дуги осложняется тем, что напряжения в дугах а в ряде режимов и токи в электродах, — несинусоидальны. Однако для анализа распределения тепловой энергии между отдельными дугами и исследования основных соотношений в трехфазной дуге достаточно вести расчет, как показывает опыт, исходя из эквивалентных синусоид действительных нелинейных токов и напряжений. Эквивалентные синусоиды позволяют учесть влияние высших гармонических составляющих на основные соотношения и построить эквивалентную векторную диа-

грамму трехфазной сварочной дуги. В этом случае действующие значения токов и напряжений эквивалентных синусоид принимаются равными действительным действующим значениям несинусоидальных токов и напряжений.

При рассмотрении основных соотношений между электрическими величинами в трехфазной сварочной дуге можно отвлечься от конкретной схемы питания дуги и считать, что напряжения сварочного трехфазного трансформатора и индуктивные сопротивления регулирующего устройства выбраны с учетом высших гармонических составляющих таким образом, что на всем диапазоне регулирования токи в электродах и напряжения в дугах между деталью и электродами практически поддерживаются равными:

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_b = I; \\ E_{bc} &= E_{ca} = E. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь, как и в дальнейшем, обозначения приняты согласно рис. 1.

При сварке трехфазной дугой условие (1) обычно выполняется и можно принимать, что напряжения в дуге и токи в электродах и в детали, как правило, образуют равнобедренный треугольник.

Углы сдвига между напряжениями в дугах E_{bc} , E_{ca} и соответствующими токами в электродах I_b , I_a принимаются такими, чтобы при протекании эквивалентных синусоидальных токов по тем же сопротивлениям и при тех же напряжениях дуг мощность трехфазной нагрузки сварочной дуги не претерпела изменения [Л. 2].

Как и любую трехфазную нагрузку, мощность трехфазной сварочной дуги можно измерить при помощи двух ваттметров, включенных, например, по схеме рис. 1:

$$P_d = P_1 + P_2 = I_a E_{ac} \cos(\angle E_{ac} I_a) + I_b E_{bc} \cos(\angle E_{bc} I_b). \quad (2)$$

Согласно (1)

$$\angle E_{ac} I_a = \angle E_{bc} I_b = \angle \gamma.$$

Следовательно, угол сдвига γ между током в электроде и напряжением в дуге между этим электродом и деталью можно легко определить по данным измерений:

$$\cos \gamma = \frac{P_d}{2 \cdot EI}. \quad (3)$$

Токи в дугах должны совпадать по фазе с напряжениями, поэтому нетрудно построить также векторы токов отдельных дуг.

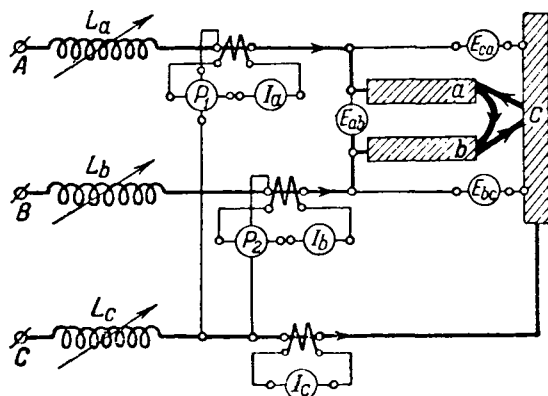


Рис. 1. Схема включения измерительных приборов при сварке.

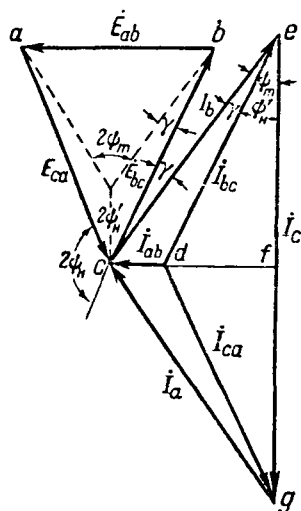


Рис. 2. Эквивалентная векторная диаграмма трехфазной сварочной дуги.

ческими величинами в трехфазной сварочной дуге.

Мощность. Из векторной диаграммы (рис. 2) нетрудно установить, что токи в отдельных дугах¹ будут:

$$\left. \begin{aligned} I_{bc} &= I_{ca} = \frac{1}{\sqrt{4-y^2}} I_c = \frac{n}{\sqrt{4-y^2}} I; \\ I_{ab} &= \frac{2I}{\sqrt{4-y^2}} \sin \left(\arccos \frac{n}{2} - \arcsin \frac{y}{2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{I_c}{I_a} = \frac{I_c}{I_b} = 2 \cos \psi_m; \\ y &= \frac{E_{ab}}{E_{bc}} = \frac{E_{ab}}{E_{ca}} = 2 \cos \psi_n, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где ψ_m — угол сдвига между токами в электродах I_a и I_b ;

ψ_n — угол сдвига между напряжениями в дугах E_{bc} и E_{ca} .

Тогда для определения мощностей отдельных дуг можно пользоваться следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} P_{bc} &= P_{ca} = \frac{1}{\sqrt{4-y^2}} EI_c = \frac{n}{\sqrt{4-y^2}} EI; \\ P_{ab} &= \frac{2E_{ab}I}{\sqrt{4-y^2}} \sin \left(\arccos \frac{n}{2} - \arcsin \frac{y}{2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Мощность трехфазной дуги определяется как сумма мощностей отдельных дуг (2), а также по выражению

$$P_d = 2EI \cos \left(\arccos \frac{n}{2} - \arcsin \frac{y}{2} \right). \quad (7)$$

Как показывает опытная проверка, обе формулы дают количественное совпадение с мощ-

На рис. 2 приведена эквивалентная векторная диаграмма трехфазной сварочной дуги, построенная на основании указанных выше соображений по следующим опытным данным:

$$\begin{aligned} E_{ab} &= 26 \text{ в}; \\ E_{bc} &= E_{ca} = 30 \text{ в}; \\ I_a &= I_b = 360 \text{ а}; \\ I_c &= 585 \text{ а}; \\ P_d &= 21,3 \text{ квт}. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма позволяет установить основные соотношения между электри-

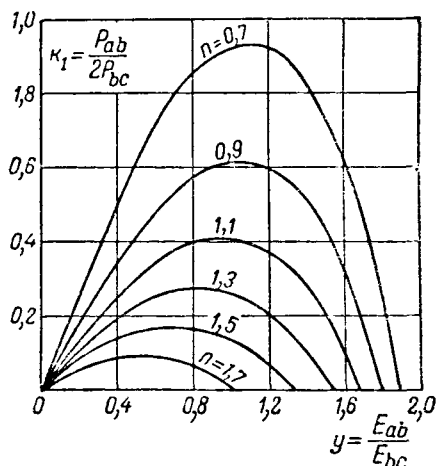


Рис. 3. Кривые зависимости $k_1 = P_{ab} / (2P_{bc})$ от $y = E_{ab} / E_{bc}$ для различных значений n .

чеством, замеренной при помощи двух ваттметров. Это позволяет считать, что формулы (4), (6) и (7) дают достаточно хорошие результаты для действительных несинусоидальных токов и мощностей. По формулам (6) и (7) просто подсчитать значения мощности отдельных дуг и всей дуги в различных режимах сварки и исследовать распределение мощности трехфазной дуги в процессе сварки между ее отдельными дугами.

Мощности отдельных дуг и всей трехфазной дуги определяются не только абсолютными значениями токов в электродах и напряжений в дугах, но также зависят от отношения тока в детали к току в электроде n (или, что то же самое, от угла сдвига между токами в электродах ψ_m) и от отношения напряжений в дуге y (или от угла сдвига между напряжениями дуг ψ_n). Изменять мощности отдельных дуг можно как путем изменения отношений n и y при неизменных токах в электродах и постоянных напряжениях в дугах между деталью и электродами, так и одновременным изменением всех указанных величин.

Для сварки трехфазной дугой характерно, что при условии $I = \text{пост}$ и $E = \text{пост}$, но различных значениях отношений n и y , мощность каждой из дуг не остается постоянной. В этом случае, в зависимости от соотношений между n и y , свариваемое изделие будет получать разное количество тепловой энергии.

Для анализа распределения тепловой энергии между отдельными дугами трехфазной сварочной дуги в различных режимах рассмотрим отношение мощности межэлектродной дуги к мощности двух других дуг (рис. 3):

$$k_1 = \frac{P_{ab}}{2 \cdot P_{bc}} = \frac{P_{ab}}{2 \cdot P_{ca}} = \frac{y}{n} \times \sin \left(\arccos \frac{n}{2} - \arcsin \frac{y}{2} \right). \quad (8)$$

Из анализа выражения (8) и кривых рис. 3 следует, что:

¹ Выражения (4) дают совпадающие результаты с формулами для определения токов в дугах, полученными К. И. Тимофеевым по другой методике расчета [Л. 3].

1) распределение тепловой энергии между отдельными дугами зависит только от отношений токов n и напряжений в дугах y ;

2) с уменьшением отношения токов n доля мощности межэлектродной дуги по сравнению с долей двух других дуг в общем случае увеличивается. При $n < 0,7$ мощность межэлектродной дуги в некоторых режимах сварки может быть больше мощности двух других дуг;

3) при одном и том же отношении токов n мощность межэлектродной дуги изменяется вместе с отношением напряжений y . С ростом отношения y мощность сначала увеличивается, достигает некоторого максимального значения и при дальнейшем увеличении y падает до нуля. Чем меньше отношение токов n , тем в больших пределах можно изменять мощность межэлектродной дуги в процессе сварки за счет варьирования отношения напряжений y . Таким образом, распределение тепловой энергии между отдельными дугами в трехфазной сварочной дуге и, следовательно, глубина проплавления основного свариваемого материала определяются соотношением между n и y .

Из анализа выражения (3) также следует, что при сварке трехфазной дугой, кроме регулируемых режимов, могут иметь место нерегулируемые режимы, когда мощность межэлектродной дуги всегда равна нулю.

Если в процессе сварки выполняется условие

$$n^2 + y^2 = 4, \quad (9)$$

то, как это следует из (4), (6) и (9), всегда

$$I_{ab} = 0; k_1 = 0 \text{ и } P_{ab} = 0.$$

В этих режимах сварки в любой момент времени отсутствует межэлектродная дуга и в общем случае одновременно горят со сдвигом по фазе только две дуги — между деталью и каждым из электродов.

Согласно (8), межэлектродная дуга не горит и в тех случаях, когда $y = 0$. Тогда имеет место сварка двумя однофазными дугами, сов-

падающими по фазе. В нерегулируемых двух-дуговых режимах сварки мощность трехфазной дуги при прочих равных условиях будет наибольшей и равной:

$$P_d = 2E_{bc} I_b = 2E_{ca} I_a = 2EI. \quad (10)$$

На рис. 4 приведены кривые отношения мощности межэлектродной дуги к мощности всей трехфазной дуги в зависимости от y и n :

$$k_2 = \frac{P_{ab}}{P_d} = \frac{y \sin \left(\arccos \frac{n}{2} - \arcsin \frac{y}{2} \right)}{n + y \sin \left(\arccos \frac{n}{2} - \arcsin \frac{y}{2} \right)}. \quad (11)$$

Как обычно, значения n выбирают в пределах 1,0 ... 1,7 и в зависимости от режимов мощность межэлектродной дуги может составлять 0...35% от мощности всей дуги. Наименьшее значение этой мощности (0...9%) имеет место при $n = 1,7$, при получившей распространение на практике сварке по схеме без дросселя в фазе детали. Поэтому при сварке по этой схеме, как установлено опытами [Л. 1], изменение мощности межэлектродной дуги не сказывается на глубине проплавления свариваемого изделия.

Таким образом, кривые рис. 3 и 4 наглядно показывают характер потребления энергии в процессе сварки и позволяют соответствующим выбором отношений n и y устанавливать необходимые сварочные режимы. Возможность управления процессом сварки по глубине проплавления основного металла, соотношением объемов наплавленного и основного проплавленного металла [Л. 1] обеспечиваются в трехфазной сварочной дуге выбором отношений между основными электрическими величинами — абсолютными и относительными значениями токов в электродах и напряжений в дугах.

Зависимость $y = f(n, \gamma)$. Для проектирования специального электрооборудования для сварки трехфазной дугой необходимо знать не только абсолютные значения напряжений в дугах между деталью и электродами и токов в электродах, но и пределы изменения отношений n и y , определяемых заданным диапазоном перераспределения тепловой энергии между отдельными дугами.

Зависимость между n и y имеет исключительно важное значение для проектирования специального электрооборудования с точки зрения технологических требований.

Из векторной диаграммы (рис. 2) нетрудно получить предложенную Д. А. Арзамасцевым формулу:

$$y = \sqrt{4 - n^2} \cos \gamma - n \sin \gamma. \quad (12)$$

Однозначная зависимость между входящими в формулу (12) величинами имеет место только в том случае, если угол γ однозначно определяется n или y .

На рис. 5 пунктирные участки кривых $y = f(n, \gamma)$ рассчитаны по формуле (12), а сплошные линии — опытные. Опытные данные полу-

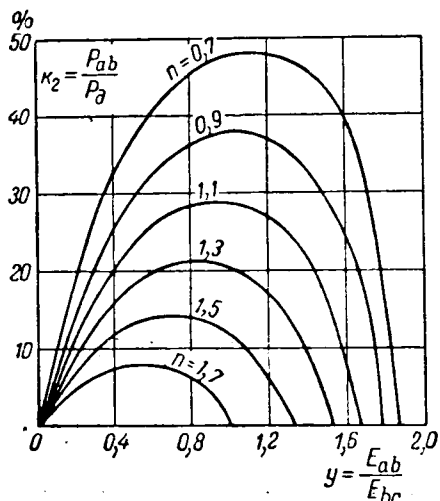


Рис. 4. Кривые зависимости $k_2 = f_2(n, y)$.

чены для ручной трехфазной дуговой сварки при различных схемах питания дуги.

С увеличением отношения токов n (рис. 5) уменьшаются пределы изменения отношения y . Например, при сварке при $n=1,0$ максимальное значение $y_{\max}=1,73$, а при сварке с $n=1,73, y_{\max}=1,0$. В случае $n \geq 1,73$ (схема без дросселя в фазе детали) теоретически и практически невозможно получить $y > 1$, т. е. напряжение в межэлектродной дуге всегда меньше напряжения в дугах между деталью и электродами. При меньших n можно получить значения y как превосходящие, так и меньшие единицы.

В режимах $\gamma=0$, когда ток в электроде совпадает по фазе с напряжением в дуге между этим электродом и деталью, удовлетворяется условие (9). В этом частном случае отношение напряжений y зависит однозначно только от n и геометрического его местом будет окружность.

Как можно было убедиться, при трехфазной сварке осуществимы самые различные соотношения между n и y , что и позволяет управлять процессом перераспределения тепловой энергии в трехфазной сварочной дуге. Многозначность $y=f(n, \gamma)$ открывает большие возможности для проектирования сварочного электрооборудования по заданным условиям технологии сварки.

Полученные основные энергетические соотношения для трехфазной сварочной дуги справедливы как для ручной, так и для автоматической сварки. Положенное в основу расчетов исходное условие (1) — равенство токов в электродах, а также напряжений в дугах между деталью и каждым из электродов — при трехфазной сварке практически всегда соблюдается. В противном случае, при подаче обоих электродов на деталь с одинаковой скоростью, сварка трехфазной дугой окажется невозможной. Это объясняется тем, что при различных токах в электродах и, следовательно, неравных напряжениях в дугах между деталью и каждым электродом произойдет либо короткое замыкание на деталь электрода с меньшим током, либо оборвется дуга между деталью и электродом с увеличенным током. Эти соображения легко проверить опытно.

Как при ручной, так и при автоматической сварке можно получить одни и те же энергетические соотношения. Разница будет заключаться в способах управления процессом сварки и в выборе параметров регулирующих устройств.

Исследование зависимости основных соотношений в трехфазной сварочной дуге от индуктивных сопротивлений регулирующего устройства и напряжений трехфазного сварочного трансформатора с учетом нелинейности, вносимой дуговым разрядом, иначе говоря, исследование вопросов выбора параметров электрооборудования и методов регулирования процессом трехфазной сварки требует специального рассмотрения. Здесь лишь отметим, что при заданных напряжениях сварочного трансформатора и напряжениях в дуге между деталью и электродами величины n , y и γ определяются отно-

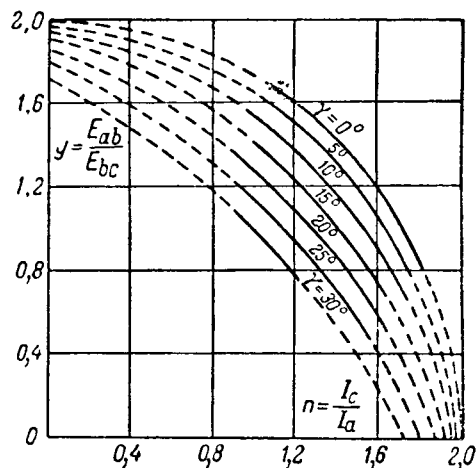


Рис. 5. Кривые зависимости $y = f(n, \gamma)$.

шениями сопротивлений регулирующего устройства. Изменяя отношения сопротивлений регулирующего устройства, можно по различному воздействовать на изменения n , y , γ и тем самым перераспределять тепловую энергию между отдельными дугами. Соответствующим выбором и регулированием абсолютных значений сопротивлений регулирующего устройства легко получить необходимый диапазон изменения токов в электродах.

В частности, при ручной сварке в трехфазной сварочной цепи имеется два ряда независимых друг от друга величин:

1) абсолютные значения сопротивлений регулирующего устройства и напряжения в дугах между деталью и электродами;

2) отношения сопротивлений регулирующего устройства. В соответствии с этим зависимыми величинами являются:

1) абсолютные значения токов и их отношение n ;

2) отношение напряжений в дуге y . Что касается угла γ , то он является функцией n и y , полностью определяясь их значениями.

Изложенные в данной статье принципы были положены в основу проектирования ряда регуляторов для ручной сварки трехфазной дугой, разработанных за последние годы кафедрой электрических машин Уральского политехнического института им. Кирова. Вопросы выбора параметров оборудования и методов регулирования освещены в [Л. 4, 5].

Литература

1. Г. П. Михайлов. Сварка трехфазной дугой. Машгиз, 1952.
2. Л. Р. Нейман и П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, т. II, 1948.
3. К. И. Тимофеев. Режим трехфазной дуги и его поддержание. Автоматическая сварка, № 6, 1953.
4. Н. С. Сиунов. Аппаратура для сварки трехфазной дугой. Автогенное дело, № 8, 1950.
5. Н. С. Сиунов и Д. А. Арзамасцев. Бесконтактные регуляторы для сварки трехфазной дуги. Автогенное дело, № 3, 1953.

Экспериментальное исследование электроприводов одноковшевых экскаваторов

Доктор техн. наук, проф. А. Т. ГОЛОВАН,
кандидаты техн. наук В. И. ЯКОВЛЕВ и Д. Н. ЛИПАТОВ
Московский энергетический институт им. Молотова

Строительство гидроэлектростанций, оросительных и судоходных каналов, а также разработка открытым способом месторождений угля и других ископаемых возможны только на базе широкой механизации и электрификации производственных процессов и особо трудоемких земляных и вскрышных работ. При комплексной механизации этих работ используется многообразная техника, в том числе землеройные машины типа одноковшевых экскаваторов.

Современный экскаватор является мощной землеройной машиной с различным исполнением рабочего оборудования (прямая лопата, драглайн и т. д.). Экскаватор в целом представляет собой сложный комплекс различных механизмов и электрооборудования. Электрификация экскаваторов позволила в значительной степени упростить механическую часть конструкции. Не только основные механизмы, но и ряд вспомогательных механизмов оборудованы индивидуальными электроприводами, в связи с чем безаварийная работа экскаватора и его производительность в значительной степени определяются качеством используемой системы привода и надежностью работы электрооборудования.

В настоящее время нашей промышленностью выпускается большое количество одноковшевых экскаваторов различных типов с емкостью ковша от 0,25 до 20 м³ с различными системами электропривода. Однако до сих пор не существует определенного мнения о наиболее целесообразных системах электропривода для различных типов экскаваторов. Последнее в значительной степени объясняется новизной вопроса, малым опытом эксплуатации электрооборудования экскаваторов и недостаточным количеством проведенных в этой области исследований.

Поставив себе задачу разрешения хотя бы части этих вопросов, кафедра ЭПП МЭИ в период 1949—1954 гг. провела ряд экспериментальных исследований электроприводов экскаваторов средней и большой мощности. Исследованию подвергались экскаваторы, оборудованные тремя системами привода: переменного тока с реостатным управлением, постоянного тока по схеме генератор — двигатель со сложным возбуждением генератора и по той же схеме с электромашинными усилителями. Испытания электроприводов производились в условиях нормальной эксплуатации, на строительстве Волго-Донского судоходного канала и на открытых угольных разработках. Опыт эксплуатации и результаты экспериментального исследования показали, что электроприводы экскаваторов имеют ряд существенных недостатков.

Электропривод экскаваторов на переменном токе с реостатным управлением. Экспериментальное исследование электроприводов переменного тока производилось на экскаваторах ЭШ-1,

ЭШ-4/40 и ЭШ-1У. Испытания экскаваторов ЭШ-1 и ЭШ-4/40 были проведены в 1950 г., а экскаватора ЭШ-1У в 1951 г. в рабочих условиях.

Электроприводы основных механизмов этих экскаваторов оборудованы по схеме со ступенчатым реостатным управлением в цепи ротора и отличаются только мощностью установленных машин и некоторыми модификациями схем управления. Привод механизмов подъема, тяги и хода производится через редуктор от одного асинхронного двигателя с контактными кольцами (280 кВт, 730 об/мин)¹. Связь барабанов подъема и тяги с валом редуктора осуществляется посредством фрикционных муфт, а механизма хода — при помощи кулачковой муфты. Фрикционные муфты механизмов подъема и тяги — неререверсивные, поэтому опускание ковша и травление тягового каната происходят под действием собственного веса ковша; удержание ковша производится посредством механических тормозов. Ограничение момента осуществляется токовыми реле, включенными в цепь ротора двигателя. Привод механизма поворота производится от асинхронного двигателя с контактными кольцами (70 кВт, 980 об/мин). Автоматизация процесса пуска и динамического торможения двигателя построена на принципе времени с контролем ускорения по току, осуществляемым специальным токовым реле, включенным в цепь ротора. В схеме управления электроприводами применена аппаратура постоянного тока. Рис. 1 иллюстрирует работу основных элек-

¹ Параметры двигателей указаны для экскаватора ЭШ-1У.

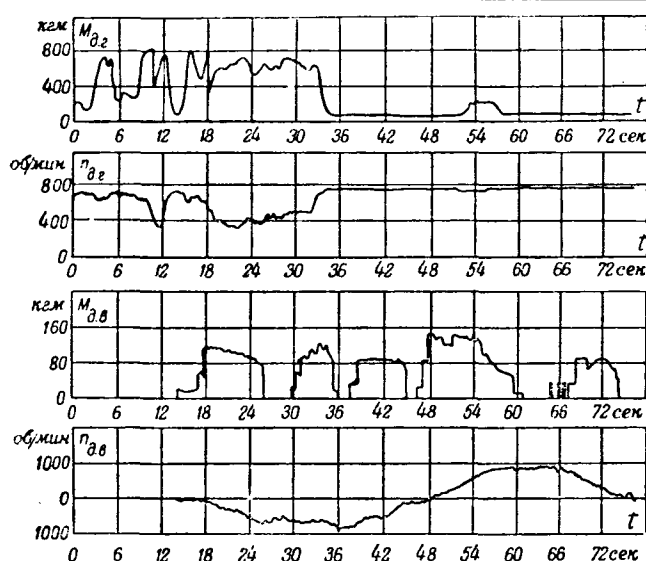


Рис. 1. График нагрузки электроприводов экскаватора ЭШ-1 за рабочий цикл при повороте на выгрузку на 180°.

$M_{д2}$, $n_{д2}$ — момент и скорость главного двигателя; $M_{дв}$, $n_{дв}$ — момент и скорость двигателя поворота.

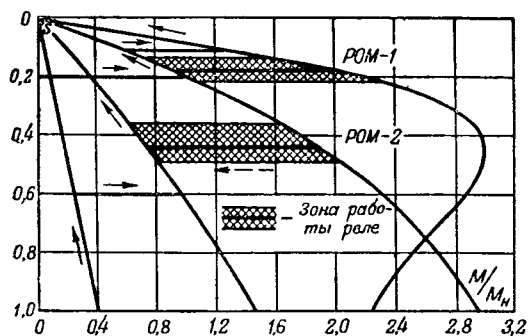


Рис. 2. Экспериментальные механические характеристики главного двигателя экскаватора ЭШ-4/40.

POM-1, POM-2 — реле ограничения момента.

троприводов экскаватора ЭШ-1 за один цикл. Результаты экспериментального исследования показали, что электроприводы на переменном токе не удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к экскаваторным приводам, и имеют ряд существенных недостатков:

1. Механические характеристики двигателя подъема и тяги не имеют экскаваторной формы и в схеме предусмотрена лишь защита от перегрузки. Двигатель нормально работает на основной характеристике с минимальным сопротивлением в роторной цепи. В случае перегрузки срабатывает реле ограничения момента, которое включает следующую ступень сопротивления в цепь ротора. Переход с одной характеристики на другую происходит скачкообразно, что вызывает резкое изменение момента и скорости. Жесткая механическая характеристика, при которой происходят копание и скачкообразный переход на другую характеристику, затрудняет наблюдение за процессом копания. Машинист с трудом ощущает изменение скорости ковша при увеличении нагрузки и не всегда успевает принять своевременные меры для ее уменьшения, что приводит к довольно частому срабатыванию реле ограничения момента и снижению средней скорости копания. На рис. 2 приведены экспериментальные характеристики главного двигателя (привод подъема, тяги и хода) экскаватора ЭШ-4/40 и показана зона работы реле ограничения момента.

На рис. 3 и 4 иллюстрируется работа этого же двигателя в процессе копания. Как видно из этих рисунков, ступенчатое регулирование приводит к резким изменениям момента и скорости двигателя, что связано с потерей темпа работы и в конечном счете со снижением производительности экскаватора.

2. Реле ограничения момента (POM-1 и POM-2) работают нестабильно.

Как видно из рис. 3 и 4, реле ограничения POM-1 в одном случае сработало при моменте двигателя, равном 835 кгм, в другом случае — при моменте 750 кг, причем во втором случае оба реле сработали при одном и том же значении момента. Еще более нестабильная работа этих реле имеет место при значительных колебаниях напря-

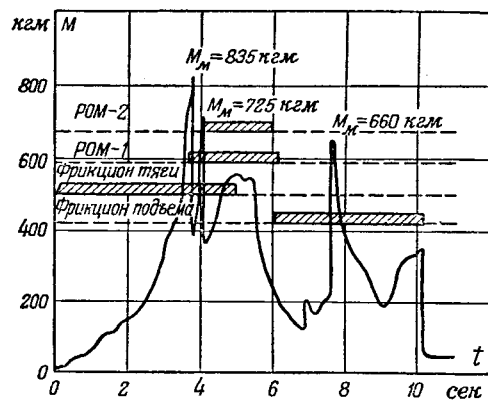


Рис. 3. График нагрузки главного двигателя экскаватора ЭШ-4/40, иллюстрирующий работу реле ограничения момента.

M — момент двигателя; t — время.

жения. В связи с этим моменты, развиваемые двигателем при срабатывании реле, значительно отличаются от допустимых, что приводит к преждевременному износу канатов и отдельных узлов механических передач и потере производительности экскаватора.

3. Фрикционные муфты работают в очень тяжелых условиях. Включение фрикционных муфт происходит при полной скорости двигателя, что вызывает быстрый износ их, а также резкое изменение усилий в механизмах.

4. Двигатель поворота имеет ступенчатый пуск, обуславливающий резкие изменения момента в переходных процессах, вызывающие недопустимые колебания скорости и, как следствие, колебания стрелы, а также раскачку ковша, что иллюстрируется рис. 5. Система привода, создающая такой характер переходных процессов, не может быть признана удовлетворительной.

5. Аппаратура управления и особенно мощные контакторы в главных цепях работают с большой частотой включений и быстро изнашиваются.

Указанные недостатки электрического привода и механического оборудования вызывают быстрый выход из строя отдельных частей экскаватора и частые остановки на ремонт. Со стороны эксплуатационного персонала имеется много нареканий на плохую работу экскаваторов, и не случайно

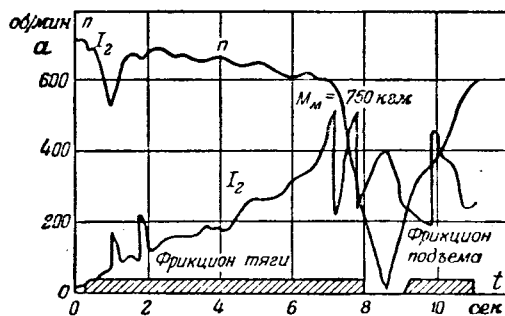


Рис. 4. График нагрузки главного двигателя экскаватора ЭШ-4/40 при копании.

I_2 — ток ротора; n — скорость двигателя; t — время.

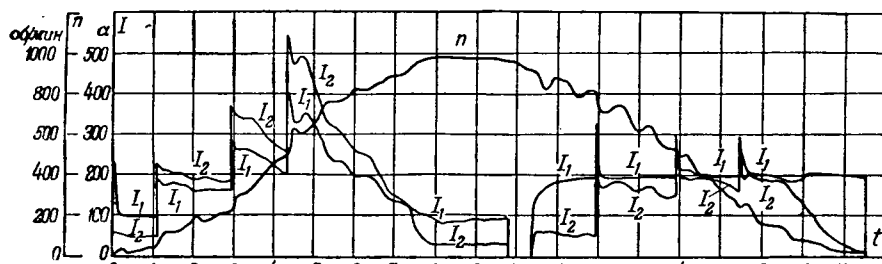


Рис. 5. Осциллограмма пуска и торможения двигателя поворота экскаватора ЭШ-1.

I_1 — ток статора; I_2 — ток ротора; n — скорость двигателя.

экскаваторы долгое время не были приняты государственной комиссией.

Электропривод экскаваторов на постоянном токе по схеме генератор — двигатель со сложным возбуждением генератора. Этой системой привода оборудованы экскаваторы СЭ-3 типа механической лопаты. Испытания экскаваторов производились в 1949 и 1951 гг. в рабочих условиях и имели целью не только исследование электроприводов, но и выявление возможности увеличения производительности экскаватора путем замены ковша емкостью 3 м³ на ковш емкостью 5 м³ без существенного изменения механической конструкции экскаватора.

Экскаватор СЭ-3 имеет три основных электропривода: привод механизма подъема (175 квт, 740 об/мин), привод механизма напора (54 квт, 1110 об/мин) и привод механизма поворота (50 квт, 910 об/мин). В качестве приводных двигателей указанных механизмов применены двигатели постоянного тока с независимым возбуждением с питанием от отдельных генераторов с тремя обмотками возбуждения. Все генераторы и возбудитель объединены в одну группу и приводятся в движение от асинхронного двигателя 250 квт, 6 000 в, 1 480 об/мин. Управление электроприводами осуществляется при помощи командоконтроллеров. Получение экскаваторной характеристики двигателя в этой схеме привода обеспечивается системой возбуждения генератора. Обмотки включены таким образом, что н. с. обмоток независимого возбуждения и самовозбуждения действуют согласно и встречно по отношению к обмотке последовательного возбуждения. В схеме привода подъема предусмотрено ослабление поля двигателя при спуске ковша. Типичный график нагрузки основных приводов экскаватора СЭ-3 приведен на рис. 6. Экспериментальное исследование показало, что электропривод постоянного тока по схеме генератор — двигатель со сложным возбуждением генератора является более совершенным, чем электропривод переменного тока с реостатным управлением, и в большей степени отвечает требованиям, предъявляемым к электроприводам основных механизмов экскаватора. Однако в этой системе привода также имеется ряд недостатков, к которым относятся:

1. Неудовлетворительная форма регулировочных характеристик привода подъема (рис. 7).

Как видно из этого рисунка, основная характеристика двигателя имеет более или менее благоприятную форму, в той или иной степени отвечающую технологическим требованиям. Однако регулировочные характеристики, соответствующие другим положениям командоконтроллера и особенно его нулевому положению, являются неблагоприятными как в отношении регулирования скорости, так и удержания ковша, необходимого при повороте экскаватора.

Следует отметить, что приведенные характеристики получаются при регулировании сопротивления только в цепи обмотки независимого возбуждения, как это предусмотрено схемой управления. Если же производить регулирование сопротивления одновременно в цепях обмоток независимого возбуждения и самовозбуждения, то возможно получение более благоприятных характеристик. На рис. 8 приведено семейство таких характеристик. Аналогичные недостатки, вызван-

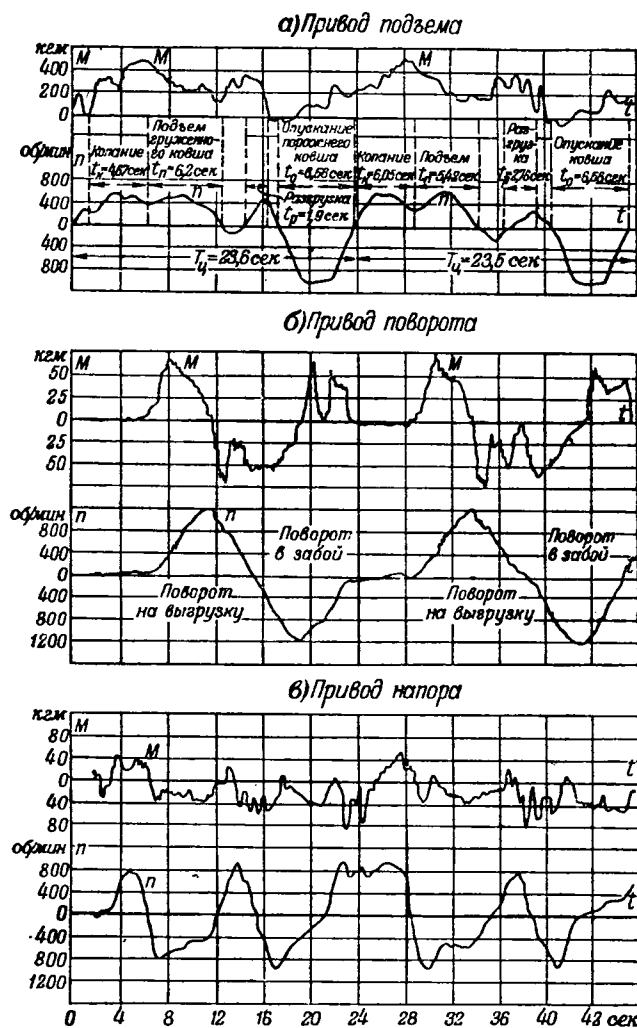


Рис. 6. Осциллограмма рабочих режимов электроприводов экскаватора СЭ-3 с ковшом 5 м³.

M — момент двигателя; n — скорость двигателя.

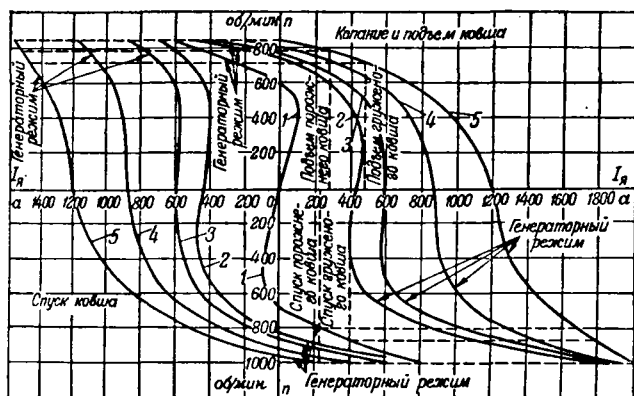


Рис. 7. Универсальные характеристики двигателя подъема экскаватора СЭ-3...5 (регулирование сопротивления независимой обмотки возбуждения).

1— нулевое положение командоконтроллера; 2 — первое положение; 3 — второе положение; 4 — третье положение; 5 — четвертое положение.

ные неудачным подбором параметров обмоток возбуждения, имеют место и в приводах механизмов поворота и напора.

2. Статическая характеристика в этой схеме привода, определяемая установившимися значениями н. с. обмоток возбуждения, является нестабильной. Динамическая характеристика сильно от нее отличается, особенно при резких изменениях момента нагрузки, что подтверждается рис. 9, где приведены статическая характеристика привода подъема экскаватора СЭ-3-5 и зона динамических характеристик при копании. Максимальные расхождения в моментах для одних и тех же скоростей при статическом и динамическом режимах колеблются от $-17,6\%$ до $+22\%$. Максимальное превышение момента в динамическом режиме над стопорным значением доходит до $7,9\%$.

Нестабильность статической характеристики имеет место вследствие изменения температуры обмоток и окружающей среды. Так, например, испытания показали, что изменение температуры обмоток машин вследствие нагревания с $23,9$ до $72,6^\circ\text{C}$ привело к изменению стопорного тока на $11,5\%$. Нестабильность характеристик двигателя неблагоприятно сказывается на работе механизмов, так как стопорные значения моментов соизмеримы с максимально допустимыми, определяемыми прочностью металлоконструкций.

3. Схема включения двигателей поворота, принятая для экскаваторов СЭ-3, является неудач-

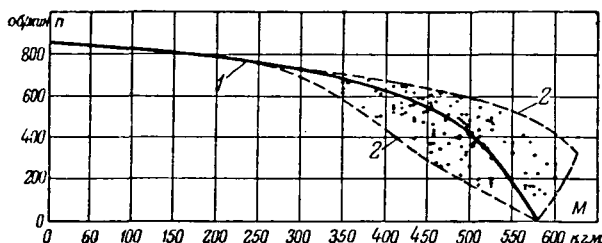


Рис. 9. Статическая характеристика и зона динамических характеристик двигателя подъема экскаватора СЭ-3...5.

1 — статическая характеристика; 2 — зона динамических характеристик.

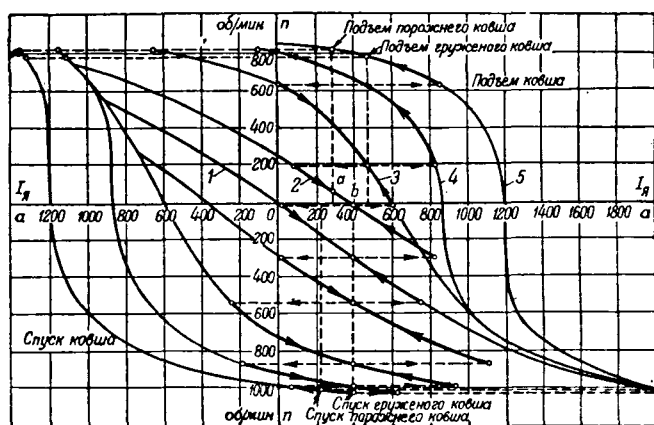


Рис. 8. Расчетные универсальные характеристики двигателя подъема экскаватора СЭ-3...5 (одновременное регулирование сопротивлений обмоток независимого возбуждения и самовозбуждения).

1— нулевое положение командоконтроллера; 2 — первое положение; 3—второе положение; 4 — третье положение; 5 — четвертое положение; а—точка, соответствующая скорости подъема порожнего ковша; $0,058$ м/сек; б — точка, соответствующая скорости опускания груженого конца $0,018$ м/сек.

ной (параллельное присоединение к генератору, каждый двигатель на отдельную пару щеток) по следующим причинам: разное напряжение на щетках генератора, а также некоторое различие в потоках двигателей приводят к неравномерному распределению нагрузок между ними. На рис. 10 приведены осциллограммы тока двигателей при пуске, реверсе и торможении, подтверждающие вышесказанное.

Проведенные испытания и анализ работы этой схемы привода позволяют утверждать, что путем более рационального выбора параметров возбуждения и некоторого изменения схем управления и силовой цепи возможно существенное улучшение работы привода в этой схеме.

Электропривод экскаваторов на постоянном токе по схеме генератор — двигатель с электромашинами усилителями. Этой системой привода оборудованы мощные экскаваторы типа ЭШ-14/65 и ЭШ-10/75, которые снабжены индивидуальными приводами механизмов подъема, тяги и поворота. Каждый механизм приводится во вращение двумя двигателями, обмотки якорей которых соединены:

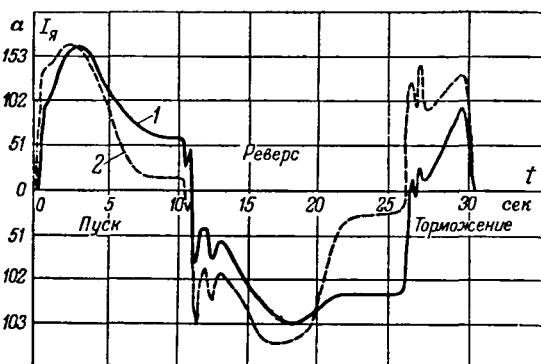


Рис. 10. Осциллограмма токов двигателей поворота экскаватора СЭ-3.

1 — ток якоря "левого" двигателя; 2 — ток якоря "правого" двигателя.

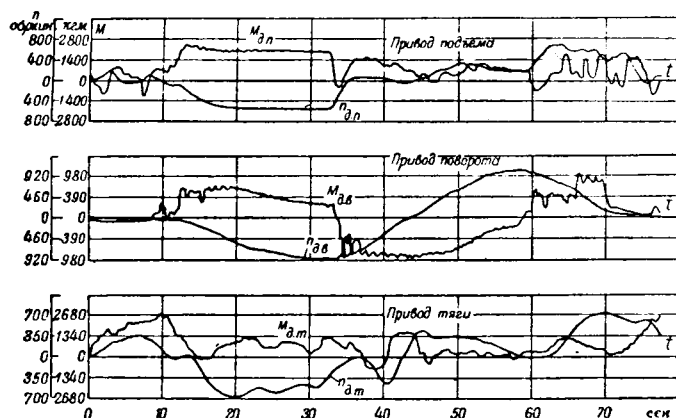


Рис. 11. Графики нагрузки двигателей подъема, тяги и поворота экскаватора ЭШ-10/75 за рабочий цикл.

$M_{дп}, n_{дп}$ — момент и скорость двигателя подъема; $M_{дв}, n_{дв}$ — момент и скорость двигателя поворота; $M_{дт}, n_{дт}$ — момент и скорость двигателя тяги.

последовательно. Номинальная мощность каждого двигателя² подъема и тяги 540 кВт; номинальная скорость 730 об/мин; мощность каждого двигателя поворота 250 кВт, скорость 980 об/мин.

Все три генератора (подъема, тяги и поворота) и два возбуждителя приводятся во вращение от одного синхронного двигателя 1800 кВа, 1000 об/мин. Возбуждение каждого генератора осуществлено от отдельного электромашинного усилителя с поперечным полем с четырьмя обмотками возбуждения. Одна обмотка электромашинного усилителя использована в качестве задающей, другая — токовой, третья — напряжения и четвертая — стабилизирующей. Намагничивающие силы токовой обмотки и обмотки напряжения действуют согласно и направлены против н. с. задающей обмотки. Стабилизирующая обмотка через трансформатор подключена к якорию электромашинного усилителя. Токовые обмотки электромашинного усилителя привода тяги и подъема подключены к силовой цепи через купроксные выпрямители и потенциометры сравнения, что обеспечивает прохождение тока по обмотке только при определенных его значениях (токовая отсечка). Токовая обмотка электромашинного усилителя привода поворота отсечки не имеет. Управление электроприводами экскаватора осуществляется тремя командоаппаратами, имеющими по четыре положения. Электроприводы мощных шагающих экскаваторов ЭШ-14/65 и ЭШ-10/75 значительно сложнее, чем экскаваторов ЭШ-4/40 и СЭ-3, и представляют собой дальнейшее развитие электропривода отечественных экскаваторов. Несмотря на большие достижения в области создания мощных советских шагающих экскаваторов, их электроприводы имеют ряд существенных недостатков:

1. Электропривод не обеспечивает паспортных скоростей работы отдельных механизмов. Производительность экскаватора ЭШ-10/75 меньше проектной на 12...16%.

2. Генераторы тяги, подъема и поворота недо-

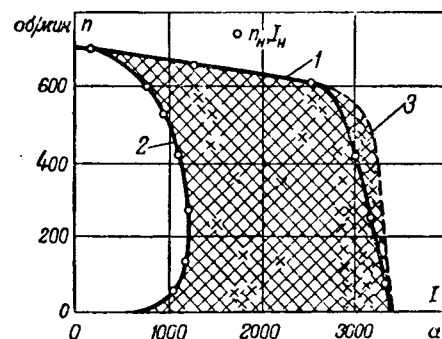


Рис. 12. Статическая и динамические характеристики двигателя тяги экскаватора ЭШ-10/75.

1 — статическая характеристика; 2 — динамическая характеристика; 3 — зона динамических характеристик.

использованы по напряжению, двигатели тяги и подъема по скорости.

3. Значительная продолжительность переходных процессов и неблагоприятный характер их протекания. Например, в течение первых 5 сек пуска и реверса двигателей поворота наблюдаются резкие колебания тока, причем среднее значение тока при реверсе в этот период меньше, чем в последующий период. Для иллюстрации сказанного на рис. 11 приведена осциллограмма рабочих режимов основных приводов экскаватора ЭШ-10/75.

4. Механические характеристики двигателей тяги этого экскаватора имеют неблагоприятную форму: высокая жесткость в области нормальных нагрузок и резкое падение скорости при перегрузках (рис. 12). При такой форме характеристики осложняется управление приводом, так как вследствие незначительного изменения скорости при нормальных нагрузках машинист не в состоянии своевременно определять степень загрузки привода, в результате чего работа привода при копании проходит при низких скоростях, отвечающих крутоспадающей части характеристики. Как показывает опыт эксплуатации и проведенные испытания, характеристика привода тяги должна быть мягкой, без резких изломов при переходе в область больших нагрузок. На рис. 13 показана характеристика привода тяги экскаватора ЭШ-14/65 № 1, которая имеет более благоприятную форму и в большей степени отвечает требованиям, предъявляемым к приводу этого механизма.

5. Так же как и в схеме генератор — двигатель с тремя обмотками возбуждения генератора, в схеме с электромашинным усилителем наблюдается неустойчивость механических характеристик. Статическая характеристика привода тяги экскаватора ЭШ-14/65 № 1 и зона механических характеристик в динамике приведены на рис. 13. Расхождение в моментах для одних и тех же скоростей статического и динамического режимов колеблется от -7,9% до +54%. Максимальное значение момента в динамическом режиме превышает стопорное значение на 16,5%, в то время как в схеме генератор — двигатель с тремя обмот-

² Параметры двигателей указаны для экскаватора ЭШ-10/75.

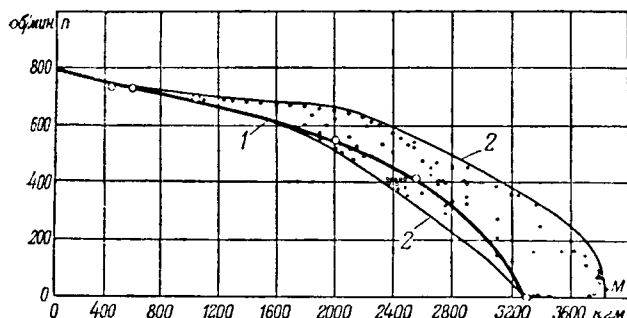


Рис. 13. Статическая характеристика и зона динамических характеристик двигателя тяги экскаватора ЭШ-14/65.

1 — статическая характеристика; 2 — зона динамических характеристик.

ками возбуждения у генератора это превышение составляет всего 7,9%.

6. Нестабильная работа схемы и сложность ее наладки. Как показал опыт эксплуатации экскаваторов ЭШ-14/65 и ЭШ-10/75, значительные колебания величин установившихся скоростей, стопорных токов и моментов, максимальных бросков тока в переходных процессах являются результатом нестабильной работы схемы. Кроме того, большое влияние на настройку схемы оказывают колебание температуры машин аппаратов и среды, состояние коллекторов электромашинного усилителя и возбuditелей, контактов аппаратуры и пр. К числу недостатков этой схемы привода следует также отнести сложность наладки электрооборудования, которая по продолжительности соизмерима с временем монтажа всей установки в целом.

Выводы. Результаты исследования и опыт эксплуатации электроприводов позволяют наметить некоторые пути улучшения электроприводов экскаваторов.

1. Экскаваторы с небольшой емкостью ковшей могут быть оборудованы электроприводами и на переменном и на постоянном токе. Так как двигатели переменного тока значительно дешевле, удобнее и надежнее в эксплуатации, чем двигатели постоянного тока, то необходимо стремиться создать новые системы электроприводов на переменном токе, имеющие бесступенчатое и бесконтакторное управление с надлежащими формами механических характеристик. Эта задача может быть разрешена путем отказа, где это возможно,

от группового привода механизмов подъема и тяги и применения асинхронных двигателей с кольцами, управляемых при помощи дросселей насыщения или асинхронных муфт скольжения.

2. Для приводов экскаваторов с ковшами средней емкости (2—6 м³) представляется целесообразным применение двигателей постоянного тока с питанием от отдельных генераторов с тремя обмотками возбуждения. Испытания дают основание полагать, что эти приводы при устранении отмеченных выше недостатков могут удовлетворить требованиям, предъявляемым к экскаваторным приводам.

3. Существующая схема управления электроприводами мощных шагающих экскаваторов с электромашинными усилителями является несовершенной и ее применение не оправдывается практикой эксплуатации действующих экскаваторов. Неблагоприятный характер протекания переходных процессов, нестабильная работа электроприводов объясняются сложностью схемы и нестабильностью работы электромашинного усилителя в условиях эксплуатации экскаваторов. Тяжелые условия работы электрооборудования экскаваторов, резко отличающиеся от условий работы стационарных установок, требуют создания более простых и надежных схем. Есть основания полагать, что использование в качестве возбудителя генераторов машин постоянного тока нормального исполнения с несколькими обмотками возбуждения позволит решить эту задачу. Поэтому наряду с дальнейшей работой по совершенствованию схем электроприводов с электромашинными усилителями необходимо создать и исследовать схемы с применением нормальных машин постоянного тока с несколькими обмотками возбуждения в качестве возбудителей. Следует отметить, что до настоящего времени научные организации недостаточно уделяли внимания вопросам разработки и исследования сложных электроприводов мощных экскаваторов. Поэтому до сих пор остается нерешенным вопрос о наиболее рациональной форме механических характеристик электроприводов главных механизмов экскаваторов, не разработана методика расчета переходных процессов, а также отсутствует продуманная методика наладки электроприводов.

[29.11.1954]



Выбор числа ступеней сопротивлений для схемы поглощения энергии рекуперации

Кандидат техн. наук Л. В. ИЗВОЛЕНСКИЙ

Москва

Одной из особенностей электрического транспорта является возможность применения рекуперативного торможения. Применение рекуперации намного повышает безопасность движения, увеличивает срок службы тормозного пневматического оборудования и дает существенную экономию как металла, расходуемого на изготовление бандажей и тормозных колодок, так и электрической энергии.

Применение рекуперативного торможения требует наличия потребителей энергии рекуперации. В большинстве случаев такими потребителями являются поезда, находящиеся в тяговом режиме, а при отсутствии их рекупирированная энергия возвращается в первичную сеть или рассеивается в поглощающих сопротивлениях, установленных на тяговой подстанции.

Рассмотрим более подробно функции поглощающих сопротивлений.

Если осуществлять рекуперацию в отсутствие потребителей энергии рекуперации, то напряжение на токоприемнике рекупирирующего электровоза будет повышаться и может превысить максимально допустимое значение, и электровоз потеряет тормозную силу, чему будет сопутствовать срыв торможения.

Автоматическое подключение к шинам подстанции поглощающих сопротивлений, ограничивая повышение напряжения, предотвращает все вредные явления.

Величина поглощающего сопротивления должна быть такой, чтобы ток в цепи, образуемой: тяговыми двигателями электровоза, контактной сетью, шинами подстанции, поглощающим сопротивлением и рельсами, обеспечил необходимый тормозной момент поезду и вместе с тем исключал бы возможность повышения напряжения на токоприемнике сверх допустимого значения.

Оказывается, если выбрать ступень поглощающего сопротивления, исходя из максимального избыточного тока рекуперации, то можно обеспе-

чить электровозу любые токи рекуперации — от нуля до максимального избыточного тока.

Пусть при напряжении U_0 , называемом нами напряжением включения (рис. 1), к шинам подстанции подключается ступень сопротивления R_{1c} . Предположим, что протекающий через двигатель электровоза избыточный ток $I_{\max}$ создает такой тормозной момент, что движение поезда замедляется. Пока напряжение на поглощающем сопротивлении не снизилось до значения напряжения холостого хода подстанции U_x , электровоз будет работать один на поглощающие сопротивления. Но как только напряжение на поглощающем сопротивлении упадет до значения U_x , параллельно с электровозом на ступень поглощающего сопротивления начнут работать ртутные выпрямители, отдавая ток I_p . При дальнейшем снижении напряжения доля тока, которую дает электровоз, будет уменьшаться, и в точке B ток электровоза будет равен нулю. Тогда поглощающие сопротивления будут питаться только от ртутных выпрямителей.

Таким образом, в зоне от напряжения включения U_0 до напряжения холостого хода U_x , когда ртутные выпрямители подстанции заперты высоким напряжением электровоза, электровоз один работает на поглощающие сопротивления. В зоне от напряжения холостого хода U_x до напряжения отключения ступени U_0 электровоз работает параллельно с ртутными выпрямителями на поглощающие сопротивления.

Во второй зоне при работе ртутных выпрямителей и рекупирирующего электровоза на поглощающие сопротивления та доля энергии, которая потребляется от ртутных выпрямителей, представляет собой потери. При малых избыточных токах рекуперации эти потери будут тем больше, чем меньше сопротивление ступени.

Во избежание больших потерь, связанных с потреблением тока от ртутных выпрямителей при малых избыточных токах рекуперации, значение ступеней сопротивления необходимо увеличить. Если принять сопротивление второй ступени $R_{2c} > R_{1c}$, обеспечив в зоне $U_x - U_0$ на ступени R_2 тот же ток электровоза I_s , который он имел бы на ступени R_{1c} , то ток от ртутных выпрямителей снизится ($I'_p < I_p$, рис. 1). Однако при помощи только одного поглощающего сопротивления R_{2c} нельзя будет обеспечить максимальный избыточный ток рекуперации; этого можно будет достичь, только подключив сопротивление R_{1c} .

Следовательно, поглощающее сопротивление должно состоять из нескольких ступеней, включаемых в такой последовательности, что при малых значениях избыточного тока рекуперации включаются первые ступени большего сопротив-

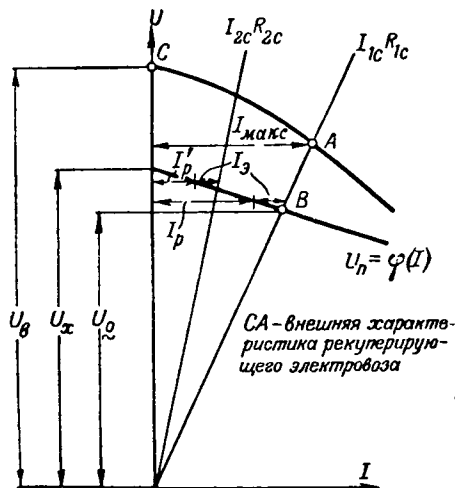


Рис. 1.

тия, выбранные на малые избыточные токи, а при максимальном избыточном токе рекуперации включаются параллельно все ступени сопротивления устройства, от 1-й до n -ной, и общее, суммарное, сопротивление устройства уменьшится.

Если напряжение отключения ступеней принять равным напряжению холостого хода подстанции, то для получения всех значений тока рекуперации от нуля до максимального ступени сопротивления должны строиться таким образом, чтобы максимальный ток предыдущей ступени был равен минимальному току последующей ступени. Если же напряжение отключения ступеней выбрано ниже напряжения холостого хода подстанции, то ступени сопротивления должны строиться таким образом, чтобы минимальный ток последующей ступени был равен максимальному току предыдущей ступени плюс ток от ртутных выпрямителей подстанции, даваемый ими на ступень сопротивления при напряжении отключения.

Выбор напряжения включения и отключения ступеней. Чтобы получить от электроваз возможно большее значение максимального тока рекуперации, следует выбирать напряжение включения устройства $U_{\text{в}}$ как можно меньшим, так как максимально допустимый ток рекуперации электроваза

$$I_{\text{мд}} = \frac{U_{\text{мд}} - U_{\text{в}}}{R_{\text{с}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{в}}$ — максимально допустимое напряжение на токоприемнике электроваза при рекуперации;

$I_{\text{мд}}$ — максимально допустимый ток рекуперации электроваза;

$R_{\text{с}}$ — сопротивление участка тяговой сети от рекуперирующего электроваза до подстанции.

В целях получения максимального тока рекуперации от электроваза можно снизить напряжение включения ступеней до номинального напряжения подстанции. Дальнейшее снижение напряжения нецелесообразно, так как ртутные выпрямители будут работать с перегрузкой.

При выборе такого значения напряжения включения ртутные выпрямители подстанции и рекуперирующий электроваз все время будут работать параллельно на ступень поглощающего сопротивления и в этом режиме будут иметь место потери энергии, обусловленные потреблением тока от выпрямителей.

С другой стороны, во избежание потерь при обратном преобразовании энергии в первичную сеть, а тем более поглощения ее в реостатах, целесообразно всю энергию, выработанную рекуперирующим поездом, потреблять на самой электрифицированной дороге для нужд тяги и с этой точки зрения целесообразно было бы выбирать напряжение включения близким к максимально допустимому. Однако, если $U_{\text{в}}$ выбрать равным $U_{\text{мд}}$, то ни одна ступень, кроме первой, не сможет включиться.

Из выражения (1) видно, что для получения малых избыточных токов рекуперации напряжение включения можно принять близким к максимально допустимому напряжению электроваза, а при больших избыточных токах рекуперации следует это напряжение принять близким к номинальному напряжению $U_{\text{н}}$ подстанции. По этим соображениям желательно для каждой ступени сопротивления выбрать свое значение напряжения включения $U_{\text{в}}$. При определении $U_{\text{в}}$ следует поэтому задаваться конкретной схемой расположения электроваза на участке.

Согласно (1) при одностороннем питании самым неблагоприятным для получения максимального избыточного тока будет случай расположения электроваза в конце участка, на котором возможна рекуперация, а при двустороннем питании — в наиболее удаленной от подстанции точке.

Затем считаем, что при расположении в этих точках электровазов может отдавать любые токи на подстанцию — от нуля до максимума, и поэтому напряжение включения ступеней будет изменяться по закону

$$U_{\text{в}} = U_{\text{мдв}} - I_{\text{рв}} R_{\text{с}}. \quad (2)$$

Электрическая тяга обычно применяется на грузонапряженных линиях. На этих линиях отношение времени работы устройства к общему времени рекуперации, как правило, меньше единицы. Поэтому работа устройства на ступенях, соответствующих большим избыточным токам рекуперации, весьма маловероятна. В основном устройство во время рекуперации энергии будет работать на ступенях, отвечающих малым избыточным токам рекуперации.

Следовательно, нет оснований опасаться больших потерь, обусловленных питанием сопротивлений выпрямителями.

Поэтому желательно на ступенях, отвечающих малым токам рекуперации, принять более высокое возможное напряжение отключения, а на ступенях, отвечающих большим токам рекуперации, меньшее из возможных значений. При таком принципе выбора напряжения отключения число ступеней будет не больше того, которое получается при постоянном значении напряжения отключения, а общие суммарные потери ртутных выпрямителей уменьшатся.

Учитывая изложенное выше, следует напряжение включения выбирать согласно (2), а напряжение отключения — согласно неравенству

$$U_{\text{х}} > U_{\text{о}} > U_{\text{н}}. \quad (3)$$

Чем ниже значения напряжения отключения, тем меньше будет число ступеней, но тем больше будет потери энергии в результате потребления тока от ртутных выпрямителей. Поэтому выбор напряжения отключения, а следовательно, числа ступеней сопротивлений устройства следует производить, руководствуясь экономическими расчетами: для каждого из вариантов числа ступеней следует сопоставить стоимость ступеней и стоимость потерь энергии.

динат и продолжив эту прямую до пересечения с прямой $U_a = f(I)$, получим точку E , которая соответствует напряжению включения третьей ступени U_a''' и максимальному току второй.

Прямая OE дает зависимость тока от напряжения на второй ступени поглощающего сопротивления:

$$U_{2c} = I_{2c} R_{2c}.$$

Для построения третьей ступени сопротивления проводим из точки E линию, параллельную оси U , до ее пересечения с прямой $U_o = \psi(I)$ в точке F . Из точки F проводим прямую FG , расстояние которой от оси I в соответствующем масштабе дает напряжение отключения третьей ступени U_o'' . Абсцисса LK точки пересечения продолжения отрезка FG с характеристикой подстанции дает ток выпрямителей I_p'' при работе их на поглощающее сопротивление третьей ступени при напряжении U_o''' .

Для получения минимального тока третьей ступени откладываем от точки F отрезок LK , соответствующий току I_p'' , получим точку G . Точку G соединяем с началом координат и продолжаем линию до пересечения в точке M с прямой $U_a = f(I)$. Точка M соответствует напряжению включения четвертой ступени U_a'''' и максимальному току третьей. Прямая OM выражает зависимость тока от напряжения на третьей ступени поглощающего сопротивления:

$$U_{3c} = I_{3c} R_{3c}.$$

Точно таким же образом производим построение всех последующих ступеней до тех пор, пока не получим максимального избыточного тока рекуперации

$$I_{n \text{ макс}} = I_{a \text{ макс}} = \frac{U_{md} - U_{an}}{R_c},$$

где U_{an} — напряжение включения n -ной ступени;

$I_{n \text{ макс}}$ — максимальный ток n -ной ступени;

U_{md} — максимально допустимое напряжение на токоприемнике электровоза.

Избыточный ток рекуперации электровоза изменяется согласно ломаной $MG'FEQBAA'$.

Изменяя α — угол наклона линии отключения $U_o = j(I)$, можно варьировать ток, потребляемый от ртутных выпрямителей поглощающим сопротивлением. Сравнение стоимости потерянной энергии со стоимостью ступеней сопротивления позволяет сделать окончательный выбор числа ступеней.

Для уменьшения числа ступеней сопротивлений при тех же значениях тока от ртутных выпрямителей, что и полученных при построении, необходимо иметь внешние характеристики

электровоза на первых ступенях контроллера машиниста.

Из этих характеристик следует выбрать ту, которая имеет наибольшую крутизну (кривая AB' , рис. 2) и построение вести так же, как было изложено.

При построении отрезок CN откладываем уже от точки B' , получаем точку D' , через нее проводим луч OD' до пересечения его с прямой $U_a = f(I)$. Дальнейшее построение производим аналогично изложенному.

При этом у электровоза ток будет изменяться непрерывно, хотя $I_{1 \text{ макс}} \neq I_{2 \text{ макс}}$, так как уменьшение тока будет происходить по внешней характеристике электровоза.

Если напряжения холостого хода тяговых подстанций, на которых располагаются устройства, различны², то выбор и расчет ступеней сопротивлений производятся для каждой из подстанций. Напряжение отключения ступеней, расположенных на подстанциях, напряжение холостого хода которых ниже максимального, должно быть выбрано с учетом уравнительного тока, который при работе устройства будет подтекать от подстанций, имеющих более высокое напряжение.

В том случае, когда при расчете ступеней установок для подстанций с одинаковыми характеристиками токи отключения ступеней, соответствующие напряжениям отключения U_o'' и U_o''' , принимаются для всех установок, расположенных на участке, одинаковыми, то для подстанции, напряжение холостого хода которой ниже, чем для соседней с ней, значение тока следует уменьшить (напряжение отключения следует повысить) на величину уравнительного тока:

$$I_y = \frac{U_{x2} - U_{x1}}{R_c},$$

где I_y — уравнительный ток от подстанции 2 к подстанции 1;

U_{x1} и U_{x2} — напряжение холостого хода соответствующих подстанций;

R_c — сопротивление участка тяговой сети между подстанциями 1 и 2. Ток отключения установки будет $I_{p1} =$

$$= I_p' - I_y \text{ и } I_{p2} = I_p'' - I_y.$$

Иногда напряжение холостого хода одной или нескольких подстанций выше напряжения включения первых ступеней, тогда необходимо принять меры к выравниванию всех характеристик тяговых подстанций.

[10.7.1954]

² Напряжение холостого хода любой из подстанций не должно быть выше напряжения включения ступеней.

Влияние знакопеременных нагрузок на механическую прочность высоковольтного фарфора

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

Введение. В эксплуатации наблюдаются случаи «старения» изоляторов, когда изоляторы из электротехнического фарфора, прошедшие предварительные испытания, внезапно разрушаются. Причины старения электротехнического фарфора в эксплуатационных условиях могут быть различными. В числе основных причин старения назовем следующие:

1) внутренние напряжения, возникающие в фарфоре в процессе охлаждения после обжига по причине неоднородной структуры черепка (внутренние структурные напряжения);

2) внутренние напряжения, возникающие в фарфоровых изделиях в процессе нагревания, вследствие неравномерного распределения температуры по сечению изделия (внутренние температурные напряжения);

3) знакопеременные и вибрационные нагрузки в условиях эксплуатации изоляторов и вводов.

В настоящей работе излагаются результаты изучения знакопеременных и вибрационных нагрузок как возможной причины старения фарфора.

В эксплуатации высоковольтные изоляторы подвергаются воздействию механических нагрузок. В высоковольтных аппаратах и устройствах (разъединители, трансформаторы тока, шинные, опорные изоляторы и т. п.) установок переменного тока фарфор подвержен воздействию статических и знакопеременных изгибающих нагрузок электродинамического характера. Значительные электродинамические усилия получаются при коротких замыканиях. При несимметричных коротких замыканиях — усилия пульсирующие, а при симметричных (трехфазных) — знакопеременные, изменяющиеся с двойной частотой по сравнению с частотой тока. В выключающих аппаратах — разъединителях и выключателях — фарфор подвергается воздействию повторяющихся ударных и знакопеременных затухающих нагрузок. Частота и быстрота затухания механических колебаний зависят от механических свойств материала и массы конструкции. Линейные изоляторы в эксплуатационных условиях подвержены, кроме воздействия статических механических нагрузок, обусловленных собственным весом, натяжением проводов, весом гололеда и т. п., также знакопеременным или повторным механическим усилиям, связанным с явлением вибрации проводов. В результате изменений в линейных изоляторах возникают напряжения «растяжение — сжатие» и в большинстве случаев пульсирующие растягивающие напряжения. Наконец, знакопеременные часто повторяющиеся напряжения возникают в изоляторах при изменениях температуры, так как температурные коэффициенты расширения фарфора и армировочных материалов (цемент, металл), непосредственно связанных в конструкции с фарфором, различны.

Известно, что при воздействии повторных или знакопеременных нагрузок и при вибрации боль-

шинство материалов имеет значительно меньшую прочность по сравнению со случаем постоянной и статической нагрузки. Кроме того, в хрупких материалах в условиях воздействия знакопеременных и повторных нагрузок больше сказываются местные дефекты: состояние поверхности, неоднородность структуры и прочие очаги внутренних напряжений. Чтобы выяснить, не являются ли знакопеременные и вибрационные нагрузки одной из причин старения, нужно знать влияние этих нагрузок на механическую прочность высоковольтного фарфора и эффект ряда технологических факторов и глазурных покрытий на усталостную прочность высоковольтного фарфора.

Методика исследований. Для хрупкого материала, каким является высоковольтный фарфор, наиболее устойчивые результаты дает испытание на изгиб, так как трудноустраняемый перекосящий образец при испытании на растяжение — сжатие вносит неопределенность в результаты испытаний. Поэтому в данной работе из возможных видов деформации был выбран знакопеременный изгиб. При испытаниях был принят симметричный цикл нагружения образцов, что экспериментально сравнительно проще и соответствует более суровым условиям воздействия знакопеременных нагрузок.

Определение влияния знакопеременных симметричных нагрузок и предела усталости производилось в Государственном научно-исследовательском электрокерамическом институте на установке, разработанной Ленинградским электротехническим институтом (рис. 1). Фарфоровый образец 1 с насадкой на свободном конце из магнитного материала жестко закрепляется в станке 2, выполненном в виде тисков специальной формы, приваренных к массивной чугунной плите. Плита, в свою очередь, при помощи болтов крепится к фундаменту. Образец 1 зажимается очень прочно в тиски с прокладкой из прессшпана. Колебания звуковой частоты от генератора 7 по-

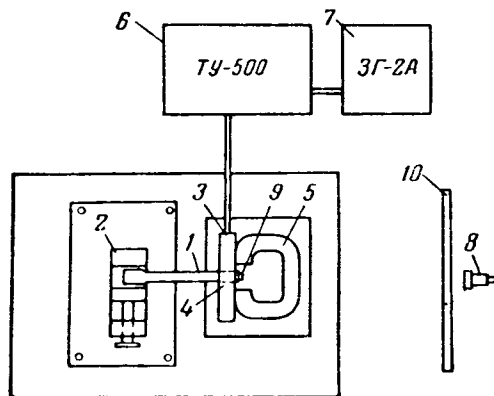


Рис. 1. Схема установки для испытания фарфоровых образцов на знакопеременный симметричный изгиб. 1 — фарфоровый образец; 2 — станок; 3 — катушка возбуждения; 4 — металлический наконечник на образце; 5 — постоянный магнит; 6 — усилитель мощности; 7 — генератор звуковой частоты; 8 — осветительная установка; 9 — зеркало; 10 — шкала.

даются на усилитель мощности 6. Усиленные, колебания поступают на катушку возбуждения 3. Переменное магнитное поле катушки возбуждает вихревые токи в металлическом наконечнике 4, насаженном на образец. Магнитное поле вихревых токов, взаимодействуя с полем постоянного магнита 5, создает поперечные колебания в образце. Кривые колебаний образца по форме и частоте повторяют колебания напряжения звукового генератора. Изменяя частоту генератора, можно найти собственную резонансную частоту системы. Нетрудно видеть, что испытание несобственной частоты дает огромный выигрыш в потребляемой от установки мощности.

Амплитуда колебаний на свободном конце образца измеряется следующим образом: луч от осветительной установки 8 падает на зеркало 9, укрепленное на конце испытуемого образца, и отражается через собирающую линзу в виде очень тонкой линии на шкалу 10. При наличии колебаний на шкале получается освещенная полоса. При помощи предварительной градуировки с точностью 0,05 мм по ширине освещенной полосы определяется амплитуда деформации свободного конца консольной балки (образца). Для определения напряжений в образце при изгибных симметричных колебаниях и известном значении амплитуды на свободном конце балки было использовано уравнение изгибных колебаний.

Для образца прямоугольного сечения

$$\sigma_{\max} = \frac{a\beta^2 E h}{B(\beta l)};$$

$$\sigma_{(x)} = \frac{a\beta^2 E h}{B(\beta l)},$$

где a — амплитуда колебаний образца, мм; $\beta =$

$$= \sqrt{\frac{\mu^2 \omega^2}{EJ}};$$

E — модуль упругости, кг/мм²;

μ — погонная плотность;

J — момент инерции;

ω — круговая собственная частота образца

и

$$B(\beta l) = \sin \beta l - \sin \beta l \cos \beta l.$$

Для определения предела усталости были изготовлены образцы по форме балки прямоугольного сечения. Для исключения влияния давлений, возникающих в зажимах тисков, образцы изготовлялись с головкой большего сечения, чем остальная рабочая часть, но с достаточно плавным переходом. Вид и размеры образцов, подвергавшихся исследованию на знакопеременный симметричный изгиб, приведены на рис. 2.

Окончательная обработка экспериментальных данных и построение кривых усталости были произведены на основе метода математической статистики, пригодного для малого числа статистических данных, разработанного советским ученым Митропольским [Л. 1]. Сущность метода заключается в установлении по экспериментальным данным линейных корреляционных уравнений, связывающих значение $\sigma_{\max}$ и логарифм числа циклов колебаний N образца

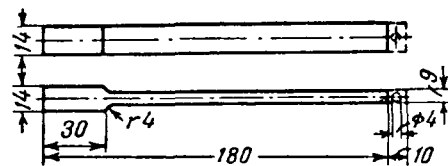


Рис. 2. Вид и размеры образцов для испытания высоковольтного фарфора на знакопеременный симметричный изгиб.

на значительной части нисходящей ветви кривой усталости. По указанным уравнениям и заданному значению N легко вычислялись вероятные средние значения $\sigma_{\max}$. Кроме основных кривых усталости, вычислялись также „границы безопасности“, соответствующие тройной мере индивидуального рассеяния [Л. 1]. Вероятность нахождения экспериментальных точек в этой зоне равна 99,7%. На приводимых здесь кривых (рис. 3... 6) в зоне рассеивания кружками отмечены опыты, закончившиеся разрушением образца, кружками со стрелкой — эксперименты, при которых образец выдержал заранее обусловленное число циклов и не разрушился. Определение предела усталости производилось на 15...25 образцах. Выбор такого сравнительно большого количества образцов был продиктован стремлением получить надежные данные, так как нам не известны данные подобных испытаний фарфора.

При предварительных экспериментах базой для определения предела усталости было принято $20 \cdot 10^6$ циклов переменных напряжений. Однако, как показали дальнейшие испытания, образцы всех серий разрушались уже в пределах $4 \dots 5 \cdot 10^6$ циклов. Поэтому в конечной стадии экспериментов база была принята в $5 \cdot 10^6$ циклов. С целью установления связи между пределом усталости и прочностью на статический изгиб обе величины определялись на одних и тех же образцах. После разрушения образцов при испытании на усталость проверялась их прочность. Испытанию на знакопеременный изгиб подвергались образцы в основном из масс М-1 и М-2. Состав фарфоровых масс (в процентах по весу) приведен в табл. 1. Для выявления всяких механиче-

Таблица 1

Масса	Состав массы, %				
	Пегматит токаревский	Глина ча-сов-ярская	Каолин глуховецкий	Кварц-песок луберецкий	Черепок фарфоровый
М-1	47	17,9	26,3	3,8	5,0
М-2	30	22,0	39,0	9,0	—

ских повреждений образцов и дефектов поверхностных слоев, образовавшихся после обжига, образцы перед испытанием подвергались внешнему осмотру, а некоторые осматривались под микроскопом при увеличении 40.

Предел усталости высоковольтного фарфора.

1. Результаты испытаний на знакопеременный симметричный изгиб фарфоровых образцов из

масс М-1 и М-2, обожженных на заводе и в лаборатории, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Масса	Прочность на статический изгиб, кг/см ²	Предел усталости, кг/см ²	Циклическая долговечность, мегациклы	Снижение прочности при знакопеременном воздействии нагрузки, %	Температура обжига, °С
М-1	785	485	1,5	38,2	1 280 (на заводе)
М-1	720	445	1,5	38,1	1 280 (в лаборатории)
М-2	835	510	1,5	38,9	1 300 (в лаборатории)

Типичная кривая усталости фарфоровых образцов из массы М-1 приведена на рис. 3. Из таблицы и рисунка следует, что фарфоровые образцы при длительном воздействии знакопеременных симметричных изгибающих усилий показывают закономерное снижение прочности $\sigma_{\max}$ до определенного предела по мере увеличения числа циклов N , после чего прочность остается постоянной. Число циклов, соответствующее пределу усталости, или *циклическая долговечность*, для обоих исследованных масс имеет одно и то же значение, примерно равное $1,5 \cdot 10^6$ циклов симметричных колебаний. Как статическая прочность на изгиб, так и предел усталости у образцов из массы М-2 больше соответственно на 17 и 15%, чем у образцов из массы М-1.

Сравнивая результаты испытаний на усталость образцов из одной и той же массы М-1, обожженных на заводе и в лаборатории при одной и той же конечной температуре 1 280°С, видим, что при равенстве их циклической долговечности предел усталости образцов, обожженных на заводе с более длительной выдержкой при конечной температуре, больше на 10%, чем у образцов, обожженных при меньшей выдержке в лабора-

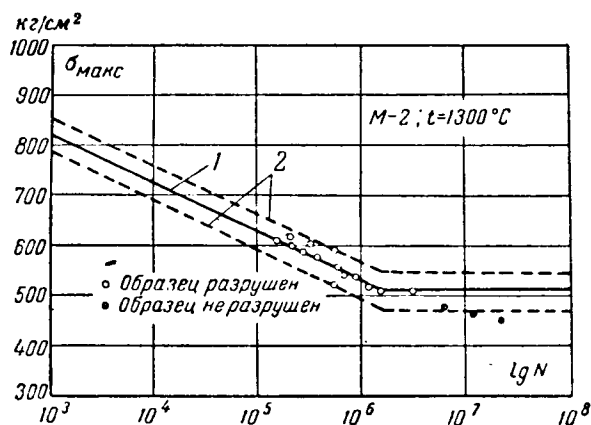


Рис. 3.

1 — кривая усталости образцов из массы М-2; 2 — границы индивидуального рассеяния.

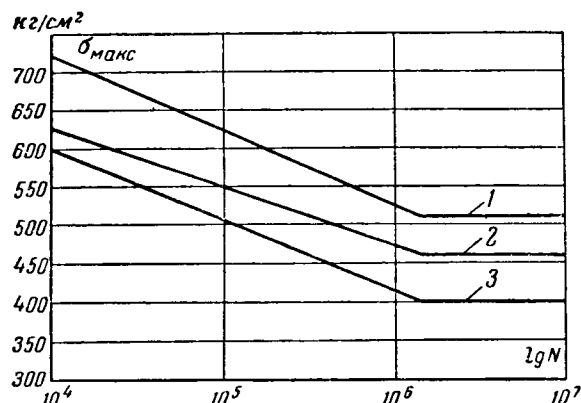


Рис. 4. Кривые усталости образцов из массы М-2 при различной температуре обжига.
1 — конечная температура обжига 1 300°С; 2 — 1 350°С и 3 — 1 380°С.

торной печи. Вся кривая усталости у заводских образцов лежит выше кривой усталости лабораторных образцов. Это различие, очевидно, обусловлено разной длительностью воздействия высоких температур в процессе обжига. В лабораторных образцах, вследствие сравнительно малой длительности выдержки при конечной температуре, структура черепка развита недостаточно, что и обусловило сравнительно низкую прочность фарфорового черепка. Это также подтверждается исследованием микроструктуры. При анализе было обнаружено, что для микроструктуры черепка из массы М-1, обожженного в лабораторной печи, характерна несколько меньшая степень муллитизации основной массы и неравномерное распределение муллита в основной массе. Советские ученые А. М. Соколов и Н. М. Червинский [Л. 3, 4] указывали, что муллит, являясь основным кристаллическим скелетом черепка, безусловно, повышает механическую прочность фарфора. Однако имеет значение не только общее количество муллита в массе, но также характер его распределения и кристаллизации. Результаты наших экспериментов полностью согласуются с положением, выдвинутым А. М. Соколовым и Н. М. Червинским.

2. Влияние конечной температуры обжига на усталостные характеристики высоковольтного фарфора было исследовано на фарфоровой массе М-2. Все образцы из массы М-2 для испытания на усталость обжигались в одной и той же пламенной печи при конечных температурах 1 300, 1 350 и 1 380°С. Результаты испытаний приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3

Температура обжига	Прочность на статический изгиб, кг/см ²	Предел усталости, кг/см ²	Циклическая долговечность, мегациклы	Снижение предела прочности при пожаре, %	Снижение прочности при знакопеременном воздействии нагрузки, %
1 300	835	510	1,5	—	38,9
1 350	820	460	1,5	9,6	43,2
1 380	740	400	1,5	21,5	46,0

Из табл. 3 видно, что конечная температура обжига сильно влияет на предел усталости и что пережженный черепок снижает свою прочность больше при воздействии знакопеременных симметричных нагрузок, чем при статических воздействиях.

Независимость циклической долговечности образцов от конечной температуры обжига (табл. 2 ... 4), вероятно, объясняется тем, что эти малые изменения температуры обжига (1300 ... 1380°С) не сказываются на состоянии поверхности образцов, а, как известно, циклическая долговечность в первую очередь определяется состоянием поверхности.

3. Для определения влияния глазурных покрытий на усталостные характеристики образцы из массы М-1, покрытые белой глазурью Г-1, коричневой глазурью Г-2 и белой глазурью Г-3, обожженные на заводе при конечной температуре 1260°С, были испытаны на знакопеременный симметричный изгиб. Результаты испытаний приведены в табл. 4 и на рис. 5.

Таблица 4

Вид глазури	Предел усталости, кг/см ²	Циклическая долговечность, мегациклы	Статическая прочность на изгиб, кг/см ²	Влияние вида глазури на изменение предела усталости при глазуровании, %	Влияние вида глазури на изменение статической прочности при глазуровании, %
Неглазурированный	485	1,5	785	—	—
Г-1	455	2,6	727	—6,18	—7,0
Г-2	400	4,0	665	—17,5	—15,3
Г-3	610	5,0	953	+25,1	+12,3

Как видно из табл. 4, циклическая долговечность для образцов, покрытых глазурями, заметно превышает циклическую долговечность черепка из той же массы. Однако с увеличением максимальной циклической долговечности предел усталости образцов, покрытых глазурями Г-1 и Г-2,

снижается соответственно на 6,18 и 17,5% и только у образцов, покрытых глазурью Г-3, он возрастает на 25,1%. Как видно из рис. 5, не только предел усталости, но полностью кривые для глазурей Г-1 и Г-2 лежат ниже, а для глазури Г-3 выше, чем для неглазурированных образцов.

Повышение циклической долговечности при глазуровании, повидимому, объясняется тем, что покрытие глазурью улучшает состояние поверхности образцов, ликвидируя те поверхностные неровности (особенно имеющие острые конфигурации), которые являются наиболее вероятными очагами и зародышами усталостных трещин.

В керамической технологии глазурные покрытия играют ту же роль, что в металлах обработка поверхности, создающая наклеп и систему остаточных напряжений в поверхностном слое. Однако в металлах при помощи разных обработок создаются главным образом остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое, что влечет за собой всегда существенное увеличение предела усталости и особенно долговечности. В нашем случае глазури Г-1 и Г-2, с одной стороны, улучшают состояние поверхности, увеличивая циклическую долговечность, а с другой стороны, они создают в поверхностном слое систему внутренних напряжений растяжения и уменьшают предел усталости. Факт возникновения в поверхностном слое образцов внутренних напряжений растяжений при использовании глазурей Г-1 и Г-2 подтверждается экспериментально при определении модуля упругости и статической прочности на изгиб и измерении напряжения в слое глазури — черепок. Только глазурь Г-3 вызывает повышение предела усталости. Глазурь Г-3 увеличивает также модуль упругости и статическую прочность на изгиб соответственно на 5 и 21,5%. Это послужило основанием для предположения, что глазурь Г-3 создает в поверхностном слое глазури — черепок напряжения сжатия, что и подтверждалось при измерении напряжений в слое глазури — черепок.

4. Нашими экспериментами было установлено, что некоторые образцы разрушались под воздействием знакопеременных симметричных нагрузок при значительно меньших напряжениях, чем предел усталости, найденный при испытаниях нормальных образцов. Из факторов, снижающих прочность образцов, наиболее заметные влияния оказывали те, которые создавали местные концентрации напряжений в поверхностном слое образцов, как то: трещины, царапины, сколы на ребрах образцов, поры и включения в поверхностном слое и т. п.

Наглядной иллюстрацией роли местных напряжений на циклическую прочность высоковольтного фарфора являются результаты испытания образцов с выточками глубиной 0,5 мм на одну сторону у места закрепления образцов. Предел усталости образцов оказался (рис. 6) 246 кг/см², таким образом, вследствие концентрации напряжений, обусловленной выточкой, предел усталости понизился на 44,5% по сравнению с пределом усталости гладких образцов из той же массы, обожженных в той же печи и одновременно.

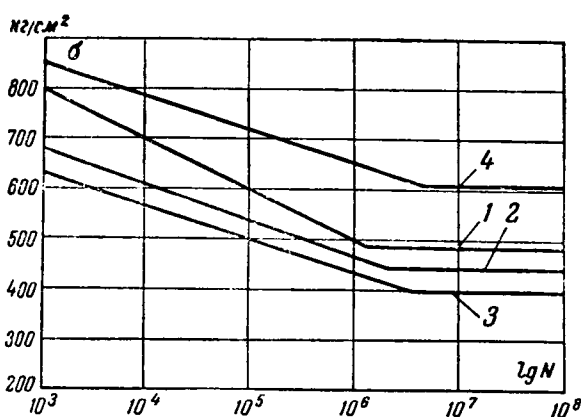


Рис. 5. Влияние вида глазурного покрытия на усталостную кривую образцов из массы М-1.

1 — без глазури; 2 — глазурь Г-1; 3 — глазурь Г-2; 4 — глазурь Г-3

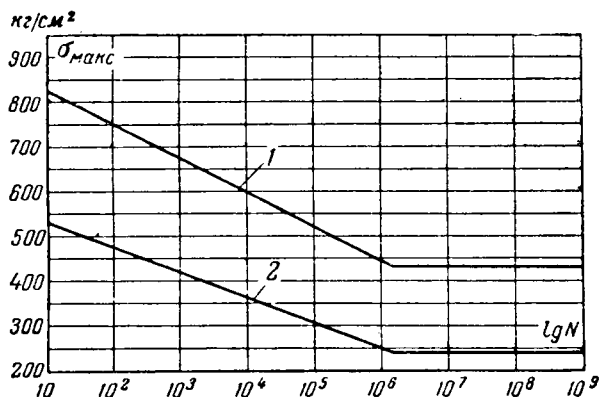


Рис. 6. Сравнение кривых усталости гладких образцов (1) и образцов с выточкой (2).

5. Опытные данные позволили найти закономерную связь между пределом усталости и прочностью на статический изгиб. Для установления такой связи были использованы все результаты испытаний на усталость и на статический изгиб. Эмпирическая формула, устанавливающая зависимость между усталостной прочностью и прочностью на статический изгиб, полученная по методу Митропольского, имеет вид:

$$\sigma_y = 0,7\sigma_{ст} - 74 \text{ [кг/см}^2\text{]}.$$

Коэффициент корреляции этой формулы довольно высок, что указывает на наличие функциональной связи между пределом усталости и прочностью на статический изгиб высоковольтного фарфора.

6. Все испытания на усталость производились при симметричных знакопеременных нагрузках. Симметричный цикл нагрузки образцов является наиболее распространенным при лабораторных испытаниях, и большинство приводимых в справочниках характеристик усталостной прочности получено именно при симметричных циклах, однако в эксплуатации предпочитают асимметричные циклы. Всякий асимметричный цикл можно рассматривать как результат наложения двух видов нагрузки: постоянной и переменной, изменяющейся по симметричному циклу. Наиболее удобно оценивать поведение материала при асимметричных циклах путем построения так называемых полных диаграмм усталости. Для их построения нужно знать значения прочностей при симметричных циклах нагрузок, при статическом воздействии и несколько точек, соответствующих прочностям асимметричных циклов.

На рис. 7 приведена полная диаграмма усталости высоковольтного фарфора при наличии растягивающих постоянных напряжений. Диаграмма построена по двум точкам — по прочности при симметричном цикле и статической прочности и может служить для количественных расчетов.

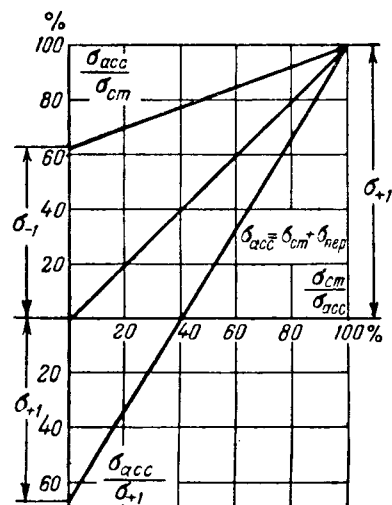


Рис. 7. Полная диаграмма усталости высоковольтного фарфора.

Однако из диаграммы следует, что при правильных оценках возникающих усилий, выборе коэффициента запаса и при отсутствии пережога фарфора и местных дефектов, вызывающих значительные концентрации напряжений, влияние переменных или вибрационных нагрузок, которым подвергаются конструкции в эксплуатационных условиях, на процесс старения фарфора не значительно.

При наличии в условиях эксплуатации значительных знакопеременных усилий для более правильной оценки влияния усталости на старение высоковольтного фарфора требуется тщательное и систематическое изучение как характера, так и численного изменения эксплуатационных переменных нагрузок.

Основные обозначения

- $\sigma_{\max}$ — максимальное изгибающее напряжение на закрепленном конце балки при знакопеременном изгибе;
- $\sigma_{\min}$ — минимальное изгибающее напряжение на закрепленном конце балки, возникающее при знакопеременном изгибе $\sigma_{\min} = -\sigma_{\max}$ (симметричные колебания);
- N — число циклов колебаний до разрушения образца;
- σ_{-1} ; σ_y — предел усталости;
- σ_{+1} ; $\sigma_{ст}$ — прочность на статический изгиб.

Литература

1. А. К. Митропольский. Труды Лесотехнической академии им. Кирова № 48, 1937, а также № 60, 1947.
2. И. В. Ананьев. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. ОГИЗ, 1946.
3. А. М. Соколов. Стекло и керамика, № 5—6, 1932.
4. Н. М. Червинский. Керамический сборник, № 13, 1941.

[23. 10. 1954]



Влияние тяговых подстанций на работу энергосистем

Кандидат техн. наук М. Д. ТРЕЙВАС и инж. В. Б. ЛАПИН

Всесоюзный научно-исследовательский институт Министерства путей сообщения

На электрифицированном участке одной из магистральных железных дорог Советского Союза имелось семь тяговых подстанций с тремя-четырьмя ртутными выпрямителями на каждой. Выпрямители были присоединены к шестифазным трансформаторам со стандартной схемой соединения обмоток: звезда — две обратных звезды с разделяющей катушкой. Тяговые подстанции питались от тэц через понизительные трансформаторы 115/11 кВ мощностью по 7,5 и 10 мвта сначала по одной линии электропередачи 110 кВ, а затем, для повышения надежности их питания, была построена вторая линия электропередачи 110 кВ. Предполагалось, что тяговые подстанции будут присоединены к обеим линиям электропередачи в шахматном порядке. С энергосистемой тэц была связана линией электропередачи 35 кВ. Схема питания тяговых подстанций изображена на рис. 1.

После первого включения без нагрузки второй линии электропередачи к шинам 110 кВ тэц в работающем генераторе были обнаружены ненормальный шум и повышенный нагрев его отдельных элементов (особенно торцевых щитов статора и крепящих их болтов). Эти явления резко снижались при работе одного генератора и одной линии электропередачи или при работе двух генераторов и двух линий электропередачи при ограниченной тяговой нагрузке.

Исследования, проведенные бригадой ЦНИЭЛ МЭС, показали, что указанные явления имели место вследствие наличия в токе статора генератора высших гармоник, в частности пятой гармоники, величина которой превосходила 20% номинального тока генератора. Появление высших гармоник было обусловлено тем, что генераторы тэц питали тяговые подстанции с ртутными выпрямителями, работавшими по шестифазной схеме выпрямления при весьма малой промышленной нагрузке. Как известно, при этой схеме выпрямители потребляют несинусоидальный ток. Повышенная величина гармоник вызывалась наличием условий резонанса отдельных гармоник в силу неблагоприятного соотношения между параметрами линии электропередачи 110 кВ и мощностью генераторов.

Известно, что форма кривой первичного тока m -фазного преобразователя, определяемая в основном мгновенным значением анодного тока, даже при нагрузке близка к прямоугольной (рис. 2). Кривую такой формы можно представить как синусоиду основной частоты с наложенными на нее высшими гармониками. Величина этих гармоник обратно пропорциональна их порядку n , который в свою очередь пропорционален числу фаз преобразователя m и может быть выражен следующим образом:

$$n = km \pm 1.$$

Следовательно, при $m = 6$ выпрямитель вызывает появление в первичном токе пятой, седьмой, одиннадцатой, тринадцатой и т. д. гармоник. При $m = 12$ пятая и седьмая гармоники отсутствуют.

Если два параллельно работающих преобразовательных трансформатора имеют различные схемы соединения первичных обмоток (например, обмотка одного из них соединена в звезду, а другого — в треугольник), то подведенные к ним напряжения будут сдвинуты между собой на 30° . В этом случае пятые и седьмые гармоники первичного тока этих агрегатов взаимно компенсируют друг друга и в сети остаются одиннадцатая, тринадцатая, двадцать третья и т. д. гармоники, т. е. те гармоники, которые имеют место при двенадцатифазной схеме выпрямления. Таким образом, рекомендацию ЦНИЭЛ МЭС о переводе ртутно-выпрямительных агрегатов на двенадцатифазную схему следует признать правильной, тем более, что это мероприятие предусмотрено заводом Уралэлектроаппарат и Правилами устройства электротехнических установок [Л. 1].

Так как в настоящее время наша электропромышленность не изготавливает двенадцатифазных трансформаторов, было решено для обеспечения нормальной работы генераторов применить основную двенадцатифазную схему выпрямления путем установки тяговых трансформаторов с различными схемами соединения их первичных обмоток. Эту схему можно осуществить двояко: 1) подстанции, на которых установлены трансформаторы со схемой соединения первичных обмоток звездой чередуются с подстанциями, на которых установлены трансформаторы со схемой соединения первичных обмоток треугольником; 2) трансформаторы с разными схемами соединения первичных обмоток устанавливаются на каждой тяговой подстанции.

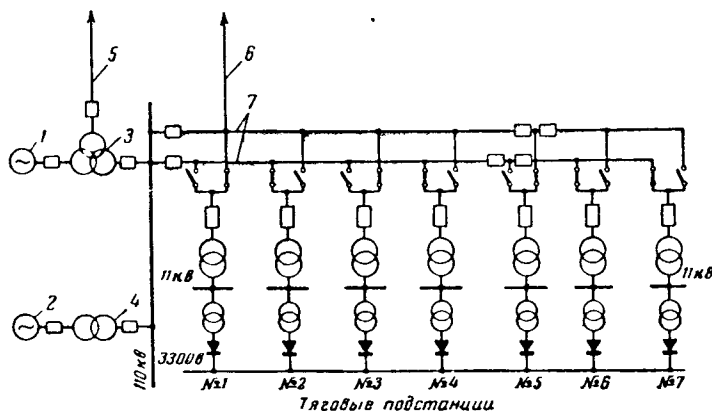


Рис. 1. Схема питания тяговых подстанций в начальный период эксплуатации участка электротяги.

1 и 2 — генераторы тэц мощностью 50 тыс. кВт каждый, напряжением 11 кВ; 3 — трансформатор 115/35/10,5 кВ; 4 — трансформатор 121/10,5 кВ; 5 — линия электропередачи 35 кВ, связывающая тэц с энергосистемой; 6 — линия протяженностью 20 км; 7 — линии электропередачи 110 кВ.

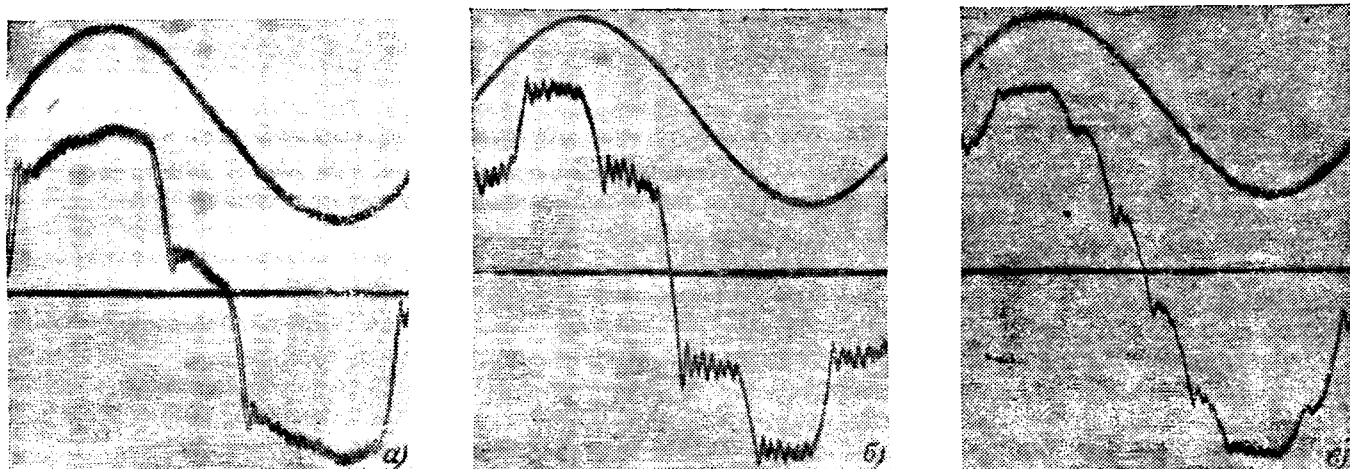


Рис. 2. Осциллограммы тока линии электропередачи, от которой питаются тяговые подстанции.
а — первичные обмотки преобразовательных трансформаторов соединены в звезду; б — первичные обмотки преобразовательных трансформаторов соединены в треугольник; в — при условной двенадцатифазной схеме.

Во втором случае между агрегатами на стороне постоянного тока будет протекать уравнительный ток, обусловленный разностью мгновенных значений выпрямленных напряжений отдельных агрегатов, связанной с тем, что эти напряжения сдвинуты между собой на 30° . Для ограничения этого тока потребовалась бы установка катодных реакторов, параметры которых точно еще не определены и которые промышленностью не изготавливаются. Следовательно, первый путь является единственным практически возможным для осуществления условной двенадцатифазной схемы.

С целью проверки эффективности работы условной двенадцатифазной схемы в условиях эксплуатации были произведены измерения и осциллографирование токов и напряжений на линии 35 кВ, питавшей две тяговые подстанции, на одной из которых первичные обмотки преобразовательных трансформаторов были соединены в звезду, а на другой — в треугольник. Когда по указанной линии электропередачи питалась только первая подстанция, форма кривой первичного тока линии имела вид, изображенный на рис. 2,а, а когда по ней питалась только одна вторая подстанция, форма кривой имела вид, изображенный на рис. 2,б. При одновременном же питании

по линии обеих тяговых подстанций форма кривой первичного тока была такой, какая характерна для двенадцатифазной схемы (рис. 2,в).

Однако в последнем случае пятая и седьмая гармоники тока полностью компенсировались только при равномерном распределении нагрузок между обеими тяговыми подстанциями. Во всех других случаях распределения нагрузок значения этих гармоник снижались до некоторой величины, зависящей от соотношения нагрузок подстанций. Эта зависимость изображена на рис. 3; она имеет U-образный характер.

Результаты проверки эффективности условной двенадцатифазной схемы были признаны достаточно удовлетворительными, и эта схема была рекомендована для осуществления на упомянутой железнодорожной магистрали.

В настоящее время электрифицированный участок рассматриваемой магистрали увеличился и питается от двух источников (от тэц и грэс) через 15 тяговых подстанций с 45 ртутно-выпрямительными агрегатами. Когда первичные обмотки преобразовательных трансформаторов всех этих агрегатов были соединены только в звезду, сумма высших гармоник в токе генераторов грэс составляла значительную величину — 23,0% их номинального тока. После того как на трех подстанциях вместо трансформаторов с соединением первичных обмоток в звезду были установлены трансформаторы, первичные обмотки которых соединены в треугольник, следовало ожидать снижения величины высших гармоник. Для проверки этого, а также с целью выявления влияния присоединенной к шинам грэс ненагруженной линии электропередачи 110 кВ длиной 156 км, которая вместе с реактантами системы представляла как бы фильтр высших гармоник, были проведены четыре опыта.

При первом опыте осуществлялось нормальное питание от параллельно работающих тэц и грэс по двум линиям электропередачи всех тяговых подстанций; ненагруженная линия была включена. При втором опыте осуществлялось тоже нор-

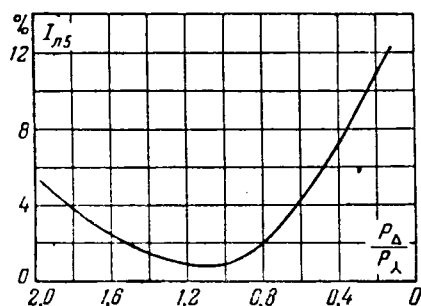
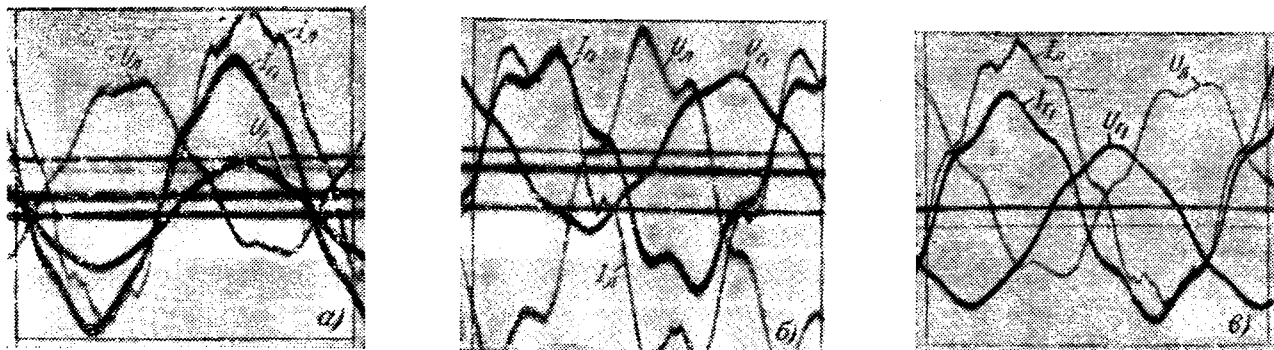


Рис. 3. Зависимость пятой гармоники тока линии электропередачи, питающей две смежные тяговые подстанции, от соотношения нагрузок подстанций. Первичные обмотки преобразовательных трансформаторов на одной подстанции соединены в звезду, а на другой — в треугольник.



мальное питание всех тяговых подстанций, но при отключенной ненагруженной линии. При третьем опыте осуществлялось питание от параллельно работающих тэц и грэс по двум линиям только тех тяговых подстанций, первичные обмотки преобразовательных трансформаторов которых соединены в звезду, при включенной ненагруженной линии. При четвертом опыте осуществлялось питание тех же подстанций, но при отключенной ненагруженной линии. При проведении каждого опыта осциллографировались токи и напряжения на тэц и грэс. Осциллограммы, снятые во время этих опытов на грэс, приведены на рис. 4.

Анализ осциллограмм показал, что при первом опыте величина высших гармоник в токе генератора грэс составила в среднем около 5,5%, при втором — почти 16%, при третьем — 11% и при четвертом — 23%. Эти данные свидетельствуют о том, что введение условной двенадцатифазной схемы только на части электрифицированного участка уже дает снижение величины высших гармоник в среднем на 6,0%. Они также указывают на значительное влияние, которое оказывает на величину высших гармоник ненагруженная линия. Действительно, при первом и третьем опытах, когда ненагруженная линия была включена, величина гармоник оказалась на 11...12% ниже, чем при втором и четвертом, когда она была отключена.

Однако включение на шины станции ненагруженной линии электропередачи нельзя рассматривать как постоянное мероприятие. При переводе на электротягу следующего участка магистрали к этой линии будут подсоединены новые тяговые подстанции по условной двенадцатифазной схеме, и существующая минимальная величина высших гармоник, равная 5,5%, должна будет возрасти.

Таким образом, при тяговой нагрузке, составляющей значительный процент общей нагрузки энергосистемы, перевод тяговых подстанций на работу по условной двенадцатифазной схеме следует считать мероприятием, вполне оправдавшим себя.

На рассматриваемой железнодорожной магистрали нет ответвления грузопотока и пунктов значительной погрузки или выгрузки, что обеспечивает сравнительно одинаковый и равномерный график нагрузки тяговых подстанций при

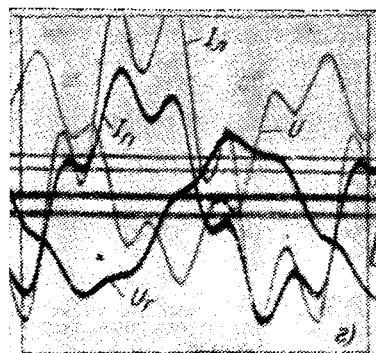


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения в генераторе грэс и линии электропередачи 110 кВ, снятые:

а — при первом опыте; б — при втором опыте; в — при третьем опыте; г — при четвертом опыте.

имеющемуся весьма интенсивном движении поездов в обоих направлениях. Это обстоятельство в свою очередь создает благоприятные условия для применения на этих подстанциях условной двенадцатифазной схемы с целью обеспечения нормальной работы генераторов энергосистемы, питающих тяговую нагрузку.

Высшие гармоники в кривой первичного напряжения влияют не только на работу генераторов энергосистемы, но и на величину гармоник выпрямленного напряжения и его постоянную составляющую.

Известно, что выпрямленное напряжение многофазного выпрямителя может быть представлено прямолинейным напряжением $U_{\text{пр}}$, на которое наложены пульсации переменного напряжения различной амплитуды и частоты. При чисто синусоидальном напряжении, приложенном к первичной обмотке преобразовательного трансформатора, и холостом ходе ртутно-выпрямительного агрегата эффективные значения первых четырех гармоник в выпрямленном напряжении соответственно равны: 4,04; 0,99; 0,44; 0,24%. Фактор мешающего напряжения, характеризующий эквивалентное мешающее напряжение, равен при этом 1,56.

Значение дополнительной гармоники в кривой выпрямленного напряжения зависит от величины соответствующей гармоники в кривой

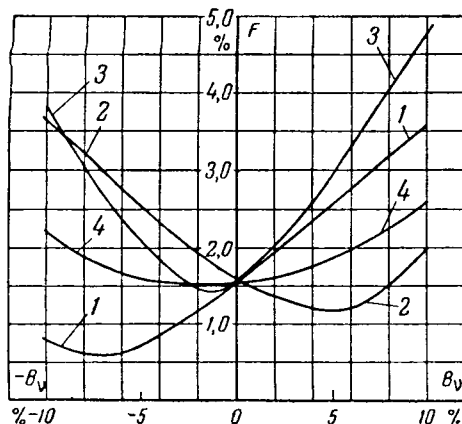


Рис. 5. Зависимость изменения величины фактора мешающего напряжения шестифазного выпрямителя от значений пятой (1), седьмой (2), одиннадцатой (3) и тринадцатой (4) гармоник в первичном напряжении.

первичного напряжения B_v , % и может быть определено по следующей формуле [Л. 2]:

$$U'_{d(n)} = \frac{\sqrt{2} \cdot B_v \cdot v}{n^2 - v^2},$$

где B_v — величина гармоники в кривой первичного напряжения, %;

v — порядок гармоники в первичном напряжении;

n — порядок гармоники в выпрямленном напряжении.

Так как гармоники кривой выпрямленного напряжения могут иметь любую начальную фазу, то, рассматривая формы кривых для двух пограничных значений начальной фазы, получим, что на подсчитанную по этой формуле величину увеличатся или уменьшатся значения гармоник выпрямленного напряжения, приведенные выше.

Если, таким образом, вычислить дополнительные гармоники для значений B_v от 0 до $\pm 10\%$ и для $v=5, 7, 11$ и 13 и определить новые гармоники выпрямленного напряжения с учетом дополнительных, то получим новые значения эквивалентного мешающего напряжения и фактора мешающего напряжения. Зависимость величины последнего от B_v для пятой, седьмой, одиннадцатой и тринадцатой гармоник представлена на рис. 5.

По мере того как выпрямитель берет на себя нагрузку и кривая выпрямленного напряжения искажается за счет одновременного горения анодов в течение угла перекрытия γ , пульсации выпрямленного напряжения растут, даже при синусоидальном первичном напряжении. Следовательно, растет и фактор мешающего напряжения; его значение при номинальной нагрузке, равной $500 a$, в 2 раза больше значения при холостом ходе. Очевидно, и при несинусоидальной кривой первичного напряжения следует ожидать по мере роста нагрузки выпрямителя увеличения гармоник и фактора мешающего напряжения против значений, приведенных на рис. 5. Это бу-

дет означать, что существующее на тяговых подстанциях типовое сглаживающее устройство не обеспечит той величины фактора мешающего напряжения на шинах подстанции, которая нормирована правилами защиты линий связи от мешающего действия выпрямленного тока.

Изложенное достаточно хорошо подтверждается осциллограммами, приведенными на рис. 6, снятыми на действующей подстанции, которая питается от системы с искаженным первичным напряжением.

Величина высших гармоник в кривой первичного напряжения (рис. 6, а) равна $10,35\%$, из них $9,85\%$ падает на пятую гармонику. В то же время в кривых пульсаций выпрямленного напряжения (рис. 6, б) имеются высшие гармоники такой величины, что значение фактора мешающего напряжения до реактора, равное $4,74\%$, в 1,8 раза больше значения, которое должно быть при чисто синусоидальном первичном напряжении. В силу этого коэффициент сглаживания $K=19,5$ не обеспечивает получения после реактора нормированной величины ($0,15$) фактора мешающего напряжения, действительная величина которого равна $0,244$.

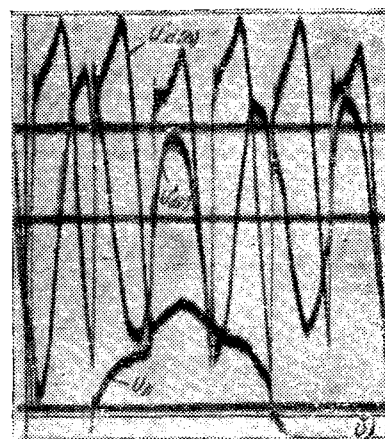
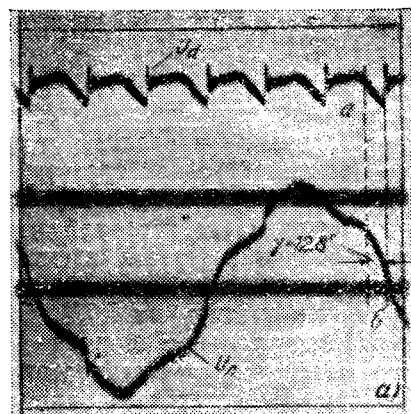


Рис. 6. Осциллограммы напряжений, снятые на тяговой подстанции, питающейся от системы с искаженным напряжением.

а — линейное напряжение системы (U_A) и выпрямленное напряжение (U_d); б — пульсации выпрямленного напряжения до реактора ($U_d(n)$) и после реактора ($U_d(r)$).

Таким образом, еще раз подтверждается необходимость применения условной двенадцатифазной схемы при искаженном высшими гармониками первичном напряжении. Однако эта схема должна применяться на всем электрифицированном участке, а не на части его. При этом безусловно желательно иметь равномерную загрузку каждой пары тяговых подстанций, на которых она осуществляется.

Выводы. 1. Снижение величины высших гармоник в токе генераторов, питающих ртутные выпрямители, вплоть до полного их уничтожения может быть достигнуто путем увеличения числа фаз выпрямления или создания эквивалентного этому режима.

2. Снижение величин высших гармоник необходимо не только для обеспечения нормальной работы генераторов электростанций, но и для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения и создания нормальных условий для работы имеющихся на тяговых подстанциях сглаживающих устройств и тем самым предотвращения увеличения мешающих влияний на устройства связи.

3. Двенадцатифазная схема выпрямления может быть осуществлена путем применения двенадцатифазных преобразовательных трансформаторов или путем работы ртутно-выпрямительных агрегатов по условной двенадцатифазной схеме.

До того как промышленность начнет выпускать двенадцатифазные преобразовательные трансформаторы, наиболее простым и практически возможным способом является условная двенадцатифазная схема, при которой подстанции с преобразовательными трансформаторами, первичные обмотки которых соединены в звезду, че-

редуются с подстанциями, первичные обмотки преобразовательных трансформаторов которых соединены в треугольник. Уже сейчас целесообразно спроектировать и изготовить образец выпрямительного агрегата с двенадцатикратной периодичностью с целью всестороннего испытания его и решения вопроса о применении агрегатов такого типа.

4. Другие методы снижения высших гармоник, как применение генераторов специальной конструкции или сглаживающих устройств на стороне переменного тока тяговых подстанций в виде емкостей или фильтров для определенных частот, нецелесообразны, так как требуют значительных затрат и времени для своего осуществления.

5. Изменение мощности генераторов, питающих тяговые подстанции, изменение параметров линий электропередачи и увеличение промышленной нагрузки может привести к снижению величин высших гармоник без применения двенадцатифазных схем.

6. Необходимо установить нормальный процент высших гармоник в токе статора гидро- и турбогенераторов, питающих ртутно-выпрямительную нагрузку. Для этого научно-исследовательские организации Министерства электростанций должны провести соответствующие испытания.

Литература

1. Правила устройств электротехнических установок издание второе. Госэнергоиздат, 1950.

2. Б. М. Шляпошников. Игнитронные выпрямители для тяговых подстанций железных дорог. Трансжелдориздат, 1947.

[20.10.1954]



О высших гармониках в энергосистеме, питающей ртутные выпрямители

Кандидат техн. наук Б. Г. ОРКИНА

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

В статье М. Д. Трейваса и В. Б. Лапина¹ описан случай резкого искажения формы кривой напряжения сети с шестифазной ртутно-выпрямительной нагрузкой, составляющей 10...15% мощности энергосистемы. При этом в обмотках генераторов, ближайших по схеме к ртутно-выпрямительным подстанциям, и в цепях некоторых потребителей, отделенных от подстанции двумя или тремя ступенями трансформации, наблюдались пятая и седьмая гармоники тока недопустимой величины.

В настоящей статье излагается приближенная методика расчета гармоник, при помощи которой был произведен количественный анализ явления

и разработаны мероприятия для уменьшения гармоник до допустимой величины. Экспериментальная проверка, произведенная ЦНИЭЛ МЭС, подтвердила правильность методики и мероприятий, а также показала возможность расчета пятой и седьмой гармоник тока в генераторах с точностью до 10...15% их величины, полученной путем измерения. Такая точность вполне достаточна для практических целей. Предлагаемая методика полезна в тех случаях, когда необходимо расчетным путем определить возможность увеличения мощности или изменения схемы питания ртутно-выпрямительных установок.

При расчетах ртутные выпрямители условно рассматриваются как источники высших гармоник с постоянной э. д. с. [Л. 1 и 2], а генера-

¹ См. стр. 37 настоящего номера.

торы, трансформаторы, приемники электроэнергии и линии электропередачи — как реактивные сопротивления. Высшие гармоники в любой точке энергосистемы определяются применением законов Ома и Кирхгофа к каждой гармонике в отдельности.

Расчет высших гармоник при наличии в энергосистеме одной ртутно-выпрямительной подстанции. При наличии в энергосистеме одной ртутно-выпрямительной подстанции, т. е. одного источника высших гармоник, гармоника тока порядка ν на входе ртутно-выпрямительной подстанции (на стороне переменного тока)

$$I_{p\nu} = \frac{E_\nu}{\sqrt{r^2 + (\sum x_{\nu})^2}}, \quad (1)$$

где E_ν — э. д. с. источника высших гармоник порядка ν , в;

r — эквивалентное активное сопротивление ртутно-выпрямительной подстанции, приведенное к напряжению питающей сети;

$\sum x_\nu$ — результирующее реактивное сопротивление схемы замещения для гармоник порядка ν .

Электродвижущая сила источника высших гармоник порядка ν

$$E_\nu = c_\nu \frac{U \cdot 1000}{\sqrt{3}},$$

где U — первая гармоника междофазного напряжения питающей сети у ртутно-выпрямительной подстанции, кВ;

c_ν — коэффициент пропорциональности для гармоник порядка ν , имеющий следующие значения:

Порядок гармоники	5	7	11	13
Значения коэффициента c_ν	0,225	0,145	0,09	0,06

Сопротивление r введено в формулу (1) для учета зависимости $I_{p\nu}$ от нагрузки ртутно-выпрямительной подстанции. Учитывая, что $\cos \varphi$ последней близок к единице, можно принять:

$$r = \frac{U^2}{P}, \quad (2)$$

где P — нагрузка ртутно-выпрямительной подстанции, тыс. кВт.

При подсчетах $\sum x_\nu$ индуктивное сопротивление трансформаторов, асинхронных двигателей и реакторов можно принять:

$$x_\nu = \nu x_k, \quad (3)$$

где x_k — соответствующее сопротивление короткого замыкания для первой гармоники.

Индуктивное сопротивление неавтополусной синхронной машины [Л. 3 и 4]

$$x_{2\nu} = 0,9 \nu x_2, \quad (4)$$

а автополусной

$$x_{2\nu} = 0,7 \nu x_2, \quad (4a)$$

где x_2 — реактивное сопротивление обратной последовательности.

Входное сопротивление ненагруженной линии электропередачи без потерь

$$x_{\text{вх}} = -z_c \operatorname{ctg} \alpha l, \quad (5)$$

где z_c — характеристическое сопротивление линии, ом;

l — длина линии, км;

$\alpha_\nu = \frac{2\pi}{\lambda_\nu}$; $\lambda_\nu = \frac{6000}{\nu}$ — длина волны гармоники порядка ν .

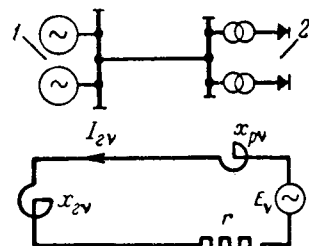
Сопротивления линий, по которым питаются промышленные или сельскохозяйственные районы, высшим гармоникам подсчитать по отдельным элементам весьма сложно, так как трудно учесть все включенные трансформаторы, двигатели и другие потребители. Для ориентировочных расчетов могут быть использованы средние данные, приведенные в табл. 1 и являю-

Таблица 1

Напряжение сети в точке измерения	34 кВ	6 кВ
% осветительной и печной нагрузки	35...43	0...50
Пределы изменения z_3/z_0 . .	1,3...2,0	0,7...1,3
Среднее значение	1,6	0,9
Пределы изменения z_7/z_0 . .	2,0...2,5	1,3...1,5
Среднее значение	2,4	1,4

щиеся результатом измерений, произведенных ЦНИЭЛ на линиях 35 кВ длиной до 50 км и линиях 6 кВ длиной до 5 км. Измерения произведены у потребителей с односторонним питанием электроэнергией, не имеющих собственных генераторов э. д. с. первой и высших гармоник. Значения сопротивлений в табл. 1 даны в долях кажущегося сопротивления для действующего значения тока промышленной частоты z_0 . При наличии у потребителей источников высших гармоник или при двустороннем питании их электроэнергией данными, приведенными

Рис. 1. Схема питания ртутно-выпрямительной подстанции непосредственно от шин генераторного напряжения изолированной электростанции и схема замещения



1 — электростанция; 2 — ртутно-выпрямительная подстанция.

в табл. 1, пользоваться нельзя (в последнем случае z_0 зависит от распределения нагрузки между электростанциями).

Для практических расчетов высших гармоник в любой точке энергосистемы составляется схема замещения с учетом реактивных сопротивлений всех цепей, связанных с источниками высших гармоник. Потерями в линиях и активными сопротивлениями генераторов и трансформаторов, которые малы по сравнению с эквивалентным активным сопротивлением ртутно-выпрямительной подстанции, можно пренебречь.

Рассмотрим метод расчета и максимальные величины высших гармоник в генераторах изолированной станции для трех простейших схем питания ртутно-выпрямительной подстанции.

1-я схема. Ртутно-выпрямительная подстанция питается от шин электростанции при отсутствии в системе емкости (рис. 1). Когда от шин электростанции питается только одна ртутно-выпрямительная подстанция, суммарная гармоника тока в генераторах I_{zv} равна гармонике тока на входе ртутно-выпрямительной подстанции и определяется по формуле (1). В этом случае

$$\Sigma x_v = x_{zv} + x_{pv},$$

где x_{zv} — индуктивное сопротивление параллельно включенных генераторов гармонике порядка v ;
 x_{pv} — индуктивное сопротивление параллельно включенных трансформаторов ртутно-выпрямительной подстанции гармонике порядка v .

Гармоника I_{zv} распределяется между генераторами обратно пропорционально их реактивным сопротивлениям обратной последовательности.

При питании на генераторном напряжении больших ртутно-выпрямительных нагрузок сумма Σx_v невелика, и высшие гармоники в генераторах значительно больше их допустимой величины. Значения гармоник тока генераторов в процентах номинального тока при питании шестифазных ртутных выпрямителей на генераторном напряжении и отсутствии других потребителей или ненагруженных линий электропередачи даны в табл. 2. При питании ртутно-выпрямительной подстанции через одну ступень трансформации или более сумма Σx_v увеличивается и гармоники тока в генераторах

Таблица 2

Ртутно-выпрямительная нагрузка в % номинальной мощности генератора	Порядок гармоники v				$\sqrt{\Sigma I_v^2}$
	5	7	11	13	
100	17,5	9,5	4,5	2,6	20,6
50	9,7	5,6	2,9	1,7	11,7
25	5,0	3,0	1,6	1,0	6,1

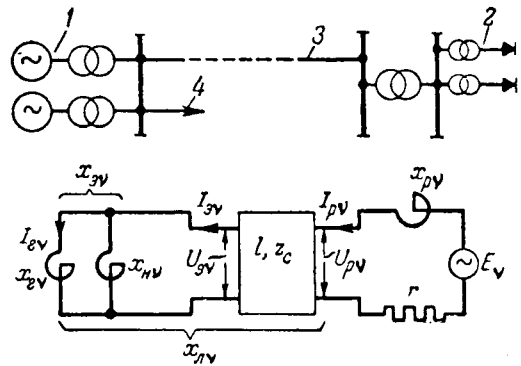


Рис. 2. Схема питания ртутно-выпрямительной подстанции от конца высоковольтной линии электропередачи и схема замещения.
1 — изолированная электростанция; 2 — ртутно-выпрямительная подстанция; 3 — линия электропередачи; 4 — нагрузка без ртутных выпрямителей.

несколько уменьшаются. При включении на шины станции, кроме ртутно-выпрямительной подстанции, двигательной или осветительной нагрузки, гармоники частично ответвляются в цепи этих потребителей и величина высших гармоник в токе генераторов уменьшается.

2-я схема. Ртутно-выпрямительная подстанция питается от конца высоковольтной линии электропередачи (рис. 2). Когда на ртутно-выпрямительной подстанции и вдоль линии передачи нет промышленной нагрузки, гармоника напряжения U_{zv} на шинах электростанции определяется из следующего выражения:

$$\dot{U}_{zv} = \dot{U}_{pv} \cos \alpha_v l - j I_{pv} z_c \sin \alpha_v l, \tag{6}$$

где

$$\dot{U}_{pv} = j I_{pv} x_{zv}, \tag{7}$$

x_{zv} — входное сопротивление линии электропередачи, включающее в себя индуктивное сопротивление генераторов и нагрузки на шинах станции x_{zv} , гармонике тока порядка v .

Для определения x_{zv} и дальнейших преобразований удобно сопротивление x_{zv} заменить фиктивной ненагруженной линией, приписав ей то характеристическое сопротивление, какое имеет линия, от которой питается ртутно-выпрямительная подстанция, и выбрав длину фиктивной линии l_0 так, чтобы было выполнено условие

$$x_{zv} = -z_c \operatorname{ctg} \alpha_v l_0. \tag{8}$$

Тогда

$$x_{zv} = -z_c \operatorname{ctg} \alpha_v (l + l_0). \tag{9}$$

Из выражения (9) видно, что влияние индуктивности x_{zv} можно учесть путем увеличения длины линии на величину l_0 .

Решив систему уравнений (1), (6), (7), (8) и (9), находим коэффициент затухания гармоники напряжения в линии

$$\frac{U_{zv}}{U_{pv}} = \frac{\cos \alpha_v l_0}{\cos \alpha_v (l + l_0)} \tag{10}$$

Таблица 3

Критические длины линии электропередачи 110 кВ и максимальные гармоники тока генераторов при работе по схеме рис. 2

Мощность генераторов, тыс. кВт	ν	Двухцепная линия				Одноцепная линия			
		100% ртутно-выпрямительной нагрузки		30% ртутно-выпрямительной и 70% прочей нагрузки		100% ртутно-выпрямительной нагрузки		30% ртутно-выпрямительной и 70% прочей нагрузки	
		$l_{кр}, км$	$\frac{I_{2ν}}{I_{2ном}}, \%$	$l_{кр}, км$	$\frac{I_{2ν}}{I_{2ном}}, \%$	$l_{кр}, км$	$\frac{I_{2ν}}{I_{2ном}}, \%$	$l_{кр}, км$	$\frac{I_{2ν}}{I_{2ном}}, \%$
25	5	90	21,3	99,3	20,9	178	18,8	169	15,4
	7	54,8	10,7	55	10,2	107	10,2	100	8,8
50	5	178	18,8	169	15,3	228	12,8	244	9,8
	7	107	10,2	100	8,8	200	9,4	159	6,3
100	5	228	12,8	244	9,8	При любой длине	$\leq 10\%$ $\leq 6\%$	При любой длине	$\leq 8\%$ $\leq 5\%$
	7	200	9,4	159	6,3				

и коэффициент усиления гармоники тока в линии

$$\frac{I_{ав}}{I_{рв}} = \frac{\sin \alpha_{\nu} l_{\nu}}{\sin \alpha_{\nu} (l + l_{\nu})}. \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что коэффициент усиления гармоники тока в линии зависит не от параметров и нагрузки ртутно-выпрямительной подстанции, а от соотношения между индуктивным сопротивлением $x_{ав}$ станции и параметрами линии и от порядка гармоники.

При заданных параметрах генераторов, трансформаторов, ртутно-выпрямительной подстанции и других нагрузок гармоника напряжения $U_{ав}$, а следовательно, и гармоника тока в генераторах максимальны при некоторой критической длине линии $l_{кр}$. Условия максимума и $l_{кр}$ определяются путем совместного решения и дифференцирования уравнений (1), (6) и (9) по длине линии l . В результате

$$l_{кр} = \frac{\operatorname{arctg} \operatorname{sh} \psi}{2\alpha_{\nu}} - l_{\nu} + \frac{k\lambda_{\nu}}{2}; \quad (12)$$

$$U_{ав макс} = \frac{E_{\nu} \cos l_{\nu}}{\sqrt{1 - \frac{x_{рв}}{z_c} l^{-\psi}}}, \quad (13)$$

где

$$\operatorname{sh} \psi = \frac{\left(\frac{r}{z_c}\right)^2 + \left(\frac{x_{рв}}{z_c}\right)^2 - 1}{2 \frac{x_{рв}}{z_c}};$$

k — целое число ($k > 0$).

В табл. 3 представлены подсчитанные² по

² При подсчете данных, приведенных в таблицах и на рисунках, параметры оборудования ртутно-выпрямительных подстанций и линий электропередачи приняты такими же, как в примере расчета. Количество включенного оборудования выбрано так, чтобы ртутно-выпрямительные агрегаты были загружены на 75%, а понижающие трансформаторы — на 50%. Для генераторов принято $x_2 = 10,8\%$, для повысительных трансформаторов — $u_k 10,5\%$.

формулам (12) и (13) критические длины линий для пятой и седьмой гармоник при $k=0$ (т. е. при $l_{кр} < \frac{\lambda_{\nu}}{2}$) и соответствующие им максимальные гармоники тока в генераторах. Как видно из таблицы, величина гармоник при $l = l_{кр}$ зависит в основном от соотношения между мощностью включенных генераторов и числом параллельных линий электропередачи, которыми ртутно-выпрямительная подстанция соединена с электростанцией. При мощности станции, меньшей 100 тыс. кВт, большие гармоники в генераторах могут возникнуть при двухцепной и при одноцепной линии электропередачи. При мощности станции, равной или большей 100 тыс. кВт, при питании ртутно-выпрямительной подстанции по одной линии гармоники в генераторах при любых нагрузках меньше 10% $I_{ном}$. Такие же гармоники будут иметь место при двухцепной линии при мощности электростанции 200 тыс. кВт и выше.

При отклонении длины линии от $l_{кр}$ гармоники тока в генераторе уменьшаются. Характер их изменения при неизменной ртутно-выпрямительной нагрузке показан на рис. 3. При $\frac{\lambda_{\nu}}{4} < l < \frac{\lambda_{\nu}}{2}$ гармоники, при прочих равных условиях, меньше, чем при $l=0$, т. е. при отсутствии емкости. При $l > \frac{\lambda_{\nu}}{2}$ кривая $I_{\nu} = f(l)$ повторяется с периодичностью $\frac{\lambda_{\nu}}{2}$.

При $l = l_{кр}$ для данных условий увеличение ртутно-выпрямительной нагрузки мало влияет на изменение величины гармоник в генераторах; снижение ртутно-выпрямительной нагрузки вызывает резкое уменьшение гармоник.

Значительное изменение промышленной нагрузки на шинах электростанции вызывает изменение $x_{ав}$ и соответственно $l_{кр}$. Поэтому, если при определенной величине $x_{ав}$ длина линии

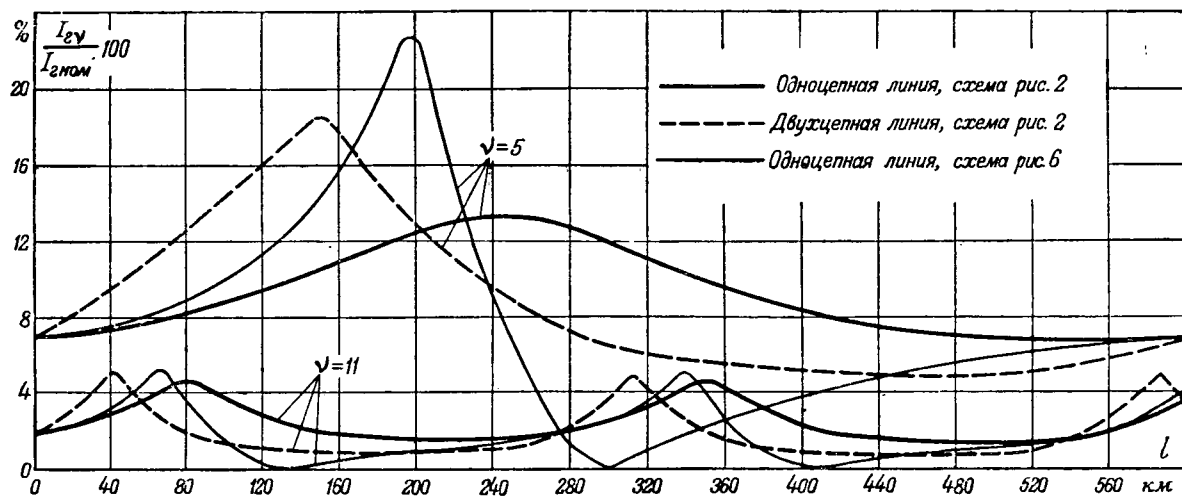


Рис. 3. Зависимость пятой и одиннадцатой гармоник тока генератора мощностью 50 тыс. кВт от длины линии электропередачи 110 кв. Ртутно-выпрямительная нагрузка равна 25 тыс. кВт, другая нагрузка отсутствует.

равна критической, то и увеличение и уменьшение промышленной нагрузки вызывает снижение гармоник в генераторе (рис. 4). В общем случае благотворное влияние промышленной нагрузки сказывается тем сильнее, чем ближе она расположена по электрической схеме к ртутным выпрямителям. Изменение включенной мощности генераторов электростанции также вызывает изменение x_{av} и, следовательно, оказывает такое же действие, как изменение промышленной нагрузки на шинах электростанции. Для иллюстрации этого на рис. 5 показана зависимость пятой гармоники тока в генераторе от общей включенной мощности генераторов станции при $l = l_{кр}$ для генератора мощностью 50 тыс. кВт, при величине ртутно-выпрямительной нагрузки 25 тыс. кВт. Если при тех же относительных значениях x_2 и u_k и той же мощности ртутных выпрямителей уменьшить включенную мощность генератора вдвое, пятая гармоника тока генератора снизится с 18,5 до 15% $I_{ном}$, несмотря на увеличение его ртутно-выпрямительной нагрузки до 100% $P_{ном}$.

3-я схема. Ртутно-выпрямительная нагрузка питается от шин электростанции, на которые включена ненагруженная высоковольтная линия электропередачи (рис. 6). Включение длинных ненагруженных линий вызывает резкое изменение величины высших гармоник токов генераторов электростанции, питающей ртутно-выпрямительную подстанцию. Если входное емкостное сопротивление $x_{лхв}$ ненагруженной линии одного порядка с индуктивным сопротивлением x_{av} электростанции, включающим в себя сопротивление промышленной нагрузки, то соответствующая гармоника тока генераторов может быть очень велика.

Нетрудно доказать, что наибольшая величина гармоник токов генераторов имеет место

при критическом входном емкостном сопротивлении ненагруженной линии электропередачи

$$x_{лхв} = - \frac{x_{av} \left[1 + \left(\frac{r}{x_{pv}} \right)^2 \right]}{1 + \frac{x_{av}}{x_{pv}} + \left(\frac{r}{x_{pv}} \right)^2}. \quad (14)$$

При $x_{лхв}$ суммарная гармоника тока генераторов

$$I_{zv} = \frac{U_{zv \max}}{x_{zv}} = \frac{E_v \sqrt{1 + \left(\frac{x_{pv}}{r} \right)^2}}{x_{zv}}. \quad (15)$$

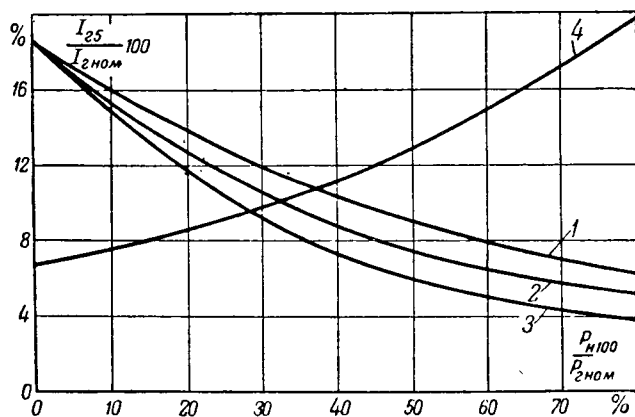


Рис. 4. Зависимость пятой гармоники тока генератора мощностью 50 тыс. кВт, питающего через двухцепную линию электропередачи 110 кв ртутно-выпрямительную подстанцию с неизменной нагрузкой 12,5 тыс. кВт, от величины и места присоединения промышленной нагрузки без ртутных выпрямителей (схема рис. 2).

Промышленная нагрузка присоединена: 1 и 4 — к шинам 110 кв электростанции; 2 — к шинам 110 кв подстанции; 3 — к шинам 10 кв подстанции. 1, 2 и 3 — $l = l_{кр}$ при отсутствии промышленной нагрузки; 4 — $l = l_{кр}$ при $P_n = 37,5$ тыс. кВт; $x_{к5} = 1,6 z_0$ при 110 кв и 1,0 z_0 при 10 кв.

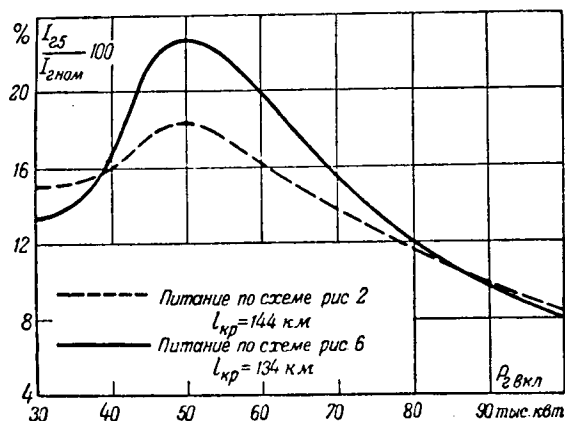


Рис. 5. Зависимость пятой гармоники тока в генераторах от их включенной мощности при неизменной ртутно-выпрямительной нагрузке 25 тыс. квт; прочая нагрузка отсутствует; длина двухцепной линии $l = l_{кр}$ при мощности генераторов 50 тыс. квт.

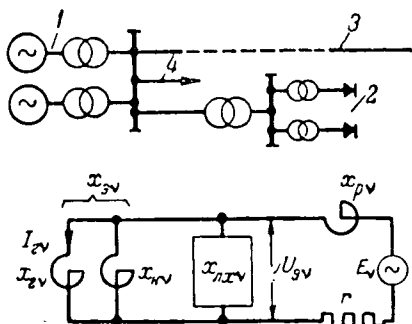


Рис. 6. Схема питания ртутно-выпрямительной подстанции от шин электростанции, на которые включена ненагруженная высоковольтная линия электропередачи.

1 — электростанция; 2 — ртутно-выпрямительная подстанция; 3 — ненагруженная линия электропередачи; 4 — нагрузка без ртутных выпрямителей.

Подсчеты, произведенные по формуле (14), показали, что при изменении ртутно-выпрямительной нагрузки в широких пределах отношение $\frac{x_{лхкр}}{x_{zv}}$ для пятой и седьмой гармоник изменяется от 1,0 до 0,7. Следовательно, для того чтобы избежать образования в генераторах больших гармоник тока, необходимо при включении ненагруженных кабельных и воздушных линий избегать соотношений, близких к указанной неблагоприятной зоне. В табл. 4 приведены критические длины ненагруженной линии электропередачи 110 кВ для изолированной электростанции.

При схеме рис. 6 гармоники тока генераторов могут быть больше, чем при схеме рис. 2, так как влияние изменения длины линии, мощности генераторов и промышленной нагрузки в этом случае выражено резче (рис. 3 и 5). При длине линии $l = \frac{\lambda_v \cdot n}{4}$, где n — любое нечетное число, гармоника порядка v в токе генератора отсутствует (рис. 3); это объясняется тем, что при такой длине входное сопротивление нена-

Таблица 4
Критические длины ненагруженной линии электропередачи 110 кВ (км) при схеме рис. 6

Мощность генераторов, тыс. квт	v	Двухцепная линия		Одноцепная линия	
		100% ртутно-выпрямительной нагрузки	10% ртутно-выпрямительной и 90% прочей нагрузки	100% ртутно-выпрямительной нагрузки	10% ртутно-выпрямительной и 90% прочей нагрузки
25	5	93	101	151	162
	7	54	54	95	94
50	5	151	162	210	220
	7	95	94	143	140
100	5	210	220	254	259
	7	143	140	175	174

груженной линии (5) гармонике порядка v равно нулю, т. е. генератор зашунтирован линией.

Расчет высших гармоник при питании от энергосистемы нескольких ртутно-выпрямительных подстанций. Если ртутно-выпрямительные подстанции, питающиеся по одной линии электропередачи или от шин одной электростанции, находятся на небольшом расстоянии (по длине линии) друг от друга, то при расчете высших гармоник тока генераторов их можно заменить одной эквивалентной подстанцией, расположенной в центре ртутно-выпрямительной нагрузки. Сопротивление этой подстанции равно результирующему сопротивлению цепи, состоящей из параллельно соединенных сопротивлений r и x_{pv} всех ртутно-выпрямительных подстанций. В этом случае схема замещения содержит одну э. д. с. E_v и расчет производится весьма просто, как это показано в приложении.

Указанный способ может быть применен для расчета гармоник тока генераторов энергоси-

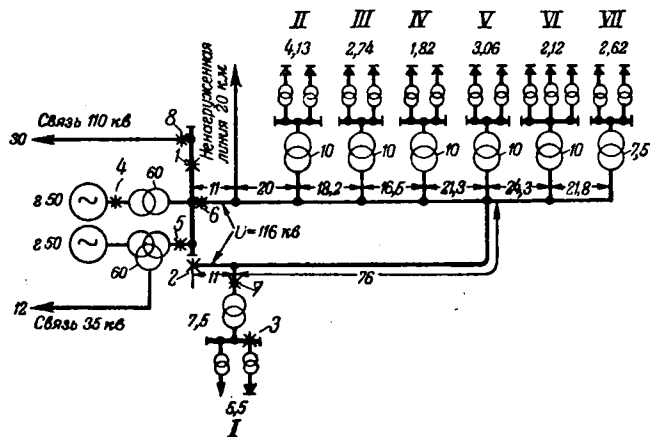


Рис. 7. Схема опыта (тяговые и прочие нагрузки, номинальные мощности генераторов и трансформаторов указаны в тыс. квт, длины линий электропередачи — в км).

Таблица 5

стемы, питающей участок электрифицированной железной дороги длиной не более $\frac{\lambda_v}{6}$. При большей длине участка для получения приемлемых результатов тяговые подстанции группируются в нескольких точках, расположенных между собой на расстояниях (по длине линии), меньших $\frac{\lambda_v}{10}$. Полученные таким образом укрупненные ртутно-выпрямительные подстанции должны быть представлены в схеме замещения эквивалентными сопротивлениями r , x_p и эквивалентной э. д. с.³ $\dot{E}$, а участки линий между ртутно-выпрямительными подстанциями замещены П-образной схемой. Схема замещения, содержащая ряд активных (по числу укрупненных подстанций) и пассивных ветвей, свертывается обычным способом к той точке, в которой необходимо определить величину высших гармоник.

Для иллюстрации точности предлагаемой методики в табл. 5 расчетные данные для пятой гармоники сопоставляются с результатами опыта, произведенного ЦНИЭЛ МЭС совместно с ВНИИ МПС.

При опыте семь тяговых подстанций получали питание по линии электропередачи 110 кВ от шин электростанции, соединенной с сетями энергосистемы связями 35 и 110 кВ (рис. 7). На подстанциях было включено по два-три ртутно-выпрямительных агрегата, имеющих такие же параметры, как в примере расчета, и по одному понижающему трансформатору 115,5/11 кВ. Величины тяговых и прочих нагрузок, длины линий и мощности генераторов и трансформаторов приведены на рис. 7. Измерение тяговых нагрузок на подстанциях и различных электрических параметров на электростанции, а также осциллографирование токов и напряжений в восьми точках схемы, указанных на рис. 7 звездочками, производились одновременно.

Расчеты производились двумя способами: а) упрощенным, при котором все тяговые подстанции сосредоточивались в одной точке линии электропередачи (в точке присоединения тяговой подстанции V); б) более точным, при котором тяговые подстанции сосредоточивались в трех точках линии электропередачи (подстанции II, III и IV в точке присоединения подстанции III, подстанции V, VI и VII в точке присоединения подстанции V и подстанция I на своем месте).

Как видно из табл. 5, расчетные значения пятой гармоники тока и напряжения в точках, на-

Наименование величины	Значения, полученные в результате расчета		Значения полученные путем измерения
	по упрощенному методу	по более точному методу	
Пятая гармоника напряжения в % действующего значения напряжения:			
в точке 1 . . .	7,5	7,6	8,2
в точке 2 . . .	18,8	19,1	22
в точке 3 . . .	—	21,8	24,6
Пятая гармоника тока в % номинального тока генератора в точке 4	6,7	6,8	6,9
Пятая гармоника тока в % действующего значения тока:			
в точке 5 . . .	21,6	21,8	23
в точке 6 . . .	38,5	39	43
в точке 7 . . .	—	7,1	8,8
в точке 8 . . .	2,2	2,2	2,3

ходящихся на электростанции (в генераторах, на отходящих линиях и шинах), отличаются от экспериментальных не более чем на 10% измеряемой величины, а в точках, находящихся на конце линии электропередачи и на наиболее отдаленной тяговой подстанции (точки 2, 3 и 7), не более чем на 20%. Такая точность вполне достаточна для определения допустимости того или иного режима работы энергосистемы.

Мероприятия по ограничению высших гармоник токов генераторов. Ртутно-выпрямительные агрегаты с числом фаз, равным 12 и более, не создают пятой и седьмой гармоник; гармоники же более высокого порядка, как показали расчеты, не могут достигнуть большой величины и оказать существенного влияния на работу генераторов. Поэтому на новых ртутно-выпрямительных установках необходимо полностью отказаться от применения шестифазных агрегатов.

На действующих установках при невозможности замены шестифазных агрегатов многофазными следует применить условную двенадцатифазную схему, создаваемую путем параллельного включения на одной подстанции шестифазных ртутно-выпрямительных агрегатов, первичные обмотки которых соединены равным числом звезд и треугольников. Если параметры и нагрузка включенных таким образом агрегатов одинаковы, то пятая и седьмая гармоники в энергосистеме практически не проникают.

При затруднениях с получением реакторов, необходимых для осуществления условной двенадцатифазной схемы, последняя может быть создана путем установки на соседних тяговых подстанциях понижающих трансформаторов или трансформаторов ртутно-выпрямительных агрегатов, имеющих различные группы соединений, причем эти группы должны быть такими, чтобы сдвиг фаз между первыми гармониками был равен 30° (рис. 8). При этом способе степень компенсации пятой и седьмой гармоник будет зависеть от рас-

³ Электродвижущие силы $\dot{E}$, могут быть сдвинуты по фазе в соответствии со сдвигом фаз первой гармоники напряжения сети; для учета этого сдвига можно принять, что при одинаковой группе соединения трансформаторов тяговых подстанций э. д. с. одной частоты одинаково ориентированы относительно первой гармоники напряжения линии электропередачи. Тогда при сдвиге фаз между первыми гармониками напряжения в двух точках сети, равном φ , сдвиг фаз между гармониками порядка ν будет равен $\nu\varphi$.

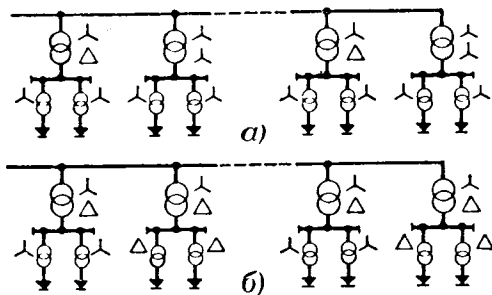


Рис. 8. Компенсация пятой и седьмой гармоник путем установки на соседних подстанциях трансформаторов с разными группами соединений, при которых сдвиг фаз между первыми гармониками равен 30° .

а — разные группы соединений имеют понижающие трансформаторы подстанций; б — разные группы соединений имеют ртутно-выпрямительные агрегаты.

пределения тяговой нагрузки между подстанциями, от количества ртутных выпрямителей, включенных на каждой подстанции, и от сопротивления участков линий между ними. Можно ожидать, что при большом числе тяговых подстанций, питаемых по одной линии электропередачи, и при равномерном графике движения будет достигнуто значительное снижение пятой и седьмой гармоник тока генераторов по сравнению с величиной этих гармоник при одинаковой группе соединений трансформаторов всех подстанций. Однако при отключениях отдельных участков линии электропередачи и подстанций от действия защитных устройств или для производства ремонтов неравномерность распределения нагрузок между подстанциями с трансформаторами, имеющими различные группы соединений, может резко возрасти, вследствие чего потребуются отключение других подстанций или ограничение тяговой нагрузки.

Для защиты генераторов от высших гармоник в принципе возможно применение фильтров из реакторов и конденсаторов, устанавливаемых на шестифазных ртутно-выпрямительных подстанциях или на питающих их линиях. Однако при значительных ртутно-выпрямительных нагрузках это мероприятие совершенно нерационально с экономической точки зрения, так как сооружение таких фильтров потребовало бы крупных капиталовложений. Также нерационально применять в качестве фильтров ненагруженные линии электропередачи⁴.

Из сказанного следует, что применение двенадцатифазных ртутно-выпрямительных агрегатов или агрегатов с большим числом фаз является наиболее целесообразным мероприятием для обеспечения нормальной работы энергосистемы, от сетей которой питаются тяговые подстанции.

В заключение автор выражает благодарность Л. Г. Мамиконянцу и В. Ю. Ломоносову, сделавшим ряд ценных замечаний при просмотре рукописи.

Приложение. Пример расчета. Изолированный генератор питает шесть шестифазных ртутно-выпрямительных подстанций, равномерно распределенных вдоль одноцепной линии электропередачи 110 кВ длиной 140 км.

⁴ Такое мероприятие вынужденно применяется в упомянутом выше случае.

На каждой подстанции включен один трансформатор 10 тыс. кВА, 115,5/11 кВ, $u_k = 0,112$ и четыре ртутно-выпрямительных агрегата типа РМНВ 500/6 с трансформаторами ТМР 3200/35, 1850 кВА, 10 кВ, $u_k = 0,063$. Тяговая нагрузка каждой подстанции — 5 тыс. кВт. Характеристическое сопротивление одноцепной линии $z_c = 365$ Ом. Первая гармоника напряжения сети — 120 кВ. Генератор типа Т2-50-2, 10,5 кВ, 3240 А, $x_2 = 0,158$ работает в блоке с трансформатором 60 тыс. кВА, 10,5/121 кВ, $u_k = 0,105$.

Определить пятую гармонику тока генератора в момент, когда параллельно линии электропередачи, по которой питаются тяговые подстанции, включена ненагруженная линия электропередачи длиной 140 км (рис. 9).

Поскольку $l < \frac{\lambda_5}{6} = \frac{6000}{5.6} = 200$ км, принимаем все

ртутно-выпрямительные подстанции сосредоточенными в середине линии электропередачи, являющейся в данном случае центром тяговой нагрузки. Определяем параметры схемы замещения, приведенные к напряжению линии электропередачи:

электродвижущую силу пятой гармоники

$$E_5 = 0,225 \frac{120000}{\sqrt{3}} = 15600 \text{ в};$$

по формуле (2) сопротивление $r = \frac{120^2}{6.5} = 480$ Ом; по формуле (3) индуктивное сопротивление шести параллельно включенных ртутно-выпрямительных подстанций

$$x_{p5} = \frac{5.0 \cdot 112 \cdot 115,5^2}{6 \cdot 10} + \frac{5.0 \cdot 0,063 \cdot 10^2 \cdot 115,5^2}{24 \cdot 1,85 \cdot 11^2} = 203 \text{ Ом};$$

по формулам (3) и (4) индуктивное сопротивление блока генератора

$$x_{25} = \frac{5.0 \cdot 105 \cdot 121^2}{6 \cdot 10} + \frac{0,9 \cdot 5.0 \cdot 158 \cdot 10500 \cdot 121^2}{3240 \cdot \sqrt{3} \cdot 105^2} = 305 \text{ Ом};$$

по формуле (5) входное емкостное сопротивление ненагруженной линии электропередачи длиной 140 км

$$x_{\text{лх5}} = -365 \operatorname{ctg} \frac{2\pi 140}{1200} = -405 \text{ Ом};$$

сопротивление генератора вместе с ненагруженной линией

$$x_{55} = \frac{305(-405)}{305-405} = +1235 \text{ Ом};$$

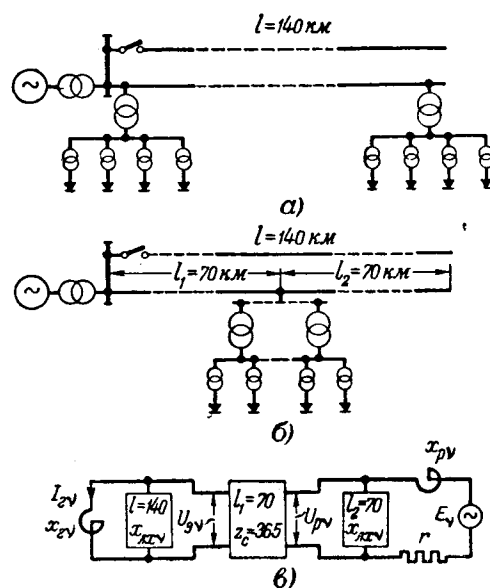


Рис. 9.

а — схема питания шести тяговых подстанций от изолированного генератора; б — расчетная схема с одной эквивалентной подстанцией; в — схема замещения.

по формуле (8) эквивалентную длину ненагруженной линии

$$l_g = 544 \text{ км};$$

по формуле (9) входное сопротивление линии l_1 вместе с сопротивлением x_{g5} :

$$x_{g5} = -365 \operatorname{ctg} \frac{2\pi(544 + 70)}{1200} = -5400 \text{ ом};$$

по формуле (5) входное сопротивление ненагруженной линии l_2

$$x'_{2x5} = -980 \text{ ом};$$

сопротивление системы у эквивалентной тяговой подстанции

$$x_{cуст5} = \frac{(-5400)(-980)}{-5400 - 980} = -830 \text{ ом};$$

по формуле (1) гармоники тока на входе эквивалентной подстанции

$$I_{p5} = \frac{15600}{\sqrt{480^2 + (203 - 830)^2}} = 19,8 \text{ а};$$

гармонику напряжения на линии электропередачи у эквивалентной тяговой подстанции

$$|U_{p5}| = I_{p5} x_{cуст5} = 16400 \text{ в};$$

по формуле (10) гармонику напряжения на шинах 110 кВ электростанции

$$U_{g5} = 16400 \frac{\cos \frac{2\pi 544}{1200}}{\cos \frac{2\pi(544 + 70)}{1200}} = 15700 \text{ в};$$

гармонику тока в генераторе с учетом коэффициента трансформации

$$I_{z5} = \frac{U_{g5}}{x_{z5}} = \frac{15700 \cdot 121}{305 \cdot 10,5} = 595 \text{ а},$$

что составляет 18,3% номинального тока и около 42% действующего значения тока генератора.

Литература

1. М. П. Костенко, Л. Р. Нейман и Г. Н. Блазевич. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. Издательство Академии наук СССР, 1946.
2. P. W. Bye, H. E. Kent. Влияние выпрямителей на форму кривой напряжения сети. Electrical Engineering, т. 53, стр. 54, № 1, 1934.
3. Е. Г. Комар. Вопросы эксплуатации турбогенераторов. Госэнергоиздат, 1950.
4. Р. А. Лютер. Учет влияния высших гармонических в кривой тока на работу синхронных генераторов, питающих ртутные выпрямители. Сборник „Электросила“, № 5, 1948.

[16.10. 1954]



Из опыта работы

О самосинхронизации генераторов сельских электростанций

Кандидат техн. наук В. А. ГЛЕБОВ

Ростов-на-Дону

Синхронные генераторы часто включают на параллельную работу по способу самосинхронизации, что по сравнению с точной синхронизацией дает упрощение схемы и облегчение операций. Для ряда типов установок этот способ включения синхронных генераторов на параллельную работу стал основным [Л. 1]. Способ самосинхронизации особенно эффективен в применении к небольшим сельским электростанциям, так как в этих установках можно с толчком тока не считаться [Л. 2]. Однако и здесь есть необходимость в подгонке частоты генератора к частоте сети, хотя и не очень точной.

В ряде сельских установок включение генераторов на параллельную работу по способу самосинхронизации можно осуществить еще проще. В частности, на ветроэлектростанции, где для предотвращения ее перехода в вентиляторный режим работы при снижении скорости ветра ге-

нераторы оборудуются шкивами свободного хода, работающими аналогично велосипедной втулке «Торпедо» [Л. 3]; в данном случае ротор вращается по ходу свободно относительно верхней части шкива, и при включении генератора на параллельную работу здесь можно использовать асинхронный разгон ротора генератора. При этом не требуются ни особая подгонка, ни какие-либо специальные устройства и приборы синхронизации.

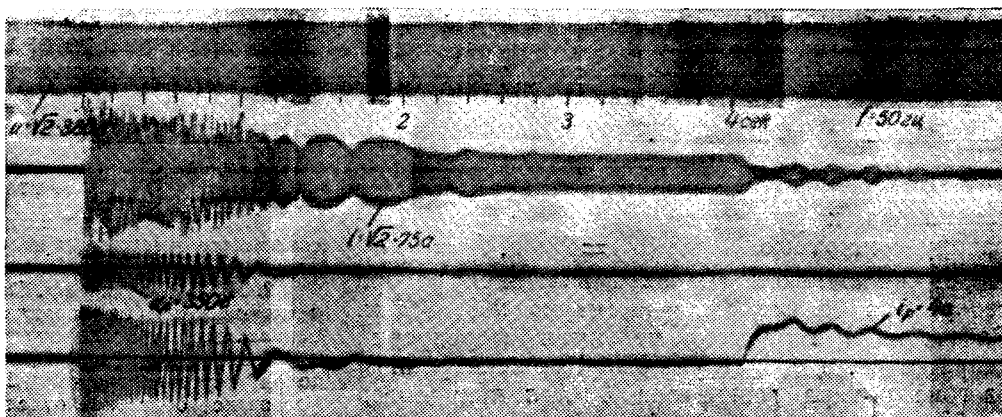


Рис. 1.

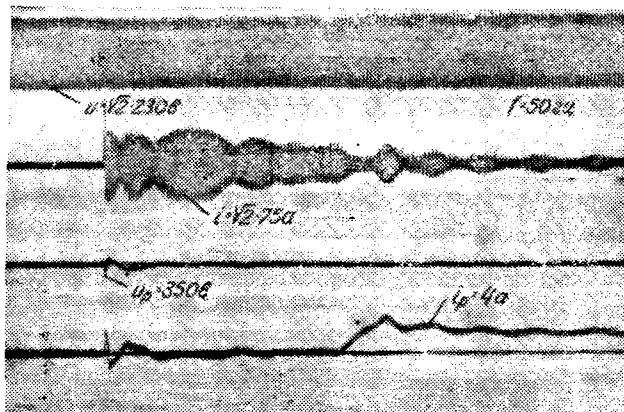


Рис. 2.

На рис. 1, 2 и 3 приведены осциллограммы процесса синхронизации генератора 30 кВа, $U_n = 430/230$ в, $I_n = 43/75$ а ветроэлектростанции со шкивом свободного хода. При включении в ротор соответствующего сопротивления машина приобретает свойства асинхронного пуска, иначе говоря, машина не имеет отрицательного асинхронного момента при полусинхронной скорости.

На рис. 1 представлены осциллограммы напряжения сети u , тока статора подключаемого генератора i , напряжения ротора u_r и тока ротора i_r при синхронизации генератора с мощной сетью. Подключение обмотки статора генератора к сети производится при неподвижном роторе. Спустя 2,0...2,5 сек ротор достигает подсинхронной скорости, к ротору подключается возбудитель и через весьма непродолжительное время генератор самосинхронизируется с сетью. После этого запускается первичный двигатель.

На рис. 2 представлена осциллографическая запись тех же величин, что и в предыдущем случае, но скорость вращения ротора генератора перед включением обмотки статора в сеть доводилась при помощи первичного двигателя примерно до 900 об/мин. В этом случае толчок тока заметно уменьшается, а ротор достигает подсинхронной скорости через 1,2...1,3 сек. После подключения возбудителя генератор самосинхронизируется. Аналогично будет протекать пуск и в том случае, если скорость вращения ротора перед включением обмотки статора в сеть будет составлять не 900 об/мин, а, например, 600...700 об/мин. В этом случае лишь время асинхронного разгона увеличится на 0,2...0,3 сек.

На рис. 3 представлена осциллографическая запись процесса подключения этого синхронного генератора к работающему синхронному генератору мощностью 20 кВа ($U_n = 230$ в, $I_n = 50$ а). Перед включением скорость вращения ротора генератора 30 кВа была примерно 900 об/мин. Работающий генератор не имел форсировки напряжения, и его напряжение при асинхронном разгоне ротора генератора 30 кВа понизилось до 50%. Весь асинхронный разгон в этом крайне

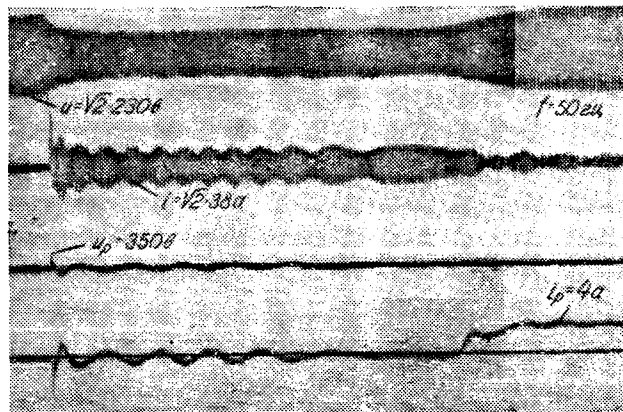


Рис. 3.

неблагоприятном случае длится 2,5...3,0 сек. Очевидно, что при наличии форсировки процесс разгона облегчается, и при весьма эффективной форсировке, например при компаундировании, синхронизация с маломощным генератором будет осуществляться также просто и быстро, как и при синхронизации с мощной сетью.

С целью предотвращения пробоя обмотки и по условиям техники безопасности для уменьшения напряжения обмотки ротора она при пуске замыкается на внешнее сопротивление, примерно в 20 раз превышающее сопротивление обмотки ротора. Как видно из осциллограмм, напряжение обмотки ротора при подключении обмотки статора к сети не превосходит напряжения обмотки статора. После подключения возбудителя напряжение на обмотке ротора было 10 в, поэтому на осциллограммах напряжение обмотки ротора видно лишь в начальной части переходного процесса, затем оно почти сливается с нулевой линией.

Выводы. 1. Синхронизацию генераторов, оборудованных шкивами свободного хода и обладающих свойствами асинхронного пуска, можно осуществить простым подключением обмотки статора при неподвижном роторе с подключением возбудителя при подсинхронной скорости и последующим разгоном первичного двигателя.

2. При синхронизации генераторов, лишенных свойства асинхронного пуска, а также при необходимости уменьшения толчка тока и времени асинхронного разгона сначала целесообразно скорость вращения ротора подключаемого генератора довести до скорости, превышающей полусинхронную, а затем синхронизировать генератор, как и в предыдущем случае.

Литература

1. И. А. Сыромятников. Применение способа самосинхронизации для включения синхронных машин на параллельную работу. Электричество, № 3, 1954.
2. И. И. Кодкин и др. Включение генераторов сельских электростанций на параллельную работу способом самосинхронизации. Электричество, № 9, 1953.
3. В. А. Глебов. Оборудование синхронных генераторов ветроэлектростанций шкивом свободного хода. Ростовское областное отделение ВНИТОЭ, 1953.

[3.9.1954]

О главе „Городские электрические сети“ в Правилах устройства электротехнических установок

Доктор техн. наук, проф. И. А. СЫРОМЯТНИКОВ

Техническое управление Министерства электростанций

В ранее изданных Правилах устройства электротехнических установок не было главы, посвященной городским электрическим сетям, между тем необходимость в такой главе давно назрела.

Предлагаемый на обсуждение проект составлен в результате существенной переработки ряда редакций. Большую работу по составлению проекта проделали: Академия коммунального хозяйства, Гипрокоммунэнерго, Ленинградская кабельная сеть, Ленгипрогор, Ленинградский инженерно-экономический институт и др. В его разработке и обсуждении активно участвовали следующие товарищи: И. С. Бессмертный, В. А. Козлов, Э. С. Иохвидов, Н. И. Медведский, Н. К. Архипов, Г. Н. Баскаков, А. П. Щеглов, М. М. Зархин, Г. В. Сербиновский, А. Л. Фаерман, Б. М. Баранов, Ф. А. Глаголев, Б. Л. Айзенберг и др. Следует отметить весьма дружную работу ленинградского и московского коллективов специалистов по городским сетям.

Предлагаемый проект является главой раздела «Электроснабжение» Правил устройства электротехнических установок, вследствие чего системные вопросы, а также вопросы электроснабжения промышленных предприятий и городов решены комплексно и согласованы между собой.

Правила, содержащиеся в проекте главы, распространяются на городские сети низкого напряжения (380 в и ниже) и высокого напряжения (до 20 кВ включительно).

Проект главы состоит из восьми частей. В первой части даны область применения и основные определения.

Вторая часть содержит общие положения по проектированию. При перспективном проектировании схем электроснабжения расчетные сроки должны быть согласованы со сроками генерального плана развития города. При составлении проектных заданий эти сроки должны приниматься не менее 5 лет. Установлен объем работ при разработке перспективной схемы энергоснабжения города. Указано на необходимость рассмотрения вариантов с применением глубоких вводов 35 кВ и выше. Преимущества варианта сети устанавливаются сравнением первоначальных затрат и годовых расходов с учетом срока окупаемости в 10 лет, а также сравнением технических качеств вариантов.

В третьей части даны основные требования к электроснабжению, установлены три категории потребителей. Принято, что для первой категории

должны быть предусмотрены местные источники питания необходимой мощности. Это положение исходит из того, что питание от общей сети не может быть абсолютно бесперебойным. Установлены требования к резерву. Потребители первой категории должны быть обеспечены автоматически вводимым резервом. Допускается также ввод резерва при помощи телемеханических устройств.

Потребители второй категории обеспечиваются сетевым резервом с ручным вводом. Применение автоматического или телемеханического ввода резерва рекомендуется в том случае, когда вызываемое им увеличение капитальных затрат не более 15% или когда увеличение этих затрат хотя и больше 15%, но компенсируется снижением численности обслуживающего персонала и потерь электроэнергии в сетях в пределах срока окупаемости.

Потребители третьей категории могут не иметь сетевого резерва. При суммарных нагрузках больше определенной величины требования к резерву повышаются независимо от категории.

В четвертой части рассмотрены вопросы выбора и отклонений напряжения в городских сетях. Низкое напряжение принято равным 380/220 в. При реконструкции рекомендуется осуществлять переход сетей на это напряжение. При реконструкции или расширении городских сетей 6 кВ рекомендуется переходить на напряжение 10 кВ, при этом должны быть использованы проложенные кабели 6 кВ.

Для двигателей установлены отклонения напряжения в пределах $+10\ldots-5\%$, для ламп накаливания в нормальных условиях $\pm 5\%$ и в аварийных условиях до -12% . Для уменьшения колебаний напряжения в случае необходимости должны предусматриваться технические мероприятия. На шинах центров питания должно быть обеспечено согласное регулирование напряжения. Установлены пределы отклонения напряжения на шинах центров питания при минимальных и максимальных нагрузках.

Присоединение двигателей и других нагрузок к сети низкого напряжения допускается в тех случаях, если включение их не вызывает колебаний напряжения, превышающих 2%. При числе включений в сутки менее 5 колебания напряжения не ограничиваются. Потеря напряжения нормируется только для внутридомовой сети.

В пятой части даны расчетные условия. Рекомендовано использование резервных линий в нор-

мальных режимах работы сети. Сечения проводов должны выбираться по экономической плотности тока в нормальном режиме с проверкой выбранного сечения по нагреву при аварийном режиме, а также по отклонениям напряжения в сети. Кабельные линии высокого напряжения должны быть термически устойчивыми к токам короткого замыкания. Допускается перегрузка сетевых трансформаторов в аварийных режимах до 150% в течение не более часа.

Шестая часть посвящена схемам городских сетей. Обращено внимание на необходимость обоснования сооружения распределительных подстанций. Наивыгоднейшая мощность сетевой трансформаторной подстанции должна определяться на основании технико-экономических расчетов. Рекомендуются совместное устройство питающих и распределительных сетей высокого напряжения и сетевых трансформаторов для питания нагрузок городской сети и отдельных промышленных предприятий. Все питающие сети высокого напряжения должны иметь автоматическое резервирование вводов в распределительные подстанции.

В седьмой части рассмотрены вопросы защиты и автоматики. Принято, что для устройств защиты и автоматики должен применяться только переменный оперативный ток. При токах замыкания на землю более 30 а необходимо предусматривать компенсацию токов замыкания на землю. Допускается отказ от защиты от перегрузки там, где эта перегрузка нормально не имеет места.

В восьмой части рассмотрены вопросы конструктивного выполнения элементов городских сетей. Применение воздушных линий допускается лишь в районах застройки до четырех этажей. В трансформаторных подстанциях рекомендуется иметь один трансформатор за исключением случаев, когда применена схема, требующая установки двух трансформаторов, и когда установка второго трансформатора необходима для питания отдельного потребителя.

Предполагаемое обсуждение проекта главы Правил, посвященной городским электрическим сетям, на очередной научно-технической сессии безусловно позволит внести в них ряд существенных изменений и дополнений. Последующей задачей коллектива работников городских сетей будет разработка на основе утвержденных Правил по городским сетям новых Руководящих указаний по проектированию городских сетей.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Глава 3

ГОРОДСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

1. Область применения и определения

§ 1. Настоящие правила распространяются на вновь сооружаемые, реконструируемые и расширяемые городские электрические сети низкого напряжения до 380 в и высокого напряжения до 20 кВ включительно, обеспечивающие электроснабжение всех находящихся на территории города потребителей, за исключением имеющих самостоятельные питающие линии.

§ 2. Кроме указаний настоящего раздела, устройства городских сетей должны удовлетворять требованиям разделов Основных правил (часть I).

Электроснабжение промышленных предприятий, питающихся от городских сетей, кроме данной главы, должно удовлетворять требованиям главы Правил «Электроснабжение промышленных предприятий».

§ 3. Центром питания (ЦП) называется распределительное устройство генераторного напряжения электростанции или вторичного напряжения понизительной подстанции энергосистемы, к которому присоединяются питающие и распределительные линии электропередачи высокого напряжения городских сетей.

§ 4. Распределительной подстанцией (РП) называется установка, предназначенная для передачи и распределения электроэнергии от питающей сети высокого напряжения в распределительную сеть того же напряжения.

§ 5. Питающей линией электропередачи называется линия высокого напряжения, питающая распределительную подстанцию от ЦП.

Питающей сетью называется сеть, состоящая из питающих линий, РП и линий связи между последними.

§ 6. Трансформаторной подстанцией (ТП) называется установка, содержащая понизительные трансформаторы.

ТП могут быть сетевыми, предназначенными для питания городской сети низкого напряжения, абонентскими — для питания самостоятельных потребителей и смешанными.

§ 7. Распределительной сетью высокого напряжения называется сеть, состоящая из распределительных линий высокого напряжения и ТП.

Распределительной линией электропередачи высокого напряжения называется линия, питающая ряд трансформаторных подстанций от центра питания или распределительной подстанции.

§ 8. Распределительной сетью низкого напряжения называется сеть, состоящая из распределительных линий низкого напряжения, узловых и соединительных пунктов и вводных линий.

Распределительной линией электропередачи низкого напряжения называется линия, имеющая по своей длине вводы к потребителям.

§ 9. Узловым пунктом называется устройство сети низкого напряжения, связывающее между собой несколько распределительных линий низкого напряжения.

Соединительным пунктом называется узловой пункт, соединяющий только две распределительных линии.

§ 10. Вводной линией называется линия сети низкого напряжения, соединяющая распределительную линию низкого напряжения с вводным устройством.

§ 11. Вводным устройством называется устройство сети низкого напряжения, устанавливаемое на вводной линии у потребителя.

§ 12. Вводом называется совокупность вводной линии и вводного устройства.

Прямым вводом называется ввод, выполненный непосредственно от шин ТП.

2. Общие положения по проектированию

§ 13. При проектировании городских сетей рекомендуется принимать следующие расчетные сроки:

а) для перспективных схем электроснабжения города последние должны быть согласованы со сроками генерального плана развития города;

б) для проектных заданий на сооружение новых сетей и реконструкции существующих — не менее 5 лет.

§ 14. В случае составления генерального плана развития города необходимо предусматривать разработку перспективной схемы электроснабжения города в объеме энергобаланса потребителей, определения источников питания для покрытия потребной мощности, сетей и подстанций напряжением 35 кВ и выше, а также принципиальных решений в части схем городских сетей высокого и низкого напряжений.

§ 15. При разработке перспективных схем электроснабжения и развития городских сетей следует рассматривать варианты с применением глубоких вводов напряжением 35 кВ и выше.

§ 16. Проекты сетей должны предусматривать возможность осуществления городских сетей по частям с учетом очередности застройки и роста нагрузок.

§ 17. При росте нагрузок к расчетному сроку проектирования не менее чем на 50% следует рассматривать полную реконструкцию городских сетей.

При составлении проекта реконструкции сетей необходимо разрабатывать вопросы применения повышенных напряжений с их глубоким вводом и внедрения усовершенствованных схем сетей.

§ 18. Премущества варианта сети устанавливаются сравнением первоначальных затрат и годовых расходов с учетом срока окупаемости в 10 лет и технических качеств.

§ 19. Прокладка кабельных линий, рассчитанных лишь для удовлетворения нагрузок первой очереди застройки, вне общего проекта развития сетей не допускается.

3. Требования к электроснабжению

§ 20. Все потребители городской сети по степени ответственности их электроснабжения разделяются на три категории:

Категория I — потребители, перерывы в питании которых могут вызвать опасность для жизни людей или значительный ущерб для государственных интересов.

Категория II — потребители, перерывы в питании которых нарушают нормальную деятельность значительного коллектива.

Категория III — все остальные потребители, не подходящие под определения категорий I и II.

§ 21. К категории I относятся:

а) сооружения и объекты с массовым скоплением людей (свыше 1000 чел.), действующие при искусственном освещении (театры, кино, клубы, универмаги и т. д.);

б) особые лечебные помещения, как то: операционные палаты, пункты неотложной помощи, родильные дома и т. д.;

в) особые технические и силовые установки, как то: узлы радиосвязи, телеграф, телефонные станции, противопожарные, водопроводные, канализационные установки и т. п.

§ 22. К категории II относятся:

а) все здания от 4 этажей и выше;

б) административно-общественные здания и помещения;

в) лечебные и детские учреждения, школы и учебные заведения;

г) силовые установки, технология которых ограничивает допускаемые перерывы в электроснабжении (отопительные котельные и др.).

§ 23. Потребители категории I должны быть обеспечены автоматически вводным сетевым резервом. Допускается ввод резерва при помощи телемеханических устройств.

Для создания бесперебойности питания потребителей категории I должны быть предусмотрены местные резервные источники питания необходимой мощности (аккумуляторные батареи и т. д.).

§ 24. Потребители категории II должны быть обеспечены сетевым резервом, ввод которого может производиться вручную. Рекомендуется применение автоматических или телемеханических устройств для ввода резерва, если их применение увеличивает капитальные затраты на сооружение городских сетей не более чем на 15%, а также в том случае, когда увеличение капитальных затрат более чем на 15% компенсируется снижением численности обслуживающего персонала и потерей электроэнергии в сетях, в пределах срока окупаемости. В остальных случаях следует применять ручной ввод резерва.

§ 25. Электроснабжение потребителей категории III может осуществляться без сетевых резервов. Для трансформаторов должен быть складской резерв.

§ 26. Для суммарных нагрузок городских потребителей общей мощностью 3000 кВА и более не допускается возможность одновременного прекращения питания потребителей при повреждениях в сетях. Указанная совокупность нагрузок должна быть обеспечена резервом применительно к требованиям для потребителей категории I.

§ 27. Для суммарных нагрузок городских потребителей общей мощностью от 300 до 3000 кВА для кабельных сетей или от 1000 до 3000 кВА для воздушных сетей допускается одновременное прекращение питания при условии резервирования питания рассматриваемой совокупности нагрузок применительно к требованиям для потребителей категории II.

§ 28. Для питания жилых домов прямые кабельные вводные линии длиной до 30 м и воздушные вводные линии могут осуществляться нерезервируемыми.

§ 29. При наличии на отдельных участках сети потребителей различных категорий выбор схемы их электроснабжения должен обосновываться в каждом отдельном случае, включая рассмотрение варианта выполнения сети применительно к требованиям высшей категории потребителей.

§ 30. Расчетные электрические нагрузки потребителей сети низкого напряжения должны определяться по действующим директивным указаниям.

§ 31. В случае реконструкции существующих сетей разрешается расчетные нагрузки определять по коэффициенту роста нагрузок. Последний получается из сопоставления расчетных нагрузок, определяемых действующими директивными указаниями, с фактически существующими нагрузками.

§ 32. Рекомендуется принимать следующие коэффициенты участия в максимуме:

а) для линий сети низкого напряжения и сетевых трансформаторов — 1,0;

б) для линии распределительной сети напряжения 3—20 кВ — 0,9;

в) для питающей сети 3—20 кВ — 0,9 (0,81 от расчетных нагрузок потребителей).

4. Напряжения сетей

§ 33. Городские электрические сети высокого напряжения должны выполняться трехфазными с изолированной нейтралью, как правило, при напряжении не ниже 10 кВ.

При расширении или реконструкции городских электрических сетей 6 кВ следует переходить на напряжение 10 кВ, используя проложенные кабели 6 кВ на напряжение 10 кВ.

§ 34. Городские электрические сети низкого напряжения должны выполняться трехфазными, как правило, четырехпроводными с глухо заземленной нейтралью, при напряжении 380/220 В.

§ 35. При реконструкции существующих сетей низкого напряжения рекомендуется осуществлять их перевод на четырехпроводную систему трехфазного тока при напряжении 380/220 В.

§ 36. При нормальных режимах работы новых и реконструируемых сетей отклонения напряжения на зажимах электроприемников не должны выходить за пределы:

а) для электродвигателей +10 и —5%;

б) для ламп накаливания, установленных в жилых и административных общественных помещениях, ±5%.

При аварийных режимах в сети отклонения напряжения допускаются до —12%.

§ 37. На шинах ЦП, от которых питаются городские сети, должно быть обеспечено согласное (встречное) регулирование напряжения в соответствии с суммарным графиком нагрузки.

При нормальном режиме работы ЦП в периоды снижения суммарной нагрузки до 30% и ниже от максимального ее значения напряжение на шинах должно поддерживаться на уровне номинального напряжения сети, а в периоды максимума — превышать его не менее чем на 5%. При необходимости и при возможности по режиму ЦП можно повышать напряжение на шинах в часы максимума до 10%, если при этом отклонение напряжения у ближайших потребителей не превысит максимально допустимого значения.

§ 38. Присоединение электродвигателей и иных нагрузок к сети низкого напряжения или к шинам низкого напряжения ТП допускается при условии, что колебания напряжения при включении их не будут превышать 2% от номинального напряжения сети. При числе включений менее 5 раз в сутки колебания напряжения не ограничиваются.

§ 39. Вся сеть от ЦП до токоприемников должна быть проверена на допустимые отклонения напряжения согласно § 36 с учетом режимов напряжения на шинах ЦП.

В случае, если отклонения напряжения получаются больше указанных пределов, необходимо предусматривать в сетях соответствующие технические мероприятия по регулированию напряжения.

§ 40. При определении отклонения напряжения у потребителей потери напряжения во внутридомовых сетях до наиболее удаленного токоприемника учитываются в размерах до 2,5%.

§ 41. В случае применения в городских сетях с воздушными линиями разделительных трансформаторов для защиты ЦП от перенапряжений следует рассматривать возможность выполнения указанных трансформаторов как повысительных на 20 кВ с осуществлением городских сетей при указанном напряжении.

5. Расчетные условия

§ 42. В аварийных режимах сети должны рассчитываться на полную расчетную нагрузку потребителей.

§ 43. Совпадение аварийных и ремонтных отключений нескольких участков сети или линий при расчете аварийных режимов не рассматриваются.

§ 44. Резервные линии рекомендуется использовать в нормальных режимах работы сети.

§ 45. При расчете сетей по условиям аварийных и ремонтных режимов следует учитывать перегрузочную способность линий и трансформаторов сети с учетом сезонной температуры окружающей среды в период максимума нагрузок.

§ 46. Сечение проводов и кабелей необходимо выбирать по экономической плотности тока в нормальном режиме с последующей проверкой выбранного сечения по предельному току нагрева в аварийном режиме.

§ 47. Экономические плотности тока принимать согласно таблице для всех напряжений.

В случае распределительной нагрузки значения плотности тока на головном участке линий одинакового сечения должны приниматься увеличенными против таблицы на величину коэффициента, учитывающего характер распределения нагрузки вдоль линии (в среднем 1,5).

Годовое число часов использования максимума нагрузки	Экономическая плотность тока, а/мм ²			
	Медные провода	Алюминиевые провода	Кабели	
			с медными жилами	с алюминиевыми жилами
Более 5 000	1,25	0,75	2,0	1,3
3 000 — 5 000	1,75	1,0	2,25	1,5
До 3 000	2,5	1,5	2,5	1,65

§ 48. Сечения кабельных линий высокого напряжения городских сетей должны проверяться на термическую устойчивость токам короткого замыкания.

§ 49. В аварийных режимах допускается перегрузка сетевых трансформаторов до 150% при длительности перегрузки не более часа.

§ 50. Питающие сети 3—20 кВ, как правило, должны выполняться таким образом, чтобы мощность короткого замыкания в распределительной сети того же напряжения не превышала 200 мВА.

§ 51. Для питающих линий высокого напряжения рекомендуется принимать кабели максимального сечения, в частности при 6 кВ — 150 мм², при 10 кВ — 120 мм².

§ 52. При выполнении сетей низкого напряжения неосвоенными кабелями не рекомендуется выбирать крупные сечения. В этих случаях рекомендуется расщепление кабельных линий. Воздушные линии низкого напряжения должны выбираться с сечениями нулевых проводов не менее половины от фазных.

6. Схемы городских сетей

§ 53. Целесообразность сооружения РП должна быть обоснована сравнением с вариантом непосредственного питания распределительных сетей от ЦП.

§ 54. В зависимости от сетевых условий наиболее выгодная мощность сетевой ТП должна определяться на основании технико-экономических расчетов.

§ 55. Для нагрузок городской сети и отдельных промышленных предприятий рекомендуется совместное устройство питательных и распределительных сетей высокого напряжения, а также сетевых трансформаторов.

§ 56. Питающие сети высокого напряжения во всех случаях должны осуществляться по схемам с автоматическим резервированием вводов в РП.

7. Защита и автоматика

§ 57. В качестве оперативного тока защиты и автоматики городских электрических сетей должен применяться переменный ток.

§ 58. Устройства защиты и автоматики городских сетей во всех случаях должны быть согласованы с устройствами АРЧ.

§ 59. В сетях с автоматическим резервированием питания потребителей должна предусматриваться сигнализация аварийных отключений выключателей в РП на диспетчерский пункт.

§ 60. В городских сетях с током замыкания на землю более 30 А необходимо предусматривать мероприятия по компенсации токов замыкания на землю.

Расчет заземляющих устройств для сети необходимо выполнять без учета компенсирующих устройств.

§ 61. На распределительных линиях низкого напряжения и трансформаторах со стороны низкого напряжения допускается не предусматривать защиту от перегрузки в тех случаях, когда перегрузка нормально не имеет места. В случаях, когда может иметь место перегрузка кабелей и трансформаторов выше допустимой § 49, необходимо предусматривать устройства автоматической разгрузки сетей за счет отключения части потребителей категории III.

8. Конструктивное выполнение

§ 62. Для сетей всех напряжений в районах застройки от четырех этажей и выше рекомендуется применение подземных кабельных линий.

Для сетей районов застройки до четырех этажей допускается применение воздушных линий.

§ 63. Во всех случаях рекомендуется применение ТП одностранового типа, кроме запроектированной установки второго трансформатора для отдельного потребителя, а также в случае осуществления городской сети по схеме, требующей установки двух трансформаторов.

§ 64. Конструктивное выполнение ТП, как правило, должно предусматривать разделение оборудования отдельных выводов высокого напряжения несгораемыми перегородками.

В сетях с автоматическим резервированием питания потребителей рекомендуется применение упрощенных конструкций ТП с учетом особенностей схем.

ПОЛЕ КАК ВИД МАТЕРИИ

(Статья О. Б. Брона, *Электричество*, № 7, 1954)

Кандидат техн. наук, доц. Б. В. ГРУШЕВСКИЙ

Донецкий индустриальный институт

Рядом дискуссий и других материалов, опубликованных в журнале «Электричество» в последние годы, вскрываются серьезные недостатки в изложении курса теоретических основ электротехники. Вопрос о пересмотре некоторых основных определений в этой области остро сформулирован в поставленной на обсуждение статье О. Б. Брона. Автор статьи подчеркивает, что установившееся в передовой науке представление о физическом поле как виде материи не нашло достаточно полного и последовательного отражения в учебниках по теоретическим основам электротехники.

Остановимся на некоторых выражениях и определениях рассматриваемой статьи.

Передача и преобразование энергии. О. Б. Брон напомнил, что в основе всех энергетических процессов в силовых установках лежит преобразование материальных форм, которое сопровождается изменениями массы и энергии. Преобразование энергии, таким образом, является только одной стороной более общего процесса — преобразования форм материи, атрибутами которой являются масса и энергия.

Передача электромагнитной энергии является, в сущности, передачей электромагнитного поля, так как нельзя представить себе энергию без материи, которая является носителем энергии. Очевидно, эти соображения следует распространить на аналогичные процессы в других электротехнических установках. Процессы, аналогичные передаче энергии, происходят в устройствах электрической связи, сигнализации, телеизмерений, телеуправления и т. д. И здесь мы имеем дело с преобразованием различных форм материи и с передачей электромагнитного поля. Аппараты связи и сигнализации, датчики, измерительные приборы и т. д. являются, в сущности, такими же преобразователями энергии (или, по сути, электромагнитного поля), как генераторы, трансформаторы и электродвигатели силовых установок. Таким образом, все упомянутые процессы являются процессами передачи и преобразования электромагнитного поля.

Обратимся к терминологии. Технические термины «передача энергии», «сигнализация» (передача сигналов), «телефония» (передача речи) и т. д. выражают целевое назначение соответствующей установки и происходящих в ней явлений.

Обобщенный термин «передача электромагнитного поля» выражает основное содержание физических процессов во всех перечисленных устройствах, но ничего не говорит о характере использования этих процессов. Следовательно, это неконкретный термин.

Так, в силовых установках электромагнитное поле является лишь средством для передачи и распределения механической энергии (например, энергии падающей воды), ее частичного преобразования в тепло и другие формы. В этом случае интерес представляет не электромагнитное поле, как таковое, а его энергия.

Таким образом, о замене частного термина «передача энергии» общим термином «передача электромагнитного поля», как это предлагает О. Б. Брон, не может быть и речи.

Определения электрического, магнитного и электромагнитного полей. Развивая положение о материальности физических полей, О. Б. Брон приходит к определениям, в которых электрическое и магнитное поля рассматриваются как два самостоятельных вида материи, а электромагнитное поле — как третий вид материи, являющийся

результатом определенной взаимной связи электрического и магнитного полей. С такой трактовкой нельзя согласиться.

В простейшем случае, например, поле заряженной частицы может рассматриваться как электрическое только в системе отсчета, неподвижной относительно данной частицы. Это же поле в другой системе отсчета, движущейся относительно частицы, придется рассматривать как магнитное, точнее — электромагнитное. Таким образом, объективно существующим следует признать электромагнитное поле, а электрическое поле и магнитное поле следует рассматривать как различные формы проявления электромагнитного поля. Что касается определения электромагнитного поля, то принимать в качестве основного признака давление, производимое полем на «поглощающую плоскость», как это делает О. Б. Брон, нецелесообразно. Значительно легче электромагнитное поле обнаруживается в других, чаще наблюдаемых и проще воспроизводимых явлениях. Хорошим признаком электромагнитного поля может служить преобразование энергии поля в другие виды энергии, непосредственно воспринимаемые, например в тепло.

Определения электрического сопротивления, емкости и индуктивности. В определениях О. Б. Броном этих величин допущено довольно распространенное смешение двух понятий: свойства тела или среды и величины, характеризующей это свойство, что не одно и то же. В результате — неопределенность формулировок.

В основу определения сопротивления положено количественное соотношение между величинами. Тем самым сопротивление рассматривается как величина. С этим необходимо согласиться. В самом деле, сопротивление может быть больше или меньше, может быть измерено, может быть вычислено числовое значение сопротивления. Но измеряются не свойства, а величины: вычисляются числовые значения величин, а не свойств.

Таким образом, сопротивление надо определять как величину. Но в таком случае в определении сопротивления должно быть указано соотношение между этой величиной и другими, ранее определенными величинами, чего нет в формулировке О. Б. Брона.

Исходное выражение для мощности

$$P = ri^2$$

можно дополнить следующим:

$$P = gU^2; P = Ui.$$

Тогда, кроме соотношений (14)

$$r = \frac{1}{i^2} P = \frac{c^2}{i^2} m,$$

получим также:

$$a) \quad g = \frac{1}{U^2} P = \frac{c^2}{U^2} m,$$

$$b) \quad U = \frac{1}{i} P = \frac{c^2}{i} m.$$

Следовательно, свойство среды или тела превращать при наличии в них тока электромагнитное поле в тепло можно характеризовать такими величинами как сопротивление, проводимость, напряжение, а также мощность и энергия. Предлагаемое О. Б. Броном определение оказывается неоднозначным.

Аналогичные возражения вызывают также определения емкости и индуктивности. Прежде всего эти понятия следует определять как величины, давая в определениях соотношения между этими величинами и другими, ранее опре-

деленными величинами. Затем формулировки должны иметь однозначный характер.

Емкость — не единственная величина, характеризующая способность заряженных тел и окружающей среды накапливать энергию и массу электрического поля. Точно так же мерой способности контура тока и окружающей среды накапливать энергию и массу электромагнитного поля может служить не только индуктивность.

Таким образом, предлагаемые О. Б. Броном формулировки понятий электрического сопротивления, емкости и индуктивности не содержат правильных определений этих понятий как величин, но представляют собой формулировки физических свойств соответствующих материальных систем и происходящих в них явлений.

«Протекание тока по проводнику». Такое и другие подобные выражения, искажающие физическое содержание одного из основных понятий (ток), встречаются в литературе довольно часто. В статье О. Б. Брона — в определении сопротивления (стр. 9).

Не следует говорить о протекании тока, ибо ток — это движение (протекание) зарядов; лучше говорить о наличии тока. Нельзя также говорить о токе по проводнику, по телу или по среде. Это наводит на представление о перемещении зарядов только по поверхности проводника. Следует говорить: ток в проводнике, в среде, в теле.

В заключение считаю необходимым подчеркнуть, что при изложении курса теоретических основ электротехники в свете представлений о поле как виде материи, участвующем во всех электромагнитных процессах, поле должно быть представлено такими количественными характеристиками как масса (мера количества материи) и энергия, как это показал О. Б. Брон. Причем нельзя не считаться с тем, что эти величины играют далеко не равноценные роли: «плотность массы в обычных полях чрезвычайно мала»; «Не имея возможности измерить массу поля, мы легко обнаруживаем его энергию» (О. Б. Брон, стр. 8). Другими словами, во всех электротехнических устройствах мы имеем дело лишь с энергией электромагнитного поля. Отсюда — целесообразность широкого использования таких величин как энергия и мощность и допустимость таких несколько условных выражений как «передача энергии», «расход энергии» и т. д. Это нисколько не мешает правильному изложению курса с позиций диалектического материализма.

Инж. В. И. КОНСТАНТИНОВ

Москва

О. Б. Брон подчеркивает в своей статье значение понятия «поле» в области учебных дисциплин, связывая неправильные и неточные определения с трактовкой в некоторых учебниках. Между тем значение поставленного вопроса гораздо шире. Бесспорно, большинство читателей правильно рассматривает понятия «поле» и др. как основные понятия учения об электричестве и магнетизме.

Ясное положение диалектического материализма о том, что материя вечна во времени и бесконечна в пространстве, в статье неудачно выражено словами: «Как пространственная, так равно и временная протяженность являются только свойствами материи».

Не доводит до логического конца свою мысль автор, когда затрагивает положение о том, что процесс в пространстве может происходить лишь с заполняющей его материей. Слова автора: «поле возникает только за счет других видов материи...» (стр. 4) придают изменениям форм материи какой-то «экономический» оттенок. Все это можно сформулировать более четко. Например: «Мир по природе своей материален. Наблюдаемое многообразие явлений в природе представляет собой различные формы движущейся материи. Материя не исчезает и не создается вновь. Материя только меняет свои формы (см. «Философский словарь», изд. 1954 г., стр. 335).

На стр. 6 в нечетких выражениях говорится о разрядке конденсатора или реактивной катушки на активное сопротивление. «Вся энергия этих полей, — говорит автор, — идет на нагревание разрядных сопротивлений». В этих словах спутаны причина и следствие. Нагревание сопротивлений, которые автор назвал «разрядными», не есть самоцель. Здесь следовало сказать о преобразовании материи в фор-

ме электромагнитного поля в форму тепловую и объяснить механизм этого преобразования. «Но благодаря нагреванию, — читаем дальше, — увеличивается скорость движения частиц проводов, образующих сопротивление» (стр. 6). Здесь тепловая энергия поступает в сопротивления из электромагнитного поля при процессе превращения формы материи, и сначала увеличивается скорость движения частиц, а затем возрастает температура проводов (они нагреваются). Автор употребляет слово «тепло», не объясняя того, что скрывается за этим словом: «тепловая энергия» или «тепловая форма материи».

Нехорошо звучит фраза: «...в пространстве данного вида материи». Пространство — единое и оно является одной из непрерывных форм существования материи вообще; здесь же речь должна идти об области пространства, которую занимает материя в рассматриваемой форме.

Формулировка магнитного поля теряет свою ценность из-за неопределенности: «...сила, приложенная к определенным образом ориентированному электрическому току в пространстве данного вида материи»; большей определенности удастся достичь, если здесь говорить о силе, приложенной к движущемуся электрическому заряду.

В предложении: «Всякое изменение во времени магнитного потока вызывает появление электрического поля» (стр. 8) слово «появление» лучше опустить.

Не совсем ясно из статьи взаимоотношение между магнитным потоком и магнитным полем, так как непосредственно за приведенной фразой читаем: «Электромагнитная индукция есть, таким образом, процесс преобразования магнитного поля в электрическое поле».

Такое же впечатление получается при чтении определения «магнитоэлектрической индукции», относительно взаимоотношения электрического потока и электрического поля.

Несмотря на направленность разбираемой статьи в защиту материалистических взглядов, на стр. 8 читаем: «Эти поля в пустоте движутся со скоростью света». Можно было сказать здесь «двигались бы», ведь автор едва ли укажет «пустоту» в мировом пространстве.

Автор прав, что в электрических установках «Энергетические процессы представляют собой только одну сторону этих преобразований» (стр. 8), однако сторону, едва ли не самую важную для современной практики.

В статье предлагается ввести в формулировку закона Кулона выражение, что «на два заряда (или две массы) действует их общее поле» (стр. 9). Однако, повидимому, здесь рассматривается лишь одна сторона, так как в той же области пространства на две массы, которые обладают указанными зарядами, распространяется закон всемирного тяготения. Таким образом, если идти в этом направлении дальше, то следует говорить о действии «результатирующего» поля.

Вызывают недоумение слова автора: «...для мощности P электромагнитного поля, превращающейся в тепло» (стр. 9). Что такое «мощность электромагнитного поля», если последнее есть вид материи? Повидимому, здесь можно было бы под «мощностью» понимать скорость преобразования энергии этого поля. Но как может скорость преобразования энергии превратиться в тепло, если «тепло» — одна из форм материи?

В определении автора для «электрической емкости» содержится, на наш взгляд, неувязка. «Электрическая емкость есть способность заряженных тел и окружающей их среды...» (стр. 9). Отсюда следует, что эта способность появляется лишь после заряжения тел. Правильно, что эта способность обнаруживается при заряжении тел и может быть здесь надо было сказать о способности «заряжаемых» тел и окружающей их среды.

Автор говорит, что «емкость пропорциональна энергии W_e и массе m_e электрического поля» (стр. 9); при таком положении емкость — величина переменная и равная нулю у незаряженного тела.

Это новый взгляд на электрическую емкость!

Подобные замечания можно сделать относительно определения автором индуктивности.

В связи с затронутыми вопросами напомним, что до сих пор индуктивность определялась тремя способами:

$$L = \frac{2W_m}{I^2} = \left| \frac{eL}{di} \right| = \frac{\phi}{I}.$$

Аналогично для емкости мы имели:

$$C = \frac{2W_e}{U^2} = \left| \frac{i}{dU_c/dt} \right| = \frac{Q}{U}.$$

Таким образом, при заданном токе I индуктивность L определяет энергию магнитного поля W_m и потокоцепление Ψ , а при заданной скорости изменения тока $\frac{di}{dt}$ она определяет э. д. с. самоиндукции e_L .

Аналогично емкость C при заданном напряжении U определяет энергию электрического поля W_e и заряд Q , а при заданной скорости изменения напряжения $\frac{dU_c}{dt}$ она определяет ток i через конденсатор.

А. Ф. МЕТЕЛКИН и М. А. ЛЮБИМОВ

Ивановский энергетический институт имени Ленина

В статье совершенно справедливо критикуются некоторые старые представления и отжившие определения в области теоретической электротехники, однако в ней имеются и неправильные утверждения, сделанные автором вопреки имеющимся по этим вопросам материалам в научно-технической литературе и в нашей периодической печати.

На стр. 5 написано: «Согласно классической теории полная масса электрона состоит из двух частей — из механической (точнее неэлектромагнитной) массы и массы электромагнитного происхождения. Электромагнитная масса электрона определяется соотношением

$$m = \frac{2e^2}{3r_0c^2}. \quad (3)$$

В действительности дело обстоит иначе. Не следовало упрощать суть дела и забывать о том, что проблема массы электрона еще не разрешена до настоящего времени.

На стр. 7 автор сначала пишет: «Поле как вид материи возникает не только за счет вещества, но и за счет другого поля», ниже на 30 строк совершенно неожиданно для читателя утверждается: «Тепло через ряд промежуточных преобразований обращается в электромагнитное поле». А дальше на стр. 9: тела и среды при протекании по ним электрического тока способны «превращать ...электромагнитное поле как вид материи в тепло» и наконец (на стр. 10), сказано: «...величина $k = \frac{2}{\tau}$ характеризует относительную скорость превращения этих полей как видов материи в тепло».

После этого остается неясным только то, чем же является тепло — веществом или полем?! К сожалению, надо сказать, что автор статьи не разделяет современных взглядов на природу теплоты. Работа и тепло являются только мерой изменения энергии и вместе с тем они не тождественны энергии (см. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева «Курс общей физики» т. I, стр. 306).

В статье подробно рассмотрены общие черты поля и вещества, а также различия между ними. На стр. 5 автор пишет: «Электромагнитная масса сосредоточена не в заряженном теле, а в его электромагнитном поле». Заряженное тело, конечно, состоит из вещества. Следовательно, электромагнитное поле не может находиться в веществе. Вопреки этому на стр. 7 утверждается: «Вещество и поле проникаемы друг для друга. Они могут занимать один и тот же объем. Если поле и вещество могут занимать один и тот же объем, то они абсолютно проникаемы друг для друга. В этом случае нельзя объяснить существование, например, электрической и магнитной защиты».

На стр. 6 автор перечисляет основные законы, которым подчиняются процессы, происходящие как в поле, так и в веществе. После этого он указывает, что взаимосвязь частицы вещества с родственным ей полем выражается зако-

ном переменной массы. Далее следовало бы показать, что частицы вещества в родственном им поле взаимодействуют тоже по определенным законам. Так, например, на два точечных электрических заряда их общее электрическое поле действует по закону Кулона; на два элементарных участка двух контуров тока их общее магнитное поле действует по закону Ампера; на две материальные точки их общее гравитационное поле действует по закону Ньютона для всемирного тяготения и т. д. Подобного рода законы, пожалуй, в первую очередь намечают различия в свойствах полей; при помощи их прежде всего устанавливаются количественные характеристики для точек поля в виде различных значений некоторой вектор-функции или скалярной функции. Таким образом, в определении понятия поля необходимо отразить его характерные особенности, опираясь на эти законы. В статье же механические силы поля рассматриваются не дифференцированно, а в общем виде. В определении электрического поля (стр. 7) сказано, что «характерным проявлением ...является механическая сила, приложенная к неподвижному заряду». Если электрический заряд находится под действием поля, то он не останется неподвижным без дополнительных внешних на него воздействий. Механические же силы действуют на заряд в каждой точке поля. Они действуют на движущийся пучок электронов, изменяя характер движения этого пучка.

Замена формулировок закона Кулона и закона всемирного тяготения, предложенная автором статьи, является целесообразной. Подобного рода формулировка принята, например, для определения напряженности поля.

При незатухающих электрических колебаниях в колебательном контуре действительно происходит последовательное периодическое превращение электрического поля в магнитное поле и наоборот. Так, при уменьшении интенсивности электрического поля нарастает интенсивность магнитного поля и наоборот. Очевидно, автор статьи распространяет эту схему колебательного процесса и на свободно распространяющееся электромагнитное поле, когда пишет: «В свободно распространяющейся электромагнитной волне происходит непрерывное возникновение магнитного поля за счет электрического и электрического поля за счет магнитного» (стр. 7). Но в этом случае нужна увязка этого высказывания с общепринятыми положениями; например, для элементарного дипольного вибратора известно, что «В каждом данном направлении электромагнитную волну можно представить с помощью двух синусоид, лежащих во взаимно-перпендикулярных плоскостях» и «...оба вектора (E, H) колеблются в одинаковой фазе» (С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, т. II, стр. 576).

В статье встречаются попытки обобщения свойств электромагнитного поля и распространения их на другие виды полей. Опытных же данных для такого перенесения в науке пока не имеется.

Таким образом, все, что касается электромагнитного поля, что установлено и согласовано с экспериментом, необходимо ввести в курс. Для обобщения же и расширения новых положений на другие виды полей следует предварительно получить достаточные для того научные основания.

Кандидат техн. наук, доц. В. Ф. ТАБАЧИНСКИЙ

Киевская кафедра теоретических основ электротехники
Ленинградского института инженеров
железнодорожного транспорта

Статья весьма актуальна и постановка ее на широкое обсуждение своевременна. Вопрос о природе электромагнитного поля живо волнует широкие круги научных работников и инженеров, преподавателей и учащихся.

Со многими основными положениями, выдвинутыми в рассматриваемой статье, можно согласиться; однако некоторые положения встречают возражения или требуют серьезных уточнений.

Представляется сомнительным: возможно ли такие законы механики, как закон сохранения количества движения и момента количества движения, как законы, относящиеся к простым механическим формам движения материи, автоматически распространять на процессы, происходящие в электромагнитном поле, являющиеся более сложными

формами движения материи? Не будет ли это возвратом на позиции науки середины XIX столетия, когда все явления природы в той или иной мере пытались истолковать на основе законов механики?

Не будет ли правильное утверждать, например, что закону сохранения количества движения или принципу механической инерции в механических системах соответствует принцип электромагнитной инерции (принцип Ленца) в электромагнитных системах.

Необходимо отметить, что в статье вообще ощущается крен в область механики и механистических представлений. Так, например, в определении электромагнитного поля (стр. 8) автор указывает на одно и, стало быть, как на основное его проявление — «...механическое давление, производимое на определенным образом ориентированную поглощающую плоскость». Очевидно, что это свойство электромагнитного поля нельзя считать наиболее существенным его свойством.

Пример, приведенный для иллюстрации положения о сохранении момента количества движения электромагнитного поля, является неудачным и потому необудительным. Как известно, при намагничивании ферромагнитного стержня ориентированные в плоскости, перпендикулярной его оси, элементарные сверхпроводящие контуры с токами (вращающиеся электроны) не образуют вращающегося электромагнитного поля. Опыт, на который ссылается автор, доказывает только наличие элементарных круговых токов, и здесь можно говорить лишь о сохранении момента количества движения системы, состоящей из вращающихся частиц вещества.

Положение о невозможности для электромагнитного поля служить системой отсчета требует уточнений. Известно, что если в некоторой системе координат существует только магнитное поле, и другая система движется определенным образом относительно первой системы, то во второй системе обнаруживается электрическое поле. Таким образом, магнитное поле, связанное с определенной системой токов в пространстве, может служить системой отсчета. Очевидно, что то же положение может быть высказано и в отношении электрического поля. Только свободное электромагнитное поле, не будучи связано с определенными системами зарядов или токов, само никогда не может являться системой отсчета.

Двойственный противоречивый характер природы электромагнитного поля — волновой и квантовый — отображает положение диалектики о борьбе противоположностей. Обратимся к вопросу о распространении электромагнитного поля в пространстве. Вектор Умова-Пойнтинга, изображающий удельную мощность потока электромагнитной энергии, равен:

$$\vec{S} = [\vec{E} \cdot \vec{H}],$$

или модуль вектора S для случая однородной изотропной среды равен:

$$S = E \cdot H.$$

Энергия кванта — частицы электромагнитного поля — ϵ_{ϕ} равна:

$$\epsilon_{\phi} = h \cdot \nu.$$

Если поделить среднее значение величины S , т. е. количество электромагнитной энергии, проходящей в единицу времени сквозь площадку, равную единице площади и расположенную нормально к направлению распространения поля, на энергию одного кванта ϵ_{ϕ} , то, очевидно, мы получим число N частиц электромагнитного поля, пролетающих сквозь указанную площадку в единицу времени. С другой стороны, это число N равно числу частиц электромагнитного поля, находящихся и движущихся в объеме поля, который представляет собой столбик с основанием, равным указанной площадке, и длиной, численно равной скорости распространения поля c . Если теперь поделить число N на величину скорости c , то, очевидно, получится число частиц электромагнитного поля в единице его объема

$$n = \frac{N}{c} = \frac{E \cdot H}{h \cdot \nu \cdot c}.$$

Итак при заданных значениях напряженности E и H число частиц электромагнитного поля, находящихся в движении в единице его объема, обратно пропорционально частоте ν волн этого поля. С возрастанием частоты ν число квантов n в единице объема поля уменьшается и вместе с тем энергия каждого кванта увеличивается. Дискретный характер электромагнитного поля при этом усиливается. При $\nu \rightarrow \infty$ электромагнитное поле как бы теряет свой волновой характер и воплощается в поток «малочисленных» и чрезвычайно мощных частиц. Наоборот, при $\nu \rightarrow 0$ число частиц поля в единице объема $n \rightarrow \infty$. Структура поля теряет дискретность и становится как бы непрерывной. Действительно, в пределе получается статическое поле — электрическое или магнитное — в котором не существует квантов.

Процесс излучения электромагнитной энергии, который в волновой теории поля трактуется как процесс непрерывный, можно легко физически раскрыть одновременно как процесс квантовый. В процессе излучения свободного электромагнитного поля от электрической цепи отшнуровываются отдельные силовые трубки векторов E и H .

Представим себе, что энергия и масса, заключенная в каждой такой отдельной трубке вектора E и вектора H , соответственно равны между собой и составляют:

энергия электрической трубки

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \epsilon E^2 \cdot dV;$$

энергия магнитной трубки

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mu H^2 \cdot dV,$$

где V — объем трубки;

$$W_e = W_m = \frac{1}{2} h \nu;$$

масса каждой трубки

$$m = \frac{W_e}{c^2} = \frac{W_m}{c^2} = \frac{1}{2} \frac{h \nu}{c^2},$$

тогда энергия и масса совокупности этих двух трубок E и H соответственно равны энергии и массе одного кванта

$$\epsilon_{\phi} = W_e + W_m = h \nu,$$

$$m_{\phi} = 2m = \frac{h \nu}{c^2}.$$

Назовем совокупность таких двух трубок E и H квантовой цепочкой электромагнитного поля.

Так как процесс отшнуровывания трубок электромагнитного поля имеет, несомненно, прерывистый характер, то отшнуровывание квантовых цепочек и равноценно испусканию квантов.

Несколько замечаний необходимо сделать относительно определений и терминов. Термин «магнитоэлектрическая индукция», связанный с логической стороны, является все же неудачным, так как идет вразрез с установившейся в электротехнике терминологией (магнитоэлектрические машины, магнитоэлектрические приборы) и неизбежно приведет к путанице в понятиях, с чем нельзя не считаться. Термины «электрический волновой ток» и «магнитный волновой ток» следует признать неудачными. В особенности неясна физическая сущность понятия «магнитный волновой ток».

Определения сопротивления, емкости и индуктивности не являются принципиально новыми и содержат неточности даже со стороны позиций автора статьи. Так, например, в определении сопротивления говорится о том, что электромагнитное поле как вид материи превращается в тепло, но тепло это энергия; следовательно, материя превращается в энергию?

Несмотря на вышеприведенные критические замечания по содержанию статьи и спорность ряда положений, содержащихся в ней, надо приветствовать инициативу автора, решительно выдвинувшего на обсуждение одну из наиболее острых и волнующих проблем современной теоретической электротехники и физики.

Доктор техн. наук, проф. С. П. РОЗАНОВ*Кафедра электрооборудования МИХМ*

Самый факт помещения рассматриваемой статьи именно в журнале «Электричество» подчеркивает важность данной темы для электротехников. Действительно, в различных учебниках по общей и теоретической электротехнике понятие «поле» разъясняется по-разному и, что хуже, большей частью неправильно. Следует согласиться с автором в том, что необходим пересмотр ряда определений в теоретической электротехнике на основе диалектического материализма.

В обычных определениях индуктивности и емкости автор считает необходимым включать вместо слова «энергия» слова «энергия и масса». Известно, что с изменением и увеличением наших знаний о природе в старые формулировки вкладывается новое содержание, хорошо всем известное. Действительно, вряд ли кого в настоящее время введет в заблуждение относительно достоверности, например, утверждение, что электрический ток идет от плюса к минусу, или фраза «восход и заход солнца».

Против необходимости придерживаться скрупулезной точности определений, конечно, возражений быть не может, если статья на точку зрения физика. Но во всех электротехнических расчетах учитывают только превращение энергии, а неизмеримо малым изменением массы пренебрегают. Поэтому во всех электротехнических определениях, связанных с расчетами, во избежание путаницы не следует упоминать о массе.

В статье, однако, допущена погрешность. Автор пишет: «Поле как вид материи возникает не только за счет вещества, но и за счет другого поля» (стр. 7). Далее: «При падении волны из верхнего бьефа в нижний происходит изменение гравитационного поля как вида материи. За этот счет в гидрогенераторах появляется другой вид материи — электромагнитное поле». Таким образом, утверждается, что гравитационное поле может перейти в электромагнитное. Электромагнитное же поле может превратиться в вещество. Тем самым утверждается, что гравитационное поле, хотя бы через посредство электромагнитного поля может превратиться в вещество. Впрочем автор не одинок в этом своем убеждении. Такого же взгляда придерживается, например, Д. Д. Иваненко, который тоже понимает гравитационное поле как один из видов вещества¹.

Нелишне напомнить, что А. Эйнштейн считает поле не только реальностью, но даже единственной реальностью, к которой он сводит другую реальность — вещество. Он риторически спрашивает: «не следует ли вообще отказаться от понятия вещества и построить чистую физику поля, где рассматривать вещество, как области пространства, в которых поля чрезвычайно сильны»².

Совершенно очевидно, что поле как вид материи не может существовать вне времени и пространства. Их совокупность, т. е. пространственно-временной континуум, представляет собой формы существования материи. Это правильно отмечено автором статьи.

Взаимоотношения между пространственно-временным континуумом и материей те же, что между формой и содержанием. Содержание всегда существует в какой-нибудь форме. Форма не существует без содержания. Она всегда присуща определенному содержанию. Пространство и время всегда заполнены материей. Этой материей может быть как вещество, так и поле. Однако пространство и время не безразличны к заполняющей его материи. «Пустое пространство» в физическом отношении ни однородно, ни изотропно: его состояние мы вынуждены описывать при помощи десяти функций — гравитационных потенциалов. Поэтому свойства пространственно-временного континуума определяются свойствами заполняющей его материи. Какова масса материи, т. е. каковы компоненты гравитационного потенциала, таковы и компоненты так называемого метрического тензора, характеризующего геометрию пространственно-временного континуума³. Иначе говоря, гра-

витация выражает свойства пространственно-временного континуума, т. е. формы бытия материи, но не является материей.

Электромагнитное поле не выражает свойства, а выражает содержание пространственно-временного континуума.

Но форма бытия материи не может превратиться в свое содержание, в материю. Это бессмысленно. Если, например, движение есть форма бытия материи, то оно не может превратиться в самую материю. Следовательно, гравитация не может превратиться в электромагнитное поле, а через него в вещество. Эта ошибка происходит потому, что одним и тем же словом «поле» называются хотя и внешне сходные, но по существу различные физические сущности (электромагнитное поле, гравитационное «поле»).

То же самое происходит, когда говорят о «полях упругих деформаций» в твердых телах, о «поле скоростей» в текущей жидкости, о «тепловом поле» нагретого тела. В этом случае эти «поля» в отличие от поля электромагнитного или «поля» гравитационного не могут быть ни формой бытия материи, ни тем более материей, заполняющей форму бытия материи.

Во всех этих случаях придерживаться существующих формулировок и называть без оговорок все эти явления «полями» вредно, так как это вносит путаницу в понятия и ведет к ошибкам даже практического характера. Нужно найти для описания приведенных и аналогичных понятий какие-то другие определения.

Кандидат техн. наук, доц. В. М. ЛАВРОВ
МЭИС

Нельзя не признать, что в статье прямо и решительно ставятся и рассматриваются многие принципиальные вопросы о природе электромагнитного поля. Основные идеи, которые развивает автор — это идеи о том, что электромагнитное поле — вид материи, отличный от других видов материи (например, вещества), что электромагнитное поле как вид материи обладает массой и энергией, связанными известным соотношением, что электромагнитное поле может преобразовываться в другие виды материи, причем соответствующим образом преобразуются масса и энергия электромагнитного поля. Эти идеи являются достоянием современной науки и должны быть широко популяризированы.

Однако на многие из вопросов, рассмотренных в статье, современная наука не дала еще окончательных ответов и, конечно, важно, формулируя ответы на такие вопросы, отчетливо оттенять то, что еще не решено, еще не установлено. Утверждения, особенно касающиеся принципиальных положений, не подтвержденные в своем полном объеме опытом, должны высказываться как соответствующие гипотезы. К сожалению, в статье проф. О. Б. Брона встречается немало утверждений, высказанных в смысле их полной достоверности о вопросах, решенных далеко не окончательно, о вопросах, не полностью обоснованных современной наукой.

Такие утверждения приводят к рискованному упрощению вопроса, а в ряде случаев к механизму в трактовке вопросов о природе электромагнитного поля. В статье имеются также неточные и даже ошибочные положения.

При решении принципиальных вопросов важно не только смысловое содержание решения, важны также точность, последовательность и непротиворечивость формулировок и терминологии.

Отметим, прежде всего, что в определении электромагнитного поля следует оставить термин — особая форма материи, принятый в марксистской философии, и не заменять этот термин произвольным выражением «вид материи». Это выражение, как и аналогичные («сорт материи», «тип материи» и т. п.), может служить лишь пояснением основного термина.

В марксистской философии понятие формы неразрывно связывается с понятием содержания и любой конкретный объект рассматривается как единство формы и содержания. Электромагнитное поле в данном случае и является таким конкретным физическим объектом, а так как физическое содержание (сущность, субстанция) этого объекта есть

¹ Д. Д. Иваненко. «Элементарные частицы и их взаимодействие». Успехи химии, т. 17, вып. 5, стр. 545, 1948.

² А. Эйнштейн и Л. Инфельд. Эволюция физики, стр. 144, 1948.

³ А. И. Уемов. Может ли пространственно-временный континуум взаимодействовать с материей? «Вопросы философии», № 3, стр. 172—180, 1954.

материя, то отсюда и следует термин — особая форма материи.

На стр. 7 автор, основываясь на некоторых качественных отличиях в проявлениях электрического и магнитного полей, утверждает, что эти поля представляют собой два особых вида материи и электромагнитное поле — некоторый третий вид материи, т. е., что по своей физической сущности электрическое поле, магнитное и электромагнитное — суть объекты одной категории (виды материи — по терминологии О. Б. Брона). Такое утверждение — серьезная ошибка, приводящая к ложным представлениям об электромагнитном поле и электромагнитных процессах. Приняв подобное утверждение, нужно было бы заключить, что так же как возможно локализованное существование электромагнитного поля (например, «цуг» электромагнитных волн), должно быть возможно и существование локализованного электрического и магнитного полей, что в каких-то условиях можно «отфильтровать» электрическое поле от магнитного. Однако, как известно, никогда нельзя полностью локализовать электрическое поле от магнитного и наоборот. В электромагнитной волне неразрывность электрической ее стороны и магнитной очевидны. Так же и в электростатическом поле очевидна неразрывная связь его с электрическим зарядом, характеризующаяся соотношением

$$div \vec{D} = \rho.$$

А так как электрический заряд есть динамическая система, то, следовательно, он связан с магнитным полем, может быть и неощутимым в сколько-нибудь заметном удалении от этого заряда.

Точно так же и магнитостатическое поле (например, поле постоянного магнита) всегда и неразрывно связано с элементарными молекулярными токами:

$$div \vec{H} = -div \vec{I},$$

следовательно, с электрическим полем, которое также может не проявляться в сколько-нибудь заметном удалении от этих токов.

Особенно отчетливо показывается неразрывность электрического и магнитного полей в релятивистской электродинамике, в том, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ (или соответственно $\vec{D}$ и $\vec{H}$) сливаются в единый тензор электромагнитного поля.

Электрическое и магнитное поля — два специфических свойства или две стороны электромагнитного поля, отличающие эту форму материи от других (например, вещества).

Привычная терминология — «электрическое поле», «магнитное поле» — имеет историческое происхождение и, несомненно, неудачна. Однако эта терминология широко принята и вряд ли ее можно изменить. Тем важнее утверждение правильной точки зрения на электрическое и магнитное поля как на стороны единого электромагнитного поля.

Автор широко пользуется механическими понятиями и соотношениями и, проводя доказательство законов сохранения для электромагнитного поля, применяет эти механические соотношения к электромагнитному полю без существенных пояснений (раздел II, п. 3). Например, в разделе II, п. 3, абзац а, автор, выясняя принципиально важный вопрос о массе электромагнитного поля, говорит: «Согласно механическим соотношениям, давление должно быть равно изменению количества движения давящего тела, т. е. $p = m \cdot c$, откуда

$$m = \frac{W}{c^2}. \quad (2)''$$

Действительно, масса электромагнитного поля определяется по этой формуле, но рассуждение, проведенное автором, никак не оправдывает возможности применения формулы (2) к электромагнитному полю, так как электромагнитное поле имеет свои специфические законы, не сводимые к законам механики.

Цитированное рассуждение может навести читателя на ложную мысль о допустимости непосредственного применения к электромагнитному полю законов механики и о возможности сведения электромагнитных явлений к механическим. Подобный «механицизм» встречается и в других местах статьи.

Ниже — формулы (2) стр. 4 — проф. О. Б. Брон указывает в общей фразе: «...Позднее была доказана его [соотношения (2) — В. Л.] справедливость по отношению к любым видам массы и энергии». Такая общая фраза ничего не выясняет. В данном, существенном вопросе следовало бы пояснить соотношение (2), исходя из электромагнитных процессов, и в доказательстве законов сохранения для электромагнитного поля воспользоваться специфическими законами электромагнитного поля, в первую очередь — принципом Ленца.

Весьма неточно объясняется в статье одно из существенных явлений электромагнитного поля — явление излучения (раздел II, п. 3, абзац б): «...Заряженное движущееся тело окружено электрическим и магнитным полями. Изменение скорости тела вызывает изменение напряженности магнитного поля...». Заряженное движущееся тело есть конвекционный электрический ток и, как таковой, связан с электромагнитным полем (возбуждает электромагнитное поле). В рассматриваемом случае электрическое и магнитное поля взаимосвязаны; они опять-таки — две стороны электромагнитного поля.

При изменении скорости движущегося заряда изменяется не только магнитное поле, но (за счет изменения магнитного поля и возникновения вихревого электрического поля) изменяется и электрическое поле. При этом происходит процесс излучения. Процесс излучения электромагнитной волны мы можем рассчитать, но какова его внутренняя природа — это на современном уровне науки так же неизвестно, как неизвестна структура электромагнитной волны. Объяснение, которое приводит (стр. 5) автор: «Процесс образования электромагнитной волны основан на том, что при быстром изменении полярности заряженных тел или при изменении напряжения и тока в проводниках энергии и массы, распределенные в поле, не успевают вернуться к заряженному телу или к проводнику с током. Они отшнуровываются от него и начинают свое свободное движение в виде электромагнитной волны», — является примитивной механической моделью, связанной с представлением об упругих силовых трубках, их распоре, тяжении и прочих механических свойствах и, конечно, ничего принципиального не объясняющей.

Имеются неточности в определении понятий «электрическое сопротивление», «емкость» и «индуктивность» (раздел IV, п. 4, абзацы а, б, в). Правильным в определении этих величин является то, что они определены как «свойства» или «способности» соответствующих объектов. Термин «свойство» в данном случае более подходящий.

В заключение определения электрического сопротивления (стр. 9) автор говорит о превращении электромагнитного поля как вида материи в тепло. Под термином «тепло» автор понимает, как это можно заключить из разд. II, п. 7, абзац е: — тепловую энергию, т. е. кинетическую энергию хаотического движения молекул. В физике теплом называется специфический вид работы, а работа — это процесс преобразования энергии одного вида в другой. Таким образом, тепло не есть энергия. Но, принимая определение термина «тепло», как это делает автор статьи, все же нельзя говорить о переходе электромагнитного поля — формы материи — в тепловую энергию. Определение электрического сопротивления следует построить на указании преобразования электромагнитной энергии в тепловую, что фактически и происходит при прохождении тока по проводникам. Определения емкости и индуктивности автор строит на энергетической стороне процессов зарядки конденсатора и прохождения тока в индуктивности, упоминая при этом о массе, связанной с энергией.

Вряд ли нужно определения индуктивности и емкости осложнять указанием на то, что энергия, накапливающаяся в емкости и индуктивности, связана с соответствующей массой. Ведь при практическом применении емкости и индуктивности представляют интерес заряд и электрическая энергия, концентрированные в емкости, и магнитные потоко-сцепления, наводимые э. д. с. самоиндукции, и магнитная энергия в индуктивности. Эти физические объекты и должны быть использованы в определениях индуктивности и емкости.

В заключение отметим наиболее заметные погрешности и неточности по тексту статьи.

а) В статье часто употребляются выражения: «обращение материи, превращение материи (например, раздел I, стр. 4). Такое выражение неточно. По классическому определению В. И. Ленина, материя — это философская категория для обозначения объективной реальности. Разрушимость атома, говорит В. И. Ленин, неисчерпаемость его, изменчивость всех форм материи и ее движения всегда были опорой диалектического материализма. Таким образом преобразуются различные формы материи.

б) В разд. II, п. 3, абзац б утверждается, что электромагнитная масса электрона сосредоточена не в заряженном теле, а в его электромагнитном поле. Такое категорическое заключение не имеет оснований, так как структура электрона современной наукой еще не раскрыта.

в) В разделе II, п. 3, абзац г говорится об электромагнитном поле, вращающемся вокруг оси. Повидимому, автор имеет в виду эффекты Эйнштейна — Де-Гааза и Барнетта, когда делает заключение о вращении электромагнитного поля. Из этих опытов, как известно из физики, следует только то, что электроны обладают собственным механическим моментом и магнитным спином, и если в некотором намагничивающемся теле их внезапно ориентировать, то возникающий результирующий момент вращения должен быть компенсирован противоположным моментом, который может вызвать поворот упомянутого намагничивающегося тела. Никаких фактов, указывающих на вращение поля, эти опыты не дают.

г) Автор допускает неточность, когда утверждает (разд. III, п. 1), что «Всякое материальное тело занимает определенный объем, который не может одновременно занимать другое тело», а далее, что «В противоположность этому в одном и том же объеме может существовать много различных полей, не оказывающих обнаруживаемых влияний друг на друга». В неправильности первого положения можно убедиться на примере сплавов типа твердого раствора. Второе положение также неправильно, — можно привести как пример взаимодействия полей одной природы, явление интерференции когерентных световых лучей, теорию направленных радиоантенн, всю построенную на интерференции радиоволн, излучаемых системой вибраторов, а как пример взаимодействия полей разной природы, — отклонение светового луча в сильном гравитационном поле.

д) Очень неудачно сравнение, приведенное в разд. III, п. 4. Автор здесь говорит, что для свободного электромагнитного поля ускорения не существует. Но ведь также не существует ускорения для «свободного тела», т. е. тела, на которое не действуют силы. Тело, на которое действуют силы и которое ускоряется, следует, возможно, сравнить с электромагнитной волной в диэлектрике, но там ее скорость также будет меньше, чем в пустоте!

Ограничимся этими замечаниями.

Основные идеи, развитые в статье, необходимо популяризировать как можно шире, однако ряд недостатков следует исправить и отдельные вопросы существенно доработать.

Инициативу редакции журнала «Электричество», открывшей дискуссию по затронутым в статье О. Б. Брона физико-философским вопросам, имеющим важное значение для науки об электромагнитном поле, нужно приветствовать.

Доктор техн. наук, проф. О. Б. БРОН
Ленинград

Я останавлиюсь на некоторых замечаниях, опубликованных выше (к выступлению В. М. Лаврова за ограниченностью места я рассчитываю обратиться в дальнейшем).

Б. В. Грушевский согласен с тем, что в линиях электропередачи происходит передача не энергии, а электромагнитного поля. Говоря о передаче только энергии, мы делаем серьезную ошибку, отрывая движение от того, что движется. Этого не опровергает Б. В. Грушевский, но в чисто утилитарных целях предлагает сохранить старый безусловно ошибочный с материалистической точки зрения термин. С этим нельзя согласиться. Если термины «сигнализация» (передача сигналов), «телефония» (передача речи), «телеграфия» (передача письменных сообщений) и т. д. выражают целевое назначение соответствующих установок, в которых используется передача электромаг-

нитного поля, и не находятся в противоречии с нашими взглядами на физическую сущность происходящих при этом процессов, то про термин «передача энергии» этого сказать нельзя. Не нарушая правильности физических и философских взглядов в тех случаях, когда идет речь о передаче электромагнитного поля, в энергетических целях, можно применять термин «электропередача».

Утверждение, что электрическое и магнитное поля это — только две стороны единого электромагнитного поля, покоится на ошибочном предположении, что движение не меняет свойств материи. Б. В. Грушевский и также другие защищают именно такой взгляд на электрическое и магнитное поля как на две стороны электромагнитного поля, но поля в движущейся и в неподвижной системе отсчета не идентичны между собой. Если поле характеризовать энергией W и массой m , то они не равны для неподвижной и для движущейся системы отсчета. Для того чтобы привести в движение электрическое поле некоторого заряда q , имеющего радиус r , необходимо затратить энергию

$$W_m = \frac{q^2 v^2}{3r}$$

и получить массу

$$m_m = \frac{W_m}{c^2}$$

которые как раз и равны энергии и массе магнитного поля.

Для движущегося поля

$$W = W_e + W_m \text{ и } m = m_m + m_e.$$

Для неподвижного поля $W_m = 0$ и $m_m = 0$.

Поэтому

$$W = W_e; m = m_e.$$

Изменение свойств материи с движением присуще не только электрическому и магнитному полю, но и частицам вещества. Известно, что масса вещества, а стало быть, и его энергия, не равны в неподвижной и в движущейся системе отсчета

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

При движении частиц вещества наблюдается количественное изменение их основных свойств — массы и энергии, размера и формы. При движении электрического и магнитного поля вследствие явления индукции наблюдается возникновение одного поля за счет другого или за счет поступающих извне видов материи. Здесь имеют место не только количественные, но и качественные изменения, которые, однако, происходят в строгом соответствии с законами сохранения массы, энергии и количества движения.

При движении электрического заряда можно получить не только магнитное поле, сохраняющее связь с зарядом, но и новый вид материи — электромагнитную волну, которая теряет уже связь с зарядом и начинает самостоятельное движение. Это явление было обнаружено П. А. Черенковым при движении электрона в некоторой среде со скоростью большей, чем скорость света в этой среде (но меньшей, чем скорость света в пустоте). Вокруг такого электрона наблюдается свечение (эффект Черенкова).

Около заряженного тела нет единого электромагнитного поля. Если мы рассмотрим n систем отсчета, движущихся с различными скоростями, то обнаружим и n различных электромагнитных полей. Выходит, что у электромагнитного поля, окружающего заряженное тело, не две стороны (электрическая и магнитная), а столько, сколько в этом поле может существовать различных движений, т. е. сколько угодно. При движении изменяются свойства полей. Границы между различными видами материи становятся условными, относительными, в связи с чем для характеристики частиц и полей нужно выбрать систему отсчета. Когда мы говорим о массе частиц вещества, то обычно имеем в виду их массу покоя, т. е. массу в неподвижной системе отсчета. Для характеристики электрического и магнитного полей естественно выбрать такую же систему отсчета и тогда каждое из этих полей, обладающее своими индивидуальными особенностями, вырисовывается как самостоятельный вид материи.

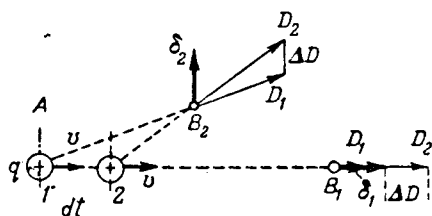


Рис. 1. Возникновение токов смещения при движении заряженного тела в диэлектрике.

Совсем другую картину представляет электромагнитная волна, которая обладает одинаковой скоростью как по отношению к движущемуся, так и по отношению к неподвижному наблюдателю. Здесь действительно электрическое и магнитное поля являются только двумя сторонами единого электромагнитного поля.

В некоторых учебниках приводится следующее соображение в пользу того, что электрическое и магнитное поля это только две стороны единого электромагнитного поля: только наблюдатель, находящийся в покое по отношению к заряженному телу, обнаруживает в пространстве, окружающем тело, одно электрическое поле; другой наблюдатель, в то же время движущийся по отношению к заряженному телу, обнаруживает около тела также магнитное поле, так как он воспринимает движение относительно его заряда тела как электрический ток.

Рассмотрим, как возникает магнитное поле при движении заряда q со скоростью v в некотором диэлектрике. Пусть заряженное тело A за время dt переходит из положения 1 в положение 2 (рис. 1). В таком случае в любой точке поля (мы рассматриваем точки B_1 и B_2) сначала существует вектор электрического смещения D_1 , а потом вектор D_2 . Разность этих векторов ΔD характеризует изменение вектора смещения за время Δt . Но $\frac{\Delta D}{\Delta t} = \delta$ есть

плотность тока смещения, который вызывает появление магнитного поля в пространстве, окружающем движущийся заряд. Энергия этого поля

$$W_m = \frac{q^2 v^2}{3r}.$$

Такую работу нужно затратить, чтобы привести заряд в движение со скоростью v .

Совсем иначе обстоит дело, когда наблюдатель движется относительно заряда. Под наблюдателем мы будем понимать какое-нибудь малое материальное тело, помещенное в электрическое поле. Пусть это тело находится в точке B (рис. 2), а в точке A находится заряд q . Пусть наблюдатель B движется навстречу заряду со скоростью v . В таком случае он действительно будет наблюдать, помимо электрического, еще и магнитное поле, однако это магнитное поле будет вызываться движением зарядов, индуцированных по поверхности тела B . Напряженность этого поля в точке B будет такая же, как если бы наблюдатель был неподвижен, а ему навстречу двигался заряд. Но при движении тела A магнитное поле вызывается всем этим зарядом q . При движении же наблюдателя B магнитное поле возникает только в результате действия малых зарядов Δq , индуцированных на поверхности тела B . Энергия магнитного поля при движении заряда q во много раз больше, чем энергия магнитного поля, вызываемого движением тела B в электрическом поле. Эти поля не идентичны. Поэтому нельзя их отождествлять.

Рассмотренный пример иллюстрирует также, как магнитное поле возникает в процессе движения электрического поля.

Утверждают иногда следующее: общий заряд тела образован совокупностью элементарных электрических зарядов, которые находятся в постоянном движении; следовательно, в заряженном теле существуют элементарные электрические токи, окруженные не только электрическим, но и магнитным полем, и только вследствие того, что элементарные токи имеют разнообразное направление, их магнитные поля почти полностью взаимно компенсируются уже на небольшом расстоянии от заряженного тела; таким образом, явление, рассматриваемое в целом, и в этом случае оказывается электромагнитным.

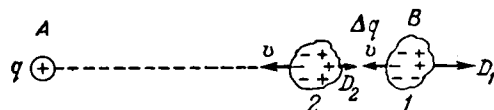


Рис. 2. Движение тела B в электромагнитном поле заряда q .

Обратим внимание на то, что нагревание тела ускоряет хаотическое движение элементарных зарядов и тем повышает напряженность элементарных магнитных полей; наоборот, охлаждение тел понижает эту скорость и ведет к уменьшению напряженности элементарных магнитных полей, но это никак не отражается на энергии, массе и напряженности электрического поля.

Значит, между электрическим полем заряженного тела и элементарными магнитными полями хаотически движущихся зарядов нет той органической связи, на которую указывают сторонники взгляда на электрическое и магнитное поле, как на две стороны единого электромагнитного поля.

Электрическое и магнитное поля удовлетворяют всем признакам самостоятельных видов материи. Каждое из них обладает своей энергией и массой. Каждое из них возникает из других видов материи и не исчезает бесследно, а обращается в другие виды материи. Каждое из них обладает своими отличительными признаками, не присущими другим видам материи. Это дает право считать электрическое и магнитное поле самостоятельными видами материи. Одной из существенных отличительных черт тех видов материи, которые мы называем электрическим и магнитным полем, является процесс электромагнитной и магнитоэлектрической индукции. Процесс движения или изменения во времени одного из этих видов материи вызывает появление другого. Этот процесс происходит в строгом соответствии с законами сохранения массы, энергии, количества движения и является особенностью электрического и магнитного поля, не присущей другим известным нам видам материи.

Представление об электрическом и магнитном полях как о самостоятельных видах материи проводится уже рядом авторов (например, С. Э. Фриш и Л. В. Тиморева. Курс физики, т. II, изд. 1952 г. Д. И. Сахаров. Физика, изд. 1953 г. и др.).

С замечаниями Б. В. Грушевского по поводу определения электрического сопротивления, емкости и индуктивности нельзя согласиться.

У нас часто нет различных терминов для физических свойств материальных тел и для величин, которые характеризуют эти свойства. Масса есть свойство материи, но масса есть и величина. Скорость есть свойство движения, но скорость есть и величина. Трение есть свойство трущихся поверхностей, но трение есть и величина. Это же положение относится к электрическому сопротивлению, емкости и индуктивности.

Давая определение свойствам, обычно исходя из физических явлений, характеризующих эти свойства. Выбирая величины, измеряющие свойства, мы исходим из методологических соображений.

Давая определения сопротивлению, емкости и индуктивности, я стремился в статье показать, какие свойства ими характеризуются, однако из приведенных в статье соотношений (14), (16) и (18) однозначно вытекает определение единиц для измерения величин сопротивления, индуктивности и емкости, а также связь этих единиц с единицами других величин, которые считаются известными. Так, полагая в соотношении (14) $P = 1 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} = 1 \text{ а}$, получаем $r = 1 \text{ ом}$, поэтому можно формулировать следующее.

Один ом есть сопротивление такого проводника, который при токе в один ампер способен ежесекундно обращать в тепло электромагнитное поле с энергией 1 джоуль.

Аналогично этому из соотношения (16) получаем:

Одна фарада есть емкость такого конденсатора, который при разности потенциалов $\sqrt{2}$ вольт способен накопить электрическое поле с энергией 1 джоуль.

Из соотношения (18) получаем:

Один генри есть индуктивность такого контура, который при токе $\sqrt{2}$ ампер способен накопить магнитное поле с энергией 1 джоуль.

Для определения приведенных единиц необходимо считать известными единицы массы, энергии, тока и напряжения. Поэтому замечание Б. В. Грушевского, что в определении сопротивления должно быть указано соотношение между этой величиной и другими, ранее определенными величинами, не основательно. Эта связь непосредственно вытекает из соотношений (14), (16) и (18). Никакой неоднозначности в моих формулах нет.

В заключение Б. В. Грушевский делает ошибку, недооценивая вредного значения попыток возрождения «энергетизма» — разновидности «физического» идеализма. Ошибка заключается в отрыве энергии от материи; с ней нужно вести решительную борьбу и не допускать терминов, поощряющих неправильные взгляды и мешающих изложению курса с позиций материалистической диалектики.

В. И. Константинов упрекает меня в том, что в статье нет объяснения механизма преобразования электромагнитного поля как вида материи в тепло. Пожелание вполне законное. Однако и я интересуюсь таким объяснением и сожалею, что В. И. Константинов не изложил его в своем выступлении. Я такого объяснения не знаю.

В. И. Константинов указывает: «...сначала увеличивается скорость движения частиц, а затем возрастает температура проводов (они нагреваются)». Это неверно: не сначала и не после, а одновременно. Нагревание и скорость движения частиц неотделимы друг от друга.

В. И. Константинов совершенно неправильно критикует выражение «в пространстве данного вида материи». Пространство не вместилище вещей, а их свойство. «Если бы исчезла где-нибудь частица вещества, то с ней исчезла бы и ее протяженность» (Спиноза). Поэтому вполне законно говорить о «пространстве данного вида материи».

В. И. Константинов отмечает, что из статьи неясно взаимоотношение между магнитным потоком и магнитным полем. Я не преследовал цели дать определение всех понятий, которые известны из теоретических основ электротехники.

Говоря об электрической емкости В. И. Константинов делает ошибку. Из приведенного мной выражения (16).

$$C = \frac{2}{U^2} W_e = \frac{2c^2}{U^2} m_e$$

следует, что емкость пропорциональна энергии W_e и массе m_e электрического поля при постоянном напряжении $U = \text{const}$. Если у заряженных тел при наличии между ними разности потенциалов энергия и масса поля равны нулю, то нулю равна и емкость. Это вполне закономерно и не должно вызывать удивления. В телах, емкость которых не равна нулю, невозможно такое положение, когда бы при наличии разности потенциалов энергия и масса поля равнялись бы нулю.

А. Ф. Метелкин и М. А. Любимов упрекают меня в том, что в вопросе о массе электрона я упрощаю дело и забываю о том, что проблема массы электрона не разрешена до настоящего времени. Но, говоря о массе электрона, я указал, что вопрос рассматриваю согласно классической теории. Кроме того, я указал, что электрон имеет массу, состоящую из двух частей — «из механической (точнее неэлектромагнитной) массы и массы электромагнитного происхождения» — и это согласуется с известными в настоящее время явлениями и никем не оспаривается.

«Наличие механической массы у электрона вместе с электромагнитной не противоречит известным опытам» (Н. Ф. Овчинников. Понятие массы и энергии в современной физике. Философские вопросы современной физики. АН СССР, 1952, стр. 420).

«Хотя, таким образом, сведение всей массы электрона к электромагнитной массе не может считаться оправданным, несомненно, что часть его массы — электромагнитного происхождения» (Э. В. Шпольский. Атомная физика. т. 1, стр. 45, 1949).

Спорным является не вопрос о том, что у электрона имеется масса электромагнитного происхождения, а вопрос

о том, какая часть массы электрона механического (неэлектромагнитного) происхождения и какая часть массы электромагнитного происхождения. Для решения этого вопроса нужны совершенно новые эксперименты. В статье рассматривается поле как вид материи. Важно было отметить, что электрон имеет массу электромагнитного происхождения, и вовсе не существенно: вся ли эта масса или часть ее и какая часть. Поэтому, не входя в подробности распределения массы электрона, никаких упрощений сути дела автор не допустил.

А. Ф. Метелкин и М. А. Любимов утверждают, что из статьи неясно, чем же является тело — веществом или полем? При нагревании тела увеличивается его энергия, а стало быть, и масса. Если по массе тела судить о количестве вещества в нем, то при нагревании тела оно увеличивается, хотя число частиц тела остается неизменным, но возрастает их масса и энергия.

Говоря о том, что поле и вещество взаимно провицаемы друг для друга, что они могут занимать один и тот же объем и что при этом поле «изменяет состояние вещества, а вещество в свою очередь влияет на поле, я имел в виду только макроскопические процессы. Нам неизвестно, что делается внутри так называемых элементарных частиц. В настоящее время нет никаких данных, которые позволили бы говорить о том, есть ли нет поля внутри электрона или позитрона, поэтому распространять указанные выше положения на области внутриэлементарных частиц пока нет оснований, а для всех остальных областей они сохраняют свою силу. Электрическая и магнитная защиты обусловлены именно тем, что вещество влияет на поле. На внешнее поле накладывается поле, вызываемое наличием вещества. В тех местах, которые хотят защитить, внешнее поле ослабляется действием поля, возбуждаемого веществом.

В вопросе об обмене энергии между электрическим и магнитным полем А. Ф. Метелкин и М. А. Любимов допускают ошибку. Этот процесс происходит не так, как в колебательном контуре, и поэтому сдвига по фазе на 90° между полями не требуется, но зато возникает пространственный сдвиг на 90° . Рассмотрим движение проводника l (рис. 3) в равномерном магнитном поле, направленном перпендикулярно к проводнику и к скорости его движения v . В таком случае на концах проводника возникает э. д. с.

$$e = Blv.$$

Переходя к длине $l = 1$ и к скорости $v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, получим:

$$E = Bc = \frac{B}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{H \mu_0}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = H \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}.$$

Это соотношение сохраняет силу и при отсутствии проводника. Из него получаем известное равенство

$$E \sqrt{\epsilon_0} = H \sqrt{\mu_0}.$$

Возводя его в квадрат и деля на два, получим:

$$\frac{E^2 \epsilon_0}{2} = \frac{H^2 \mu_0}{2}.$$

Если движение происходит без действия внешних сил, что имеет место в электромагнитной волне, то энергия одного поля в любой данный момент времени возникает за счет энергии другого поля, и форма кривых, выражающих зависимость E и H от t , должна быть одинаковой и должна совпадать по фазе.

Следует согласиться с А. Ф. Метелкиным и М. А. Любимовым, что нельзя все свойства электромагнитного поля распространять и на другие поля. Но этого я и не пытался делать. Я распространяю на все поля только соотношения

$$m = \frac{W}{c^2},$$

а также законы сохранения, и утверждаю, что «общность картины силовых и равнопотенциальных линий характери-

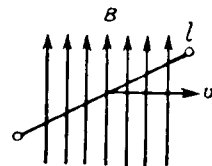


Рис. 3.

зует одинаковое пространственное распределение массы и энергии у этих полей». Это положение вытекает из приведенного выше соотнесения и не опровергнуто.

Сомнения, высказанные В. Ф. Табачинским, не основательны. Законы сохранения массы, энергии, количества движения и моментов количества движения имеют всеобщее значение. Им подчиняются как механические процессы, так и процессы, связанные с электромагнитным полем. Неизвестно ни одного случая, в котором имели бы место отступления от этих законов.

Закон Ленца связан не с движением электромагнитных масс (в узком понимании), а с процессом преобразования электрического поля в магнитное и наоборот. Поэтому он не может заменить закон сохранения количества движения.

По поводу упрека В. Ф. Табачинского, что «в статье вообще ощущается крен в область механики и механистических представлений», необходимо заметить следующее. Дело не в том, что при рассмотрении электромагнитных процессов мы отказываемся от механических законов вообще, а в том, что процессы преобразования одних полей в другие, как равно и процессы преобразования поля в вещество, мы не можем свести к механическим законам и на это обращено внимание в моей статье. Существенным для электромагнитного поля является не одно механическое давление, а наличие двух взаимно связанных на основе электромагнитной и магнитоэлектрической индукции полей — магнитного и электрического. Механическое же давление является только одним из проявлений этого поля. Именно это и указано в моем определении. Можно было бы указать и на другое проявление электромагнитного поля, а именно на механическое воздействие на электрический заряд.

Приведенные в моей статье опыты Эйнштейна и де Гааза (вращение ферромагнитного стержня в цилиндрической катушке при намагничивании) и опыты Барнета (намагничивание стержня при быстром вращении) являются общепризнанным доказательством наличия момента количества движения у электромагнитного поля (см. Э. В. Шпольский, Атомная физика, т. 1, стр. 173—174). Этот вопрос, полагаю, не является дискуссионным, и высказывания В. Ф. Табачинского по этому вопросу ошибочны.

В статье идет речь о том, что электромагнитное поле (имеется в виду электромагнитная волна) не может служить системой отсчета. Скорость электромагнитной волны в любой движущейся системе отсчета сохраняет постоянное значение. Именно это показали опыты Майкельсона и Марлея, Трутона и Нобеля. Этот вопрос, повидимому, не является дискуссионным.

Движение любого замкнутого контура в равномерном магнитном поле дает э. д. с., равную нулю, именно поэтому попытки использовать движущиеся проводники в земном магнитном поле для определения скорости корабля или самолета не увенчались успехом.

В. Ф. Табачинский должен был бы объяснить, почему термин «волновой ток» представляется ему неудачным. Ведь говорим мы «волновое сопротивление», «волновая

проводимость». Ныне применяемый термин «ток смещения» противоречит существу процесса и заставляет искать механические модели там, где их нет.

С. П. Розанов не прав, говоря, что в статье взяты обычные определения индуктивности и емкости и включены в них вместо слова «энергия» слова «энергия и масса». Старые определения сопротивления емкости и индуктивности были чисто формальными. Давая новые определения, автор старался отразить в них физическую сторону процессов, связанных с полем как видом материи. Дело заключается вовсе не в том, что в этих определениях рядом со словом энергия написано слово масса, а в том, что показано, какие материальные процессы лежат в основе описываемых свойств. Хотя масса электромагнитного поля действительно мала по сравнению с массой вещества, однако не говорить о ней в определениях, как это предлагает С. П. Розанов, нельзя. Упоминание это имеет принципиальное значение. Забывая о массе и говоря только об энергии поля, мы рискуем скатиться на позиции философского энергетизма — разновидности идеализма. Мне часто приходится слышать от некоторых инженеров и научных работников: «а что в электромагнитном поле есть кроме энергии?» Пользуюсь случаем, чтобы подчеркнуть вновь, что самостоятельное существование энергии, не связанной с материей, и есть основное положение «энергетиков-идеалистов». Пренебрегать массой электромагнитного поля нельзя даже в ряде практических расчетов. Масса есть мера инертных свойств материи. Электрон не может мгновенно изменить свою скорость в связи с тем, что его масса имеет электромагнитное происхождение. Если бы электромагнитное поле не обладало массой, то все переходные процессы в электрических цепях совершались бы мгновенно. Мы часто говорим об электромагнитной инерции электрических цепей, забывая, что она связана с наличием инерции у электромагнитного поля.

При рассмотрении вопроса о превращении гравитационного поля в электромагнитное поле, на чем далее останавливается С. П. Розанов, я исхожу из следующих соображений. Пусть некоторый груз P поднят на высоту h над поверхностью земли. Для того чтобы поднять груз на эту высоту, пришлось совершить работу $Ph = W$. Но энергия неразрывно связана с массой и поэтому $m = \frac{W}{c^2}$. Так как

при подъеме груза на высоту h не изменились ни масса земли, ни масса груза, то следует заключить, что эта масса m принадлежит гравитационному полю, которое возникло между грузом и землей. При падении груза на земное освобождаются энергия W и масса m , а гравитационное поле претерпевает соответственные изменения. Отсюда заключаем, что освобожденные энергия и масса получены за счет изменения гравитационного поля. Эти энергия и масса могут быть переданы какому-нибудь двигателю, и потому через ряд превращений обращены в электромагнитное поле. Эту энергию и массу можно непосредственно обратить в электрическое поле, если груз упадет, например, на пьезокристалл, или в какой-нибудь другой вид материи.

НАСЫЩАЮЩИЕСЯ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА С КОРОТКОЗАМКНУТЫМИ ВИТКАМИ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

(Статья А. Д. Дроздова, *Электричество*, № 10, 1953)

Инж. Г. Ф. ЭДЕЛЬШТЕЙН

г. Чебоксары

Быстронасыщающиеся трансформаторы нашли весьма широкое применение, чему способствовали присущие им особые параметры, позволяющие отстраивать дифференциальную защиту силовых трансформаторов от бросков намагничивающего тока, при одновременном сохранении достаточно высокой степени чувствительности к внутренним повреждениям. Естественно, что всякое новое слово в области этой новой аппаратуры не может не привлечь внимания.

Описанные А. Д. Дроздовым насыщающиеся трансформаторы с короткозамкнутыми витками обладают интерес-

ными свойствами и более совершенны, чем обычные насыщающиеся трансформаторы. На наш взгляд основное, новое качество трансформаторов, предлагаемых автором, — это возможность произвольно регулировать характер зависимости относительного тока срабатывания от коэффициента смещения.

Работы, проведенные нами в 1952—1953 гг., однако, дают основание подвергнуть сомнению некоторые положения, высказанные автором статьи. Одновременно с тем мы хотели бы указать на особенности новых трансформаторов, выявившиеся в процессе работы с ними.

1. Автор статьи указывает, что одно из преимуществ насыщающегося трансформатора с короткозамкнутой об-

моткой — возможность регулирования тока срабатывания движком реле. Более поздние работы показали, что в первый момент броска намагничивающего тока защищаемого трансформатора его короткозамкнутая обмотка задерживает и аperiodическую составляющую, и в этих условиях насыщающийся трансформатор с короткозамкнутыми витками ведет себя так же, как и обычный. Поэтому рабочую индукцию в обоих случаях нужно выбирать одинаковой.

Если это так, то вряд ли целесообразно регулировать ток срабатывания движком реле: выбрав индукцию для минимального значения тока срабатывания из условий надежной отстройки от бросков намагничивающего тока, можно получить при регулировании тока срабатывания движком реле недопустимо большое значение рабочей индукции при максимальном значении тока срабатывания. Степень надежности и время действия защиты при этом будут ухудшены.

Выбор значения рабочей индукции как для обычного, так и для насыщающегося трансформатора с короткозамкнутой обмоткой можно произвести на основании следующих соображений.

На рисунке представлена петля гистерезисного цикла ферромагнитного материала. В четвертом квадранте на оси ординат даны синусоида тока в первичной обмотке насыщающегося трансформатора, при котором реле, включенное в его вторичную цепь, трогается, и кривая броска намагничивающегося тока в первый период.

Из рисунка следует, что если магнитопровод трансформатора не был предварительно намагничен, то изменение индукции за один период синусоидального тока, при котором реле срабатывает, составит:

$$\Delta B_p = 4B_p - B_{rp}, \quad (1)$$

а при броске намагничивающего тока:

$$\Delta B_2 = 2B_2 - B_{r2}, \quad (2)$$

где B_p — рабочая индукция;

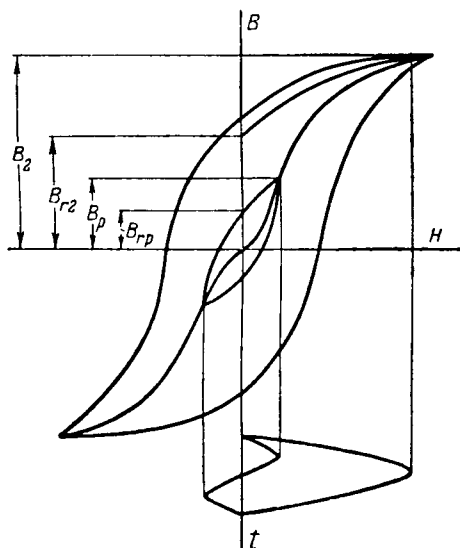
B_{rp} — остаточная индукция при намагничивании до индукции B_p ;

B_2 — индукция при броске намагничивающего тока.

Так как э. д. с. вторичной обмотки насыщающегося трансформатора пропорциональна скорости изменения потока, то при желании отстроить защиту от бросков намагничивающего тока необходимо обеспечить условие:

$$\Delta B_p > \Delta B_2. \quad (3)$$

Учет максимально возможных бросков намагничивающего тока приводит к замене индукции B_2 индукцией насыщения стали B_s , а индукцию B_{r2} остаточной индукцией B_{rs} при намагничивании до индукции B_s .



Приняв, кроме того, $B_{rp} = B_p$, что дает дополнительный запас, условия отстройки от бросков намагничивающего тока можно представить в виде:

$$B_p \geq \frac{2B_s - B_{rs}}{3}. \quad (4)$$

Таким образом, выбрав материал для магнитопровода насыщающегося трансформатора, можно определить минимальное значение рабочей индукции, необходимое для отстройки защиты от бросков намагничивающего тока. Повышать индукцию значительно не следует, так как ухудшаются другие параметры защиты.

2. Изложенное выше делает сомнительным указание автора статьи о том, что трансформаторы с короткозамкнутыми витками дают значительно большие кратности вторичного тока при коротком замыкании в зоне защиты, чем обычные насыщающиеся трансформаторы.

Если рабочие индукции в обоих случаях следует выбирать одинаковыми, то о значительно больших кратностях вторичного тока вряд ли можно говорить. Вероятно, будут получены несколько большие кратности вторичного тока за счет того, что при значительных кратностях первичного тока короткозамкнутая обмотка уже не полностью уничтожает переменное магнитное поле, что приводит к увеличению числа действующих первичных ампервитков и увеличению магнитной проводимости за счет изменения пути магнитного потока.

3. Следует указать, что, если в кривой тока внутреннего повреждения будет содержаться аperiodическая составляющая, время действия защиты при применении насыщающегося трансформатора с короткозамкнутыми витками может быть больше, чем в случае применения обычного насыщающегося трансформатора, следовательно:

1) насыщающиеся трансформаторы с короткозамкнутыми обмотками дают значительные преимущества при отстройке защиты от частично смещенных бросков намагничивающего тока;

2) при отстройке от полностью смещенных бросков намагничивающего тока трансформаторы нового типа явных преимуществ не имеют;

3) применяя насыщающиеся трансформаторы с короткозамкнутыми витками, следует учитывать возможное увеличение времени действия защиты;

4) внедрение в эксплуатацию трансформаторов с короткозамкнутыми витками вполне целесообразно; конструктивно их следует оформить так, чтобы представлялась возможность исключить действие подмагничивающей обмотки и варьировать характер зависимости относительного тока срабатывания от коэффициента смещения.

Кандидат техн. наук, доц. А. Д. ДРОЗДОВ

Новочеркасский политехнический институт

На основании выведенных формул Г. Ф. Эдельштейн обосновал минимальные рабочие расчетные индукции насыщающихся трансформаторов тока, что является весьма ценным, однако некоторые его положения могут быть уточнены.

На основании полученных осциллограмм можно заключить, что большее влияние на работу насыщающихся трансформаторов оказывает остаточная индукция. Если однополярный бросок первичного тока противоположен по действию остаточному потоку, то в первый момент возникает большой пик вторичного тока.

Судя по петле гистерезиса, при этом имеется значительное изменение индукции за период, которое можно по методу Г. Ф. Эдельштейна выразить следующим образом:

$$\Delta B_2 = 2B_{\text{макс}}$$

При синусоидальном токе срабатывания за один период¹ (но не за первый) изменение рабочей индукции

$$\Delta B_p = 4 \cdot B_p$$

¹ Реле всегда имеет возможность сработать в последующие периоды.

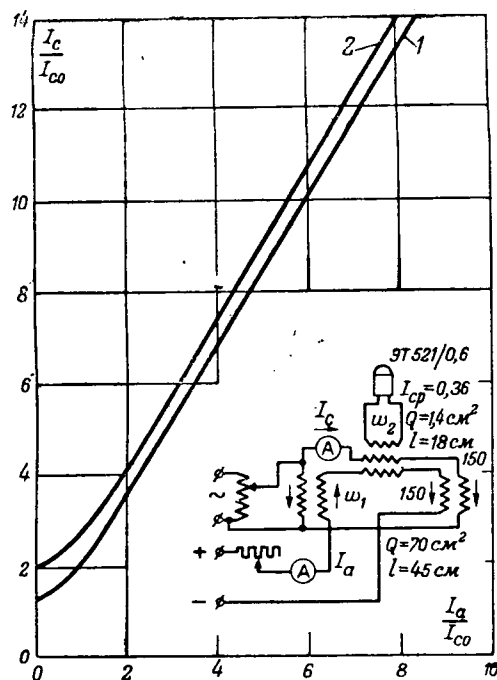


Рис. 1. Характеристики срабатывания реле с насыщающимся трансформатором тока при несинусоидальных токах I_c с аperiodической слагающей I_a ; I_{co} — синусоидальный ток срабатывания при $I_a = 0$ (кривая 1: $w_1 = 86$; $I_{co} = 0,268$; $w_2 = 6$; $B = 1,14 \frac{в \cdot сек}{м^2}$; $I_{co} w_1 = 23$; кривая 2: $w_1 = 95$; $I_{co} = 0,36$; $w_2 = 5$; $B = 1,315$; $I_{co} w_1 = 34,2$).

Если принять, что реле реагирует на среднее из абсолютных значений э. д. с. за период, которое при монотонном изменении потока пропорционально разности максимального и минимальных потоков, то условие отстройки реле от бросков тока одного направления выражается следующим образом:

$$\Delta B_p > \Delta B_2, \quad B_p > 0,5 \cdot B_{\max}.$$

В действительности реле реагирует главным образом на первую гармоническую напряжения, а $B_{\max}$ не является постоянной величиной, поэтому последнее условие надо считать приблизительным. Кроме того, следует учитывать время срабатывания реле. При отсутствии внутреннего короткого замыкания через реле, подключенное к вторичной обмотке насыщающегося трансформатора любого типа, протекает сравнительно небольшой ток, поэтому реле может сработать неправильно лишь за несколько периодов и не реагирует на первый пик вторичного тока. Если не учитывать первого пика, то условие отстройки защиты от однополярных импульсов будет:

$$B_p > 0,5 (B_{\max} - B_{\text{ост}}).$$

Решающую роль при неправильных срабатываниях играют обратные полуволны тока. Они появляются вследствие поглощения аperiodической слагающей основными трансформаторами тока и автотрансформаторами. Кроме того, обратные полуволны наблюдаются в токе включения трехфазных трансформаторов, если их включать при отсутствии заземленной нейтрали, соединенной с системой (рис. 3а, б), поэтому рабочую индукцию приходится выбирать выше, чем по последней формуле, а именно $(0,55 \dots 0,66) B_{\max} = 11\,000 \dots 13\,500$ гс.

Для суждения о роли рабочей расчетной индукции важно испытать насыщающиеся трансформаторы при несинусоидальных токах, аналогичных токам небаланса и броскам намагничивающего тока силовых трансформаторов. На рис. 1 показана схема такого испытания и характеристики, построенные в относительных единицах. Начальный синусоидальный ток срабатывания I_{co} определялся при

предварительном опыте. Затем в схеме рис. 1 при неизменном значении постоянного тока увеличивались напряжение и намагничивающий несинусоидальный ток (основного, правого, трансформатора) до срабатывания реле. Идентичный левый трансформатор предупреждал индуктирование переменного напряжения в цепь постоянного тока. Приведенные кривые, а также ряд других опытов показывают, что несколько лучшую отстройку от несинусоидальных токов дает насыщающийся трансформатор с большей индукцией (в пределах $0,8 \dots 1,4 \frac{в \cdot сек}{м^2}$). С увеличением рабо-

чей индукции более надежно исключается реагирование реле на токи небаланса, отчасти вследствие некоторого повышения времени срабатывания при небольших кратностях первичного тока. С другой стороны, возрастание рабочей индукции влечет за собой увеличение времени срабатывания и снижение кратности вторичного тока при внутренних повреждениях. На основании всего сказанного в небольших пределах рабочую индукцию вполне допустимо и целесообразно изменять движком реле, для чего необходима шкала.

Если основные трансформаторы тока имеют большое число первичных ампервитков, достаточное сечение магнитопровода и не насыщаются при малых напряженностях поля, а нейтраль силовых трансформаторов заземлена и требуется создать более действующую защиту, то можно принять несколько меньшую рабочую индукцию для насыщающегося трансформатора тока. При худших основных трансформаторах тока индукцию целесообразно несколько повышать. При одинаковой отстройке от бросков тока включения у трансформаторов с короткозамкнутыми витками получается меньшая рабочая индукция.

Возможность регулирования индукции подтверждается тем, что в настоящее время в Советском Союзе применяются насыщающиеся трансформаторы тока с различными рабочими индукциями и большинство их зарекомендовало себя с лучшей стороны.

Шкала с делениями, помимо прочего, желательна для проверки кратности вторичного тока, которую следует определять как отношение вторичных токов срабатывания при пяти- или трехкратном изменении первичного тока.

При изменении индукции от $1,14$ до $1,315 \frac{в \cdot сек}{м^2}$ синусоидальный ток срабатывания увеличивается в 1,5 раза. Время срабатывания согласно рис. 2 возрастает при пятикратном токе с $0,022$ до $0,028$ сек, что в большинстве случаев не существенно, а коэффициент надежности уменьшается с $1,48$ до $1,3$. В заключение можно сказать, что вполне осуществимо изменение тока срабатывания на $20 \dots 30\%$ посредством движка реле. Для более широкого регулирования следует переключать первичные витки.

Значительно большее снижение времени действия защиты, чем путем понижения индукции, можно получить

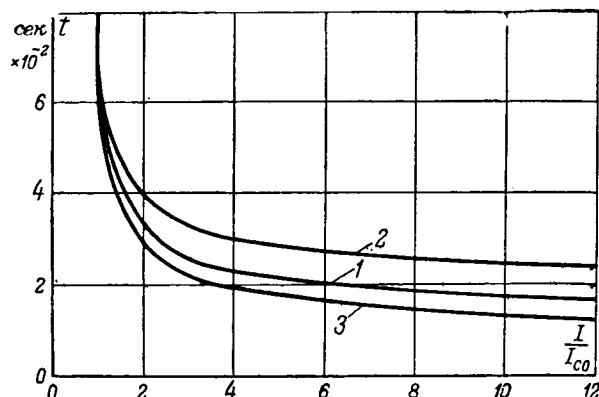


Рис. 2. Время срабатывания реле в зависимости от кратности первичного тока.

1, 2 — при различных индукциях насыщающегося трансформатора тока; 3 — при наличии последовательного активного сопротивления в цепи реле; k_n — кратность вторичного тока при пятикратном первичном токе.

$$1 - B = 1,14 \frac{в \cdot сек}{м^2}; k_n = 1,48; 2 - B = 1,315 \frac{в \cdot сек}{м^2}; k_n = 1,3;$$

$$3 - R = 4Z_p = 3 \text{ ом}; B = 1,29 \frac{в \cdot сек}{м^2}; W_1 = 103; W_2 = 20; I_{co} = 0,357; k_n = 1,46.$$

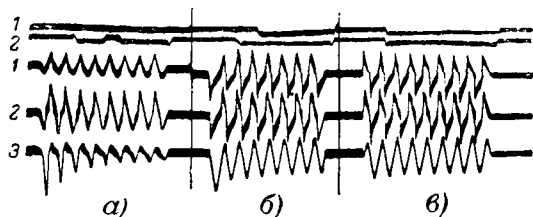


Рис. 3. Осциллограммы работы насыщающихся трансформаторов тока.

а — при включении трехфазного силового трансформатора; б, в — при включении однофазной индуктивности (внутренние короткие замыкания с различными аperiodическими слагающими). 1 — ток контактов и обмотки реле насыщающегося трансформатора тока с короткозамкнутыми витками; $W_{KB} = W_{KC} = 6$, диаметром — 1,6 мм и с одной обмоткой в дифференциальной цепи; $W_C = 19$, средний стержень — 2,8 см, $I_{CP} = 1,43$ см; 2 — то же обычного насыщающегося трансформатора тока; 3 — первичный ток насыщающихся трансформаторов тока.

(при обычном насыщающемся трансформаторе), включив активное сопротивление последовательно с реле (кривая 3, рис. 2). Тогда увеличение сопротивления реле, сопутствующее повороту якоря, почти не уменьшает вторичного тока. Следовательно, при желании осуществить особо быстродействующую защиту можно применить последовательное активное сопротивление. Следует, однако, помнить, что чем быстрее действует защита, тем сильнее она реагирует на токи небаланса.

Теоретические выводы и осциллограммы показывают, что при синусоидальном первичном токе (внутреннее короткое замыкание) вторичное напряжение насыщающегося трансформатора без короткозамкнутого витка получается несинусоидальным с резко выраженными нечетными гармониками. Этим объясняется то, что последовательное индуктивное сопротивление во вторичной цепи, которое ограничивает токи высших гармонических, не убыстряет действия реле при больших первичных токах. При несинусоидальном первичном токе (подобном намагничивающему току) и при определенном числе витков первичной обмотки трансформатора вторичное напряжение приближается к синусоиду.

Насыщающиеся трансформаторы с короткозамкнутыми витками при наличии аperiodической слагающей сильно ограничивают уже вторую полуволну и дают лучшую отстройку от не полностью смещенных токов небаланса. Это подтверждает осциллограмма рис. 3,а. Оба трансформатора (кривые 1 и 2) при работе на реле имели одинаковую чувствительность — 3,а и кратность вторичного тока 1,3 при трехкратном первичном токе.

На рис. 3,а видно, что реле с обычным трансформатором (кривая 2) срабатывало, в то время как трансформатор с короткозамкнутыми витками предупреждал неправильную работу реле при включении трехфазного силового трансформатора. На рис. 3,б и в показана работа трансформаторов при включении дроссельной катушки с пятикратным периодическим током в 15 а, что соответствует случаю внутреннего повреждения. Рис. 3,б соответствует сравнительно редкому случаю, когда аperiodическая слагающая имеет наибольшее значение. Тогда даже обычный насыщающийся трансформатор дает задержку срабатывания реле, но трансформатор с короткозамкнутым витком дает увеличенную задержку на 1,5 периода. В большинстве же случаев никакого увеличения задержки не наблюдалось (рис. 3,в). Уменьшая путем снижения числа короткозамкнутых витков на среднем стержне добавочное подмагничивание от аperiodической слагающей, можно снизить возможное увеличение задержки до нуля и сблизить характеристики обоих трансформаторов.

Заключение. 1. Г. Ф. Эдельштейн сделал правильный вывод, что основным преимуществом насыщающихся трансформаторов с короткозамкнутыми витками является возможность регулировки отстройки от токов небаланса и сравнительно большая нечувствительность к полностью сдвинутым токам.

2. Предпочтение следует отдать схеме с одной катушкой в дифференциальной цепи, как более удобной для регулировки, для которой снята осциллограмма рис. 3.

3. Для насыщающихся трансформаторов любого типа заводу надо выпускать реле со шкалой и движком. В эксплуатации рабочую индукцию можно несколько изменять, например в пределах 11 000...13 500 гс.

ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ С ПРОДОЛЬНЫМ ПОЛЕМ

(Статья О. И. Золотарева, *Электричество*, № 3, 1953)

Инж. И. Н. РАВИНОВИЧ, инж. В. Ф. БАЙКО,
инж. А. А. ВАВИЛОВ

Завод „Электросила“

В первом разделе своей работы „Постановка задачи“ автор делает ряд неправильных допущений, что приводит его к ошибочным выводам.

Действительно, как видно из выражения на стр. 28:

$$e = (I_1' + i) R_k = i(R_a + R_c + R) + L \frac{di}{dt},$$

автор полагает, что полезный магнитный поток, созданный н. с. обмотки независимого возбуждения изменяется во времени по тому же закону, что и ток в этой обмотке. Это предположение снижает практическую ценность полученных выводов, так как не учтено демпфирующее влияние обмотки самовозбуждения, вихревых токов и влияние постоянной времени обмотки независимого возбуждения, а, как известно, все это значительно замедляет нарастание полезного результирующего потока машины. Поэтому нельзя согласиться с тем допущением автора, что ток I_1' устанавливается мгновенно.

Если даже и принять это допущение, то из уравнения

$$i = \frac{R_k}{L} I_1' t + A$$

не следует, что „В ненасыщенной части характеристики холостого хода установившийся режим невозможен. Если выключить обмотку независимого возбуждения ($I_1 = 0$), то э. д. с. машины станет равной нулю“ (стр. 27).

К этим выводам автор приходит, считая, что машина не была намагничена до включения тока I_1 , тогда при $t = 0$ $i = 0$, откуда $A = 0$ и $i_1 = \frac{R_k}{L} I_1' t$. И дальше:

„Если отключить обмотку независимого возбуждения, то при $I_1 = 0$ ток i в обмотке самовозбуждения и э. д. с. e равны нулю при любом I , чем доказано, что при выключении тока I_1 машина теряет возбуждение“ (стр. 28).

Высказывая эти положения, автор, вероятно, забывает, что в момент отключения обмотки независимого возбуждения машина уже намагничена и начальные условия будут уже другие. А именно: при $t = 0$ $I = 0$ и $i = i_0$ и, следовательно, постоянная интегрирования $A = i_0$, где i_0 — ток в цепи самовозбуждения в момент отключения обмотки независимого возбуждения.

Таким образом, при совпадении характеристики самовозбуждения с прямолинейным участком кривой намагничивания усилитель, вопреки утверждениям автора, может сохранять напряжение на своих зажимах при выключенной обмотке независимого возбуждения. Это подтверждается практикой работы как одноступенчатых, так и двухступенчатых усилителей, изготовленных в лаборатории

электрических машин Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) и на заводе „Электросила“ им. Кирова.

Совершенно необоснованным является то положение автора, что при наличии отрицательной обратной связи по напряжению характеристика цепи самовозбуждения не может совпадать с прямолинейной частью характеристики намагничивания. Так, автор утверждает:

„Если включить обмотку обратной отрицательной связи по напряжению при включенном токе I_1 , то ток $I'_n = I_n \frac{W_n}{W_c}$, даже равный току I'_1 , не может сместить характеристику цепи возбуждения параллельно самой себе, а только повернет ее на определенный угол. Разница во влиянии токов I'_1 и I'_n на положение характеристики цепи возбуждения заключается в том, что ток I_1 не зависит от тока I и остается величиной, постоянной при любом I , в то время как величина I_n зависит от I , и при $I=0$ ток I_n тоже равен нулю. При этом (при $I=0$ и $I_n=0$) получаем из уравнения характеристики цепи возбуждения

$$E = I(R + R_a + R_c) = 0,$$

а из уравнения прямолинейной части характеристики холостого хода:

$$E = (I + I'_1 - I'_n) R_k = I'_1 R'_k \quad (\text{стр. 28}).$$

Однако при этом не было учтено, что при наличии тока I'_1 токи I и I_n не могут быть равны нулю, так как установившийся режим в пределах прямолинейного участка кривой намагничивания возможен только при $I'_1 = I'_n$, и, следовательно, напряжение усилителя не равно нулю.

Совершенно неправильно делать выводы из сравнения уравнений

$$E = I(R + R_a + R_c) = 0$$

и

$$E = (I + I'_1 - I'_n) R_k = I'_1 R'_k$$

(при $I=0$ и $I_n=0$), которые справедливы для различных режимов работы, а именно: первое для случая, когда $I'_1=0$, $I=0$ и $I'_n=0$, а второе, когда $I'_1 \neq 0$ и, следовательно, $I \neq 0$ и $I'_n \neq 0$.

Кроме этих ошибочных положений, составляющих основу рассматриваемой работы, является также спорным определение автором основных признаков электромашиного усилителя с продольным полем: „1) ненасыщенная магнитная цепь; 2) наличие продольного комбинированного возбуждения в виде обмоток независимого возбуждения и самовозбуждения; 3) наличие обратной отрицательной связи по напряжению; 4) сопротивление цепи самовозбуждения равно критическому“ (стр. 27).

В этих определениях автор не учитывает, что наличие обратной отрицательной связи по напряжению является особенностью не усилителя, а схемы, в которой он используется, а также и то, что обратная связь может быть не только по напряжению, но и по току, скорости вращения и т. д.

Необязательно, а в некоторых случаях и невозможно выбрать сопротивление цепи самовозбуждения равным критическому. Поэтому третий и четвертый признаки не являются характерными и обязательными для этого электромашиного усилителя.

Таким образом, статья кандидата техн. наук. доц. О. И. Золотарева „Электромашинные регуляторы с продольным полем“, как содержащая ряд ошибочных положений, не может быть использована при исследовании и проектировании электромашиных усилителей с самовозбуждением.

Кандидат техн. наук О. И. ЗОЛОТАРЕВ

1. В работе мной рассматриваются машины постоянного тока с тремя обмотками возбуждения: основной обмоткой самовозбуждения и двумя обмотками управления, из которых одна обмотка независимого возбуждения, а другая — обратной отрицательной связи по напряжению.

Обмотка обратной связи, по существу, есть разновидность обмотки самовозбуждения, что с предельной очевидностью следует из схемы рис. 1,б (стр. 27), поэтому целесообразно введение эквивалентной цепи самовозбуждения, сопротивление которой определяется формулами (2), (8) или (3), (10). Пользование характеристикой эквивалентной цепи самовозбуждения позволяет разрешить графически некоторые важные вопросы — построения внешней характеристики и др.

Введение эквивалентной цепи самовозбуждения, что является основным содержанием моей работы, не встретило возражений ни со стороны рецензента, ни при обсуждении работы на кафедрах электрических машин ВИА и МЭИ. Авторы замечаний также не привели ни одного веского довода против справедливости такого приема.

2. Все возражения направлены против первого раздела работы «Постановка задачи».

В литературе, в частности в [Л. 3], принят следующий метод рассмотрения: обмотки управления заменяются одной эквивалентной и рассматривается влияние этой эквивалентной цепи управления на характеристику цепи самовозбуждения.

Обмотки управления оказывают неодинаковое влияние на характеристику цепи самовозбуждения: обмотка независимого возбуждения перемещает ее параллельно самой себе, а обмотка обратной отрицательной связи по напряжению поворачивает ее на некоторый угол.

Смещение характеристики цепи самовозбуждения параллельно самой себе под влиянием эквивалентной обмотки управления приводит к неверным представлениям.

Рассмотрим это положение для схемы рис. 1,б (стр. 27) при $r=0$ (последовательная обмотка самовозбуждения отсутствует). На рис. 1 приведены характеристика холостого хода и характеристика цепи самовозбуждения при различных комбинациях обмоток возбуждения. Линия AM на рисунке изображает характеристику эквивалентной цепи самовозбуждения, и каждая точка этой линии имеет определенный физический смысл, позволяя построить внешнюю характеристику при помощи реактивного треугольника abc , стороны которого, как известно, можно принять пропорциональными току якоря.

Линия BM (линия параллельная AN и OQ), очевидно, не является характеристикой цепи возбуждения машины, так как физический смысл имеет только точка M , принадлежащая характеристике AM . При $R_{ш} = R_k$ и $I'_n = I'_1$ линия BM сливается с начальной прямолинейной частью характеристики холостого хода. Если трактовать линию BM , как характеристику цепи возбуждения, то стороны треугольника abc обратятся в нуль, а следовательно, будет равен нулю и нагрузочный ток генератора. Таким образом, приходим к тому бесспорному выводу, что в нагруженном генераторе постоянного тока с параллельной обмоткой самовозбуждения совпадение характеристики цепи самовозбуждения с начальной частью характеристики холостого хода невозможно.

3. Рассмотрим генератор с последовательной обмоткой самовозбуждения (рис. 2). В схеме рис. 1,а (стр. 27) $I'_1 - I'_n = 0$ при установившемся режиме и $I'_1 - I'_n \neq 0$ в неустановившемся режиме. Выясним, нельзя ли воссоздать те же режимы в схеме рис. 1 включением и выключением тока I_1 . Очевидно, такова точка зрения авторов замечаний.

При сделанных ранее допущениях остается справедливым уравнение $L \frac{di}{dt} = I'_1 R_k$ и его решение (стр. 28):

$$i = \frac{R_k}{L} I'_1 t.$$

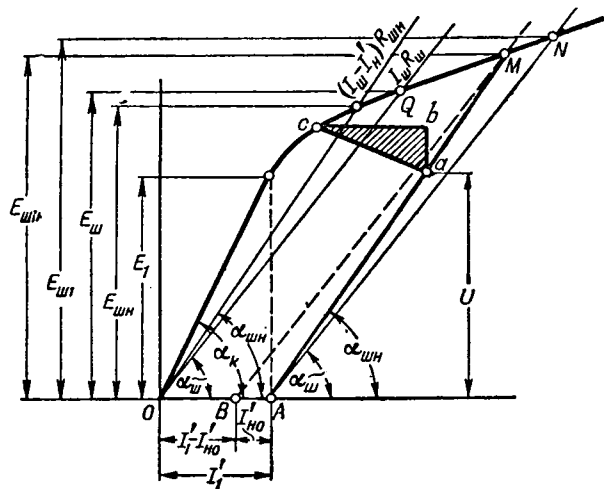


Рис. 1.

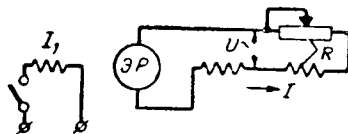


Рис. 2.

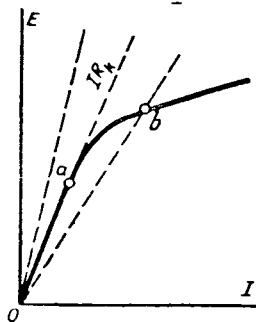


Рис. 3.

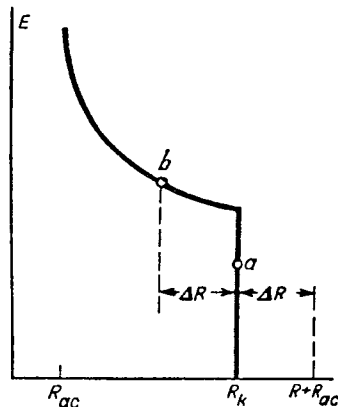


Рис. 4.

Отсюда мной сделан вывод, что при $I_1 = 0$ ток i в обмотке самовозбуждения также равен нулю. Несмотря на кажущуюся справедливость, этот вывод неправилен. На самом деле, если при $t = t_1$, когда $i = \frac{R_k}{L} I_1' t_1$, отключить ток I_1 , т. е. положить $I_1 = 0$, то уравнение примет вид:

$$L \frac{di}{dt} = 0, i = B,$$

где B — новая постоянная интегрирования, равная значению тока i , в момент отключения тока I_1 , и теперь для $t \geq t_1$ ток

$$i = \frac{R_k}{L} I_1' t_1.$$

Таким образом, здесь возможен установившийся режим, причем значение тока i будет зависеть от длительности неустойчивого режима. Однако легко убедиться, что такой установившийся режим неустойчив и не может практически существовать. Действительно, э. д. с. E и ток возбуждения I установившегося режима генератора рис. 1 определяются какой-либо точкой a рис. 3 только при условии соблюдения равенства $R + R_{ac} = R_k$. Величины E и I , будучи выражены как функции от $R + R_{ac}$, терпят разрыв при $R + R_{ac} = R_k$ (рис. 4), и поэтому при $R + R_{ac} = R_k - \Delta R$ режим машины определяется точкой b , а при $R + R_{ac} = R_k + \Delta R$ э. д. с. E и ток I равны нулю и машина теряет возбуждение.

Таким образом, все же приходим к выводу, что при совпадении характеристики цепи возбуждения с начальной частью характеристики холостого хода невозможно обеспечить устойчивое напряжение генератора постоянного тока.

Ссылка авторов замечаний на „практику“ не может быть убедительной, так как они получили устойчивое напряжение благодаря: 1) неравенству сопротивлений $R + R_{ac}$ и R_k , которое практически всегда имеет место; 2) нелинейности начальной части характеристики холостого хода; 3) наличию остаточного магнетизма, когда уже нельзя считать $I_1 = 0$.

Выводы данного раздела распространяются на случай холостого хода генератора при наличии параллельной обмотки самовозбуждения.

В своей работе я исходил из следующего основного положения, которое мне кажется, безусловно, справедливым.

Самовозбуждающаяся машина постоянного тока не может сохранять устойчивое напряжение при отсутствии остаточного магнетизма, насыщения магнитной цепи или независимого возбуждения. Это положение справедливо независимо от того, что происходило с машиной до рассматриваемого момента.

4. Авторы замечаний считают характерным для усилителя с продольным полем наличие только первых двух признаков: 1) ненасыщенной магнитной цепи и 2) комбинированного возбуждения.

Третий признак, конечно, следует расширить, включив в него и обратную отрицательную связь по току, но при этом сюда войдут и сварочные генераторы. Если разновидность обратной отрицательной связи является особенностью схемы, то наличие обратной отрицательной связи является свойством усилителя, так как только при этом становится возможной работа усилителя при наличии первых двух признаков. Если отказаться от третьего и четвертого признаков, то необходимо отказаться и от первого, и тогда речь будет идти вообще о машинах постоянного тока с комбинированным возбуждением. Вопрос этот, безусловно, является дискуссионным, как и термин «электромашиный усилитель».



К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

После опубликования «Руководящих указаний по повышению коэффициента мощности на промпредприятиях» (Электричество, № 5, 1954) от ряда читателей журнала поступили замечания. Эти замечания 10 ноября 1954 г. были рассмотрены на расширенном совещании при Техническом управлении и Государственной инспекции по промышленности и энергоснабжению МЭС. В результате в «Руководящие указания» внесены необходимые изменения.

Измененные «Руководящие указания» будут изданы отдельной брошюрой в ближайшее время.

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТАКТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЛЯ БЕССТУПЕНЧАТОГО ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ ТРАМВАЙНЫХ ВАГОНОВ

Регулируемые угольные контактные сопротивления широко применяются в электрических цепях и аппаратах малой мощности (регуляторы напряжений и т. п.). Достоинства этих регуляторов, состоящие в простоте устройства, плавном изменении сопротивления и легком управлении, естественно привлекают внимание к возможности использования контактных сопротивлений в цепях сильного тока. Поэтому значительный интерес представляет предложенная и практически испытанная новая система бесступенчатого, совершенно плавного регулирования сопротивления цепи тяговых двигателей при пуске и торможении, основанная на использовании контактных регулируемых сопротивлений.

Контактные сопротивления представляют собой столбики из угольных или графитовых шайб, подвергающиеся сжатию. При изменении давления изменяется поверхность соприкосновения шайб и, как следствие, переходное сопротивление контакта между шайбами, что приводит к изменению общего сопротивления столба. Исследования показывают, что переходное сопротивление между шайбами обратно пропорционально поверхности соприкосновения шайб, причем последняя изменяется пропорционально давлению. Зависимость сопротивления от давления $R = f(F)$ имеет приблизительно гиперболический вид (рис. 1). Большое значение имеет качество поверхности соприкосновения. В зависимости от того, насколько ровна и гладка поверхность, характеристика сопротивления располагается выше или ниже, однако форма ее почти не изменяется. Изменение величины шайб не вызывает изменения площади соприкосновения, если общее давление остается неизменным. При сохранении величины удельного давления, удвоение площади шайбы приводит к снижению сопротивления до половины значения. Таким образом, характеристика $R = f(F)$ практически не зависит от размеров шайб, однако увеличение последних позволяет повысить мощность нагрузки, рассеиваемой сопротивлением. При повышении давления общее сопротивление столба из шайб стремится к сопротивлению сплошного стержня тех же габаритов и из того же материала, причем число шайб в столбе не имеет значения, так как сопротивление при весьма высоких давлениях в основном определяется электропроводностью материала шайб, а не переходным сопротивлением. Практически давление следует изменять лишь в пределах, обеспечивающих эластичную деформацию шайб, что без труда позволяет получить область регулирования сопротивления, характеризуемую отношением 20:1. Большое значение при этом имеет плавность изменения давления. Влияние материала шайб проявляется в основном через удельное сопротивление, которое для угольно-графитных материалов изменяется в широких пределах (между 6 и $3000 \frac{\text{ОМ} \cdot \text{ММ}^2}{\text{М}}$). На рис. 1 приведены характеристики кон-

тактных сопротивлений для столбиков из 250 шайб, диаметром 40 мм и толщиной 2 мм, выполненных из различных материалов.

Значительным удобством при использовании контактных сопротивлений является малая величина перемещения при сжатии шайб. Она зависит от числа шайб и практически равна нескольким миллиметрам. Изменение длины столба вследствие теплового расширения должно компенсироваться конструктивными мероприятиями. Характерной особенностью контактных сопротивлений является неизменность объема и поверхности охлаждения активного материала (угля и т. п.) при изменении величины сопротивления, что в ряде случаев дает существенные преимущества перед обычным способом регулирования, основанном на отключении части сопротивления.

Нагрузка угольных столбиков существенно ограничивается допустимой температурой угля, при которой еще не наблюдается подгорания. Повидимому, эта температура для угля в свободной атмосфере может выбираться в пределах до 300°С. При тщательной воздушной изоляции возможна длительная работа при температуре 600...700°С, так как образующийся при этом газ защищает уголь от обгорания. Другая возможность повышения перегрузочной способности сопротивлений состоит в погружении угольных столбиков в масло. В этом случае нагрузка ограничивается допустимой температурой масла. Принимая во внимание допустимые температуры нагрева угля, можно указать следующие возможные тепловые нагрузки поверхности охлаждения угля:

а) в свободной атмосфере — 1 Вт/см²;

б) в закрытом исполнении при тщательном отводе тепла — 2 Вт/см².

Температурный коэффициент угля отрицателен, что приводит к снижению сопротивления примерно на 25% при нагреве на 300°С, однако это изменение сопротивления не имеет практического значения вследствие наличия бесступенчатого регулирования.

Для системы управления трамвайным вагоном разработан специальный тип регулируемого контактного сопротивления с пневматическим приводом, управляемым электромагнитным вентилем. Корпус блока сопротивления состоит из алюминиевой отливки (рис. 2), имеющей два трубчатых отверстия и поперечные плоские ребра, служащие для лучшего охлаждения корпуса. Угольные пластины имеют диаметр 40 мм и толщину 2 мм. Комплект из 250 пластин образует столбик сопротивления, который помещается в трубку из изолирующего материала, имеющую диаметр 42 мм и толщину стенок 5 или 8 мм. Трубка вставляется в корпус блока, причем свободное пространство между трубкой и трубчатым отверстием блока заполняется металлическим наполнителем, хорошо проводящим тепло. В каждом блоке размещено по два столбика сопротивления. Полная группа сопротивлений для одного электродвигателя часовой мощностью в 40 кВт состоит из двух блоков, расположенных по обе стороны от пневматического двустороннего цилиндра, служащего для создания давления на угольные столбики, и имеет габарит 14×28×120 см при допускаемой длительной нагрузке в 5 кВт (рис. 3). Применением угольных пластин больших габаритов можно существенно повысить длительную мощность без изменения общих размеров установок. В качестве другого способа повышения мощности сопротивлений применяется также параллельное включение контактного регулируемого сопротивления с неизменным металлическим сопротивлением. Этот способ использован в опытной установке для трамвая, рассчитанной на управление пуском и торможением поездов из четырехосного моторного и двух прицепных вагонов.

Основные технические данные моторного вагона: длина 12 400 мм, ширина — 2 100 мм, тара 18,2 т, диаметр колеса — 680 мм, напряжение — 600 в, количество электродвигателей — 4, мощность каждого электродвигателя —

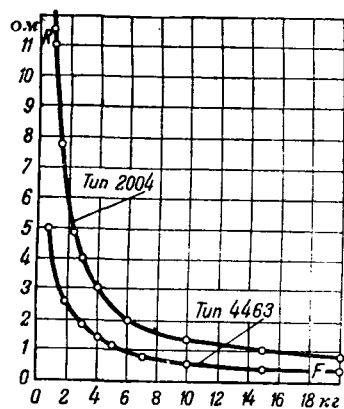


Рис. 1. Характеристики контактных сопротивлений.

тактных сопротивлений для столбиков из 250 шайб, диаметром 40 мм и толщиной 2 мм, выполненных из различных материалов.

Значительным удобством при использовании контактных сопротивлений является малая величина перемещения при сжатии шайб. Она зависит от числа шайб и практически равна нескольким миллиметрам. Изменение длины столба вследствие теплового расширения должно компенсироваться конструктивными мероприятиями. Характерной осо-

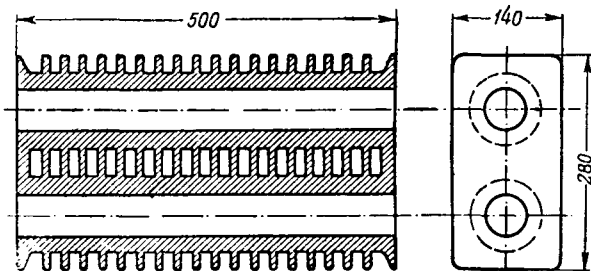


Рис. 2. Корпус блока сопротивления из алюминиевой отливки.

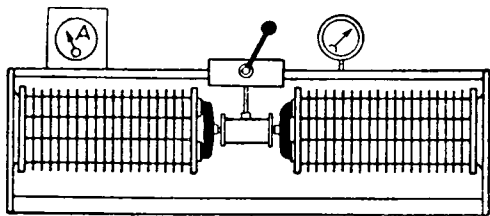


Рис. 3. Устройство из двух блоков сопротивлений и пневматического двустороннего цилиндра, осуществляющего давление на угольные столбики.

40 квт, система управления электропневматическая — 24 в, электродинамическое торможение.

Схема управления (рис. 4) допускает последовательно-параллельное соединение двух групп электродвигателей в режиме тяги и образование раздельных двухдвигательных перекрестных схем торможения, к которым подключаются тормозные цепи прицепных вагонов. Для ускорения самовозбуждения машин в каждой группе применяется подпитка обмотки возбуждения одной из машин от батареи цепи управления.

Пуско-тормозное сопротивление состоит из двух групп, в каждой из которых имеется контактное регулируемое и постоянное сопротивления. Так как регулируемое сопротивление не может быть уменьшено ниже некоторого предела (называемого «остаточным» сопротивлением), то для его полного выключения служат закорачивающие контакторы 7 и 8.

Испытания установки на вагоне показали, что контактные сопротивления в электрическом и термическом отношении полностью удовлетворяют требованиям эксплуатации. Надежность сопротивлений вполне достаточна, так как конструкция их такова, что в случае поломки одной или нескольких пластин последние остаются на месте под давлением и продолжают нормально работать. При напряжении 600 в и числе контактных слоев около 1000 нет опасений в отношении возможности образования электрических дуг в точках контакта. Фактически оказалось возможным производить отключение тормозного режима посредством увеличения сопротивления контактного регулятора.

Стеновые тепловые испытания блока сопротивлений позволили определить зависимости установившейся температуры угольных пластин T_i и корпуса блока T_a от мощности длительной нагрузки (рис. 5). Характеристики 1...4 относятся к изолирующим трубкам с толщиной стенок от 8 до 5 мм из материалов разной теплопроводности при разных типах наполнителя. Отмечается значительный перепад температуры между угольным столбиком и корпусом блока, что указывает на возможность повышения мощности установки путем улучшения теплопередачи от угля к металлическому корпусу.

Исследования атмосферы возле контактов показывают, что при наблюдаемых температурах нагрева не происходит

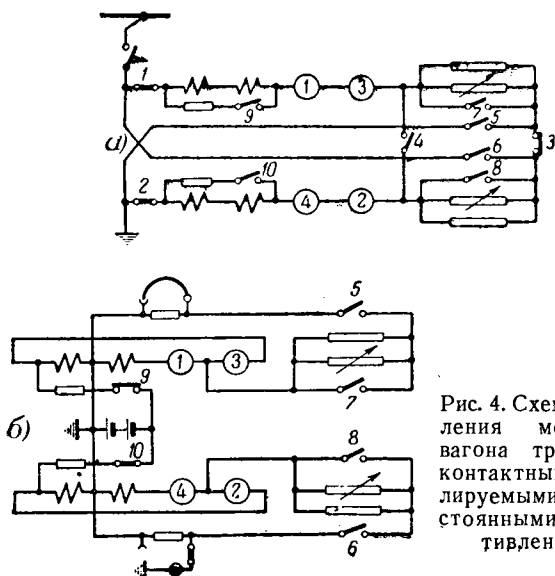


Рис. 4. Схема управления моторного вагона трамвая с контактными регулируемыми и постоянными сопротивлениями.

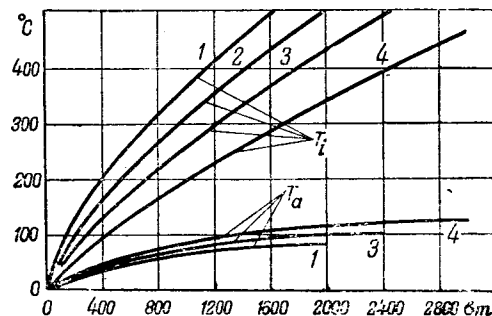


Рис. 5. Зависимости установившейся температуры угольных пластин (T_i) и корпуса блока (T_a) от мощности длительной нагрузки.

образования окиси углерода, и поэтому использование нагретого воздуха для целей отопления вагона не встречает препятствий.

На основании проведенных опытов определены основные требования к угольным материалам для контактных сопротивлений: характеристика $R = f(F)$ должна удовлетворять желаемым пределам изменения; материал должен быть прочным на сжатие и эластичным; тепловые напряжения не должны вызывать появления трещин в пластинах; ограничивающие плоскости должны быть по возможности параллельны; поверхностная пленка, полученная в результате опрессовки, не должна устраняться последующей шлифовкой; удельная электропроводность должна быть возможно высокой, чтобы остаточное сопротивление было мало.

(А. Вауер. Elektrische Bahnen, стр. 172, № 7, 1954)

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

ОПЫТНЫЙ МОТОРНЫЙ ВАГОН С РТУТНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

В Англии проводится опытное исследование электрификации железных дорог на однофазном токе. Для этой цели выбран участок Ланкастер—Моркам—Хейшем протяженностью около 32 км в однопутном исчислении, который ранее был электрифицирован на переменном однофазном токе 25 гц.

Опытные поездки после переоборудования участка были начаты в декабре 1952 г., а регулярное пассажирское движение началось в августе 1953 г. На участке работают три мотор-вагонных секции, состоящие из трех вагонов: моторного, прицепного и прицепного с постом управления. Для создания моторных вагонов, работающих на переменном токе 50 гц, были использованы вагоны, оставшиеся после закрытия в 1940 г. пассажирского движения на линии электрифицированной на постоянном токе, с токо-съемом от контактного рельса. Переоборудование этих вагонов потребовало значительной переделки кузова.

Электрическое оборудование моторных вагонов не является стандартным, и большую часть его пришлось разместить не под рамой, а в кузове, чем была уменьшена вместимость вагона. Электроэнергия снимается одним пантографом и через высоковольтный плавкий предохранитель вводится в отделение вагона, где размещены трансформатор, два ртутных выпрямителя, вспомогательные машины и коммутационная аппаратура.

Силовой трансформатор имеет три обмотки. Вторичная обмотка снабжена ответвлениями для регулировки напряжения, подводимого к выпрямителям, а затем к тяговым двигателям. Изменение напряжения осуществляется без разрыва цепи двумя группами контакторов и делительными дросселями. Третья обмотка трансформатора 230—0—230 в служит для электроснабжения вспомогательных нужд. От нее через понижающий трансформатор 230/24 в питается освещение поезда. Кроме того, от нее питаются цепи управления, вспомогательные машины, электродвигатель компрессора, автоматически включаемый регулятором, и осуществляется подзаряд батареи 24 в. Для привода компрессора используется стандартный двигатель постоянного тока, питающийся через сглаживающий фильтр от

твердых выпрямителей. Полное напряжение 460 в используется для отопления поезда.

Каждый ртутный выпрямитель заключен в стальной, герметически закрытый, охлаждаемый воздухом баллон и имеет шесть анодов. Для подогрева катода выпрямители снабжены автоматически действующими подогревателями. Для автоматического регулирования количества воздуха, поступающего в отделение вагона для оборудования, стенки кузова имеют жалюзи с электрическим приводом, управляемым термореле. В цепь каждого выпрямителя, работающего по схеме с нулевым выводом, включено последовательно по два тяговых двигателя с заземленной средней точкой. Двигатель с трамвайной подвеской — самовентилирующаяся машина постоянного тока, с последовательным возбуждением — развивает часовую мощность 292 квт. Некоторое сглаживание пульсаций выпрямленного тока достигается при помощи реактора, состоящего из двух последовательно соединенных катушек, намотанных на общий магнитопровод.

Защита от перегрузки в цепи постоянного тока обеспечивается реле перегрузки и контакторами. Кроме того, каждый анод обоих выпрямителей снабжен плавким предохранителем. Защита от перенапряжений осуществляется крышевым искровым разрядником.

Под вагоном смонтирован электропневматический моторный реверсор, пусковые сопротивления, сопротивления, включаемые в цепь обмоток возбуждения двигателей, компрессор и аккумуляторная батарея 24 в для аварийного освещения моторного вагона.

Управление поездом такое же как и при постоянном токе. Пуск осуществляется автоматически, под контролем реле ограничения тока до выбранной ходовой позиции.

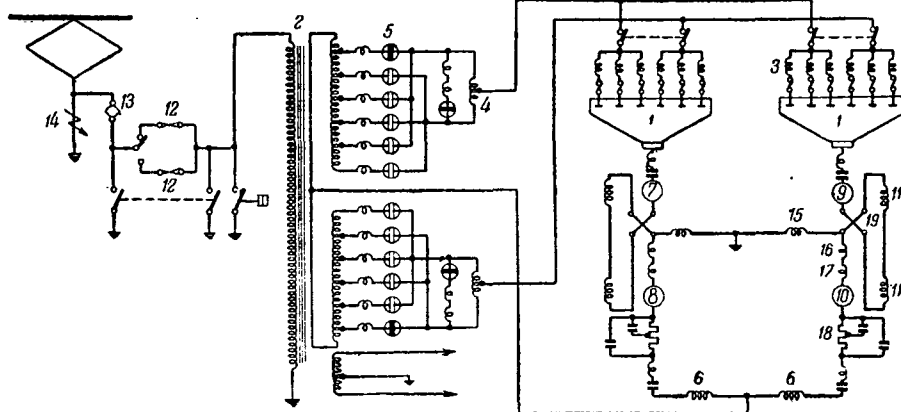


Рис. 1. Силовая схема опытного моторного вагона.

1 — ртутный выпрямитель с воздушным охлаждением; 2 — трансформатор; 3 — анодные дроссели; 4 — делительный дроссель; 5 — контакторы группового переключателя; 6 — сглаживающий реактор; 7, 8, 9 и 10 — тяговые двигатели; 11 — обмотки возбуждения тяговых двигателей; 12 — высоковольтные плавкие предохранители; 13 — крышевой изолятор ввода; 14 — искровой разрядник; 15 — катушка заземляющего реле; 16 — катушка реле перегрузки; 17 — катушка реле ограничения тока; 18 — пусковые сопротивления; 19 — реверсор.

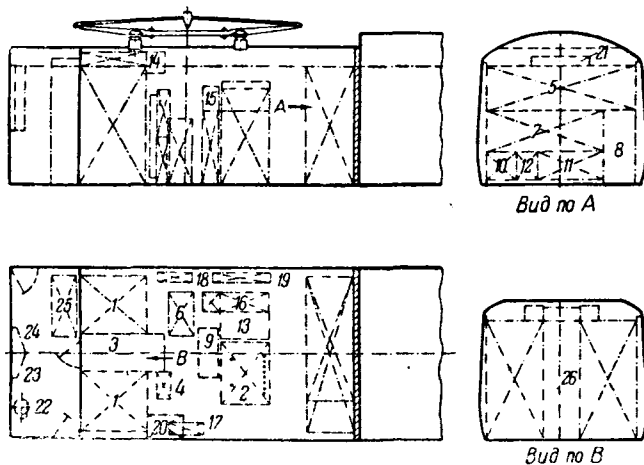


Рис. 2. Расположение оборудования в кузове моторного вагона.

1 — 6 см. рис. 1; 7 — электропневматические контакторы; 8 — дверь в контакторное отделение, снабженная с пантографом; 9 — высоковольтное оборудование; 10, 11 — шкафы управления выпрямителями; 12 — элементы цепей управления; 13 — мотор — вентилятор для охлаждения тяговых двигателей; 14 — два вентилятора для охлаждения выпрямителей; 15 — насос масляной системы трансформатора; 16 — радиатор для охлаждения масла; 17, 18, 19 — моторы, регулирующие степень открытия жалюзи в стенках кузова; 20 — моторный привод разъединителя; 21 — твердые выпрямители для питания двигателя компрессора; 22 — контроллер; 23 — панель управления; 24 — резервуар со сжатым воздухом для подъема пантографа; 25 — вспомогательное оборудование; 26 — коридор.

Основные данные моторного вагона:

Напряжение контактной сети (без нагрузки)	6 600 в
Число тяговых двигателей	4
Мощность (часовая) тягового двигателя	292 квт
Напряжение на коллекторе тягового двигателя	750 в
Часовая мощность на ободе колес (с учетом 10% падения напряжения в контактной сети)	1 168 квт
Часовая сила тяги (при полном поле)	5 200 кг
Средняя пусковая сила тяги	8 125 кг
Ускорение при пуске	0,58 м/сек ²
Средний диаметр колес	1 067 мм
Передаточное число	65:16 (4,06)
Конструкционная скорость	120 км/час

Электроснабжение. Подстанция оборудована двумя однофазными трансформаторами 6,6/6,6 кв, 833 кВА и шестью масляными выключателями, установленными на вводах, трансформаторах и двух путевых фидерах. Трансформаторы могут работать параллельно, но нормально один находится в резерве. Путевые фидеры имеют быстродействующую максимальную защиту. Масляные выключатели трансформатора и путевых фидеров управляются с пульты, расположенного в 45 м от подстанции.

При переоборудовании участка было установлено, что большая часть контактной сети пригодна для дальнейшей эксплуатации при частоте 50 гц. На небольшом участке

линии были установлены в экспериментальных целях семь различных типов опор: из стальных двутавров нормального сортамента, стальных двутавров с широкими полками, алюминиевых двутавров, стальные решетчатые мачты, стальные трубы, мачты из предварительно напряженного железобетона и из пропитанного креозотом дерева.

В виде опыта применены различные типы изоляторов. Простая цепная подвеска состоит из медного несущего троса, свитого из семи проволок, сечением 48 мм² и контактного провода сечением 107 мм². Наличие на участке паровой тяги и близость побережья создают условия для проведения испытаний различных типов опор и защитных покрытий на коррозионную устойчивость. Для защиты контактной сети от коррозии использованы окраска, оцинкование, металлизация и т. д.

Применение подвижного состава с ртутными выпрямителями, повышение нагрузок и частоты значительно увеличивают помехи в цепях сигнализации и связи. Проведенные на участке испытания подтвердили необходимость замены воздушных линий связи кабельными. Для цепей связи и сигнализации предусмотрены два отдельных кабеля со свинцовой оболочкой и броней из двойной стальной ленты. Кабель связи под свинцовой оболочкой имеет экран из двойной медной ленты.

Литература

1. Railway Gazette, т. 99, стр. 403, № 15, 1953.
2. The Locomotive, стр. 150, № 10, 1953.
3. Engineering, т. 176, стр. 459, № 4576, 1953.
4. Engineering, т. 175, стр. 12 и 16, № 4536, 1953.
5. P. Patin. Revue générale des chemins de Fer, стр. 223—224, № 4, 1954.

Инж. Л. А. Черноусов

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА САМОЛЕТНЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Применение переменного тока в самолетных электрических системах существенно упрощает генерирование, преобразование и распределение электроэнергии, повышает к. п. д. системы и уменьшает вес оборудования.

В силу различия скорости вращения первичных двигателей возникает проблема параллельной работы генераторов, вызывающая необходимость автоматического регулирования частоты системы и распределения активной нагрузки между параллельно работающими генераторами, а также регулирования напряжения и распределения реактивных нагрузок.

В связи с внедрением метода самосинхронизации применение точной синхронизации самолетных генераторов [Л. 5] нельзя считать актуальным.

На рис. 1 приведена схема регулирования частоты и распределения активной мощности [Л. 2]. Контрольная катушка 1, регулирующая подачу масла в муфту постоянной скорости (гидравлическая муфта дифференциального типа), включена через выпрямитель, собранный по схеме Ларионова, на тахогенератор, э. д. с. которого пропорциональна скорости вращения основного генератора. Переменное сопротивление R позволяет установить требуемую скорость вращения, которая в дальнейшем поддерживается автоматически. Катушка 2 регулятора питается от фазочувствительной схемы, реагирующей на активную нагрузку генератора, и предназначена для распределения последней между параллельно работающими генераторами. При возрастании активной нагрузки одного из генераторов скорость вращения его снижается, а у остальных несколько возрастает, чем достигается равномерное распределение активных нагрузок.

Для обеспечения устойчивого распределения активных нагрузок точки Y_1 , Y_2 регуляторов всех параллельно работающих генераторов соединяются параллельно.

Дальнейшим развитием гидравлической передачи дифференциального типа является схема рис. 2 [Л. 3], использующая для контроля частоты электродвигатель с магнитным усилителем. Напряжение, подаваемое на магнитный усилитель, пропорционально активной мощности генератора (в схеме распределения активных нагрузок) или частоте (в схеме регулирования частоты).

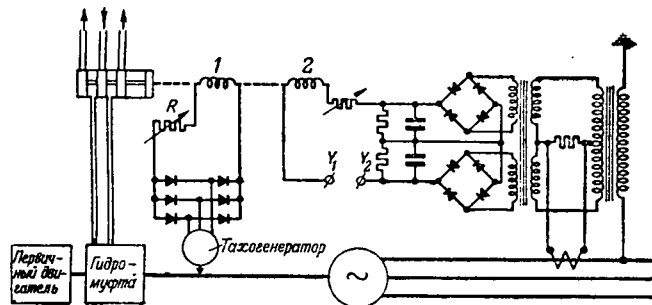


Рис. 1. Схема регулирования частоты и распределения активной мощности.

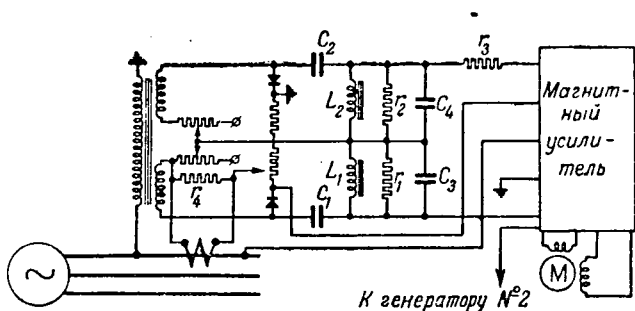


Рис. 2. Схема регулирования частоты и распределения активной мощности при помощи электродвигателя с магнитным усилителем.

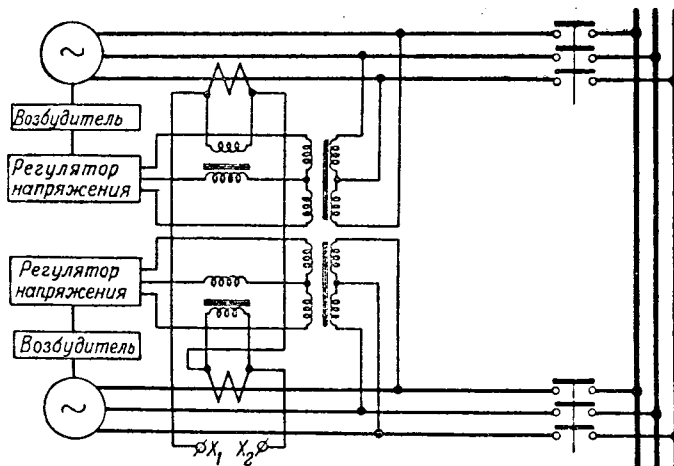


Рис. 3. Схема распределения реактивной мощности.

В схеме регулирования частоты дополнительно применен резонансный контур.

Автоматическое регулирование напряжения генераторов осуществляется угольными или статическими регуляторами с магнитными усилителями [Л. 4].

Схема распределения реактивной мощности представлена на рис. 3 [Л. 2]. К регулятору напряжения подается выпрямленное напряжение от фазочувствительной схемы, реагирующей на реактивную нагрузку генератора. При возрастании последней на одном из параллельно работающих генераторов возбуждение его снижается, а возбуждение остальных генераторов несколько возрастает, чем достигается выравнивание реактивных нагрузок. Для устойчивого распределения их, вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются последовательно (уравнительная цепь X_1, X_2).

Схемы, приведенные на рис. 1 и 3, расчет которых дан в [Л. 2], показали в эксплуатации вполне удовлетворительные результаты.

Недостатком рассмотренных схем регулирования скорости вращения генераторов является значительный вес гидравлической муфты.

Литература

1. L. R. Larson. Trans. AIEE, т. 72, ч. II, стр. 403, 1953.
2. J. A. Granath, A. K. Hawkes. Trans. AIEE, т. 72, ч. II, стр. 209, 1953.
3. R. H. Eisengrein. Trans. AIEE, т. 72, ч. II, стр. 423, 1953.
4. B. J. Wilson. Trans. AIEE, т. 72, ч. II, стр. 413, 1953.
5. F. B. Mc Carty and G. W. Hills. Trans. AIEE, т. 72, ч. II, стр. 413, 1953.

Кандидат техн. наук В. Н. Истратов
и инж. А. В. Каменский

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ
В БЕЛЬГИЙСКОМ КОНГО НА ОДНОФАЗНОМ ТОКЕ

Экономическое развитие провинции Катанга привело к резкому увеличению грузооборота железной дороги. Были изучены различные способы повышения пропускной способности однопутной железной дороги, в том числе и электрификация. Было проведено сравнение различных систем тяги. В результате сравнения систем электрической тяги на постоянном токе 1500 и 3000 в и однофазном переменном токе 11...15 кВ, 16 2/3 гц и 20—25 кВ, 50 гц установлено, что применение однофазного тока 22 кВ, 50 гц позволяет снизить на 30% первоначальные капиталовложения по сравнению с другими системами. Проведенные расчеты и испытания показали, что при применении однофаз-

ного тока промышленной частоты степень несимметрии в трехфазной системе даже при чрезвычайных обстоятельствах остается в допустимых пределах, что объясняется сравнительно небольшими мощностями, требующимися для железной дороги, по сравнению с промышленной нагрузкой.

Протяженность электрифицированного участка Ядотвил—Тенке равна 94 км, в течение 1954—1956 гг. предполагается довести длину электрифицированных линий до 340 км.

Электроснабжение осуществляется по линии 120 кв от двух подстанций. Электрифицированный участок делится на три примерно равные фидерные зоны, каждая из которых питается от различных фаз сети. На подстанциях установлены однофазные трансформаторы 120/25 кв, 6 000 кВА. Трансформатор на первой подстанции подсоединен к фазам В и С, а два трансформатора второй подстанции — к А и С и А и В.

Участки питания разделены нейтральной вставкой, на каждом конце которой имеются выключатели, позволяющие подавать напряжение на вставку при остановке электровоза под ней. Подобные выключатели имеются и на станциях, где используются для снятия напряжения со станционной контактной сети. Участки сети, расположенные по обе стороны от станции, при отключении ее контактной сети соединяются обходным фидером.

Контактная сеть общей протяженностью 105 км состоит из медного профилированного контактного провода сечением 107 мм² и бронзового несущего троса сечением 80 мм².

На всем протяжении электрифицированного участка применяется простая цепная подвеска и только на кривых, имеющих радиус меньше 3 000 м, применена косая подвеска. Для большей устойчивости контактной сети на кривых радиусом 3 000...525 м установлены фиксирующие опоры.

Натяжение в контактном проводе равно 1 100 кг. На участках с косой подвеской оно оказалось необходимым из-за больших колебаний температуры (от 0 до 50° С) в течение суток. Длина анкерного участка 1 000...1 200 м. При вертикальной подвеске пролет имеет длину 60 м, при косой подвеске — 60, 50 и 40 м, причем наименьший пролет относится к кривым с радиусом 200 м. Наибольшее отклонение контактного провода от оси пути на участках с вертикальной подвеской равно ± 250 мм.

Подвижной состав. При выборе ходовой формулы электровоза учитывалось, что нормальный вес поезда на электрифицируемом участке равен 550...600 т, но имеется необходимость увеличения его до 1 100...1 200 т. Были выбраны электровозы однофазного тока с коллекторными

тяговыми двигателями, с ходовой формулой $Bo-Bo$, могущие вести состав весом до 600 т, а при двойной тяге — состав двойного веса, со скоростью 45 км/час, на подъеме 12,5%.

Основные данные электровозов

Ходовая формула	$Bo-Bo$
Напряжение на токоприемнике:	
номинальное	22 кв
минимальное	17 кв
максимальное	25 кв
Сцепной вес	74 т
Давление колесной пары на рельсы . .	18,5 т
Мощность электровоза при часовом режиме	1 230 квт
Скорость при часовом режиме	47,5 км/час
Максимальная скорость	70 км/час
Диаметр новых бандажей	1 150 мм
Передаточное число	6,93

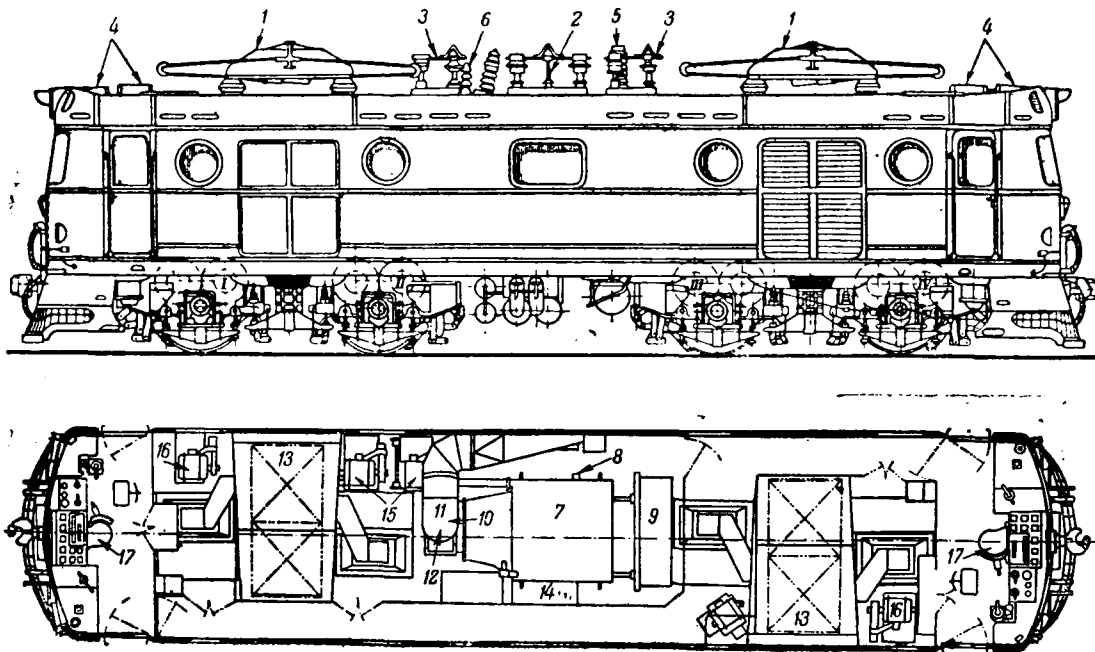
Размеры электровоза: общая длина — 15,065 м; ширина кузова (максимальная) — 3,04 м; база тележки — 2,5 м; расстояние между опорами кузова — 7,2 м; длина высоковольтной камеры — 11,0 м.

Механическая часть. Тележки электровоза — сварные. Боковины — двутавровые балки, связанные по концам легкими поперечными креплениями, а в середине — пустотелым брусом. Рессорное подвешивание — листовые рессоры, расположенные под буксами. Буксы имеют двухрядные роликовые подшипники. Кузов опирается на листовые рессоры, помещенные с внешней стороны боковых тележек.

Расположение оборудования показано на рисунке.

Электрическое оборудование. На электровозе установлено четыре однофазных коллекторных двигателя. Тяговые двигатели — двоянные, полностью подрессорные, передача — с полым валом. Основные данные при часовом режиме: мощность на валу — $2 \times 154,5$ квт; напряжение — 2×240 в; ток — 850 а; сила тяги — 2 320 кг. Число оборотов в минуту при скорости 47,8 км/час — 1 580, а максимальное число оборотов в минуту при скорости 70 км/час — 2 330 (при наполовину изношенных бандажах).

Соединение тяговых двигателей — параллельное, причем тяговые двигатели — близнецы одной оси соединены последовательно. Такая схема соединения тяговых двигателей позволила получить приемлемую тяговую характеристику, а ограничение тока и напряжения в допустимых пределах позволили получить трансформаторную э. д. с., не выходящей из нормы.



Расположение оборудования на электровозе $Bo-Bo$.

1—IV — тяговые двигатели; 1 — токоприемник; 2 — заземляющий контактор; 3 — изолятор токоприемника; 4 — тормозные сопротивления; 5 — разрядник; 6 — масляный выключатель; 7 — главный трансформатор; 8 — масляный насос; 9 — контакторы; 10 — вентилятор холодильника; 11 — холодильник; 12 — фильтр; 13 — вентиляторы для охлаждения тяговых двигателей; 14 — аккумуляторная батарея; 15 — вентиляторы; 16 — компрессор; 17 — контроллер.

Трансформатор мощностью 1 600 ква имеет масляное охлаждение. Монтаж его осуществляется через люк в крыше.

Ток от одного из двух токоприемников подводится через масляный выключатель 6 к главному трансформатору 7. Контакт 2, имеющий механический привод из кузова, позволяет заземлять высоковольтные зажимы масляного выключателя, снабженного электропневматическим приводом.

Вторичная обмотка главного трансформатора имеет 16 выводов для 15 ходовых позиций. Величину ускорения поезда при разгоне можно регулировать специальным устройством.

Для выбора нужной величины ускорения (из трех возможных) на контроллере машиниста имеется особая рукоятка. Главная рукоятка контроллера, кроме 15 ходовых, имеет одну тормозную позицию. Регулирование тормозного усилия осуществляется специальной системой управления.

Для предохранения от опасного скольжения колес имеются реле напряжения, которые при скольжении воздействуют на тормозную систему той тележки электровоза, колесные пары которой работают в ненормальном режиме.

При реостатном торможении возбуждение тяговых двигателей производится от машины постоянного тока. Одна из обмоток этой машины — обмотка независимого возбуждения — питается от аккумуляторной батареи 14. Три ступени возбуждения получают регулированием сопротивления, помещенного в цепь обмотки. Кроме этой, имеются

еще три обмотки возбуждения, одна из которых подсоединена к тормозным сопротивлениям и по ней протекает ток, пропорциональный току якоря. Такая система возбуждения позволяет поддерживать в некотором диапазоне скоростей на каждой тормозной позиции ток приблизительно неизменной величины.

Шунтировка дополнительных полюсов обеспечивает хорошую коммутацию как при тяговом, так и при тормозном режиме.

На электровозе установлены: два вентилятора для охлаждения тяговых двигателей, на валу одного из которых находится генератор для зарядки батареи, два вентилятора, один из которых обеспечивает быстрый отпуск вакуумного тормоза, два компрессора, вентилятор и насос системы охлаждения трансформатора, возбудитель для реостатного торможения. Все вспомогательные механизмы приводятся однофазными асинхронными двигателями, пуск которых производится по системе с расщепленной фазой.

Электровоз имеет реостатное торможение, воздушный тормоз и аппаратуру для вакуумных тормозов. Во время реостатного торможения, хотя воздушный тормоз и отключен, при постановке рукоятки в положение экстренного торможения последний включается автоматически.

(Railway Gazette, т. 96, стр. 689, № 25, 1952; т. 97, стр. 491, № 18, 1952; т. 98, № 2, стр. 38, 12, стр. 324, 16, стр. 452, 1953; т. 101, стр. 8, № 1, 1954; Elektrische Bahnen, т. 24, стр. 292, № 11, 1953.)

Кандидат техн. наук В. Н. Хлебников



Заметки и письма

О РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ ГЭС

В помещенной в № 2 журнала «Электричество» за 1954 г. статье Б. И. Доманского и Е. И. Юревича «О регулировании частоты и мощности крупных энергообъединений» разбираются в основном те же вопросы, которые изложены в моем изобретении «Устройство для поддержания статической и динамической устойчивости энергосистем» (авторское свидетельство № 95018 от 5 февраля 1953 г., приоритет от 16 марта 1951 г.). Отсутствие ссылки на это изобретение в указанной статье объясняется, видимо, незнанием с ним ее авторов. Работая независимо от меня, авторы пришли к выводам, во многом совпадающим с моими.

Особый интерес представляет сделанная Б. И. Доманским и Е. И. Юревичем попытка анализа работы гидрогенератора, снабженного регулятором угла сдвига э. д. с. или напряжений (мною рассматривалась главным образом работа турбогенераторов).

Предложенное Б. И. Доманским и Е. И. Юревичем регулирование угла между напряжением каждой из электростанций и передаваемым на все станции из единого центра напряжением эталонной частоты вызывает серьезные возражения, так как в тех случаях, когда мощность станций, работающих в дефицитной части системы, будет исчерпана, такое регулирование не только не предотвратит перегрузки транзитных связей и нарушения устойчивости, а, напротив, будет способствовать им.

Сомнение вызывает также допустимость анализа нестационарных режимов гидрогенераторов на базе уравнений Стодола, как это сделали авторы. Эти уравнения, во всяком случае, неприменимы при наличии длинных напорных трубопроводов. Необходимо дополнительно проверить и развить выводы авторов, базируясь на последних работах советских ученых в области гидравлического удара.

Кандидат техн. наук М. М. Горништейн



Хроника

СОВЕЩАНИЕ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЮ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В Москве 20—21 октября 1954 г. было проведено расширенное техническое совещание Главэлектромонтажа Минметаллургхимстроя совместно с техническим Советом ГПИ «Тяжпромэлектропроект» (ГПИ ТПЭП) по автоматизации и телеуправлению в промышленности.

В работе совещания приняли участие свыше 150 представителей проектных, исследовательских, монтажных и других организаций различных министерств и ведомств. На совещании были заслушаны 15 докладов, посвященных вопросам внедрения автоматики и телемеханики в области электрооборудования промышленных предприятий и в области управления электроприводами и производственными процессами в тяжелой и строительной промышленности.

Широкое внедрение автоматики и телемеханики в промышленные установки, предусмотренное директивами XIX съезда Коммунистической партии Советского Союза,

непосредственно связано с дальнейшим резким повышением производительности труда в промышленности, а также — с повышением надежности эксплуатации оборудования, и поэтому представляет важную народнохозяйственную задачу. Совещание подвело итоги работы проектных и экспериментальных организаций Главэлектромонтажа в этой области и наметило дальнейшие пути к усилению внедрения автоматики и телемеханики в промышленность.

В докладе инж. С. М. Мессермана (ГПИ ТПЭП) «Основные положения по проектированию автоматики и телемеханики электроснабжения и подстанций промышленных предприятий» были освещены некоторые вопросы эффективности автоматизации и телемеханизации на основе опыта эксплуатации ряда энергосистем, транспортных и других предприятий, а также изложены основные положения по проектированию систем автоматики и телемеханики. На автоматизированных и телемеханизированных объектах значительно сократилось число аварий и простоев (в 5—

6 раз). Случаев неправильных исполнений телеустройств не было. Отказы от работы бывают очень редко (не более 0,15%). Персонал на телемеханизированных объектах сокращается в 2—3 раза. Расходы по телемеханизации окупаются в 1—2 года и в отдельных случаях до 5 лет.

«Основные положения» устанавливают, что вопросы автоматизации и телемеханизации должны рассматриваться во всех проектах электрификации промышленных предприятий. С точки зрения диспетчеризации электроснабжения следует различать предприятия с ограниченной территорией с расстоянием от диспетчерского пункта до контролируемых пунктов не более 1 км и более крупные предприятия с большим расстоянием между этими пунктами. В первом случае рекомендуется применять многопроводные, а во втором случае малопроводные системы телеуправления. Иногда целесообразно и допустимо применять обе системы на одном и том же предприятии. Объем автоматизации и телемеханизации следует устанавливать, исходя из повышения надежности и бесперебойности электроснабжения и отказа от обслуживающего персонала на подстанциях. Объем телемеханизации должен быть максимально ограничен и увязан с автоматизацией. Как правило, необходимо предусматривать телеуправление выключателями вводов подстанций всех напряжений, межподстанционных связей, иногда секционными и межшинными выключателями и выключателями трансформаторов 110—35/10—6 кв. На преобразовательных подстанциях следует предусматривать, кроме того, телеуправление агрегатами и линейными выключателями. Не рекомендуется передавать диспетчеру телеуправление выключателями технологических агрегатов цеха (приводов двигателей). Это управление должно быть возложено на персонал технологических цехов. При наличии автоматического повторного включения (АПВ) и автоматического ввода резерва (АВР) можно сократить объем телеуправления. Объем телесигнализации и телеконтроля, включая телеизмерение, должен быть доведен до разумного минимума. Нужны только такие сигналы и измерения, на которые диспетчер должен и может реагировать. Анализ ряда предприятий показал, что число управляемых объектов на одном коммутационном пункте колеблется от 2 до 10 (редко до 20), число телесигналов колеблется от 5 до 60; количество телеизмерений (обычно ток и напряжение) незначительно (2—8).

В «Основных положениях» уделяется большое внимание вопросам выбора линии связи и источников питания. Рекомендуется применять преимущественно кабельную линию связи, объединенную с линиями связи других назначений, возможна самостоятельная проводная линия связи. Воздушные линии связи ненадежны: из-за повреждений в линиях связи имеет место наибольшее число простоев (75%). Высококачественная связь по линии передач применяется редко.

Вопрос об источнике питания связан с общим вопросом о применении переменного тока для питания защиты и цепей оперативного тока. Рекомендуется применять переменный ток.

В докладе инж. Г. Р. Миллера (Ленинградское отделение ГПИ ТПЭП) «Автоматика в электроснабжении промпредприятий» освещен вопрос об автоматизации электроснабжения электроемких производств (алюминиевые заводы) и предприятий с автоматизированным поточным производством (заводы черной металлургии).

Автоматика в алюминиевой промышленности предусматривается главным образом для преобразовательных ртутно-выпрямительных подстанций. Там предусматривается АВР питающей линии 110 кв, АВР для собственных нужд и питания фазорегуляторов, однократное АПВ после отключения выпрямителя, включение по одному общему приказу, автоматическое включение насосов, поддержание заданного нормального режима и т. п.

АВР в электроснабжении до сих пор, как правило, применялось на стороне высокого напряжения. В условиях автоматизированного поточного производства целесообразно применение АВР на стороне низкого напряжения. Из-за ограниченной шкалы контакторов и для упрощения схем целесообразно применение АВР непосредственно на распределительных пунктах. Следующим элементом автоматизации является автоматический повторный пуск (АПП) механизмов и АПВ.

АПВ должно применяться не только для воздушных, но и для кабельных линий. Применение АВР, АПВ и АПП связано с вопросом самозапуска двигателей. Должна быть проверена возможность самозапуска по сетевым и технологическим условиям, по моментам сопротивления механизмов и моментам вращения двигателя. Отсюда следует, что проектирование автоматизации электроснабжения должно быть увязано с проектированием электропривода. В случае самозапуска двигателей примерное соотношение мощности короткого замыкания и самозапускаемых двигателей должно быть около 20.

Опыт автоматизации энергосистем поделился на совещании доктор техн. наук, проф. И. А. Сыромятников (МЭС).

Одним из основных элементов автоматизации является автоматическое регулирование возбуждения генераторов, компенсаторов и двигателей, внедрение которого коренным образом изменило отношение к пуску двигателей. Сейчас можно применять прямой пуск для двигателей самой большой мощности. Важным вопросом является автоматическая разгрузка по частоте (АРЧ). Вследствие дефицита мощности во многих энергосистемах внезапное отключение генерирующей мощности вызывает серьезные аварии. Применение АРЧ непосредственно у потребителя позволяет отключить наименее ответственных потребителей и должно обеспечить автоматический подъем частоты до 48...49 гц.

АВР широко применяется на станциях и в сетях и показал высокую эффективность. Устройства АВР должны быть быстродействующими. Самосинхронизация синхронных машин при их включении на параллельную работу применяется во многих случаях, что еще раз подтверждает возможность прямого пуска двигателей большой мощности.

Широкое применение в энергосистемах находит АПВ, которое используется для всех воздушных линий, для кабельных линий, для шин подстанций, для автоматического подключения гидрогенераторов, для автоматического включения потребителей отключенных устройствами АРЧ и повторного включения двигателей, которые не могут быть обеспечены самозапуском. Там, где нет резервного источника питания, нужно применять АПВ и на линиях, питающих одну подстанцию. Применение АПВ в сочетании с методом самосинхронизации обеспечивает выдачу мощности в систему в течение 10—15 сек. В настоящее время находит уже применение несинхронное АПВ, которое действует вполне успешно. Автоматика и телеуправление находят широкое применение в энергосистемах. Все гидростанции автоматизированы и большая часть гидростанций переведена на телеуправление.

В части самозапуска двигателей докладчик, отмечая некоторые успехи в этом вопросе, считает их недостаточными и указывает на возможность более смелого применения самозапуска без специальных автоматических устройств. Самозапуск должен быть обеспечен специальной настройкой защиты без излишней автоматики. Резко критикуя существующие способы защиты двигателей, на основании ряда примеров эксплуатации, докладчик приходит к выводу о необходимости упрощения защит двигателей для повышения надежности.

В заключение докладчик остановился на вопросе об оперативном токе для автоматики и телемеханики. Докладчик считает, что только для диспетчерских пунктов можно применять в качестве резервного источника оперативного тока аккумуляторную батарею; на подстанциях же нужно пользоваться для целей автоматики и телемеханики только переменным током.

Опыт телемеханизации в энергосистемах поделился также инж. В. С. Малов (ЦИЭЛ МЭС). Внедрение телемеханизации в энергосистемах докладчик характеризовал следующими данными: в настоящее время телемеханизированы гидроэлектростанции мощностью около 50% от их общей мощности, против 0,2% в 1940 г.; за 5 лет переведено полностью на телеуправление 77 подстанций; за 3 года телемеханизация диспетчерского управления внедрена в весьма крупных энергосистемах; в эксплуатации находятся более 200 устройств телеуправления и около 300 устройств телеизмерения. На центральных диспетчерских пунктах в основном применяются только телеизмерение и телесигнализация ограниченного числа объектов, управление выключателями не осуществляется. На районных диспетчерских пунктах, где осуществляется телеуправление внутрирайонными сетями, увеличен объем телеуправления и со-

крашен объем телеизмерения. Телеуправление гидростанциями и подстанциями производится либо с базисной станции или подстанции, либо с районного диспетчерского пункта.

С подстанций полностью снимается персонал, если в аварийных случаях он может быть доставлен с базисной подстанции за 20—25 мин. В этих случаях широко применяется телеуправление (почти всеми выключателями) и передаются сигналы положения, газовой защиты трансформаторов, иногда сигналы, расшифровывающие действие защиты. Количество объектов управления на подстанциях достигает 20—30. Телеизмерение применяется для контроля напряжения на шинах и нагрузки трансформаторов, но только по вызову. Вместо контроля нагрузки иногда применяют телесигнализацию перегрузки.

В заключение докладчик коснулся вопроса о каналах связи и пришел к выводу о целесообразности применения высокочастотных каналов связи, как наиболее надежных и экономичных даже для линий до нескольких километров и десятков километров. Ведутся работы и подготовка по применению радиоканалов связи.

В докладе инж. А. М. Гнесина (Московское отделение ГПИ ТПЭП) «Типовое устройство телеуправления и телесигнализации» освещена одна из многопроводных систем телеуправления, которая проверена длительной эксплуатацией.

Разработанная система характеризуется следующими данными: для управления требуется число проводов связи $N = n + 4$ и количество реле на диспетчерском и контролируемом пункте $M = 5n_1 + n_2 + 10$, где n_1 — число управляемых и одновременно сигнализированных объектов, n_2 — число контролируемых объектов. Система быстродействующая: продолжительность передачи составляет порядка 0,8 сек. Схема обеспечивает постоянный контроль линии связи. Обрыв провода, короткое замыкание в линии и другие повреждения не ведут к ложным действиям, а легко обнаруживаются по квитированию или сигналу.

Устройство разработано в виде унифицированных релейных блоков на 6 реле, 12 реле и 24 реле, т. е. на 6 объектов управления, 12 сигналов и общий блок. Система надежно работает при расстоянии между ДП и ИП в 1,5 км и диаметре жилы кабеля 0,7 мм.

В докладе инж. Ю. Е. Левина (Харьковское отделение ГПИ ТПЭП) «Внедрение электроники и следящих систем в схемы автоматизации управления промышленными агрегатами» был рассмотрен опыт проектирования, исследования и наладки летучих ножиц стана 280 завода «Днепроспецсталь». В результате этой работы была осуществлена максимальная интенсивность процессов управления электроприводами ножиц и достигнута стабилизация следящей системы, построенной на принципе применения фазового дискриминатора с электронным усилителем. При вводе летучих ножиц в эксплуатацию обеспечена надежная их работа в части реза «на лету» малых длин металла и возможности реза больших длин металла. Вместе с тем докладчик указал на ряд существенных недостатков фазовых дискриминаторов с электронными усилителями: малый срок службы электронной лампы; чувствительность системы к высокочастотным паразитным напряжениям и потенциалам, емкостным токам, токам утечки в изоляции сети и т. п. В связи с этим Харьковское отделение ГПИ ТПЭП, разработало, изготовило и исследовало более совершенный фазовый дискриминатор, построенный на базе трансформаторного моста с применением магнитных усилителей как для измерительного устройства, так и для усиления полученных в этом устройстве сигналов. Такой фазовый дискриминатор показал удовлетворительную работу в качестве регулятора в сельсинно-следящей системе, обладая достаточно высокой чувствительностью и мощностью при весьма небольших габаритах и весе.

В докладе инж. П. И. Попова (Харьковское отделение ГПИ ТПЭП) «Система управления и наладки электрооборудования стана 350-2 Макеевского завода им. Кирова» был освещен опыт проектирования, исследования и наладки, пущенного в начале 1954 г., современного высокопроизводительного среднесортного непрерывного прокатного стана, рассчитанного на прокатку широкого ассортимента сортового металла с выходной скоростью до 12 м/сек. Электрооборудование

этого стана представляет большую новизну.

Все главные приводы прокатных клетей снабжены регулируемыми двигателями постоянного тока с питанием их главных цепей от безнасосных с воздушным охлаждением управляемых металлических ртутных выпрямителей (17 шт.) и с питанием их цепей возбуждения от индивидуальных стеклянных шестиянодных ртутных выпрямителей.

Предусмотрено устройство для автоматического регулирования скорости вращения прокатных двигателей, основанное на сравнении напряжения тахогенераторов, сидящих на валу главных двигателей с эталонным напряжением. Устройство имеет два каскада усиления, а также систему токоограничения и компаундирования, что дает возможность получать устойчивую работу привода с необходимыми по технологии скоростными характеристиками. Для получения эталонного напряжения предусмотрена установка двух синхронных генераторов с тиратронными регуляторами напряжения.

Указанное устройство обеспечивает: а) статическое отклонение скорости вращения прокатных двигателей в пределах не более 0,2% при изменении нагрузки от холостого хода до 200% номинальной; б) отклонение скорости до 2%, устанавливаемое в случае необходимости оператором стана; в) динамическое отклонение скорости не более 0,5%.

На аналогичном принципе питания и регулирования основана работа основных вспомогательных механизмов стана (ножиц, крюкового транспортера, тянущих роликов и др.). Исследование, наладка и пробная эксплуатация этого стана показали удовлетворительную работу электрооборудования и соответствие его технологическим требованиям за исключением некоторых элементов, подлежащих исправлению. К числу этих элементов относятся: цепи регулятора скорости, имеющие большую протяженность, что создает условия для появления паразитных токов в этих цепях; схема синхронизации вспомогательных механизмов с двигателем последней прокатной клети с использованием одного тахогенератора для получения напряжения сравнения для регулятора синхронизации и вспомогательными механизмами, что создавало паразитные токи, расстраивающие работу регуляторов.

В докладе инж. Л. С. Линдорфа (ЦИЭЛ МЭС) «Самозапуск синхронных двигателей» был освещен опыт организаций Министерства электростанций в части внедрения автоматики синхронных двигателей, обеспечивающей повышение устойчивости системы при кратковременных понижениях напряжения в сети. На базе проведенных исследований и изучения опыта эксплуатации синхронных двигателей докладчик рекомендует максимально упрощать схемы пуска, автоматизации и защиты электродвигателей, применяя для этой цели: а) пуск непосредственно от сети с глухоприсоединенными возбудителями и б) только основные виды защит, отключающие поврежденные синхронные двигатели ответственных механизмов или реагирующие на асинхронный их ход.

При выпадении синхронных двигателей из синхронизма необходимо в первую очередь принимать меры по ресинхронизации их простейшими методами, т. е. введением форсировки возбуждения, введением добавочного сопротивления в цепь ротора двигателя.

Для ответственных механизмов следует выбирать синхронные двигатели по условиям их самозапуска, т. е. применять синхронные двигатели с высокими пусковыми характеристиками.

Защита минимального напряжения в случае ее применения должна снабжаться выдержкой времени не менее 0,5 сек.

На предприятиях, имеющих синхронные двигатели, рекомендуется широко применять АВР и обеспечивать в первую очередь самозапуск синхронных двигателей.

В докладах инж. Г. А. Лукашенко (Ростовское отделение ГПИ ТПЭП) и инж. Г. Р. Кузнецова (ГПИ ТПЭП) были изложены вопросы обобщения опыта проектирования, наладки, монтажа и эксплуатации комплексной автоматизации отечественных трубопрокатных агрегатов на Бакинском и Закавказском металлургических заводах. В докладах указывается, что значительную часть комплексной автоматизации отдельных узлов стана не удалось реализовать по причинам недостаточной отработанности технологических узлов, неработоспособности и неправильной расстановки части аппаратов, обеспечивающих командные им-

пульсы (первичные датчики). К числу таких аппаратов относятся фляжковые выключатели, разработанные Уралмаш-заводом, фотореле конструкции треста «Электропривод» и ряд других. Необходима совместная работа механиков, электриков и технологов для создания благоприятных условий, обеспечивающих безотказную автоматическую работу высокомеханизированных прокатных станков. Особо отстоящим участком в области автоматизации управления являются отделочные пролеты трубопрокатных цехов, в которых сосредоточена наибольшая часть обслуживающего персонала цеха. В докладе инж. Г. Р. Кузнецова отмечается успешный опыт комплексной автоматизации трубоотрезных станков, проведенной докладчиком на трубопрокатном агрегате Закавказского металлургического завода, и намечаются пути к более широкому использованию этого опыта.

В докладе инж. А. С. Симиса (ГПИ «Электропроект») был освещен опыт проектирования и наладки современных бетонных и цементных заводов.

В докладах инж. Е. П. Бронштейна (ГПИ ТПЭП) и инж. Я. М. Бунича (ГПИ «Электропроект») освещен опыт проектирования автоматизации и диспетчеризации на рудниках цветной металлургии. Проектами автоматизации охвачена работа: насосных и компрессорных станций, лебедок конусного отвала породы, вентиляционных установок и шахтных подъемников. Диспетчеризация и телемеханизация обеспечивают слаженную и безаварийную работу основных устройств рудников. Отмечается отсутствие согласованной работы проектных, исследовательских и заводских организаций в этой области.

В докладах инж. С. В. Френкеля, инж. А. П. Хечумяна (Московское отделение ГПИ ТПЭП) и Г. П. Левина (Ленинградское отделение ГПИ ТПЭП) освещен опыт разработки и исследования ряда специальных автоматических устройств, в том числе:

а) автоматические регуляторы тока ртутно-преобразовательных подстанций для электролиза алюминия, обеспечивающие точность группового регулирования тока в пределах $\pm 0,5\%$;

б) измерительное устройство (дифференциальный тахометр) для настройки непрерывных станков, обеспечивающее точность замера в пределах $0,13\%$ от максимальной скорости двигателя.

В качестве датчика для этого устройства применены индукционные машины переменного тока, а в качестве измерительного прибора — электронно-лучевая трубка с индикатором времени;

в) фотореле на базе фотосопротивления, хорошо работающее в качестве датчика;

г) бесконтактное устройство для питания шин мигающего света в схемах автоматики, телемеханики и релейной защиты, состоящее из колебательного контура (магнитный усилитель и емкость), включенного в цепь переменного тока магнитного усилителя.

Все докладчики и выступавшие в прениях отмечали необходимость расширения номенклатуры электрооборудования для осуществления надежных систем автоматизации и диспетчеризации в промышленных установках. В связи с этим предъявлен ряд конкретных требований к электропромышленности. Намечены пути для дальнейшего более широкого внедрения автоматики и телемеханики в промышленные установки тяжелой индустрии.

Инж. Я. М. Большаков и инж. С. М. Мессерман

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

В Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) Министерства станкостроительной и инструментальной промышленности (МС и ИП) в ноябре 1954 г. было проведено научно-техническое совещание работников станкостроительных заводов специальных конструкторских бюро и научно-исследовательских организаций МС и ИП, посвященное обобщению и обмену опытом проектирования, изготовления, наладки и эксплуатации электрооборудования металлорежущих станков, проработке вопросов дальнейшего развития электрических приводов в станках и формулированию новых тре-

бований к электрооборудованию в связи с общим развитием станкостроения и значительным повышением уровня автоматизации станков.

В работе совещания приняли участие представители многих машиностроительных заводов, различных проектных, научно-исследовательских и учебных институтов, всего свыше 250 делегатов из 42 городов.

На совещании было заслушано 24 доклада и значительное число сообщений с мест.

Открывший совещание академик В. И. Дикишин (ЭНИМС) во вступительном слове указал на задачи, поставленные перед совещанием, и отметил некоторые важные вопросы по электрооборудованию станков, которые должны быть решены в ближайшем будущем: создание экономической системы плавного регулирования скорости асинхронных электродвигателей, разработка систем управления, обеспечивающих работы станка с оптимальными режимами резания, автоматизация управления для получения заданных размеров изделия с заданной точностью, создание электродвигателя для прямолинейного движения и др.

От Технического управления МС и ИП с докладом «Задачи развития советского станкостроения» выступил главный конструктор Министерства инж. М. Е. Марданян, который отметил основные тенденции развития современного станкостроения: широкое использование принципа агрегатирования, повышение скорости обработки, максимальная механизация и автоматизация вспомогательных операций, снижение веса станков, централизованное изготовление стандартных узлов и механизмов и ряд других. Докладчик указал в качестве основных задач: построение автоматических линий из серийных станков, создание станков-автоматов с быстрой переналадкой, обеспечивающей целесообразность применения их в мелкосерийном производстве и расширение производства прецизионных и тяжелых станков.

Общие вопросы электрооборудования станков были рассмотрены в докладе кандидата техн. наук В. Г. Зусмана (ЭНИМС) «Состояние и развитие электрического привода и управления металлорежущих станков». Докладчиком были сформулированы требования к электрическим приводам отдельных групп станков и отмечена необходимость повышения срока службы электрических аппаратов, применяемых в электроприводах станков.

Кандидат техн. наук И. Я. Ниберг (ЭНИМС) представил доклад «Технико-экономические показатели приводов вращательного движения металлорежущих станков».

Пять докладов были посвящены вопросам привода и управления тяжелых станков. Инж. В. А. Найдис (ЭНИМС) в докладе «Развитие электрического привода и управления тяжелых станков» остановился на требованиях, предъявляемых к электрооборудованию тяжелых станков, основными из которых являются: а) высокая степень механизации с одновременным расширением дистанционного управления; б) повышенная надежность работы и в) высокие энергетические показатели.

В докладе «Электрооборудование тяжелых станков, выполненное трестом «Электропривод» инж. Л. И. Шапиро (трест «Электропривод») сообщил об электроприводе серий тяжелых продольно-фрезерных, карусельных и токарных станков и остановился на разработанной и испытанной на станках системе электропривода подачи суппортов для тяжелых карусельных и токарных станков, позволяющей производить выбор и отсчет подачи (в мм/об) путем электрической связи между системами управления главным приводом и приводом подачи. Докладчик отметил перспективность применения в приводах подачи с широкими диапазонами электрического регулирования промежуточных магнитных усилителей и ионного привода с управляемым ртутным выпрямителем для главного привода тяжелых карусельных и токарных станков.

Инж. А. М. Разыграев (Станкозавод им. Свердлова) и инж. Я. С. Бровман (Новосибирский завод тяжелых станков и гидропрессов им. Ефремова) в докладах «Проектирование, наладка и эксплуатация электроприводов тяжелых станков» поделились опытом представляемых ими предприятий в указанной области. А. М. Разыграев указал, что принятая заводом си-

стема бесступенчатого изменения скорости привода подачи обеспечивает изменение подач в широком диапазоне, получение малых импульсных доводочных перемещений, заменяющих ручные, получение быстрых установочных перемещений при ослаблении потока двигателя, автоматизацию управления точной остановкой. Сокращение вспомогательного времени при работе на станках обеспечивается преселективной системой переключения подвижных органов, совмещением функций управления, связями между органами управления скоростью и подачей, дублированием управления. Конструкция узлов электрооборудования разработана с учетом требований узловой сборки и узлового контроля. Переход к приводу подачи от асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором взамен ранее применявшихся двигателей постоянного тока, помимо улучшения энергетических характеристик, значительно повысил также надежность работы станков.

Инж. В. А. Обухов (СКБ МС и ИП) в докладе «Электрооборудование тяжелых копировально-фрезерных станков» осветил ряд вопросов, связанных с разработкой электроприводов таких станков.

В докладе инж. Г. К. Михна (ЭНИМС) «Состояние электроавтоматизации универсальных и специальных станков» приведена классификация систем электрического управления и на основе анализа значительного числа схем управления отечественных станков оценены достоинства и недостатки различных систем регулирования.

Классификации и обзору копировальных систем универсальных станков был посвящен доклад инж. Г. А. Монахова (ЭНИМС) «Копировальные устройства универсальных станков».

Три доклада на тему «Опыт проектирования, наладки, монтажа и эксплуатации универсальных станков» были сделаны инж. Г. Д. Винокуровым (завод «Красный пролетарий»), инж. М. П. Рашковичем (СКБ МС и ИП) и инж. Ю. Е. Михеевым (Завод внутришлифовальных станков). В докладах были освещены задачи и требования в области электроавтоматизации различных станков и приведены примеры выполненных заводом конструкций узлов и станков. Подробному рассмотрению была подвергнута система точного отсчета перемещений и фиксированного останова с индуктивным устройством, успешно применяемая в координатно-расчетных станках. В докладах было подчеркнуто, что качественная работа прецизионных станков требует соответствующего исполнения электродвигателей в части точности изготовления, статической и динамической балансировки и бесшумности.

Кандидат техн. наук В. Т. Быбешев (ЭНИМС) в докладе «Монтаж электрооборудования на металлорежущих станках» указал на большое значение качества монтажа электрооборудования для надежной работы станка и сформулировал ряд требований, выполнение которых обеспечивает высокое качество монтажа и надежную работу электрооборудования. Особенное внимание должно быть обращено на защиту электрооборудования от масла, эмульсий, зачастую попадающих в него с электроаппаратурой и электропроводкой.

В докладе инж. Е. А. Семенова (Завод низковольтной аппаратуры МС и ИП) «Основные вопросы конструирования, нормализации и изготовления электрооборудования заводами МС и ИП» было сообщено о росте производства электротехнических изделий в системе МС и ИП.

Пять докладов были посвящены отдельным системам электроприводов и их узлам. Инж. П. В. Маркин (ЭНИМС) в докладе «Регулируемый электропривод малой мощности для универсальных станков» указал, что распространение регулируемых приводов в механизмах подачи и перемещений универсальных станков не получило должного размаха и является пока ограниченным и явно недостаточным. Объясняется это тем, что существующие конструкции регулируемых приводов не соответствуют в достаточной мере необходимым технико-экономическим предпосылкам широкого применения их на универсальных станках либо из-за неудовлетворительности характеристик (малый диапазон регулирования, мягкость механических характеристик, низкий к. п. д.), либо из-за чрезмерной сложности и дороговизны, а в отдельных слу-

чаях и малой надежности. Сделав обзор и анализ применяемых приводов малой мощности, докладчик наметил основные направления дальнейшего развития и усовершенствования таких приводов.

Кандидат техн. наук И. В. Харизоменов (Станкоинструментальный институт им. Сталина) в докладе «Регулирование привода главного движения для станков с двигателями переменного тока» рассмотрел возможные способы регулирования скорости двигателей переменного тока и более подробно остановился на реостатном регулировании скорости асинхронных двигателей с фазным ротором.

Инж. О. Н. Татур (ЭНИМС) в докладе «Электромагнитные муфты и их применение в станках» сообщил о работах ЭНИМС в области создания различных типов электромагнитных муфт. Электромагнитные муфты, позволяющие осуществлять дистанционное или автоматическое переключение кинематических цепей станка, становятся одним из важных элементов современных автоматизированных станков. Серия многодисковых фрикционных электромагнитных муфт охватывает в шести габаритах диапазон крутящих моментов от 1 до 100 кг/м. Порошковые электромагнитные муфты созданы для крутящих моментов до 500 кг/м и обладают высоким постоянством предельного передаваемого момента. Специальные порошковые муфты имеют весьма большие скорости протекания переходных процессов, в связи с чем времена включения и отключения таких муфт измеряются единицами миллисекунд. Докладчик отметил области применения различных типов электромагнитных муфт в станках.

В докладе доктора техн. наук Б. С. Сотскова (Институт автоматики и телемеханики АН СССР) «Элементы бесконтактной электроавтоматики» были рассмотрены различные схемы бесконтактных датчиков, усилителей и реле. Докладчик отметил, что в настоящее время предпочтение должно быть отдано индуктивным устройствам, на базе которых уже созданы промышленные образцы бесконтактных путевых выключателей и промежуточных реле.

Кандидат техн. наук Н. П. Васильева (ИАТ АН СССР) в докладе «Магнитные усилители» осветила вопросы классификации магнитных усилителей и изложила разработанный метод расчета и проектирования одноконтурных и двухконтурных промышленных усилителей, который позволяет получить необходимую кратность тока нагрузки, мощность и коэффициент усиления при минимальных габаритах и весе усилителя.

Доклады, освещающие вопросы электрооборудования автоматических станочных линий были сделаны кандидатом техн. наук В. Г. Зусманом (ЭНИМС), инж. П. И. Стрельниковым (СКБ МС и ИП) и инж. А. П. Никольским (СКБ МС и ИП). В докладах отмечалось, что рационально строить систему автоматического управления линиями таким образом, чтобы каждый станок имел замкнутый цикл управления, а количество взаимосвязей между отдельными станками и системой управления линией было минимальным. Было отмечено, что повышение надежности работы систем управления линиями должно пойти по пути применения бесконтактной аппаратуры и в первую очередь путевых выключателей и промежуточных реле, а также многоцепных и многопозиционных командоаппаратов. Было сообщено, что в схемах станочных линий, предназначенных для обработки корпусных деталей, применяется командоаппарат, который позволяет рационально решить задачу сигнализации на линии и создать искатель повреждений. Было отмечено важное значение проведенной нормализации отдельных устройств электрооборудования — пультов управления, дистанционных кранов, светофоров, сигнализаторов заземления и др. В докладах были освещены оригинальные схемы и конструкции электрических узлов автоматических станков и линий: автоматическая подналадка шлифовальных кругов по мере их износа, автоматическое переключение на рабочую подачу шлифовального круга при соприкосновении с изделием, параллельная работа высокочастотных генераторов при раздельных цитах управления и ударной нагрузке и ряд других.

Доктор техн. наук М. А. Гаврилов (ИАТ АН СССР) выступил с докладом «Теория релейных схем и ее применение при синтезе систем элект-

трического управления станками и станочными линиями».

Заслушанные доклады и сообщения с мест вызвали широкий обмен мнениями. В прениях выступило 39 делегатов. Наиболее оживленно обсуждались вопросы привода тяжелых станков, которые частично были вынесены на секционное заседание, и вопросы расширения номенклатуры выпускаемых электротехнических изделий.

Доклад представителя МЭП СССР «Электрооборудование для станков, изготавливаемое заводами МЭП», не состоялся.

В решениях совещания было отмечено, что двигатели постоянного тока в главном приводе тяжелых станков следует применять: для токарных станков с диаметром обработки 1 600 мм и более; для карусельных — с диаметром обработки 4 000 мм и более; для расточных — с диаметром шпинделя 150 мм и более, а также для электрифицированных продольно-строгальных, долбежных и прецизионных координатно-расточных станков. В остальных станках следует для главного привода применять асинхронные двигатели. В качестве гонных двигателей преобразовательных агрегатов при мощности свыше 100 кВт совещание рекомендовало применение синхронных двигателей. Совещание отметило перспективность применения в главном приводе тяжелых станков ионного привода с использованием игнтронов и управляемых ртутных выпрямителей.

Совещание отметило большую разнородность структурных схем регулирования электроприводов подачи тяжелых станков и считает необходимым значительно усилить работу по типизации этих систем.

Совещание в своих решениях сформулировало требования к регулируемым в широком диапазоне электроприводам подачи тяжелых станков, основными из которых являются: а) нестабильность подачи в статических режимах не должна превышать $\pm 5\%$ и только на минимальных подачах достигать $\pm 10\%$; б) должна быть исключена возможность аварии электрооборудования станка или брака детали при возможных неисправностях электрооборудования; в) электропривод должен обладать возможно более простой структурной схемой с минимальным числом жестких и гибких обратных связей и контактов в цепях регулирования; г) для большинства станков при настоящем уровне развития систем регулирования электропривода следует ограничиться диапазоном электрического регулирования скорости вращения двигателя 1:100 ÷ 1:200, принимая при необходимости большего диапазона подач — электромеханическое регулирование.

Кандидат техн. наук В. Г. Зусман

СОВЕЩАНИЕ ПО ПРОИЗВОДСТВУ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МАНГАНИНА

Секция специальных материалов Лонитоприбор провела в июне 1954 г. совещание по вопросам производства и использования мanganина. Совещание обсудило три группы вопросов: 1) об изготовлении мanganиновых сплавов и изменении их состава для удовлетворения различных запросов потребителей; 2) об изготовлении изолированных проводов из мanganина и 3) об изготовлении сопротивлений из мanganиновой проволоки и о средствах стабилизации заданной величины сопротивления.

Г. К. Покровская (завод цветной металлургии) сообщила об освоении выпуска мanganина нового состава, отличающегося значительно меньшим температурным коэффициентом в узком интервале температур. За счет присадок удалось сместить вершину параболической кривой зависимости температурного коэффициента сплава в область комнатных температур. Мanganин этого состава с успехом использован для изготовления особо точных сопротивлений.

С. И. Олевский (Институт прецизионных сплавов) сообщил о разработке нового мanganинового сплава на основе марганца. Этот мanganин имеет удельное сопротивление, в 4 раза более высокое, чем у обычного; его температурный коэффициент укладывается в средние нормы, но в значительно большем интервале температур, а термо-э. д. с. в паре с медью очень мала, однако стабильность его сопротивления во времени недостаточна.

В. Пашенко в основном остановился на применяемом высокотемпературном вакуумном отжиге мanganина. Если бы тонкие проволоки, подверженные этому отжигу, загружа-

лись в печь намотанными на каркасы в виде готовых сопротивлений, то они после этой операции отличались бы высокой стабильностью. Перемотка же проволоки, подвергнутой вакуумному отжигу, при ее эмалировании и при изготовлении сопротивлений на заводах-потребителях, требует затем стабилизирующей обработки. Светлый отжиг освобождает от травления тонких проволок и потребитель получает мягкую, мало ломкую изолированную проволоку.

В. А. Привезенцев осветил историю изменений рецептуры изолирующих смол. Были высказаны замечания о недостаточности изоляции на мanganине в 30..20 мкм, а также пожелания вырабатывать мanganин тоньше 20 мкм.

В связи с этим вызвал интерес доклад В. Г. Теличина об очень тонкой мanganиновой проволоке в сплошной стеклянной изоляции, диаметром от 3 до 15 мкм с пробивным напряжением не ниже 1,5 кв. Сопротивление 1 м такой проволоки достигает 40 тыс. ом. Из нового мanganина на основе марганца также были изготовлены образцы микропроволоки в стеклянной изоляции; 1 м такой проволоки имеет сопротивление до 150 тыс. ом.

Ряд сообщений на совещании был посвящен вопросу изготовления мanganиновых сопротивлений. Освоен выпуск сопротивлений высокой точности (до 0,001%); имеются возможности контроля за стабильностью сопротивлений до 0,00001%.

З. И. Зеликовский изложил результаты работы, проведенной под руководством К. Б. Карандеева. В этой работе применялось низкотемпературное (до 140° С) старение сопротивлений, но при этом конец старения определялся не зафиксированной продолжительностью выдержки или числом циклов, а по изменению сопротивления для заданной точности.

В. С. Уманцев сообщил о разработанных и широко используемых в производстве двух способах стабилизации. Высокоомные сопротивления подвергаются нагреву в вакууме (10^{-5} мм рт. ст.) с выдержкой всего 4 час. при температуре в 550° С. Для стабилизации же малоомных сопротивлений и шунтов использован импульсный (кратковременный до 0,05 сек.) разогрев током до яркого свечения в обычной атмосфере. Кратковременность нагрева, несмотря на высокую температуру, избавляет от заметного окисления. Окончание старения по обоим способам устанавливается электротехническими измерениями и металлографическим анализом. Дальнейшего увеличения стабильности мanganиновых сопротивлений можно добиться путем соответствующего крепления проволоки на каркасе без натяга и заключения готового сопротивления в герметическую оболочку, наполненную сухим воздухом.

С. А. Спектор сообщил об установке, использованной в заводских условиях для старения большого числа шунтов и малоомных сопротивлений импульсным методом.

Совещание заслушало также доклады С. М. Пигина Б. С. Горбачевича (ВНИИМ), А. А. Меркулова.

Совещание вынесло решение о необходимости обобщения накопленного опыта и разработки всеми заинтересованными организациями плана дальнейших научно-исследовательских и опытных работ по мanganину.

Инж. В. П. Матвеев

Ленинград

ДИССЕРТАЦИИ

Московский энергетический институт им. Молотова

В Ученом совете Московского энергетического института им. Молотова защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период с октября 1948 г. по декабрь 1951 г.¹

Е. И. Бозовская защитила 22 октября 1948 г. диссертацию на тему: «Стробоскопический эффект в осветительных установках». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. Д. Белькинд и проф. С. О. Майзель.

На основе анализа исследования изменения светового потока люминесцентных ламп и выяснения влияния этих изменений на зрительное восприятие, разработаны методы устранения стробоскопического эффекта.

¹ Диссертации за предшествующий период см. Электричество, № 7, 1946; № 4, 1947; № 3 и 11, 1948.

Л. С. Лурье защитил 22 октября 1948 г. диссертацию на тему: «Кажущаяся мощность несимметричной и несинусоидальной трехфазной системы». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Городский и кандидат техн. наук, доц. Б. А. Князевский.

В качестве характеристики фактической загрузки по току и напряжению несимметричной трехфазной системы использована кажущаяся мощность. В выражение кажущейся мощности введена величина — мощность несимметрии. Предложено новое определение мощности искажения трехфазной цепи. Понятие мощности несимметрии распространено на случай несинусоидальных токов.

И. И. Шумский защитил 24 декабря 1948 г. диссертацию на тему «Увлажнение лакотканей и методика определения их диэлектрических свойств». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. М. Брагин и доктор техн. наук, проф. Б. М. Тареев.

Установлены параметры величины влажности окружающей среды и оптимальное время увлажнения, которые гарантируют точность электрических показаний при испытаниях. Определена функциональная зависимость между величинами увлажнения и проводимостью лакоткани. Испытанием лакотканей на удельное объемное сопротивление, угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости определены наименьшие значения этих величин при использовании лакотканей в промышленности.

А. Г. Сливинская защитила 14 января 1949 г. диссертацию на тему «Исследование магнитных проводимостей воздушных промежутков, имеющих осевую симметрию». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Н. Ларионов и кандидат техн. наук Н. Е. Лысов.

На основании экспериментального материала, путем разработанного метода подобия установлены математические зависимости, выражающие магнитную проводимость наиболее распространенных форм воздушных зазоров. Предложен графический метод построения картин поля.

П. А. Кремлевский защитил 11 февраля 1949 г. диссертацию на тему «Разработка метода испытания на антикоррозийную устойчивость электроизоляционных лаков». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Б. М. Тареев и кандидат техн. наук Н. Н. Соколов.

Предложен новый метод испытаний на антикоррозийную устойчивость электроизоляционных лаков. Разработана установка, позволяющая производить испытания одновременно различных лаков при одинаковых условиях. Произведено испытание ряда типичных электроизоляционных лаков на антикоррозийную устойчивость их в различных химических средах, отвечающих условиям действительной службы.

А. Д. Свенчанский защитил 11 февраля 1949 г. диссертацию на тему «Электрические промышленные печи». Официальные оппоненты: доктор хим. наук, проф. П. П. Курнаков, проф. Л. Аронов и гл. инженер треста «Электропечь» А. С. Луцкер.

Составлена классификация электрических печей по принципу выделения тепла и охарактеризованы области применения электрических печей. Изложены основные принципы передачи тепла в печах. Даны указания по выбору основных параметров дуговых печей и по расчету электродов. Составлен энергетический баланс дуговой печи, приведены числовые примеры.

Н. Т. Кобякова защитила 25 февраля 1949 г. диссертацию на тему «Дифференциальная защита трансформаторов, не работающая при бросках тока намагничивания». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Г. И. Атабеков и кандидат техн. наук В. Л. Козис.

Предложена схема с промежуточными насыщающимися трансформаторами тока. Для этой схемы был выполнен анализ влияния различных факторов на эффективность работы насыщающихся трансформаторов тока.

Г. Д. Михайлов защитил 25 февраля 1949 г. диссертацию на тему: «Теория контакта химически однородных полупроводников». Официальные оппоненты: член-корр. АН СССР Я. И. Френкель и кандидат техн. наук Д. М. Чернышев.

Проанализирована проводимость контакта химически однородных полупроводников с точки зрения двух возможных механизмов проводимости — термоэлектронного и туннельного. Рассмотрены статическая и динамическая проводимости угольного порошка. Выведена формула микрофонного эффекта.

В. П. Сасоров защитил 25 февраля 1949 г. диссертацию на тему «Ртутные лампы сверхвысокого давления». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. П. Иванов и доктор физ.-матем. наук, проф. З. А. Фабрикант.

Рассмотрены причины низкой экономичности ламп накаливания, свойства холодного излучения газа при электрическом разряде и разряда в парах ртути при сверхвысоком давлении. Исследованы светотехнические и электрические свойства ламп СВД-111 и дан приближенный расчет этой лампы.

М. И. Царев защитил 22 апреля 1949 г. диссертацию на тему «Анализ работы дифференциальной защиты трансформаторов в переходных режимах и разработка способов ее усовершенствования». Официальные оппоненты: проф. А. М. Федосеев и кандидат техн. наук И. А. Сыромятников.

Теоретически и экспериментально исследованы переходные процессы в токовых цепях дифференциальной защиты трансформаторов при внешних и внутренних коротких замыканиях, а также при бросках намагничивающего тока. Предложена простая и надежная дифференциальная защита.

Е. С. Фрид защитил 3 июня 1949 г. диссертацию на тему «Расчет импульсных градиентов в обмотках трансформаторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. А. Карасев и кандидат техн. наук, доц. М. В. Липовский.

Дан практический метод расчета градиентов перенапряжения в обмотках трансформаторов для актуальных случаев при импульсных испытаниях. Метод подтвержден экспериментальными данными на моделях.

А. М. Вайнберг защитил 17 июня 1949 г. диссертацию на тему «Исследование современных электромашинных систем автоматического регулирования дуговых сталеплавильных печей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов и кандидат техн. наук, доц. Э. Г. Удерман.

Проведено сравнительное теоретическое и экспериментальное исследование типичных современных систем регулирования дуговых печей: контакторной, электромашиной, электронно-ионной и предложенной автором — системы на переменном токе.

В. М. Горштейн защитил 17 июня 1949 г. диссертацию на тему «Наивыгоднейшее распределение нагрузки между параллельно работающими электростанциями». Официальные оппоненты: доктор техн. наук И. М. Маркович и кандидат техн. наук, доц. Н. А. Мельников.

Дано теоретическое развитие «метода относительных приростов» для решения задачи наивыгоднейшего распределения нагрузок. Выявлено влияние расхода электрической мощности на собственные нужды станции и потери электрической мощности в сети. Исследованы условия выгодности, пуска и останова отдельных агрегатов системы, разработана методика построения экономических характеристик для отдельных цехов и электростанций в целом.

А. П. Куваева защитила 17 июня 1949 г. диссертацию на тему «Исследование способов повышения перегрузочной способности асинхронных двигателей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. П. Розанов и кандидат техн. наук, доц. И. И. Петров.

Рассмотрены вопросы повышения перегрузочной способности асинхронных короткозамкнутых двигателей за счет временного повышения напряжения на их зажимах. Разобраны четыре способа форсировки.

Предложен метод расчета характеристик короткозамкнутых двигателей, работающих в условиях повышенного магнитного потока.

И. С. Бессмертный защитил 29 июня 1949 г. диссертацию на тему «Метод исследования режима

напряжения при расчетах городских электросетей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. А. Глазунов и кандидат техн. наук, доц. Н. А. Мельников.

Рассмотрены вопросы, связанные с напряжением у отдельных потребителей электроэнергии. Предложен новый критерий качества электроэнергии, полученный из рассмотрения функций распределения. Результаты исследования позволяют практически использовать разработанную теорию.

Л. А. Жуков защитил 29 июня 1949 г. диссертацию на тему «Некоторые вопросы теории работы синхронных генераторов с компаундными возбудителями». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. М. Маркович и кандидат техн. наук, доц. В. А. Веников.

Проведен анализ влияния различных параметров схемы возбуждения на качество регулирования и на статическую устойчивость работы генераторов, снабженных автоматическим регулированием возбуждения, а также пределов возможных и целесообразных изменений параметров исследуемых схем возбуждения.

В. А. Лисиченко защитил 29 июня 1949 г. диссертацию на тему «Датчики из голых тензочувствительных проволок в приборах, измеряющих электрическим методом неэлектрические величины». Официальные оппоненты: кандидат техн. наук, проф. А. С. Касаткин и кандидат техн. наук, доц. Ф. Е. Темников.

Выведена оригинальная формула, определяющая чувствительность проволоки. Рассмотрены мостовые схемы датчиков. Указано, что в ряде случаев целесообразно использовать четыре плеча моста в качестве тензометрических элементов. Описаны оригинальные конструкции сильфонного уровнемера, измерителя давлений, гравиметра и магнитометра.

А. Г. Москалев защитил 29 июня 1949 г. диссертацию на тему «Автоматическое регулирование частоты в энергосистемах». Официальные оппоненты: доктор техн. наук И. М. Маркович, доктор техн. наук, проф. П. С. Жданов и кандидат техн. наук, доц. В. А. Веников.

На основе анализа некоторых общих вопросов регулирования частоты в электрических системах сформулированы требования к регуляторам частоты, разработаны схема и конструкция непрерывно действующего регулятора частоты с магнитными усилителями. Дана оценка устойчивости работы регулятора и рекомендована аппаратура схемы системы регулирования частоты.

В. А. Борисов защитил 7 апреля 1950 г. диссертацию на тему: «Исследование работы электромашиного усилителя с поперечным возбуждением в двигательном режиме». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов и кандидат техн. наук, доц. Н. П. Куницкий.

Рассмотрен вопрос о целесообразности использования электромашиного усилителя (ЭМУ) с поперечным возбуждением в качестве двигателя. Выяснены его статические характеристики и переходные процессы. Описано большое количество экспериментальных исследований.

Г. К. Салгус защитил 14 апреля 1950 г. диссертацию на тему: «Конденсаторный электронный регулятор». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Н. Ларионов и доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов.

Дана теоретическое и экспериментальное исследование конденсаторного электромашиного регулятора (ЭМР) продольного поля. Разработан принцип действия ЭМР, условие его самовозбуждения и явления в нем при нагрузке. Произведено экспериментальное исследование ЭМР и автоматической схемы с конденсаторным ЭМР в качестве регулирующего элемента. Разработана методика расчета конденсаторного ЭМР.

Б. А. Филиппов защитил 29 апреля 1950 г. диссертацию на тему: «Исследование электромашиной системы управления возбуждения генератора реверсивного электропривода». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Т. Голован и кандидат техн. наук А. Я. Лервер.

На конкретном примере системы автоматического управления электроприводом мощного реверсивного прокатного стана типа блюминга рассмотрены статические характеристики и динамические свойства такого рода систем автоматического управления, проанализировано влияние параметров системы на переходные процессы и намечены пути улучшения свойств при одновременном упрощении структуры системы управления. Теоретические исследования проверены экспериментально на макетной установке.

О. В. Слежановский защитил 5 мая 1950 г. диссертацию на тему: «Исследование электроприводов с электромашинным усилителем в качестве возбудителя». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов и инж. Н. А. Тищенко.

Исследованы теоретические и экспериментальные условия пуска и торможения сложной системы электропривода и выявлено влияние обратных связей.

В. Л. Бакиновский защитил 30 июня 1950 г. диссертацию на тему: «Определение места повреждения на линиях электропередачи и связи импульсным методом». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Ю. Ломоносов, кандидат техн. наук, доц. П. В. Борисоглебский и доц. М. Д. Гуревич.

Предложена оригинальная методика импульсных измерений на линиях, установлены основные показатели измерений, сконструирован и внедрен в серийное производство прибор.

Л. А. Ваг защитил 30 июня 1950 г. диссертацию на тему: «Учет потерь активной мощности при выборе сечения проводов и кабелей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд и кандидат техн. наук В. И. Лапицкий.

Рассмотрен ряд вопросов экономического расчета электрических сетей. Предложен метод сопоставления капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Исходя из анализа экономических значений плотности тока, сделана критическая оценка действующих норм.

Н. П. Васильева защитила 30 июня 1950 г. диссертацию на тему «К расчету измерительных схем с измерительными трансформаторами». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. И. Чистяков и доктор техн. наук, проф. В. Н. Мильтштейн.

Разработана методика определения оптимальных параметров трансформаторов, определяющих общую чувствительность измерительной схемы и характеристику выходной величины схемы в функции от изменения измеряемой величины. Дана общая методика оценки погрешностей, вносимых измерительными трансформаторами в схемы измерения.

М. З. Жиц защитил 30 июня 1950 г. диссертацию на тему: «Исследование самовозбуждения серийных тяговых электродвигателей на подвижном составе городского транспорта при реостатном торможении». Официальные оппоненты: проф. С. А. Погожев и кандидат техн. наук, доц. Б. П. Петров.

Исследован процесс самовозбуждения электрических тяговых машин. Разработан метод расчета переходных процессов в тяговых машинах, позволяющий достаточно точно установить влияние параметров схем на быстроту и плавность возрастания тормозного момента.

Ю. Д. Рагозин защитил 30 июня 1950 г. диссертацию на тему: «Электронные логометры». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Ю. Ломоносов и кандидат техн. наук Б. И. Петров.

Рассмотрены принципы, которые могут быть применены при проектировании электронных логометров. Разработана конструкция электронного прерывателя, предназначенного для преобразования напряжения в коэффициент скважности. Предложена схема, позволяющая изменять коэффициент преобразования не только по величине, но и по знаку. Дано описание работы отдельных узлов импульсного логометра. Исследованы переходные процессы в усредняющей цепочке.

В. В. Пучковский защитил 30 августа 1950 г. диссертацию на тему «Испытание изоляции электрических машин методом саморазряда». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Ю. Ломоносов, проф. П. Г. Грудинский и кандидат техн. наук Л. Г. Мамиконянц.

Исследован вопрос о проведении профилактических испытаний изоляции электрических машин методом кри-вых саморазряда. Предложенный метод теоретически обоснован и экспериментально проверен.

Г. И. Шевченко защитил 8 декабря 1950 г. диссертацию на тему: «Стабилизированный по напряжению ионный преобразователь частоты». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Г. И. Бабат и доктор техн. наук, проф. М. А. Чернышев.

Исследована система преобразования частоты с неизменяющимся напряжением, предназначенная в основном для питания электропривода переменного тока при постоянной частоте управления. Предложен способ автоматической стабилизации выходного напряжения инвертора путем подмагничивания инверторного трансформатора в функции тока нагрузки таким образом, чтобы при изменении нагрузки напряжение на выходе оставалось стабильным и мало отличалось от синусоидального.

В. Т. Прытков защитил 26 января 1951 г. диссертацию на тему: «Расчет погрешностей трансформаторов тока методом комплексных магнитных сопротивлений». Официальные оппоненты: проф. А. С. Касаткин и кандидат техн. наук, доц. С. С. Окунь.

Приведен расчет погрешностей разных типов трансформаторов тока как аналитическими, так и графическими способами с последующей экспериментальной проверкой. Даны электрические зависимости, позволяющие с достаточной точностью производить расчеты комплексных магнитных сопротивлений магнитного шунта с учетом воздушного зазора и поверхности соприкосновения магнитного шунта с сердечником. Разработана методика учета потоков рассеяния в воздухе трансформаторов типа 0-49.

Б. Н. Тардов защитил 26 января 1951 г. диссертацию на тему: «Исследование сопротивления изоляции класса В (на примере гидрогенераторов)». Официальные оппоненты: проф. Н. В. Александров и доктор техн. наук, проф. Н. Г. Дроздов.

Исследованы зависимости сопротивления изоляции класса В от электрохимических и геометрических параметров генератора и изоляции, длительности приложения испытательного напряжения, его величины, от возраста изоляции и других факторов. Дан электрический и тепловой расчет сушики обмоток генератора.

Н. Я. Заславская защитила 23 марта 1951 г. диссертацию на тему: «Система автоматического управления сталеплавильной печью с применением электромагнитного усилителя поперечного поля». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук А. И. Вайнберг.

В предложенной системе управления электродами сталеплавильной печи получен посредством введения в измерительный элемент нелинейных сопротивлений и правильного выбора режима работы отдельных аппаратов регулятора, который обладает высокими статическими и динамическими характеристиками.

В. С. Шаров защитил 4 мая 1951 г. диссертацию на тему: «Теоретическое и экспериментальное исследование регулируемого однофазного преобразователя». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук, доц. М. И. Романов.

Разработана электрическая машина, даны основы теории ее работы и методика расчета. Выполнена конструкторская разработка. Проведено экспериментальное исследование установившихся и переходных режимов работы на моделях с равномерным воздушным зазором и с выступающими полюсами.

Н. К. Круг защитила 15 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Расчеты линейных электрических схем для получения и преобразования импульсов». Официальные оппоненты: доктор техн.

наук, проф. Г. И. Атабеков и доктор техн. наук М. В. Мееров.

Дан новый, экспериментально проверенный, метод синтеза электрических цепей, основанный на разложении заданных кривых входного и выходного напряжений на сумму экспоненциальных слагающих.

И. И. Пеккер защитил 15 июня 1951 г. диссертацию на тему: «О расчете времени трогания и отпускания броневых электромагнитов с массивным стальным сердечником». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Ю. Ломоносов, кандидат техн. наук А. В. Данилин и кандидат техн. наук А. В. Гордоп.

Выяснено влияние вихревых токов, потоков рассеяния и явления насыщения на быстроту действия электромагнитов рассматриваемого типа. Дан метод оценки влияния вихревых токов на время трогания и время отпускания.

А. М. Рывкин защитил 15 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Исследование и расчет схем с дросселями насыщения по амплитудным значениям». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Ю. Ломоносов и доктор техн. наук Ю. Г. Толстов.

Разработана амплитудная теория дросселя насыщения, позволяющая с небольшой погрешностью использовать приемы теории линейных цепей для исследования и расчета дросселей насыщения и схем их применения. Разработаны графоаналитический и аналитический методы расчета дросселя насыщения. Дана конструкция переносного микроамперметра с магнитным усилителем, имеющего номинальное значение шкалы 4 мкА.

Б. М. Фрадкий защитил 15 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Ферромагнитный шар в магнитном поле и некоторые вопросы теории магнитодиэлектриков». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. А. Жекулин и доктор физ.-матем. наук, проф. Е. Н. Кондорский.

Разработан метод математически строгого расчета свойств магнитодиэлектриков в переменных магнитных полях. Результаты работы могут быть использованы в практических расчетах, особенно в области высоких частот.

А. А. Шишкин защитил 15 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Исследование схемы фазобалансного моста». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Н. Мильштейн и кандидат техн. наук, доц. М. И. Левин.

Представлен критический обзор существующих методов расчета двухконтурных суммарнозначностных выпрямителей, одним из видов которых является фазобалансный мост. Разработаны способ исследования и метод расчета схемы при заданной входной мощности. Описаны контрольные эксперименты.

Б. Г. Каменецкий защитил 29 июня 1951 г. диссертацию на тему «Исследование элементов рудничного бесконтактного электротранспорта на переменном токе повышенной частоты». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. И. Бабат, кандидат техн. наук О. А. Некрасов и кандидат техн. наук, доц. Л. Н. Трахтман.

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с внедрением рудничного бесконтактного электротранспорта на переменном токе повышенной частоты, включая теорию бесконтактной передачи энергии на электровозы, характеристику электровозов и систему энергоснабжения.

В. И. Серов защитил 29 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Исследование характеристик рельсовых электромагнитных тормозов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. К. Минов и кандидат техн. наук М. З. Жиц.

На основании экспериментальных исследований рельсовых тормозов разработана методика графоаналитического расчета и построения электромагнитных и тяговых характеристик рельсовых электромагнитов. Проведенные исследования по определению степени ослабления удельного тормозного усилия у рельсовых электромагнитов с продольным и поперечным потоком при различных режимах работы способствовали решению вопроса о влиянии вихревых токов на эффективность действия тормозных электромагнитов.

В. И. Скурихин защитил 29 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Замедление переходных процессов в системе генератор—двигатель при постоянстве тока в главной цепи». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов и кандидат техн. наук Н. Н. Дружинин.

Рассмотрены различные методы получения замедленных процессов возбуждения в системе генератор—двигатель при условии соблюдения оптимальной формы кривой тока в главной цепи машин.

А. С. Филатов защитил 29 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Электропривод и система регулирования непрерывных станов холодной прокатки». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов и доц. А. А. Дубенский.

Разработаны вопросы применения следящей системы для автоматического регулирования напряжения между клетями. Произведенный анализ позволяет решать ряд принципиальных вопросов по выбору системы регулирования непрерывных станов холодной прокатки и по расчету ее главных узлов.

Л. Н. Беляев защитил 2 ноября 1951 г. диссертацию на тему: «Экспериментальные и расчетные исследования генератора для автобусных электропередач». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Н. Ларионов и кандидат техн. наук, доц. Л. М. Трахтман.

На основе подробного теоретического и экспериментального анализа даны рекомендации по выбору рациональной формы внешней характеристики дизель-генератора для автобусных электропередач.

Г. П. Лыщинский защитил 2 ноября 1951 г. диссертацию на тему: «Теоретическое и экспериментальное исследование схем электропривода моделирующей установки». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов и доктор техн. наук, проф. С. П. Розанов.

Теоретически и экспериментально исследованы три варианта схемы. При этом специально рассмотрен вопрос о

дающем органе системы — датчике и разработан технический проект установки.

Ю. М. Шамаев защитил 2 ноября 1951 г. диссертацию на тему «Новые методы осциллографирования сверхвысоких частот». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов и кандидат техн. наук А. М. Дубинин.

Разработаны новые методы осциллографирования электрических процессов, изменяющихся во времени с весьма большой скоростью. Предложена оригинальная система управления катодным лучом для контроля процессов сверхвысокой частоты при низких напряжениях.

А. Н. Мартынов защитил 7 декабря 1951 г. диссертацию на тему «Учет магнитного насыщения в явнополюсных синхронных машинах». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук, доц. П. С. Сергеев.

Проведено исследование кривых поля явнополюсных синхронных машин с учетом насыщения стали статора как при холостом ходе, так и при нагрузке. Результаты исследований могут быть использованы для более точных расчетов основных параметров этих машин. Проведены исследования по обоснованию наиболее выгодных размеров и формы полюсных наконечников, рассмотрен вопрос о влиянии магнитного насыщения на угловые характеристики явнополюсных синхронных машин.

А. В. Склянин защитил 29 декабря 1951 г. диссертацию на тему «Высококачественные и импульсные процессы в трансформаторных обмотках». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Ю. Ломоносов и кандидат техн. наук, доц. А. В. Коричкий.

Дано подробное теоретическое и экспериментальное исследование волновых процессов в обмотках в различных модификациях моделей. Исследование позволяет уточнить величины функций взаимной электростатической и магнитной индукций.

Доцент А. С. Сергеев

ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК А. Г. ЗАХАРИН (К 50-летию со дня рождения)

Видный специалист в области электрификации сельского хозяйства доктор техн. наук Андрей Георгиевич Захарин родился 10 ноября 1904 г. в городе Батуми.

Высшее специальное образование А. Г. Захарин получил в Тбилиском государственном политехническом институте. После окончания института А. Г. Захарин с 1932 до 1943 г. работал во Всесоюзном институте электрификации сельского хозяйства, а с 1943 г. он работает в отделе общей энергетики Энергетического института им. Кржижановского Академии наук СССР, руководя группой электрификации сельского хозяйства. Одновременно А. Г. Захарин связан и с работами, выполняемыми ВИЭСХ Министерства сельского хозяйства СССР.

А. Г. Захарин участвовал в создании научных основ распределения электрической энергии в сельскохозяйственных районах, в частности, теории проектирования системы передачи два провода — земля, новой экономичной трехфазно-однофазной системы распределения электроэнергии, регулирования напряжения в сельских сетях и др. Им исследованы вопросы проектирования полевых электрических сетей, предназначенных для питания мобильных электрифицированных машин, применяющихся в сельскохозяйственном производстве.



гиевич Захарин награжден орденом «Знак почта» и медалями.

Большое теоретическое и практическое значение имеют исследования А. Г. Захарина в области энергетического районирования сельскохозяйственных зон СССР.

А. Г. Захарин активно участвует в подготовке кадров инженерных и научных работников по электрификации сельского хозяйства и систематически консультирует работников филиалов АН СССР и академий наук союзных республик и других учреждений, ведущих научную и проектную работу в области сельской электрификации.

А. Г. Захарин — член секции электрификации Научно-технического совета МСХ СССР и научный консультант Главсельэлектро по вопросам планирования сельской электрификации. Он участвовал в решении ряда вопросов по организации ВСХВ 1954 г.

А. Г. Захарин в своей деятельности сочетает требования теоретических исследований и запросами практики. За свою плодотворную научную деятельность Александр Георгиевич Захарин награжден орденом «Знак почта» и медалями.

Г. М. Кржижановский, В. И. Вейц, М. Г. Еврейнков, В. Н. Андрианов, И. А. Будзко, Н. А. Сазонов и др.

И. В. ХАРИЗОМЕНОВ. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для машиностроительных вузов. 309 стр., ц. 9 руб. Машгиз, 1952.

Автор рецензируемого учебника поставил перед собой задачу рассмотреть комплекс основных сведений, необходимых инженеру-механику, конструирующему или эксплуатирующему современные металлорежущие станки.

Стремление создать новый учебник, посвященный вопросам электрооборудования станков, надо признать своевременным, так как последняя из ранее выпущенных книг (учебник С. А. Пресса), изданная в 1946 г., в известной мере устарела и является библиографической редкостью. Отличительной особенностью выпускавшихся ранее учебников по электрооборудованию станков была их насыщенность общими вопросами теории электропривода и управления им наряду с незначительным объемом основной части, посвященной вопросам собственно электрооборудования станков.

В рецензируемой книге по сравнению с ранее изданными содержится относительно большее количество современного материала, посвященного непосредственно электрооборудованию станков. Следует также отметить хорошо подобранный иллюстративный материал по электрической аппаратуре, применяемой в станках, и наличие, хотя и незначительного количества, примеров решения расчетных задач.

Вместе с тем книга обладает существенными недостатками. В ней не освещены некоторые важные вопросы электрификации станков, неправильно излагается ряд положений, имеют место значительные недоработки методического характера и т. д.

Так, во введении не показана передовая роль в области электрификации и автоматизации станков ряда конструкторских бюро, проектных организаций и крупных советских научных конструкторов. При рассмотрении повторно-кратковременного режима (гл. 3) отсутствуют понятия об относительной продолжительности работы и стандартных ее величинах. В этой же главе нет сведений о двигателях, предназначенных для кратковременного и повторно-кратковременного режимов, и о методах их выбора. Касаясь вопроса точной остановки электропривода (гл. 5, стр. 162), автор приходит к выводу «...что для увеличения точности остановки нужно уменьшить маховой момент системы и увеличить тормозящий момент». Между тем известно, что наиболее эффективным средством для повышения степени точности остановки является снижение скорости перед окончательным торможением. Говоря о разрядном сопротивлении для обмотки возбуждения, автор рекомендует выбрать это сопротивление достаточно большим для сокращения в нем дополнительных потерь энергии. Такая рекомендация неправильна, так как при чрезмерно большом разрядном сопротивлении может иметь место пробой изоляции обмотки возбуждения.

В книге не уделено внимания переходным процессам асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока параллельного возбуждения, не приведены принципиальные схемы и графики, иллюстрирующие эти процессы: предпочтение отдано формулам переходных процессов в системе генератор — двигатель, однако физическая сущность этих процессов освещена слабо.

В разделе, названном «Построение нагрузочного графика», в действительности нет ни одного графика.

Нечетко дается понятие о жесткости механической характеристики: так, на фиг. 4 (стр. 19) характеристика (1) называется жесткой, а характеристика (2) — мягкой. Такая трактовка мало убедительна, учитывая, что жесткость механической характеристики для асинхронного двигателя не постоянна. Говоря о диапазоне регулирования скорости вращения того или иного электропривода, автор определяет его как отношение максимальной скорости к минимальной, совершенно отвлекаясь от допустимых пе-

репадов скорости в связи со всегда имеющими место на практике отклонениями действительных значений моментов нагрузки от их расчетных значений. При отсутствии этих отклонений любая система электропривода может обеспечить сколь угодно большой диапазон регулирования. В книге подчеркивается (стр. 173), что весьма распространенным в системах электрооборудования станков является маятниковое реле времени с электромагнитным приводом, что неверно. Там же упоминается, что электромагнитные реле РЭ-100 и РЭ-180 не могут применяться в цепях переменного тока. Между тем известно, что при большой частоте включения в цепях переменного тока часто используются электромагнитные реле, включаемые через полупроводниковые выпрямители. На графике фиг. 32, а имеется ошибка; в кривой тока $i = f(t)$ после так называемой «отсечки» форсировки должен быть характерный излом.

Гл. 6 «Электрификация металлорежущих станков», являющаяся наиболее важной частью курса, также не свободна от недостатков.

Так, при рассмотрении системы генератор—двигатель для токарных станков в книге нет никаких указаний о выборе мощности приводного двигателя и не отмечаются недостатки упомянутой системы электропривода применительно к токарным станкам. В разделе «Электрификация сверлильных и расточных станков», кроме упрощенного чертежа общего вида радиально-сверлильного станка, нет никаких других иллюстраций и схем. В разделе «Электрификация шлифовальных и доводочных станков» даны лишь схемы электроконтактных измерительных устройств. Слабо разработаны разделы, посвященные электрификации агрегатных станков и станочных линий.

В целом эта наиболее существенная глава учебника составлена неудовлетворительно.

В книге имеются существенные недоработки методического характера. В гл. 1 нет необходимости в примитивной форме излагать принцип действия асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока (эти принципы должны рассматриваться в курсе общей электротехники).

В этой же главе излагаются вопросы, относящиеся к переходным процессам, тогда как их следовало бы рассматривать в гл. 2, целиком посвященной этим вопросам. Поэтому, например, кривые $i_a = f(t)$ (стр. 48) для системы генератор—двигатель неуместны в том разделе, где рассматриваются механические характеристики. Вряд ли будут поняты студенту и следующие утверждения (стр. 55): «...При длительной или медленно изменяющейся нагрузке могут быть достигнуты большие диапазоны регулирования, чем при прерывистой, резко переменной нагрузке» или «...Значительный коэффициент усиления (какой?) получается за счет перехода ее в режим работы с самовозбуждением». Здесь имеется в виду электромашинный усилитель с самовозбуждением. Следовало бы пояснить принцип работы этого усилителя и показать, почему коэффициент усиления возрастает по сравнению с обычным генератором.

Рассматривая схему включения двигателя постоянного тока через твердые выпрямители (стр. 63), автор не отмечает особенностей этой схемы (недостатки и достоинства), поэтому остается неизвестным, к какому выводу может прийти читатель. Автор дает неудовлетворительную трактовку электромеханической постоянной времени, объясняя ее как «...произведение номинального скольжения двигателя на время разгона системы под действием номинального момента двигателя до скорости идеального холостого хода».

Раздел, посвященный нагреву электродвигателей при переходных процессах, не отвечает существу приведенного в нем материала. Формула для потерь энергии при пере-

ходных процессах в двигателе постоянного тока параллельного возбуждения не доведена до конца (стр. 100) и дана в виде:

$$I_{\alpha}^2 r_{\alpha} = 9,81 M \omega_0 s.$$

Автор небрежно обращается с термином потери: в одном случае под этим термином имеются в виду (но не оговариваются) потери мощности, в другом — потери энергии. Введение скольжения для двигателей постоянного тока лишено физического смысла.

Не останавливаясь более подробно на ряде мелких замечаний методического и терминологического характера, нужно обратить внимание на изложение в ряде мест книги, в результате чего трудно понять, о чем пишет автор. Например:

«Многодвигательный привод создает весьма благоприятные предпосылки для автоматизации отдельных операций и блокировки отдельных движений. Например, в продольно-строгальном станке при помощи электроаппаратуры автоматизировано реверсирование стола, увеличение скорости при обратном ходе, замедление при входе и выходе реза из металла» (стр. 8). Непонятно, какая связь между многодвигательным приводом и электрической аппаратурой продольно-строгального станка?!

«Для металлорежущих станков требуется примерное постоянство скорости вращения, вследствие чего диапазон

регулирования напряжением обычно не расширяют свыше 5:1» (стр. 47); создается впечатление, что при таком регулировании напряжения сохраняется примерное постоянство скорости. Фраза совершенно непонятна.

«Таким образом, электромашинный усилитель дает возможность управлять приводами значительной мощности при помощи малогабаритной дешевой и легкой аппаратуры, оперирование с которой не требует утомляющих физических усилий» (стр. 52). А разве управление обычной релейно-контакторной аппаратурой требует «утомляющих физических усилий» и т. д.

Перечень приведенных замечаний можно было бы продлить, но в этом нет необходимости. Указанные выше серьезные недостатки принципиального, методического и стилистического характера не могут иметь места в таких ответственных книгах, какими должны быть современные учебники или учебные пособия.

Поэтому рецензируемая книга И. В. Харизоменова «Электрическое оборудование металлорежущих станков» не может быть признана удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к учебникам.

Настоящая рецензия обсуждена и одобрена на заседании кафедры «Электрооборудование промышленных предприятий» Московского энергетического института им. М. Г. Чиликина.

*М. Г. Чиликин, А. Т. Голован, Д. П. Морозов,
А. С. Сандлер, М. М. Соколов, В. И. Яковлев*

**А. Е. СЛУХОЦКИЙ и С. Е. РЫСКИН. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО
НАГРЕВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ. 320 стр., ц. 11 руб. 15 коп.
Машгиз, 1954.**

Книга предназначена для работников машиностроительных и металлургических заводов и научно-исследовательских институтов, а также для студентов высших учебных заведений.

Индукционный метод нагрева ферромагнитных материалов занял одно из ведущих мест в области промышленной термической обработки металлов. Литература по данному вопросу еще весьма ограничена и выход рассматриваемой книги необходимо приветствовать.

В книге простым и убедительным языком даны теоретические положения о нагреве металлов токами высокой частоты и достаточно полно объяснена физическая сущность процессов, причем ряд основных вопросов изложен впервые. Не ограничиваясь электротехническими вопросами, авторы дают решение основных тепловых задач, имеющих значение при индукционном нагреве. Теоретические вопросы хорошо иллюстрируются в ходе рассмотрения основных конструкций индукторов.

Книга состоит из двух разделов: теоретически-расчетного и проектно-конструкторского. В первом разделе авторы, принимая ряд обоснованных допущений, дают простые расчетные формулы, при достаточной точности для современных расчетов индукторов. Во втором разделе приводятся основы проектирования индукторов; наличие иллюстраций, воспроизводящих типовые индукторы, применяющиеся на машиностроительных заводах, делает наглядным как самый расчет, так и применение индуктора.

В книге уделено большое внимание расчету электромагнитной системы индуктор — деталь. Впервые показан характерный для поверхностной закалки случай расчета «двухслойной среды» (когда у поверхности детали появились слои, потерявшие магнитные свойства). Разобраны специальные случаи индукционного нагрева: нагрев плоскости, внутренних поверхностей цилиндров, деталей сложной формы. Представлены вопросы выбора частоты и сквозного нагрева под обработку давлением (ковка, штамповка и т. д.), а также особые случаи применения нагрева токами высокой частоты: индукционная сварка и пайка.

Большое количество численных примеров, приведенных авторами, делает наглядным расчет и облегчает понимание задачи.

К основным недостаткам книги следует отнести следующие:

1. За последнее время появился ряд работ, в которых рассматриваются: а) двухслойный металл с учетом изменения μ по сечению второго слоя и б) однослойный металл с одновременным учетом изменения ρ и μ по сечению. Подобный метод решения задачи должен, очевидно, привести к уточнению расчетных формул. Однако авторы обошли этот вопрос молчанием, упомянув о нем только в одном месте (стр. 310). Следовало хотя бы кратко рассмотреть указанные выше случаи для анализа возможных уточнений и рекомендаций по использованию тех или иных методов расчета. Необходимость этого связана с тем, что в различных организациях расчет производится неодинаково (различный учет изменения ρ и μ по сечению). Поэтому было бы целесообразно показать преимущества и недостатки разных методов расчета.

2. Приведенный в книге материал по проектированию представляет по сути каталог типовых индукторов, применяющихся в промышленности. Общие соображения по технологии изготовления и основам проектирования индукторов следовало расширить, так как заслуживает внимания вопрос о том, как проектировать; готовые же рецепты по отдельным видам индукторов могут служить лишь иллюстрацией задачи по проектированию.

Имеются и менее существенные недостатки. На стр. 22 читаем: «В дальнейшем магнитная проницаемость снова начинает слабо возрастать за счет медленного роста удельного сопротивления...» Однако, как известно, изменение ρ непосредственно не связано с изменением μ . Здесь, видимо, авторы хотели сказать не о μ , а об удельной мощности. Непонятна также необходимость в одной книге помещать два одинаковых рисунка (фиг. 33 и фиг. 154), причем на последнем неясно к тому же, в какую точку проведен радиус R .

Пользуясь методом подобия (стр. 25 и 37), авторы не сообщают, как получены приводимые формулы. Следовало хотя бы кратко пояснить методику их получения.

При написании основных уравнений электромагнитного поля, авторы (например на стр. 20, 55) записывают: $\frac{d\vec{E}_m}{dx} =$

$= -j\mu_0\mu H_m$, однако нигде не упоминают, с какой степенью точности можно считать μ не зависящей от времени t .

В общем виде следовало бы написать: $\operatorname{rot} \vec{E} = \frac{d\vec{B}}{dt}$.

Очевидно, что:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt}(\mu H) = H \frac{d\mu}{dt} + \mu \frac{dH}{dt} = \left[H \frac{d\mu}{dt} + \mu(H) \right] \frac{dH}{dt}.$$

Авторы пренебрегают первым членом $\frac{d\mu}{dt}$, не оговаривая возможности и степени точности такого допущения.

Формулы (21) и (26) распределения температур по глубине для плоского тела различны. Следовало бы пояснить распределение температур для полуплоскости и пла-

стины, — тем более, что учащиеся электротехнических вузов недостаточно знакомы с вопросами теплопередачи.

Большинство расчетных таблиц сопровождается графиками, которые возможно рассматривать лишь как иллюстрационные, так как практически из-за плохой сетки или малых размеров ими пользоваться нельзя (например, фиг. 16, 27, 28).

Указанные недостатки не снижают общей ценности книги, хотя и затрудняют в некоторой степени использование ее как учебника. Книга является своевременным вкладом в новый раздел электротехники — промышленного использования токов высокой частоты для нагрева металлов; книга окажет помощь в подготовке необходимых кадров.

Кандидат техн. наук Г. И. Дорофеев
Московский физико-технический институт

**Г. А. СИСОЯН. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА В РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ, 266 стр.,
ц. 7 руб. 80 коп. Изд-во Академии наук Армянской ССР. Ереван, 1954.**

Советский Союз занял одно из первых мест в мире по количеству и мощности действующих руднотермических электропечей.

Руднотермические печи, обычная мощность которых составляет 7,5 тыс., 10 тыс. и даже 40 тыс. квт, потребляют в настоящее время значительную часть вырабатываемой в стране электроэнергии и во многих энергосистемах страны используются в качестве потребителей — регуляторов. Естественно, что вопросы режима работы таких крупных потребителей представляют значительный интерес с точки зрения выяснения условий наиболее экономичной работы по расходу энергии. Довольно значительная, посвященная этой теме, литература в основном ограничивает вопрос об электрических режимах мощных электропечей рассмотрением параметров внешней части печного контура и почти не затрагивает процессов, происходящих в самой ванне печи. Между тем очевидно, что решающую роль играют именно процессы, протекающие в ванне печи, где и происходит превращение электрической энергии в тепловую и использование последней в рабочем процессе печи.

Такое положение является следствием чрезвычайных трудностей, возникающих при попытках поставить эксперимент, так как речь идет о закрытых дугах с токами в несколько десятков тысяч ампер, образующих значительные по размерам очаги с температурой в несколько тысяч градусов. Столь же сложной является задача дать описание происходящих в этих очагах электрических, тепловых и физико-химических явлений. Именно поэтому в настоящее время и не существует сколько-нибудь строгого метода расчета ванны руднотермических печей, а также расчетных режимов их работы.

Рецензируемая книга посвящена выяснению природы и параметров дуги в мощных руднотермических электропечах. Книга предназначена для работников научно-исследовательских институтов и инженерно-технического персонала заводов. Она может быть использована и как учебное пособие для студентов и аспирантов, специализирующихся в области электрических печей.

Первую часть своей книги (гл. 1, 2 и 3) автор посвящает историческому обзору открытия электрической дуги и затем анализу литературных данных о различных видах дугового разряда, рассматривая этот материал с точки зрения выяснения явлений, происходящих в мощной дуге руднотермической печи. Проведенное автором всестороннее рассмотрение обширного литературного материала по различным видам и типам изученных маломощных дуг и сравнение описываемых явлений с явлениями, наблюдавшимися автором, относящимися к работе мощных ферросилициевых, ферромарганцевых и карбидных электропечей, позволяет ему сделать ряд интересных выводов, дающих последовательное объяснение явлений, ранее не выясненных. В частности, рассматривая классификацию различных

видов электрических дуг, автор приходит к выводу (стр. 40), что «Печная дуга может быть охарактеризована как длинная термическая дуга в парах со специфическим строением положительного столба». Такое представление о дуге в мощной печи отвечает характеру протекающих в тиглях печи явлений и позволяет в дальнейшем сделать очень важные заключения.

Отмечая в особом § 2,1 гл. 2 приоритет В. В. Петрова в открытии электрической дуги, автор ограничивается воспроизведением нескольких цитат из книги В. В. Петрова «Известие о гальвани-вольтовых опытах» и общими сведениями, уже широко известных по опубликованным разновременным материалам о выдающемся русском ученом, не используя, к сожалению, новых литературных источников по этим вопросам, появившихся в периодической печати последних лет (например, статьи А. М. Залесского, Я. Н. Шнейберга и др.).

Гл. 4 и 5 посвящены описанию большой экспериментальной работы, проведенной автором в течение ряда лет на мощных руднотермических и карбидных электропечах. Основным материалом исследования автору служат осциллограммы, большое количество которых снято им на различных печах и при различных режимах их работы. Анализ этих осциллограмм собственно и посвящены гл. 4 и 5 книги.

Нельзя не согласиться с автором, что осциллограф является наиболее подходящим инструментом для исследования сложных быстротекущих процессов, протекающих в тиглях мощной печи.

Рассматривая результаты обобщения большого экспериментального материала, можно согласиться с точкой зрения автора о том, что 1) в «...руднотермической печи в нормальных условиях дуга горит без всяких перерывов, кривые тока и напряжения дуги при нормальной работе печи имеют почти синусоидальную форму и, следовательно, в течение всего полупериода горения дуги сопротивление последней остается постоянным» и 2) «Искажения формы кривой тока и напряжения дуги появляются только при нарушениях теплового режима дуги, иначе говоря, при нарушениях теплового режима работы печи» (стр. 139). Этот вывод справедлив и правильно отражает происходящие в мощной печи процессы.

Хотя общая теория, развитая автором в книге, дает только качественное описание рассматриваемых процессов, но тем не менее она представляет значительный интерес, как первая попытка объяснить с достаточной полнотой сложный комплекс явлений, происходящих в печи.

К числу недостатков книги следует отнести краткость раздела, посвященного методике замеров. Этот весьма важный вопрос, вызывающий споры, следовало осветить с большей полнотой, тем более, что автор располагает достаточно обширным материалом и опытом.

Заключительная гл. 6 книги посвящена обсуждению результатов экспериментального исследования мощной печной дуги. Во вступлении к этой главе автор ограничивает поставленную перед собой задачу, и мы полагаем, что это сделано в ущерб всему содержанию книги. Очень важный и интересный вопрос о распределении тока между дугой и шунтирующим ее током шихтовой проводимости рассматривается в книге вскользь. Между тем этот вопрос является одним из важнейших для правильного описания и выявления экономичных режимов работы печи: приведенные же в тексте материалы позволяют, как нам кажется, сделать более подробные выводы, чем те, которые имеются в книге.

Для каждого процесса существует свое оптимальное соотношение между энергией, выделяющейся в дуге, и энергией, выделяющейся в шихте. Следует считать, что наиболее экономичная работа печи может быть обеспечена лишь при явно выраженной дуге, являющейся концентрированным источником энергии, создающим наиболее благоприятные условия для осуществляемых в печи металлургических процессов.

Приводимые автором описания пусковых моментов мощных печей служат этому подтверждением и поэтому приходится сожалеть, что автор не использовал имеющийся у него опытный и эксплуатационный материал и не выявил четко своей точки зрения по данному вопросу. Нам представляется, что это существенный недостаток рецензируемой книги.

В целом издание данной монографии заслуживает одобрения. При переиздании книги следует расширить ее содержание путем включения вопросов исследования оптимальных электрических режимов работы руднотермических печей и влияния на них распределения энергии между дугой и шихтой.

Кандидат техн. наук, доц. А. Д. Свенчанский
Кафедра электротермических установок МЭИ
им. Молотова

Доцент М. Я. Смелянский
Центропромэлектропечь



НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

(издания 1954 г.)

Блатт Дж., Вайскопф В. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА. Пер. с англ. 659 стр., ц. 42 руб. 45 коп. Изд. иностр. лит.

ВСЕСОЮЗНАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ВЫСТАВКА. МЕХАНИЗАЦИЯ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА. Путеводитель. 192 стр., ц. 3 руб. 10 коп. Сельхозгиз.

Герчиков Б. А., Константинов М. М., Селицкий И. А. ПРОИЗВОДСТВО СВИНЦОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ. 216 стр., ц. 5 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.

Горяинов О. А., Райнес Р. Л. ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ. Учебное пособие для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. 512 стр., ц. 12 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.

Ивахненко А. Г. ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКА. Гостехиздат УССР. ч. 1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ. 291 стр., ц. 10 руб. 45 коп.

ч. 2. ОБРАТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. 219 стр., ц. 8 руб. 85 коп.

Караморин С. П. ОФОРМЛЕНИЕ АВТОРСКИХ ПРАВ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И РАЦИОНАЛИЗАТОРСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ. 16 стр., ц. 55 коп. Изд. «Знание», Ленинградское отделение.

Карандеев К. Б. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ. 231 стр., ц. 11 руб. 95 коп. Академиздат УССР.

Коц А. Я. ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ. 184 стр., ц. 6 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Меерович Л. А., Зеличенко Л. Г. ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА. Изд. 2-е. 760 стр., ц. 24 руб. 25 коп. «Сов. радио».

Никулин Н. В., Рогозин А. С. ПОЖАРНАЯ ПРОФИЛАКТИКА В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ. 272 стр., ц. 10 руб. 50 коп. Коммухозиздат РСФСР.

ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. ТЕОРИЯ.

Под ред. В. В. Солодовникова. 1118 стр., ц. 39 руб. 75 коп. Машгиз.

Острый П. П. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ИМПУЛЬСНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ. 148 стр., ц. 3 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

ПАМЯТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА ПЕРЕДВИЖНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ. 12 стр., ц. 7 коп. Стройиздат.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ. 176 стр., ц. 6 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ. 10 изд. 88 стр., ц. 3 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА. ОРГРЭС. РАЦИОНАЛИЗАТОРСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ. Вып. 67. 32 стр., ц. 1 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.

СПРАВОЧНИК ЭЛЕКТРОМОНТЕРА. Под общ. ред. А. Д. Смирнова и П. Ф. Соловьева. Вып. 7. М. М. Каганович. МОНТАЖ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДО 35 кВ. 303 стр., 4 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

Суворов И. П., Калита В. Г. ОСВОЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОДОРОДНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ. 128 стр., ц. 3 руб. 70 коп. Госэнергоиздат.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРАВИЛА ПО ЭЛЕКТРОСВАРКЕ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ. 72 стр., ц. 1 руб. 75 коп. Стройиздат.

Уткин Б. В. ШКОЛЬНАЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. 43 стр., ц. 65 коп. Татиздат. Казань.

Фельдбаум А. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. 786 стр., ц. 28 руб. Оборонгиз.

Шляпошников Б. М. РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ УСТРОЙСТВ. 300 стр., ц. 11 руб. 30 коп. Госэнергоиздат.

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. Сыромятников (зам. главного редактора), **А. М. Федосеев,**
М. Г. Чиликин, М. А. Шателен.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЕ

Определяется электромагнитное поле в двухпроводной системе. В первой части рассматривается симметричная двухпроводная линия из проводов круглого сечения, в которой обычно возбуждается антифазная волна путем подачи на провода противоположных потенциалов. Найдена поправка к постоянной распространения, обусловленная конечной проводимостью проводов.

Получены в виде рядов выражения для электрического и магнитного полей указанной волны. Уже первые члены этих рядов дают первые гармоники, обусловленные эффектом близости проводов, поэтому в практических вычислениях можно ограничиваться малым числом членов.

ВЛИЯНИЕ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ С РТУТНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ НА РАБОТУ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Описан случай влияния тяговых подстанций с ртутными выпрямителями на работу генераторов энергосистемы при определенном сочетании ее параметров и соотношении мощности генераторов и тяговой нагрузки.

Содержащиеся в токе гармоники высшего порядка вызывают ряд ненормальных явлений в генераторах, если величина гармоник составляет значительный процент от номинального тока генераторов. Изложены результаты испытания условной двенадцатифазной схемы выпрямления, осуществленной на одном из электрифицированных участков магистральных дорог Советского Союза. Эта схема создается путем установки преобразовательных трансформаторов со схемой первичных обмоток «звезда» на одной тяговой подстанции и «тре-

ОДНОПРОВОДНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ

Электроснабжение мелких ферм, расположенных друг от друга на расстоянии более 0,5 км, от существующей трехфазной сети 22 кВ экономически не целесообразно. В Северном Квинсленде (Австралия) для этой цели применяется передача энергии по однопроводным линиям с использованием земли в качестве обратного провода.

Распределительная однопроводная сеть присоединяется к вторичной обмотке однофазного трансформатора 22/12,7 кВ мощностью 50 кВА. Применение разделительного трансформатора позволяет осуществить более чувствительную земляную защиту, чем это возможно в трехфазной системе с многократным заземлением нейтрали. Мгновенное отключение однопроводных линий при замыканиях на землю обеспечивается сравнительно низкими уставками предохранителей и отключаю-

ПЛАВКА ГОЛОЛЕДА НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ БЕЗ ПЕРЕРЫВА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Обычно борьба с образованием гололедных отложений на линиях производится путем нагрева проводов токами короткого замыкания. Это требует вывода линии из эксплуатации.

В статье рекомендуется производить плавку гололеда, пропуская по нагруженной линии дополнительный ток, который создается напряжением, обусловленным сдвигом векторов напряжений в начале и конце линии. Для образования замкнутого контура, по которому циркулирует дополнительный ток, концы линии должны быть связаны другими, параллельными линиями.

При увеличении угла сдвига векторов увеличивает-ся разность напряжений, а следовательно и ток, цирку-

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ НЕСИММЕТРИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ РАСЩЕПЛЕНИИ ФАЗ НА ДВА ПРОВОДА

Устранение транспозиции на линиях электропередачи вызывает уменьшение затрат на их сооружение и ликвидирует причиняемые транспозицией эксплуатационные неудобства. Это особенно существенно при применении расщепленных проводов на линиях 220 кВ и более высоких напряжений. Вместе с тем устранение транспозиции вызывает увеличение емкостной и индуктивной несимметрии фаз линии.

Приводится метод расчета электростатической несимметрии, возникающей в результате неравенства емкостей фазных проводов по отношению к земле. Расчет производится для линий с треугольным расположением проводов и расщеплением фаз на два провода.

РАСЧЕТ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ, ПИТАЮЩЕЙ РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Разработана приближенная методика расчета высших гармонических в генераторах и других элементах энергосистемы, полезная во всех случаях, когда необходимо расчетным путем определить возможность увеличения мощности или изменения схемы питания шести-фазных ртутно-выпрямительных установок.

Показано, что если шести-фазная ртутно-выпрямительная нагрузка составляет даже небольшой процент общей нагрузки энергосистемы, то при неблагоприятных соотношениях между емкостью линий передач и индуктивностью генераторов пятая гармоника тока в ближайших по схеме генераторах может достигать значений порядка 15...25% номинального тока, а седь-

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ НЕСИММЕТРИЯ НЕТРАНСПОНИРОВАННЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Опыт эксплуатации линий без транспозиций показал, что транспозиция необходима лишь в редких случаях. Устранение транспозиционных опор приводит к геометрической несимметрии фаз вдоль линии, создающей небольшую электростатическую и электромагнитную несимметрию. В статье приводятся результаты расчета коэффициентов электромагнитной несимметрии для одноцепных линий электропередачи.

Для определения примерных значений токов обратной и нулевой последовательности в несимметричной линии, обусловленных протеканием в ней уравновешенных токов нагрузки, должны быть известны сопротив-

ТОКИ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ ДВУХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

При несимметричном коротком замыкании на зажимах синхронного генератора в обмотке статора течет ток обратной последовательности, который вызывает дополнительный нагрев обмотки возбуждения и массивных частей ротора. Нагрев ротора растет пропорционально квадрату тока обратной последовательности. Поэтому допустимая продолжительность междуфазного короткого замыкания ограничивается величиной эквивалентного тока обратной последовательности.

Максимальная величина тока обратной последовательности в генераторе имеет место при двухфазном коротком замыкании на его зажимах. Приведен метод расчета тока обратной последовательности в генераторе

угольник» на смежной тяговой подстанции, питаемых от одной ЛЭП. Применение этой схемы только на части электрифицированной железнодорожной магистрали свело величину гармоник до допустимых пределов.

Высшие гармоники тока искажают форму кривой первичного напряжения, питающего тяговые подстанции. Это приводит к увеличению пульсаций выпрямленного напряжения после сглаживающего устройства выше допустимых норм. Условная двенадцатифазная схема позволяет сохранить установленные нормальные параметры сглаживающего устройства. Эта схема является самым простым, дешевым и практически быстро осуществимым средством (из многих теоретически возможных) снижения высших гармоник в токе статора генераторов, питающих значительную тяговую ртутно-выпрямительную нагрузку.

Электричество, № 2, 1955.

лирующий по линии. При этом напряжение в середине линии имеет минимальную величину и при угле сдвига между напряжениями в начале и конце линии, равном 60° , составляет 86,7% номинального. Увеличение угла сдвига более 60° вызывает значительное уменьшение напряжения в середине линии и может быть оправдано только в случае отсутствия потребителей в этом месте.

Необходимый сдвиг векторов напряжений может быть обеспечен путем пересоединения обмоток трансформаторов на одном конце линии или путем изменения положения выводов трансформаторов относительно фаз линии. В частности, для получения угла 30° на одном конце линии применяется трансформатор с соединением обмоток в звезду, а на другом конце — в треугольник.

Плавка гололеда по описанному методу требует обеспечения реактивной мощности, расходуемой при протекании обогревающего линию тока.

Tr. AIEE, т. 72, ч. III, 1953, стр. 1200

(Э-во, 2, 1955)

мая — 10...14%, что значительно выше допустимой величины. Одновременно имеет место резкое искажение формы кривой напряжения сети, вследствие чего питаются седьмая гармоника значительной величины могут появляться у всех потребителей, питаемых от данной энергосистемы. Показано также, что при самых неблагоприятных условиях одиннадцатая гармоника и гармоники более высокого порядка не могут достигать величин, опасных для генераторов.

Для обеспечения нормальной эксплуатации энергосистем в промышленности и на транспорте следует применять не шестифазные, а двенадцатифазные ртутно-выпрямительные агрегаты (или агрегаты с еще большим числом фаз), практически не создающие пятой или седьмой гармоник.

Экспериментальная проверка подтвердила правильность намеченных мероприятий.

Электричество, № 2, 1955.

и кривые затухания тока при различных условиях двухфазного короткого замыкания.

В расчет принимаются только переходное и установившееся значения тока. На величину тока обратной последовательности в генераторе при двухфазном коротком замыкании вблизи его зажимов оказывают влияние первоначальная нагрузка машины, характеристика системы возбуждения и применяемого автоматического регулятора возбуждения, эквивалентное сопротивление и мощность присоединенной системы, постоянные времени генератора и системы, насыщение стали генератора.

Для определения эквивалентного тока в генераторе с ручной регулировкой возбуждения необходимо учитывать начальное и установившееся значения и декремент затухания тока. В машине с автоматическим регулятором возбуждения для определения эквивалентного тока можно учитывать только его установившееся значение.

Tr. AIEE, т. 72, ч. III, 1953, стр. 9

(Э-во, 2, 1955)

Результаты получены при помощи метода, разработанного применительно к бесконечной многопроводной линии. Этот метод нечувствителен к геометрическим соотношениям, так как строит последовательные приближения по электрическому параметру. Указано, как переходить к высшим приближениям, добиваясь любой требуемой точности. Во второй части рассматриваются с учетом эффекта близости электромагнитные процессы в линии из двух неодинаковых проводов. Волна в такой линии является суперпозицией двух парциальных волн, распространяющихся с различными (вследствие конечной проводимости) постоянными распространения. Последние выражаются через различные корни квадратного уравнения. Каждая парциальная волна характеризуется своим распределением потенциалов и токов между проводами.

Электричество, № 2, 1955.

щих катушек выключателей. Благодаря этому уменьшается опасность попадания под напряжение людей и животных при прикосновении к упавшему на землю проводу и снижается вероятность загорания опор и травы от токов замыкания на землю.

Распределительная сеть сооружается на одностоечных опорах. На линиях подвешиваются стальные провода. По предварительной оценке упрощение конструкции линий и подстанций должно дать снижение стоимости строительства на 30...40% по сравнению с трехфазной системой электроснабжения.

В июне 1952 г. были введены в эксплуатацию две опытные установки, состоящие из распределительной подстанции и присоединенной к ней разветвленной однопроводной сети 12,7 кВ, питающей трансформаторные пункты мощностью 5...10 кВА. Каждая такая установка может снабжать электрической энергией 30...40 ферм. Испытания дали удовлетворительные результаты.

Electrical Times, т. 125, № 17, 1954, стр. 607

(Э-во, 2, 1955)

Крайние фазы располагаются симметрично относительно оси линии. Величина несимметрии оценивается при помощи коэффициента несимметрии, представляющего отношение напряжения смещения нейтрали к фазному напряжению системы. Электростатическая несимметрия линии может быть изменена либо путем изменения высоты подвеса проводов средней фазы, либо путем изменения расстояния между расщепленными проводами средней фазы. Практически снижение несимметрии путем изменения высоты подвеса среднего провода мало целесообразно, так как требует увеличения высоты опор и связано с увеличением их стоимости. Увеличение расстояния между расщепленными проводами фазы позволяет значительно снизить емкостную несимметрию линии без изменения конструкции опор.

Trans. AIEE, т. 72, ч. III, 1953, стр. 1288

(Э-во, 2, 1955)

ления обратной и нулевой последовательности линий и частей системы на отправном и приемном концах линии z_2 , z_0 и взаимные сопротивления между схемами обратной и прямой z_{21} и нулевой и прямой последовательности z_{01} .

Коэффициенты несимметрии $m_2 = \frac{z_{21}}{z_2}$ и $m_0 = \frac{z_{01}}{z_0}$ могут быть определены по известным физическим размерам и расположению проводов.

Приводятся кривые для определения величин m_2 , m_0 и z_2 , z_0 , необходимых для расчета токов обратной и нулевой последовательности для различных сечений сталеалюминиевых проводов в зависимости от междупроводного расстояния. Для наиболее применяемых размеров проводов и расстояний между ними соотношение между m_2 и m_0 равно шести.

Trans. AIEE, т. 72, ч. III, 1953, стр. 1323

(Э-во, 2, 1955)

ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ КЕМАНО И АЛЮМИНИЕВЫЙ ЗАВОД КИТИМАТ

В Западной Канаде пущена первая очередь подземной высоконапорной гидроэлектростанции Кемано. При полном развитии на станции будет установлено 16 вертикальных четырехсопелных ковшевых турбин общей мощностью 2,24 млн. л. с. Напор 800 м создается за счет переброски стока реки Нечако с пологого восточного склона прибрежной горной цепи на крутой западный склон.

Обмотки генераторов состоят из двух ветвей, каждая с отдельным выключателем 4 кВ; оба выключателя заблокированы. Каждый два генератора присоединены к группе трансформаторов 3×71 тыс. кВА, 13,2/301,4 кВ, с двойной первичной обмоткой. Реактивность рассеяния трансформатора — 10,7%, ток холостого хода — 1%.

Энергия станции передается по линии 300 кВ длиной 80 км на алюминиевый завод Китимат на берегу

27 сентября 1954 г. произошла авария турбогенератора 150 тыс. кВт, 3600 об/мин, установленного на одной из электростанций в Филадельфии (США). Авария случилась во время очередного эксплуатационного испытания турбогенератора и, хотя она не повлекла жертв, повреждений здания и остального оборудования, но надолго вывела из строя машину. Очагом аварии явился ротор генератора. Первоначальное предположение о недоброкачественности поковки отпало, так как протоколы заводского испытания подтвердили надлежащие физические свойства поковки и вполне удовлетворительные характеристики ее при ультразвуковом исследовании. Не нашла также подтверждения версия о дефекте в подшипнике.

Эксперты со стороны завода-изготовителя турбогенератора пришли к следующему объяснению причины аварии: во время обработки поковки ротора на станке один из пазов его был поврежден вследствие поломки

СОЛНЕЧНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В областях с жарким климатом общее количество падающей солнечной энергии составляет около 800 Вт/м². Ее возможно использовать с помощью термоэлектрических генераторов.

Дается описание плоско-пластинчатого типа коллектора, представляющего собой нефокусируемое устройство для абсорбции солнечной энергии. Экспериментальная часть содержит исследование термо-э. д. с., удельной теплопроводности, удельного сопротивления и к. п. д. различных материалов, применяемых для изготовления термоспаев. Наилучшие результаты были получены с интерметаллическими соединениями ZnSb, содержащими малые примеси других металлов. Комбинация ZnSb (Sn, Ag, Bi) для положительного и 91% Bi, 9% Sb для отрицательного электродов дает максимальный к. п. д. (3,65% в диапазоне 200°С), но, не может

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ПРОМЫШЛЕННОЙ ВЫСТАВКЕ 1954 г. В ГАННОВЕРЕ

В числе экспонатов выставки были следующие:

1. Саморегулирующиеся генераторы переменного тока, сохраняющие постоянно напряжения с точностью до $\pm 0,5\%$ без применения специальных регуляторов напряжения; изготавливаются в диапазоне мощностей 0,5...1500 кВА. 2. Реверсивный ионный привод для прокатного стана, состоящий из двигателя постоянного тока и питающего его ртутного выпрямителя с сеточным управлением; реверсирование происходит в цепи возбуждения посредством двух выпрямителей малой мощности, соединенных по «перекрестной» схеме. 3. Преобразователи частоты малой мощности 2,5...10 кВт, дающие переменный ток 1,5...2,2...3,5...5 Гц для получения ползучих скоростей у короткозамкнутых двигателей соответствующей мощности. 4. Короткозамкнутые реверсив-

ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ СВЯЗИ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Согласно рекомендациям Международного консультативного комитета по телефонии продольная э. д. с., наводимая в проводах связи при коротких замыканиях на землю на линиях электропередачи, не должна превышать 430 В.

Во многих случаях для выполнения этого условия требуется кабелирование линий связи или установка на них разрядников, что связано со значительными расходами. Возможность увеличения э. д. с. зависит от диэлектрической прочности изоляции линии и аппаратуры связи и от характеристик защитных устройств.

В докладе приводятся результаты испытаний, проведенных на специально сооруженной линии связи, проложенной вдоль линии 15 кВ, длиной 5,5 км, при среднем расстоянии между линиями, равном около 10 м.

КОЛЛЕКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ПИТАНИЕМ СО СТОРОНЫ РОТОРА

Исходя из теории работы асинхронного двигателя, поясняются принцип действия коллекторного двигателя трехфазного тока с параллельным возбуждением и процесс получения различных скоростей холостого хода посредством перестановки щеток на коллекторе. Приводятся кривые к. п. д. и коэффициента мощности коллекторного двигателя в зависимости от нагрузки при трех разных положениях щеток и дается сравнение этого двигателя в отношении экономичности с другими видами регулируемых электроприводов переменного тока. Что касается тормозных свойств коллекторного двигателя, то вследствие относительно большого махового момента его ротора у него невозможно получить время торможения меньше 1 сек и при необходимости в очень

АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

На французских электростанциях применяются аккумуляторные батареи двух типов — свинцовые и кадмие-никелевые с перфорированными пластинами. Кадмие-никелевые батареи дороже свинцовых, имеют более низкий к. п. д. и большее внутреннее сопротивление, но они более долговечны и проще в эксплуатации. Они применяются преимущественно на небольших станциях с малоквалифицированным персоналом.

Разработана конструкция герметических кадмие-никелевых элементов с малым внутренним сопротивлением — порядка 0,001 Ом. Активные материалы наносятся на пластины в виде пористого слоя, полученного путем спекания металлического порошка под высоким давлением. Толщина пластин 0,8 мм. Большое число пла-

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

С целью максимального облегчения веса самолетного электротехнического оборудования в последнее время были разработаны новые конструкции маломощных генераторов повышенной частоты 2400 и 4000 Гц. В таких машинах при максимально отдаваемой мощности 3 кВт удельная мощность, приходящаяся на 1 кг веса, составляет свыше 2 кВт. Что касается приемников энергии повышенной частоты, то у них не только уменьшается вес, но и понижается электромагнитная инерция, т. е. увеличивается быстродействие; например, в магнитных усилителях электромагнитная постоянная времени изменяется обратно пропорционально частоте. В статье анализируются конструктивные и технологические факторы, позволившие перейти к генераторам повышенной частоты и малого веса, и прежде всего —

реза. В соответствии с практикой для таких случаев это повреждение было исправлено путем заполнения образовавшихся отверстий стержнями, скрепленными с телом поковки посредством шурупов. После этого паз был снова подвергнут обработке. Все данные исследования указывают, что авария началась именно в месте расположения ввинченных стержней.

В момент аварии паровая часть и приборы защиты работали нормально. Отключение и остановка турбогенератора произошли быстро, что и ограничило размеры повреждения, сосредоточенного главным образом внутри корпуса, в статоре и роторе генератора. Основные технические данные генератора: мощность 220 588 *квт*, $\cos \varphi = 0,85$, отношение короткого замыкания 0,64, напряжение 20 000 *в*.

Недавно также сообщалось о взрывах двух турбогенераторов с водородным охлаждением мощностью по 100 000 *квт*, 3 600 *об/мин*.

Electrical World, т. 142, № 15, 1954, стр. 8.

(Э-во, 2, 1955)

ные двигатели с переключением полюсов в отношении 1:2 (большая скорость — для обратного хода), рассчитанные на часовой режим работы при 7 200 реверсов в час. 5. Двухскоростные лифтовые двигатели трехфазного тока с двумя отдельными обмотками в статоре для скоростей в отношении 1:9, имеющие на роторе, помимо короткозамкнутой обмотки, еще фазовую обмотку; последняя действует во время пуска, позволяя развивать момент, равный 1,7 номинального, и автоматически закорачивается центробежным замыкателем в процессе разбега по достижении ротором 55% номинальной скорости. 6. Асинхронные короткозамкнутые двигатели малой мощности с непосредственно пристроенными на корпусе контакторами для пуска в ход или дистанционного реверсирования кнопками, рубильником, командо-контроллером и т. п.

Electro-Anzeiger, № 27 . . . 28, 10 июля, 1954, стр. 20 (Э-во, 2, 1955)

быстром торможении приходится прибегать к асинхронному двигателю. При заданном в процентах диапазоне регулирования скорости для коллекторного двигателя существует предельная мощность на пару полюсов, определяемая условиями коммутации. Эта мощность составляет, например, для диапазона регулирования 1:3 и частоты 50 *гц* около 35 *л. с.* при простой параллельной обмотке и около 70 *л. с.* при двойной параллельной обмотке. В заключение приводятся примеры применения коллекторных двигателей для регулируемых промышленных электроприводов.

Technische Mitteilungen, т. 47, № 7 . . . 8, 1954, стр. 291 (Э-во, 2, 1955)

увеличение скорости вращения у шарикоподшипников, которая возросла за 10 лет с 20 до 50 тыс. *об/мин* при гарантийном сроке службы в 1 000 *час* и более. Увеличение скорости в 2,5 раза само по себе дает квадратичное, т. е. шестикратное увеличение мощности в единице объема машины. Применение более тонких листов стали с улучшенными магнитными свойствами позволило повысить индукцию с 12 до 16 тыс. *гс* и вдвое снизить потери. Следующим фактором повышения использования материалов был переход с двухполюсной конструкции генератора на многополюсную. Наконец, применение силиконовой изоляции и теплостойких смазок для подшипников позволило перейти от предельной температуры нагрева в 100° С к 250° С. В статье в качестве примера приведен генератор мощностью 3 *квт*, 50 тыс. *об/мин*, частотой 5 000 *гц*.

El. Eng., т. 73, № 8, 1954, стр. 735

(Э-во, 2, 1955)

океана. При полном развитии линия будет состоять из четырех цепей за исключением среднего высокогорного участка, где сооружаются две цепи с нерасщепленными сталеалюминиевыми проводами 1 700 *мм²*. Одна из цепей смонтирована на обычных стальных опорах; для второй используются опоры из тонкостенных алюминиевых труб диаметром 965 *мм*.

На первом этапе линии присоединены к шинам питающей и приемной подстанции без силовых выключателей — через развилку из разъединителей 300 *кв* с дугогасительными камерами. Разъединители могут разорвать зарядный ток линии до 90 *а* при 300 *кв*, а также ток нагрузки до 800 *а* при разности потенциалов между контактами до 60 *кв*.

Трансформаторы 275 *кв* в Китимате оснащены максимальной землей и газовой защитой и не имеют дифференциальной защиты.

Proceedings, IEE, т. 101, ч. I, № 131, 1954, стр. 255 (Э-во, 2, 1955)

быть использована при температурах выше 260° С вследствие расплавления отрицательного электрода. Сплав с тем же положительным электродом и с отрицательным электродом из константана, по данным автора, имеет к. п. д., равный 2,65% и 5,65% при температурах 200° С и 400° С соответственно. На основании определения к. п. д. различных термоспаев и различных типов коллекторов подсчитан общий к. п. д. установок термопластинчатой конструкции, равный 0,65% и 1,02% для различных типов, что составляет 5,2 *вт/м²* и 8 *вт/м²* соответственно.

Рассматриваются две конструкции солнечных термодвигателей с концентрирующими устройствами: первый — подобный плоско-пластинчатому типу и второй, выполненный в виде полости с узкой щелью для пропускания солнечной энергии. С применением концентрирующих устройств подобной конструкции был достигнут к. п. д., равный 3,35% при 50-кратной концентрации.

Journal of Applied Physics т. 25, № 6, 1954, стр. 765 (Э-во, 2, 1955)

Установлено, что несовпадение характеристик газонаполненных разрядников во многих случаях вызывает акустические удары. В разрядниках с угольными электродами акустический удар происходит, когда остаточное напряжение близко к разрядному напряжению разрядника.

Токи, протекающие через разрядник при коротких замыканиях на линиях электропередачи, могут достигать нескольких десятков ампер в течение промежутков времени от 0,2 до нескольких *сек*. Установка предохранителей для защиты разрядников нежелательна, так как при перегорании предохранителей разрядники выводятся из работы. Применение разрядников, способных в течение нескольких секунд выдерживать ток 20...25 *а* без изменения характеристик, позволяет во многих случаях обойтись без предохранителей.

CIGRE, доклад № 341, 1954.

(Э-во, 2, 1955)

стин помещается в герметически закрытый кожух. Элементы легко выдерживают большие толчковые токи. Батарея 45 *а час* может разряжаться током 9 *а* в течение 12 *мин* без чрезмерного снижения напряжения. Напряжение в конце заряда составляет 1,42 *в* на элемент вместо 1,8 *в* для кадмие-никелевых элементов обычной конструкции, напряжение в конце разряда 1,25 *в* вместо 1,1...1,15 *в*. Благодаря малому изменению напряжения батарей элементные коммутаторы не требуются.

В целях уменьшения сечения питающих кабелей предлагается питать соленоидные приводы масляных выключателей от герметических батарей малой емкости, расположенных вместе с зарядным устройством вблизи выключателя. Аварийное освещение предлагается питать от рассредоточенных мелких герметических батарей; при этом для аварийного освещения могут быть использованы переносные лампы 24 *в*.

RGE, т. 63, № 10, 1954, стр. 591.

(Э-во, 2, 1955)

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕРМАНИЕВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ДЛЯ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Германиевые выпрямители, первоначально нашедшие применение в области слабых токов, в частности, в электронике, в настоящее время начинают внедряться и в силовые установки как весьма перспективное средство для преобразования переменного тока в постоянный при мощностях от десяти до нескольких сот кВт и напряжениях постоянного тока от 25 до 125 в. По сравнению с другими видами металлических выпрямителей, германиевые выпрямители отличаются высокой плотностью тока, достигающей до 100 а/см², что позволяет сильно сокращать их габариты, и большим сроком службы без каких-либо признаков старения (до 20 000 час). Для германиевых выпрямителей применяется как воздушное (вентилятором), так и водяное охлаждение. Коэффициент полезного действия выпрямителя большой мощно-

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ФОРСИРОВКОЙ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Основное назначение приводов с форсировкой крутящего момента — обеспечение быстрого пуска в ход и быстрого торможения агрегата, что существенно важно в машинах со значительной инерционностью — электромагнитной (в обмотках возбуждения) или электромеханической (маховые массы), которая мешает достижению максимальной производительности. Форсировка момента в системе генератор — двигатель осуществляется подачей повышенного в несколько раз напряжения на обмотку возбуждения генератора с отсечкой по достижении предельного тока. Принцип форсировки момента, применявшийся раньше только в мощных электроприводах металлургической промышленности, в настоящее время начинает входить в практику приводов относительно малой мощности — от 5 до 500 л. с. (автоматические конвейеры, строгальные станки, автомобильные

ОДНОАНОДНЫЕ РТУТНЫЕ ВЕНТИЛИ

В Англии выпущены одноанодные стеклянные ртутные вентили с уменьшенным испарением ртути на катоде. Катод представляет молибденовую чашу, содержащую небольшое количество ртути. Для облегчения отвода тепла к катоду снаружи припаяно массивное медное кольцо с ребрами, обдуваемыми воздушным потоком. Катодное пятно фиксируется на линии соприкосновения молибдена с поверхностью ртути; струи ртутного пара повышенной плотности при этом не возникают.

Падение напряжения в дуге подобных выпрямителей составляет 12,5 в; мощность, требуемая для сеточного управления, в несколько раз меньше, чем в многоанодных конструкциях.

Автор считает предлагаемую конструкцию катода перспективной для сверхвысоковольтных ртутных пре-

СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ КОРОТКОЗАМКНУТЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Рассматривается система, состоящая из короткозамкнутого асинхронного исполнительного двигателя и питающего его дизель-генератора переменного тока, вырабатывающего переменную частоту. Особенностью системы, отличающей ее от других устройств для частотного регулирования скорости, является постоянство скорости вращения дизель-генератора (асинхронного). Действие схемы основано на свойстве асинхронного генератора изменять частоту тока статора при изменении мощности в цепи ротора, вращающегося с постоянной скоростью. В описываемой схеме к контактным кольцам асинхронного генератора через мостовую выпрямительную схему присоединена коллекторная машина постоянного тока, расположенная на общем валу с син-

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Одновременно с ростом мощностей отключения к выключателям высокого напряжения предъявляется ряд новых требований, также совершенствуется методика их испытания.

В свете современного уровня техники выключателестроения действующий ГОСТ 687-41 на выключатели является в значительной мере устаревшим. Существующий стандарт не содержит такой важной количественной характеристики, как скорость восстановления напряжения на дугогасящем промежутке при испытании выключателя. Вопрос этот рассматривается автором и им предлагаются к нормированию ряды частот собственных колебаний для типовых испытаний выключателя.

Стандарт позволяет учитывать апериодическую составляющую тока для оценки действующего значения

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОДНОКОВШЕВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Рассматриваются результаты экспериментального исследования электроприводов одноковшевых экскаваторов, проведенного кафедрой ЭПП МЭИ. Указывается, что электроприводы переменного тока экскаваторов типа драглайн с ковшами емкостью 3..4 м³, а также электроприводы постоянного тока, по схеме генератор — двигатель с электромашинными усилителями поперечного поля, предназначенные для экскаваторов типа драглайн с ковшами 10..14 м³, имеют ряд существенных недостатков. Некоторыми недостатками обладают также и электроприводы постоянного тока, со сложным возбуждением генератора, предназначенные для экскаваторов типа лопаты с ковшами 3..5 м³.

Система электропривода переменного тока с реостатным ступенчатым управлением в цепи ротора асин-

КОНСТРУКЦИИ ОБРАЗЦОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Повышение точности образцовых сопротивлений достигается как видоизменением их конструкции, так и применением новых материалов сопротивлений. На точность образцовых сопротивлений большое влияние оказывает влажность воздуха. Поэтому их помещают в герметический сосуд, заполненный инертным газом. Концы проводов сопротивлений приварены к платиновым выводам, вплавленным в торец стеклянного сосуда. К платиновым выводам припаиваются проводники для подключения к токовым и потенциальным зажимам.

В последние годы были разработаны новые материалы сопротивлений, которые по своим свойствам значительно превосходят манганин. Особенно хорошим материалом для точных сопротивлений является золото-хромовый сплав (97, 95% Au, 2,05% Cr). Его удельное сопротивление несколько меньше, чем у манганина, и

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ В СССР

Советские ученые, инженеры и новаторы производства, развивая творческое наследие русских изобретателей сварки, создали молодую советскую науку о сварке.

Достижения советской сварочной науки и техники позволили широко применить сварку в машиностроении и строительстве. К наиболее существенным из них относятся работы по развитию различных способов однодуговой и многодуговой сварки под флюсом, работы по шлаковой сварке с принудительным формированием сварного шва, применение шланговой полуавтоматической сварки, применение сварки в среде защитных га-

прессы, трикотажные машины и пр.). В схемах с форсировкой момента применяется широкая автоматизация с использованием электроники и обратных связей. Возбуждение генератора может осуществляться от: электромашинного усилителя, управляемого на сетке выпрямителей и тиристоров. Жесткие и гибкие обратные связи служат для автоматической стабилизации скорости, ограничения тока и ускорения двигателя, для гашения колебаний и т. д. Приводятся три категории схем рассматриваемых приводов с различной степенью сложности в зависимости от мощности и назначения привода. Регулирование скорости в схемах осуществляется комбинированное: весь диапазон регулирования перекрывается в нижней части изменением напряжения генератора, а в верхней части — изменением возбуждения двигателя, причем реостаты управления тем и другим спариваются так, что регулирование получается непрерывным.

Product Engineering, т. 25, № 6, 1954, стр. 133

(Э-во, 2, 1955)

хронной машиной, включенной параллельно с исполнительным двигателем на асинхронный генератор. Кроме описания схемы, приводятся результаты ее экспериментального исследования на асинхронных машинах мощностью около 30 кВт.

Пределы регулирования на экспериментальной установке были от 7—10 гц до 45—50 гц, причем работа ее оказалась устойчивой.

Схема потребовала исследования механических характеристик асинхронного короткозамкнутого двигателя при изменяющейся частоте, а также — процесса пуска в ход такого двигателя плавным подъемом частоты. Пуск двигателя производится в два этапа: 1) прямое включение при частоте 10 гц и 2) подъем частоты от 10 до 50 гц.

Схема разработана применительно к буровым агрегатам для нефтяной промышленности, но может найти применение и в других отраслях.

Энергетический бюллетень, № 8, 1954, стр. 17

(Э-во, 2, 1955)

хронного двигателя должна быть заменена новой системой бесступенчатого регулирования, например, с использованием дросселей насыщения.

Существующий электропривод мощных экскаваторов с электромашинными усилителями не обеспечивает требований, предъявляемых к электроприводам экскаваторов. Неблагоприятный характер протекания переходных процессов, неудовлетворительная форма механических характеристик и нестабильная работа электроприводов в этой схеме привода вызываются нестабильностью работы электромашинного усилителя в условиях эксплуатации экскаваторов.

Значительно более надежная работа экскаватора обеспечивается схемой генератор — двигатель со сложным возбуждением у генератора, хотя и эта схема обладает некоторыми недостатками.

В заключение авторы статьи намечают пути улучшения электроприводов экскаваторов.

Электричество, № 2, 1955.

зов. Сюда также относятся работы по созданию новых технологических способов наплавки износостойких сплавов, новых методов сварки различных листовых конструкций, в первую очередь резервуаров, а также разработка поточно-индустриальных методов изготовления арматурных конструкций для строительства. Значительные достижения имеют место в области совершенствования современного сварочного оборудования и автоматических сварочных устройств.

Задача развития сварочной науки и техники в СССР состоит прежде всего в изыскании принципиально новых высокопроизводительных способов соединения металлов и в дальнейшем развитии автоматизации процесса сварки. В связи с этим необходимы исследования физико-химических процессов при сварке и вопросов прочности сварного соединения, а также изыскание новых технологических процессов и способов автоматизации сварки, основанных на применении разработанных образцов сварочного электрооборудования.

Электричество, № 2, 1955.

сти с учетом потерь в трансформаторе и охлаждающем устройстве составляет 92...95%.

Для германиевых выпрямителей применяется обычная трехфазная мостовая схема, причем отдельные узлы по такой схеме могут включаться как параллельно, так и последовательно. В статье кратко описаны выполненные конструкции следующих типов германиевых выпрямителей: 1) 25 кВт, 200 а при 130 в, или 400 а при 65 в; 2) 120 кВт, 1 000 а при 120 в, или 2 000 а при 60 в. Для дуговой электропечи постоянного тока разрабатывается германиевый выпрямитель с рабочим током 10 000 а.

Product Engineering, т. 25, № 8, 1954, стр. 188.

(Э-во, 2, 1955)

образователей, предназначенных для передачи энергии постоянным током, так как для вентилей этого типа струи ртутного пара повышенной плотности особо опасны.

Electrotechnik und Maschinenbau, № 9, 1954, стр. 224 (Э-во, 2, 1955)

полного тока короткого замыкания, вводимого в определение мощности отключения выключателя. Между тем наблюдения показывают, что аperiodическая составляющая в токе может в значительной степени облегчать, а в других случаях, наоборот, значительно усложнять процесс гашения дуги в выключателе. Автор рекомендует вести испытания выключателей на отключающую способность только при симметричном токе, допуская наличие аperiodической составляющей порядка 10...15%. Указывается на ошибочность применения способа пересчета токов при установлении термической устойчивости аппаратов. Рекомендуется проводить определение термической устойчивости выключателей током, равным или приближающимся к предельному току отключения, а термическую устойчивость характеризовать временем протекания этого тока через замкнутый выключатель. Указывается на необходимость внедрения синтетических схем для испытания выключателей.

Электричество, № 2, 1955.

равно $0,33 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, температурный коэффициент равен $1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$. Старение этого сплава производится нагреванием в аргоне примерно до 200°C в течение 20 часов с последующим медленным охлаждением до температуры окружающей среды. Общее изменение сопротивления этого материала за 15 лет не превышает $4 \cdot 10^{-5}$. Другим весьма пригодным материалом для образцовых сопротивлений является сплав меди и марганца с содержанием алюминия — новокопстант (82,5% Cu, 12% Mn; 4% Al; 1,5% Fe); его удельное сопротивление равно $0,45 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, температурный коэффициент

$\pm 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$. Для получения такого температурного коэффициента новокопстант нагревают в нейтральной среде до 400°C в течение 5...20 часов. Изменение сопротивлений, изготовленных из новокопстанта, за 5 1/2 лет не превышает $3 \cdot 10^{-6}$.

ETZ—A, № 17, 1954, стр. 547.

(Э-во, 2, 1955)

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ТРЕХФАЗНОЙ СВАРОЧНОЙ ДУГЕ

Сварка трехфазной дугой является одним из высокопроизводительных методов. Существенным преимуществом трехфазной сварки является возможность регулирования распределения тепловой энергии между отдельными дугами, что позволяет управлять глубиной проплавления свариваемой детали и количеством наплавленного металла.

Показывается возможность замены действительных несинусоидальных токов и напряжений в дугах эквивалентными синусоидами, позволяющими рассчитать мощности отдельных дуг и всей трехфазной дуги с учетом внешних гармонических составляющих и предлагается эквивалентная векторная диаграмма трехфазной сварочной дуги. Предлагаются также формулы для расчета токов и мощностей отдельных дуг, а также мощности всей трехфазной дуги. Формулы дают результаты,

Л. В. Изволенский

ВЫБОР СТУПЕНЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЛЯ СХЕМЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ

Применение рекуперативного торможения возможно только при наличии потребителей энергии, выработанной электровозом. В большинстве случаев этими потребителями являются поезда, находящиеся в тяговом режиме, а при отсутствии их — двигатель-генераторы, инверторные преобразователи или поглощающие сопротивления, установленные на тяговой подстанции. При незначительном избытке энергии рекуперации (что определяется технико-экономическим расчетом) для приема ее на подстанции целесообразно устанавливать поглощающие сопротивления. Напряжение включения устройства при малых избыточных токах рекуперации следует принять близким к максимально допустимому напряжению электровоза, а при больших

R. Modlinger

РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

На паротурбинной станции мощностью $3 \times 50\,000$ квт в г. Ашаффенбурге установлены два ртутных выпрямителя с электронными сеточными регуляторами напряжения, используемые в качестве ионных возбудителей.

Установка ионных возбудителей позволяет использовать любой из генераторов станции в качестве синхронного компенсатора, отсоединив его от турбины: для подъема компенсатора с нуля выделяется отдельный турбогенератор, причем на время подъема с нуля цепи возбуждения обеих машин питаются от выпрямителей. Выпрямители используются, далее, в качестве резервных возбудителей, а также в качестве источников автоматически регулируемого напряжения возбуждения при емкостной нагрузке генератора или компенсатора. Нормально, цепь ротора генераторов питается от возбудителя на валу.

Н. Г. Дроздов и Ю. С. Чатинян

5

ВЛИЯНИЕ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ФАРФОРА

В эксплуатации фарфоровых изоляторов наблюдаются случаи внезапной потери ими механической прочности; явление это известно как «старение изоляторов». Одной из причин старения могут быть знакопеременные и вибрационные нагрузки. В работе излагаются результаты экспериментальных исследований влияния этих нагрузок на механическую прочность высоковольтного фарфора марок М-1 и М-2, а также влияние влажности и температуры обжига фарфора на его усталостную прочность. Исследования были проведены на стержнях прямоугольной формы в установке, создающей колебания звуковой частоты.

Найдено, что с возрастанием числа знакопеременной нагрузки звуковой частоты прочность фарфора закономерно падает, затем, достигнув известного предела

ПРИМЕНЕНИЕ КОПИРОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

При автоматической обработке копированием можно выделить три основные группы погрешностей: 1) обусловленные несовершенством элементов электрической или механической части станка; 2) погрешности при обработке углов детали и мест большой кривизны; 3) связанные с несовершенством элементов станка, но не поддающиеся автоматической отработке следящей системой.

Несовершенство элементов станка сказывается в наличии люфтов, упругих деформациях элементов, нагруженных большими механическими силами, в разнице между трением покоя и движения подвижных частей станка, в вибрации, в неточном соответствии установки шаблона со следящей головкой, с одной стороны, и обрабатываемой детали с инструментом — с другой стороны.

F. J. Pohnan

6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Описывается метод, позволяющий быстро определить наличие воска и пустот в изоляции высоковольтных кабелей с вязкой пропиткой. Метод основан на свойстве большинства масел и воска поглощать энергию падающих ультрафиолетовых лучей и превращать их в лучи видимой части светового спектра. Для лучшего использования этого свойства масел и воска необходимо изоляцию подвергнуть действию ультрафиолетовых лучей, не содержащих видимой части спектра. Наиболее удобным источником ультрафиолетовых лучей является ртутная лампа. Визуальное наблюдение в ультрафиолетовых «черных» лучах можно производить на свету, однако, опыты полезно вести в темной комнате, что позволяет выявить даже маленькие пузыри и детально исследовать форму больших пузырей.

C. C. Barnes

6

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КАБЕЛЕЙ

Высокая диэлектрическая прочность изоляции и большие номинальные токи кабелей, заполненных газом под давлением, и маслонаполненных кабелей вызвали в Англии применение их в сетях с напряжением 33 кв и выше. Общая длина проложенных маслонаполненных кабелей составляет 900 км. Основным препятствием большему применению этих кабелей является высокая стоимость их изготовления и прокладки. По данным статьи стоимость кабельной линии больше, чем воздушной (при одинаковой пропускной способности), в 4,5 раза при 20 кв и до 19 раз при 275 кв. В настоящее время в Англии изготовлено более 5,5 тыс. км такого кабеля. Серьезной проблемой является повышение антикоррозийной устойчивости алюминиевой оболочки.

D. P. Sayers, M. E. Laborde, F. J. Lane

6

О СВЯЗИ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ АНГЛИИ И ФРАНЦИИ КАБЕЛЕМ ЧЕРЕЗ ЛАМАНШ

Продолжается подготовка к прокладке четырех однофазных кабелей 132 кв между Фолькстоном и Калэ. Номинальная мощность передачи — 100 тыс. квт. Ввиду трудности точного регулирования перетоков по кабелю, предельная пропускная способность трех кабелей по нагреву принята равной 200 тыс. квт. По четвертому резервному кабелю намечается провести опытную передачу 200 кв постоянного тока с возвратом тока через море.

В Англии изготовлены образцы подводного газонаполненного кабеля 132 кв, 1×323 мм² с толщиной изоляции 13 мм. Давление газа — 14 ат. Оболочка толщиной 3,5 мм состоит из свинца с присадкой 0,4% олова и 0,2% сурьмы. Проволочная броня для уменьшения потерь выполнена из твердого алюминиевого сплава.

Люфты в основном лимитируют точность копирования. Самые большие люфты имеют место в ходовых винтах, их можно свести до значения меньшего 0,2 мм. Люфты в зубчатых передачах (приведенные к ходовому винту) в 30 раз меньше.

В современных копировальных станках достижимы скорости копирования до 2,5 м/сек. При этой скорости станки способны обрабатывать детали с наименьшим радиусом кривизны в 25 мм с погрешностью порядка $\pm 0,3$ мм. При меньших скоростях погрешность уменьшается. Так, при скорости около 1,3 см/мин погрешность не превышает 0,0125 мм при любой форме детали.

El. Eng., т. 73, № 8, 1954, стр. 729

(Э-во, 2, 1955)

практически совпадающие с данными опытов. Устанавливается, что мощности отдельных дуг и трехфазной дуги в целом определяются не только абсолютными значениями токов в электродах и напряжений в дугах, но также зависят от углов сдвига между токами в электродах (или, что то же, от отношения тока в детали к току в электродах — n) и от угла сдвига между напряжениями в дугах между деталью и электродами (или от отношения напряжений в дугах y). Соотношение мощностей (распределение тепловой энергии) между отдельными дугами определяется только отношениями n и y . Исследовано и опытным путем подтверждено, что зависимость между отношениями n и y многозначна: заданному отношению n могут соответствовать различные значения y и наоборот. Таким образом, при трехфазной сварке возможны самые различные соотношения между n и y , что и позволяет управлять процессом перераспределения тепловой энергии в трехфазной дуге.

Электричество, № 2, 1955

В то время как при визуальном наблюдении заметна большая разница между флуоресценцией масла и воска, на фотографии обе получились белыми со следующими различиями: площадь, занимаемая маслом, кажется мягкой — умеренно светлой, воск проявляется в виде более резкой, зернисто-белой поверхности. Количество масла или воска в любой точке определяется по степени белизны на фотографии.

При помощи специального приспособления, автоматически наводящего на фокус фотоаппарат по мере размотки изоляции кабеля, этот метод позволяет быстро исследовать каждый слой изоляции кабеля без удаления пропиточных масел.

При помощи этого метода автором были исследованы образцы новых кабелей разных марок, причем во многих образцах были найдены газовые пузыри. В некоторых трехфазных кабелях была выявлена разная степень пропитки отдельных фаз и неоднородность пропитки в продольном направлении.

T. AIEE, ч. II, 1951, стр. 1373

(Э-во, 2, 1955)

избыточных токах рекуперации — близким к номинальному напряжению подстанции.

Во избежание больших потерь вследствие потребления тока от ртутных выпрямителей подстанции при параллельной работе их с поглощающим устройством в зоне от напряжения холостого хода подстанции до напряжения отключения необходимо для ступеней, отвечающих меньшим токам рекуперации, принять более высокое напряжение отключения, а для ступеней, отвечающих меньшим токам рекуперации, меньшее напряжение.

Для определения ступеней сопротивлений предлагается графический расчет. Задаются величиной тока первой ступени. Последующие ступени строят так, чтобы минимальный ток ступени был равен максимальному току предыдущей ступени плюс ток от ртутных выпрямителей подстанции в момент отключения напряжения.

Электричество, № 2, 1955.

Британские фирмы работают над масло- и газонаполненными кабелями 275 кв. В настоящее время разработан кабель сечением 480 мм², рассчитанный на максимальную нагрузку 530 а при прокладке в земле, что соответствует передаче мощности примерно 250 мгва. Максимальная напряженность электрического поля на поверхности жилы этого кабеля равна 110 кв/см. Недавно изготовлен одножильный маслонеполненный кабель 300 кв сечением 260 мм².

Максимальная расчетная напряженность электрического поля, принятая в Англии для масло- и газонаполненных кабелей, применяемых на линиях переменного тока, составляет 85...110 кв/см. Для кабелей постоянного тока это значение может быть увеличено в 3 раза.

Electrical Review, т. 154, № 26, 1954, стр. 1163

(Э-во, 2, 1955)

Экспериментально исследовалась скорость регулирования возбуждения машины при ионном и при машинном возбуждении.

При сбросе емкостной нагрузки 21 000 квар напряжение снижается сначала в обеих схемах на 800 в. При ионном возбуждении подъем возбуждения начинается через 0,04 сек, нормальное напряжение восстанавливается через 0,32 сек. При машинном возбуждении подъем начинается через 0,4 сек, нормальное напряжение восстанавливается лишь через 1,84 сек. При сбросе и набросе индуктивной нагрузки номинальное напряжение восстанавливается при ионном возбуждении через 0,36...0,44 сек, в 4,5...5 раз быстрее, чем при машинном возбуждении. Гашение поля занимает при ионном возбуждении 1,48 сек против 2,88 сек в обычной схеме.

Применение ионного возбуждения представляет особый интерес для крупных тихоходных генераторов, когда установка возбудителя затруднена. Выпрямитель тогда питается от вспомогательного генератора на валу агрегата.

ETZ—A № 8, 1954 стр 275.

(Э-во, 2, 1955)

Однако сопротивление сплава истиранию в морской воде оказалось в 6 раз меньшим, чем для стали.

Во Франции исследуются четыре типа кабелей, в том числе два кабеля под внешним давлением газа. Кабели имеют овальную жилу и две свинцовых оболочки. Газ под давлением введен в зазор между оболочками. Броня состоит из стальной проволоки. Максимальный рабочий градиент потенциала составляет 11,8 кв/мм против 9 кв/мм для газонаполненного кабеля.

Проведены опыты по прокладке образцов кабелей в море и по разделке соединительных и концевых муфт, а также электрические и механические испытания кабелей.

При обсуждении доклада указывалось, что мощность передачи в 100 тыс. квт недостаточна, так как несовпадение максимумов нагрузки в обеих сетях составляло за последние два года 580...600 тыс. квт.

proceedings IEE, т. 101, ч. I, № 131, 1954, стр. 284 (Э-во, 2, 1955).

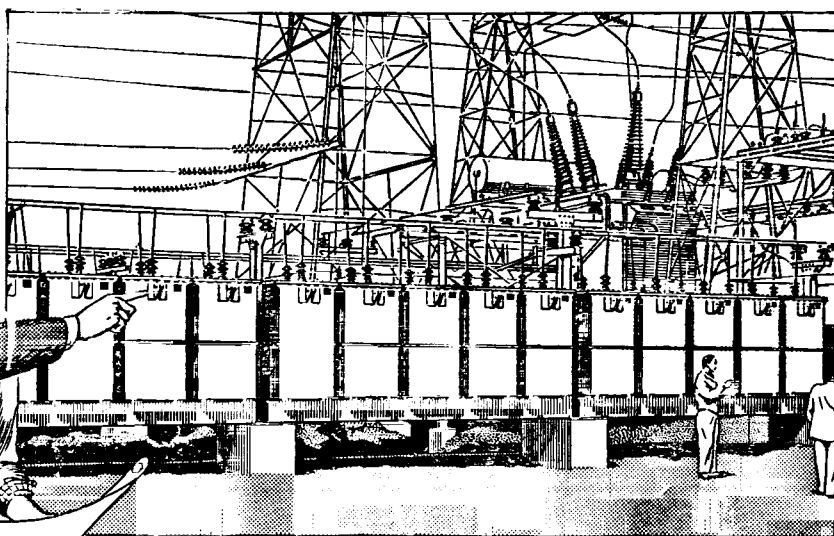
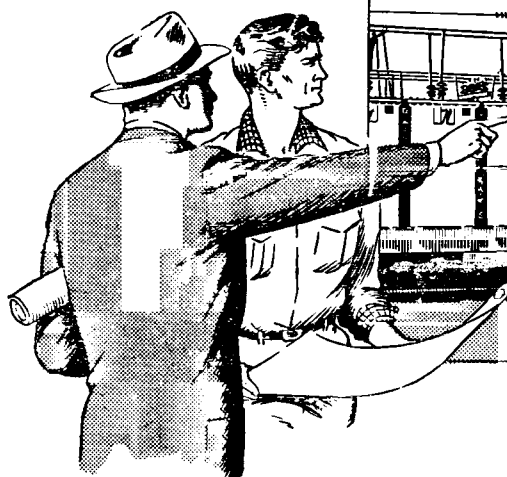
(предела усталости), прочность фарфора становится постоянной. Число витков, соответствующее пределу усталости, — циклическая долговечность (оказалась равной $1,5 \cdot 10^6$ для обеих марок фарфора). Увеличение температуры обжига фарфора не влияет на циклическую долговечность, но понижает предел усталости. Применяемые для высоковольтных изоляторов глазури Г-1 (белая) и Г-2 (коричневая) понижают статическую прочность фарфора на изгиб и предел его усталости, а глазурь Г-3, наоборот, повышает качества фарфора в этом отношении. Циклическая долговечность у глазурированного фарфора выше, чем неглазурированного.

Экспериментальные данные позволили установить связь между пределом усталости и прочностью на статический изгиб в виде формулы:

$$\sigma_y = 0,7\sigma_{cm} - 14 \text{ [кг/см}^2\text{]}.$$

Электричество, № 2, 1955

Батарея конденсаторов «ВІСС» мощностью 15000 реактивных *кв*а, состоящая из 60ти одно-фазных конденсаторов мощностью в 250 реактивных *кв*а, соединенных для работы при 11,75 *кв* . . . в Канаде.



Инженеры, заведующие снабжением!

Учили ли Вы возможности применения БАТАРЕИ КОНДЕНСАТОРОВ?

Если, как это часто случается, высокие цены и длительные сроки доставки генераторов, трансформаторов и трансмиссионной аппаратуры затрудняют удовлетворение потребителей энергии, убедитесь, что Вы не передаёте реактивный ток. Вы можете нейтрализовать реактивный ток и увеличить мощность Вашей существующей установки для подачи активной энергии установкой шунтированных групп конденсаторов. Конденсаторы эти, конечно, должны быть столь же надёжны и долговсрочны, как и остальные компоненты сети.

Конденсаторы «ВІСС» для улучшения коэффициента мощности вполне отвечают этим требованиям. Их гарантированный коэффициент полезного действия не менее 98,87%. Они не требуют текущего ремонта и обеспечивают многолетнюю бесперебойную службу. Они являются во всех отношениях совершенными, изготовленными из материалов наивысшего качества, их стоимость, однако, не является высокой.

Конденсаторы эти могут быть присоединены небольшими группами на распределительных пунктах и понизительных подстанциях или же большими батареями на повысительных подстанциях. Имеются также единичные конденсаторы для присоединения к клеммам мотора и распределительных досок.

Дальнейшие подробности Вы найдёте в брошюре № 278, каковая высылается по запросу.

КОНДЕНСАТОРЫ МОЩНОСТИ **ВІСС**

BRITISH INSULATED CALLENDER'S CABLES LIMITED
21, BLOOMSBURY STREET, LONDON, W.C.1, АНГЛИЯ

