

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР  
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

## СОДЕРЖАНИЕ

А. Ф. Иоффе — Развитие советской физики	3
М. Ф. Маликов — О введении в СССР абсолютных электрических и магнитных единиц	10
П. Л. Калантаров — О системах единиц измерения электрических и магнитных величин	17
К. К. Хренов — Электрическая сварка и резка под водой	27
И. С. Брук, С. С. Чугунов и М. С. Либкинд — Расчетный стол переменного тока	37
Л. А. Бессонов — Расчет электрических цепей с учетом гистерезиса	45
Из научно-исследовательских работ. Авторефераты	.
Г. В. Сербиновский и Э. С. Иохвидов — О потерях электроэнергии в связи с погрешностями приборов учета у бытовых потребителей	52
А. А. Воскресенский — Уравнения гармонических сложной кривой тока в цепи с железом	55
Д. П. Морозов — Новая схема возбуждения генератора в системе Леонарда	57
В. В. Усов — Металлокерамические контакты с окисью кадмия	60
Дискуссии	
К статье С. М. Сердинова „К проблеме энергоснабжения электрических железных дорог большой протяженности“	63
К статье Х. Ф. Фазылова „Обобщенный метод расчета потокораспределения мощностей в сложных цепях“	66
Из истории электротехники	
В. П. Никитин — Николай Гаврилович Славянов. К 50-летию со дня смерти	68
Рефераты	70
Стандарты	82
Хроника	89
Библиография	
А. В. Нетушил — Книга Г. И. Бабата „Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение“	92
С. М. Брагин — Книга М. Г. Герценштейна „Силовые кабели со сжатым газом“	94
Б. М. Тареев и С. П. Иноземцев — Старейший чехословацкий электротехнический журнал „Elektrotechnický obzor“	95

160300, г. Вологда, ГСП,  
ул. М. И. Ульянова, дом 1  
Вологодская областная  
библиотека им. И. В. Бабушкина

ВОЛОГОДСКАЯ  
ОБЛАСТНАЯ  
БИБЛИОТЕКА

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**, доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Глазунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик **В. Ф. Миткевич**, канд. техн. наук **И. А. Сыроматников**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

Секретарь инж **Я. А. Климовицкий**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80.  
Адрес для корреспонденции: Москва. Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

# Развитие советской физики

Академик А. Ф. ИОФФЕ

Для того чтобы правильно оценить тот путь, который прошла физика в Советском Союзе за 30 лет, будет полезно сравнить ее состояние в настоящее время с состоянием в предреволюционный период и постараться выявить те новые черты развития науки, в частности и физики, которые прямым образом связаны с советским социалистическим строем.

В прошлом русской науки известны имена, которыми по праву может гордиться наш народ. Достаточно назвать таких великанов науки, как М. В. Ломоносов, Д. И. Менделеев. Но и в узкой области физики можно вспомнить целую плеяду выдающихся ученых, начиная от Э. Х. Ленца и А. Г. Столетова до П. Н. Лебедева и Б. Б. Голицына, и целый ряд больших технических достижений, которые бы мы назвали сейчас решениями крупнейших проблем технической физики: электрическая дуга В. В. Петрова, гальванопластика Б. С. Якоби, свеча П. Н. Яблочкова, лампа накаливания А. Н. Лодыгина, радиотелеграф А. С. Попова и т. д.

Интересно вспомнить состояние физики в предреволюционные годы, в период с 1906 по 1917 гг., о котором я могу рассказать на основании личного опыта, а не только литературных и архивных данных.

Различна была судьба физиков в двух основных центрах России — в Ленинграде, тогдашнем Санкт-Петербурге, потом Петрограде, и в Москве.

Мне ближе всего знакома, конечно, петербургская физика того времени.

В университете, который был основным центром физики, процветало в основном наследие физики XIX века, времен Ф. Ф. Петрушевского, который рассматривал физику, как науку измерительную, а измерения считал существом всей физики. Так было построено и преподавание физики в высших учебных заведениях Петербурга. На первом курсе начинали с нониуса и кончали делительной машиной и только потом приступали к изучению различных разделов физики.

*Сопоставляется состояние физической науки в до-революционной России с развитием физики в СССР. Охарактеризованы важнейшие достижения и основные научные направления в советской физике. Особо отмечаются большие достижения технической физики. Показан огромный рост советских научных физических учреждений и кадров ученых-физиков. Отмечены крупнейшие преимущества, предоставляемые социалистическим строем советской науке и, в частности физике, преимущества, обеспечивающие ее успешное развитие. Статья является изложением доклада, прочитанного автором на юбилейной сессии Отделения физико-математических наук Академии наук СССР 28 сентября 1947 г.*

В Петербурге мы имели блестящего лектора, автора замечательного курса физики, — О. Д. Хвольсона, лекции которого посещались весьма усердно. Курс физики О. Д. Хвольсона послужил основой физического образования не только в России: он был переведен на ряд иностранных языков, в

том числе и на испанский, и пользовался широкой популярностью.

Однако, и лекции и курс преподавания в Петербургском университете того времени носили характер, мало побуждающий к научному творчеству. Это было систематическое, хорошо построенное изложение известных фактов, но очень слабо развиты были элементы проблемного характера.

И это несмотря на то, что в Петербурге имелся целый ряд крупных физиков. Тогда там работали: Д. С. Рождественский, метод крюков которого сделался основой изучения аномальной дисперсии, которому принадлежит прекрасное исследование аномальной дисперсии паров натрия и других щелочных металлов; Д. А. Рожанский — глубокий исследователь, первая работа которого об искре свежестью мысли привлекла внимание всех физиков того времени. В начале этого периода была опубликована столь же блестящая диссертация В. Ф. Миткевича об электрической дуге, в которой остроумным методом было обнаружено давление электронов.

В стороне от университетской физики оставался прекрасный физик А. Л. Гершун, создатель русской оптической техники. Мало помнят Н. А. Гезехуса, которому принадлежат интересные опыты по электризации трением и другие исследования, которые он ставил совершенно самостоятельно, не следуя за западной тематикой. Следует отметить Н. Г. Егорова и целый ряд других, к которым позволю причислить и себя. Тем не менее, официальная университетская физика не создала и не стремилась создать самостоятельной научной школы.

Несомненно, что петербургская физика того времени дала немало весьма ценных результатов. Но главным недостатком петербургской физики, как и всей дореволюционной физики, было то, что она строилась отдельными учеными, что так и не создавалось длительной преемственности физической школы.

Единственным отрядным исключением была школа Лебедева в Москве, на которую все русские физики того времени смотрели с большой надеждой. П. Н. Лебедев, выдающийся ученый, автор тончайших экспериментов, обнаруживший и измеривший световое давление на твердые тела, а затем и на газы, создавший рекордно короткие электромагнитные волны и развивший оригинальную теорию земного магнетизма, создал научную школу, в которую входил ряд крупных ученых. Ближайшим помощником Лебедева был П. П. Лазарев. В лаборатории Лебедева работал под руководством Лазарева С. И. Вавилов. Учениками П. Н. Лебедева являются: В. К. Аркадьев, Д. В. Зернов, Б. В. Ильин, А. Р. Колли, Т. П. Кравец, В. И. Романов, А. К. Тимирязев и ряд других ученых.

Школа Лебедева помещалась в подвале физического института. Тогда основные этажи занимались другими разделами, казавшимися более важными, чем наука, но тем не менее в этом подвале росла и развивалась крупная школа физиков.

Однако, в связи с удалением из университета прогрессивного руководства значительная часть лучших профессоров Московского университета, в том числе и Лебедев, вышли из состава университета, и даже в подвале по политическим условиям того времени не нашлось места его школе. Временно созданная в частной квартире лаборатория, конечно, не могла заменить университетской. Вскоре П. Н. Лебедев умер. Только незадолго до революции построенное для него на общественные средства здание было использовано для физического института учеником П. Н. Лебедева — П. П. Лазаревым.

В Москве жил и другой выдающийся физик А. А. Эйхенвальд, которому наши физики обязаны не только как автору классических работ по магнитному полю электрического тока и тока смещения, но и как одному из основных деятелей в области физического просвещения.

Кроме них в Москве в это время работали и другие известные физики: Умов, Соколов и ряд других. И в провинции мы имели ряд выдающихся ученых. В Харькове, например, перед революцией работали уже упомянутые Кравец и Рожанский, в Ростове — Колли, в Киеве — Косоногов, Шиллер, в Казани — Гольдгаммер и Ульянин, которому принадлежит честь открытия вентильного фотоэффекта, что незаслуженно забыто, в Одессе — Костерин и Кириллов, в Томске — Вейнберг, в Юрьеве — Садовский.

Таким образом, русская физика уже перед революцией имела достаточно большой актив крупных ученых. Я еще раз повторю: основным недостатком, связанным с условиями царского времени, было то, что это были отдельные ученые, каждый из них занимался тем или другим вопросом, его интересовавшим, но физики, как цельной науки, развивающейся планомерно и продуманно, такой физики в дореволюционной России не было; единственным светлым пятном была замечательная школа П. Н. Лебедева.

Необходимо отметить еще одну характерную черту предреволюционной физики: почти полный разрыв между физикой и техникой. В качестве примера я из петербургского своего опыта вспоминаю государственные экзамены в Петербургском университете. Я часто задавал оканчивающим университет и Высшие женские курсы в Петрограде вопрос о том: что такое амперметр, находящийся на стене перед ними, почему стрелка амперметра отклоняется, когда через него проходит ток? Почти никто не мог дать более или менее правильного ответа. Часто отвечали: стрелка электрическая, поэтому от электричества и отклоняется. Представления о динамо-машине почти ни у кого не было. В самые последние годы перед революцией в Петроградском университете особенно резко проявлялся этот отрыв физики от техники.

Наконец, последнее, что хотелось бы вспомнить, это русское физическое общество того времени. И в Петербурге, и в Москве существовали физические общества, и в том, и в другом числилось примерно по 100 членов. Это по большей части были одни и те же лица. Кроме того, среди них были любители физических знаний, сами творчески не участвовавшие в научной работе своими исследованиями. Физическое общество было живым центром, в котором постоянно происходили научные дискуссии, а иногда острые политические конфликты, естественно вытекавшие из условий того времени. Припоминается случай, который закончился отставкой всего президиума, связанный с уходом П. Н. Лебедева из Московского университета. Физическое общество приняло, вопреки настойчивому требованию некоторых старших физиков, постановление, в котором высказало решительное осуждение царскому правительству за разрушение единственной школы физики, указывая на громадный вред для науки, который от этого происходит; ответственность возлагалась на правительство и его органы. Можно отметить также случай, связанный с тем, что Парижская Академия наук забаллотировала М. Кюри, известную всему миру своими открытиями и тонкими исследованиями. По этому поводу французскому физическому обществу, с которым Русское физическое общество было в тесной связи (так, что всегда президент одного общества входил в другое), было послано резкое письмо с протестом против такого совершенно неправильного и реакционного решения.

Так выглядела русская физика накануне Октября. Октябрьская революция радикально изменила темпы развития физики в нашей стране, и дала ей новое содержание.

Уже в течение первого года советской власти создано было три больших физических института. Институт, возглавлявшийся П. П. Лазаревым в Москве, который был создан еще перед революцией и затем после революции превратился в Институт физики и биофизики. Однако, здесь разрабатывались также вопросы геофизики, задачи молекулярной физики, оптики и магнетизма. Институт занял руководящую роль в исследовании Курской магнитной аномалии. В этой работе принимал участие и академик А. Н. Крылов.

В Ленинграде осенью 1918 г. был создан физико-технический институт и вслед за ним через несколько месяцев Оптический институт. Физико-техническим институтом с тех пор руководит автор этих строк. Оптический институт был создан Д. С. Рождественским, затем научное руководство им перешло к С. И. Вавилову и в настоящее время к А. Н. Теренину.

Наряду с этими чисто физическими институтами вскоре были созданы: Электротехнический институт, Институт аэрогидродинамический и физико-химический.

В резком отличии от того, что было до революции, физика в этих институтах ставилась в тесную связь с задачами развития промышленности или других сторон жизни Советского Союза. Институт П. П. Лазарева избрал своей областью исследования геофизику и медицину. Оптический институт сделался центром оптической промышленности Советского Союза и создал производство оптического стекла под руководством И. В. Гребенщикова, А. А. Лебедева и Н. Н. Качалова.

Физико-технический институт ориентировался в сторону электротехники, энергетики и металла.

Таким образом, с самого начала новые институты рассматривали себя как основу технического прогресса, основу новой, более высокой, имеющей самостоятельные научные корни промышленности, в отличие от того, что было до революции, когда русская промышленность в своей значительной части находилась в руках зарубежных капиталистических фирм. Так, например, электропромышленность России находилась в руках Русского общества Сименс-Шуккерт, Русского общества Сименс-Гальске, Эриксон и др., являвшихся, конечно, только филиалами зарубежных фирм, заинтересованными в том, чтобы весь технический аппарат, вся техническая документация были сосредоточены за границей и чтобы в России не было собственных предприятий, что могло бы подорвать монопольное положение этих фирм. В их интересах было восхваление «чистой» науки и принижение достижений русской физики.

Одновременно с возникновением институтов были созданы новые условия для подготовки кадров физиков. Уже в 1919 г. в Петрограде был создан в связи с физико-техническим институтом физико-механический факультет в Политехническом институте, который стал готовить физиков и механиков, владеющих основами техники. Во главе механического отдела стоял, рано умерший, замечательный ученый А. А. Фридман. Вскоре произошла реформа физико-математического факультета Петроградского университета, связанная с выявившимися потребностями физического исследования. В то время как раньше физико-математический факультет готовил и физиков и математиков для средней школы, и только отдельные лица из окончивших этот факультет шли в исследовательскую работу, в Ленинградском, а потом и в Московском университетах выделились самостоятельные физические факультеты. В последнее время в Москве наряду с физическим был создан физико-технический факультет. Задача же подготовки преподавателей физики для средней школы была поставлена перед целой сетью вновь созданных педагогических институтов, которые эту задачу выполняют гораздо лучше, чем это могут делать университеты.

В дальнейшем, начиная с 1928 г., начали создаваться центры физики не только в Ленинграде и в Москве, но и в ряде крупных городов. Созданы были физико-технические институты в Томске, в Харькове, в Днепропетровске, Свердловске, Горьком. Таким образом, выросла целая сеть физических институтов каждый со своим профилем, со своим определенным научным лицом. К ним прибавились институты новых республиканских академий наук: Украинской, Азербайджанской, Грузинской, затем Армянской, Узбекской, Латвийской, Белорусской. Таким образом, сейчас мы имеем систему физических институтов не только в Ленинграде и в Москве, но и во всех основных крупных центрах Советского Союза и во многих союзных республиках.

В конце 1918 г. — в начале 1919 г. организовалась Ассоциация физиков, которая ставила своей задачей — направить физику в сторону задач социалистического строительства и широко развернуть физические исследования в Советском Союзе.

Особенно хочется вспомнить съезд, созванный этой Ассоциацией в 1928 г., который начался в Москве и затем происходил в Горьком, в Казани, в Саратове, далее перешел в Тбилиси и, таким образом, охватил целый ряд важнейших университетских городов страны. Последний съезд Ассоциации в Одессе принял решение о внедрении планового начала в организацию физических исследований.

В этих новых организационных формах уже первое десятилетие ознаменовалось крупными успехами, созданием больших научных школ и важными научными результатами.

В лабораториях Ленинградского физико-технического института было открыто явление астеризма на рентгенограммах кристаллов и получили широкое развитие работы по проблеме прочности, пластической деформации и электрических свойств кристаллов. Здесь же И. В. Обреимовым был разработан остроумный метод получения монокристаллов. Большое значение имели также работы Обреимова по силам сцепления в слюде и более поздние работы по новому виду двойникования, сопровождающего пластическую деформацию.

П. И. Лукирский положил начало новому направлению в области электроники и фотоэффекта. Он впервые определил распределение скоростей электронов в металле. П. И. Лукирский в течение долгого времени был также научным консультантом лаборатории основного нашего завода в этой области—завода «Светлана».

Из новых направлений в области молекулярной физики большое значение получили рентгеновские текстуры вещества, характеризующие изменение кристаллической решетки при деформациях и холодной обработке. В 1918 г. нами с М. В. Кирпичевым были опубликованы первые рентгенограммы деформированных кристаллов. Часто забывают, что основное представление о рентгенограммах как о результате отражения рентгеновых лучей от атомных плоскостей в кристаллической решетке было выдвинуто замечательным, к сожалению, рано погибшим, русским физиком-кристаллографом Ю. В. Вульфом, раньше, и, конечно, независимо от Брэгга. В то время Ю. В. Вульф был сотрудником Петроградского физико-технического института.

Выдающимся представителем советской науки первого периода был А. А. Фридман, автор теории относительности с отрицательной кривизной, получившей столь важное значение. А. А. Фридман создал передовую школу динамической метеорологии. Эти работы Фридмана получили большое развитие в наши дни. Создано новое и важное направление советской науки, открыт научный путь к прогнозу погоды.

К этому же периоду относится теория теплового пробоя диэлектриков, разработанная Н. Н. Семеновым и В. А. Фоком. Н. Н. Семенов перенес основные идеи этой теории на химические явления и пришел к теории цепных реакций, открывших новый этап химической кинетики и давший целый ряд важнейших практических результатов.

В Москве в конце этого периода развилась оригинальная научная школа Л. И. Мандельштама. Этой школе мы обязаны значительным углублением наших знаний в области молекулярной физики (изучение механизма вязкости трения и дисперсии звука). Л. И. Мандельштаму и Г. С. Ландсбергу принадлежит честь открытия и правильного истолкования явления комбина-

ционного рассеяния света, за которым несправедливо укоренилось название эффекта Рамана.

В той же научной школе Л. И. Мандельштам и неразрывно творчески с ним связанный Н. Д. Папалекси начали развивать теорию нелинейных колебаний со всеми разнообразными их применениями.

Уже в этот период началось развитие ряда идей, выдвинутых Я. И. Френкелем. Из них особенно замечательна идея о перемещении свободных мест среди заполненной среды, нашедшая плодотворное применение в вопросах электропроводности и диффузии. Эта же идея с успехом была распространена Я. И. Френкелем на перемещение внутри кристалла возбужденных состояний атомных электронов (экситонов).

Большое впечатление произвели замечательные исследования Д. В. Скобельцына, который, поместив камеру Вильсона в магнитное поле, исследовал спектры гамма-лучей и впервые заметил прохождение космических лучей через камеру.

В. К. Аркадьев с сотрудниками провел ряд важных исследований по магнитной спектроскопии железа. А. А. Глаголева-Аркадьева и М. А. Левитская были пионерами в деле получения электромагнитных волн, перекрывающих инфракрасный спектр.

В Оптическом институте под руководством Д. С. Рождественского выросла сильная школа спектроскопистов. Идея Рождественского о магнитном прохождении дублетов оказала большое влияние на развитие теории спектров. Его метод крючков широко использовался при изучении дисперсии. Под руководством Д. С. Рождественского получила развитие советская оплотехника, светотехника, промышленность оптического стекла и оптических приборов.

Таким образом, целый ряд крупных научных результатов, добытых советской физикой уже в первый период ее развития (1918—1928 гг.), формирование ряда новых научных направлений и школ сделали советскую физику полноправным членом мировой науки и связали ее с прогрессом советской техники.

Следующий период лучше известен, поэтому можно ограничиться лишь кратким перечислением вновь созданных научных направлений. Да и результаты, достигнутые за этот период, так обширны, что вряд ли возможно в одном докладе охватить их все сколько-нибудь полно.

В этот период дальнейшее развитие находят работы по нелинейным колебаниям в школе Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси (Андронов, Рытов, Горелик). В этой же области разработаны новые методы Н. М. Крыловым и Боголюбовым. Работы по нелинейным колебаниям — одно из важнейших научных направлений физики в Советском Союзе.

Большое открытие в области классической физики сделано П. А. Черенковым в лаборато-

рии С. И. Вавилова. Черенков обнаружил свечение электронов, движущихся в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света. Теория этого явления также была создана в Советском Союзе И. А. Таммом и И. М. Франком. Люминесценция жидкостей — область, целиком созданная С. И. Вавиловым, В. П. Левшиным и их сотрудниками.

С. И. Вавиловым был разработан метод измерения слабых интенсивностей света и непосредственно обнаружена корпускулярная природа света.

Ряд выдающихся открытий П. Л. Капицы, Л. Д. Ландау и их школы в области сверхнизких температур также относятся к этому периоду (сверхтекучесть, второй звук в гелии, промежуточное состояние сверхпроводимости, турбодетандер).

Ведущая роль принадлежит нашим ученым, работающим в области изучения жидкостей, аморфных тел и полимеров — П. П. Кобеко и А. П. Александрову.

И. В. Курчатовым, П. П. Кобеко и Б. В. Курчатовым открыто новое физическое явление, представляющее собой электрическую аналогию ферромагнетизма и названное ими сегнетоэлектричеством. Дальнейшим развитием этих идей являются известные работы В. М. Вула по титанату бария.

Вместе с рядом сотрудников и физиками Киева и Одессы мы занимались исследованием физической природы полупроводников и их практическим использованием. В этой области имеется ряд крупных достижений (фотомагнитный эффект Кикоина и Носкова, новые выпрямители, фотоэлементы и термоэлементы, выяснение физического механизма основных свойств полупроводников и сплавов).

Проблемами, связанными с ядерной физикой, мы начали заниматься не так давно, однако в этой области, благодаря работам И. В. Курчатова по ядерной изомерии и А. И. Алиханова по бета-распаду радиоактивных ядер и аннигиляции, благодаря исследованиям Д. В. Скобельцына, В. И. Векслера и Алиханьяна по космическим лучам, Л. Д. Ландау — по теории ливней и др., советская физика уверенно продвигается вперед. В Советском Союзе создано современное представление о протонах и нейтронах как единственных элементах атомного ядра (Иваненко), о хаотическом движении нуклонов в ядре и о распаде тяжелых ядер (Френкель). Алиханьян и Алиханов произвели переворот в наших представлениях об элементарных частицах вещества открытием спектра «варитронов».

Основные линии квантовой механики разработаны не у нас, однако метод, созданный В. А. Фоком, сделался руководящим для проблемы атомных электронов.

Невозможно здесь перечислить даже все самые крупные работы, но достаточно и этого неполного перечня крупнейших результатов для того, чтобы с достаточной ясностью предстал масштаб работ и значение достижений советской физики за эти годы, чтобы видеть, что советская физика имеет свои глубокие корни и прокладывает новые пути в ряде областей знания.

Новым для русской физики направлением, сильно развившимся после Октябрьской революции, является техническая физика с ее многообразными практическими применениями и выход физики в ряд смежных научных дисциплин.

В области технической физики следует назвать разработанный Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси фазовый метод измерения расстояний, который, несомненно, получит большое развитие в дальнейшем. Электронные умножители, созданные Кубецким, явились новым словом в области электроники. Созданные у нас сурьмяноцезиевые и серноталлиевые фотоэлементы далеко превосходят все, что было сделано в этой области за границы.

Назовем и радиолокацию, которую принято целиком связывать с Англией и США. Однако, следует иметь в виду, что радиолокация совершенно независимо, задолго до второй мировой войны, была создана у нас в СССР. Это одна из заслуг Д. А. Рожанского, Ю. Б. Кобзарева и их сотрудников.

Необходимо также вспомнить широко известные работы П. А. Ребиндера по использованию активных поверхностных слоев для многих важных технических целей. Следует указать далее на музыкальную акустику — оригинальное советское направление; на агрофизику, которая впервые использовала возможности современной физики для нужд социалистического сельского хозяйства; на физику моря Шулейкина, физические методы разведки и сейсмологию.

Можно перечислить еще целый ряд вновь созданных, никогда до революции в России не существовавших направлений технической физики. Свидетельством того широкого развития, которое приобрела в СССР техническая физика, является то, что издаваемый у нас «Журнал технической физики», по объему во всяком случае, а по содержанию в значительной степени не уступает масштабу «Журнала экспериментальной и теоретической физики». Этот журнал охватывает целый ряд направлений, созданных в послереволюционное время.

Попробуем теперь сопоставить то, что было вначале сказано о состоянии физической науки в дореволюционной России, с тем, что мы знаем о развитии физики за последние годы.

Если до революции в России имелось примерно 100 физиков, то сейчас мы имеем во всяком случае не менее 2 000 ученых, которые занимаются исследовательской работой в области

физики. До революции у нас было не больше 20 докторов наук, сейчас в нашей стране имеются сотни докторов физико-математических наук.

С 1909 г. я был редактором физической части журнала Русского физико-химического общества, которая появлялась в виде 9 тощих выпусков в год, в которых половина статей носила обзорный характер; примерно 30 научных работ в год появлялось в России в то время. Сейчас ежегодно публикуется не менее 300 оригинальных работ крупного научного значения.

До революции в университетах очень небольшое число лиц оставалось для подготовки к профессорскому званию по физике, и из них формировались кадры ученых физиков; подготовка их часто производилась при помощи заграничных лабораторий. Сейчас мы имеем в Академии наук СССР три физических института в Ленинграде и Москве и институт в Свердловске. Кроме того, почти во всех республиканских академиях созданы физические институты или физические лаборатории. Создано большое число мощных отраслевых институтов и сотни физических лабораторий в институтах не физических.

В этих учреждениях, к которым следует еще добавить физические, физико-механические и физико-технические факультеты высших школ, повышают свои знания и приобретают опыт научной работы сотни аспирантов и докторантов.

Обсуждение физических вопросов в России происходило на съездах естествоиспытателей и позже на менделеевских съездах. Но эти съезды происходили раз в несколько лет. Сейчас, как известно, одно Отделение физико-математических наук Академии наук СССР ежегодно организует целый ряд конференций и сессий, а кроме того, большое число конференций по разным вопросам физики созывается рядом других организаций. Достаточно сказать, что в конференциях по полимерам, которая созывается у нас два раза в год, принимает участие больше 60 научных институтов Советского Союза, и это также характерно и для других конференций: по спектроскопии, люминесценции, радиофизике и т. д.

Это — количественные сопоставления, но далеко не только они иллюстрируют тот перелом, который произошел в советской физике. Гораздо существеннее и глубже изменения, которые связаны с созданием у нас нового общественного строя. В этом отношении наша наука, естественно, отличается не только от науки дореволюционной России, но и от современной науки буржуазных стран. Это своеобразие советской науки дает ей большие преимущества и в них больше, чем в количественном росте, я вижу основания для самых смелых надежд на будущее. Оно вселяет уверенность в том, что мы действительно выполним задание, которое поставил перед учеными товарищ Сталин в своей речи 9 февраля 1946 г.:

«...не только догнать, но и превзойти в ближайшее время достижения науки за пределами нашей страны».

Наука во всех капиталистических странах имеет всегда порочные моменты, вызванные корыстными интересами конкурирующих промышленных фирм и необходимостью для ученого добиться заработка и известности. Эти стимулы лежат в основе научной деятельности за границей. У нас за 30 лет советской власти создана целая армия ученых, мощные коллективы которых ставят своей основной задачей научные исследования. Наука сделалась орудием улучшения жизни нашего народа и создания лучшего будущего для всего человечества. Эта высокая цель вдохновляет советских ученых. Вместо разрозненных, случайных интересов отдельных лиц и выгоды капиталистов как основания для постановки той или другой проблемы у нас наука составляет часть общесоюзного государственного плана развития народного хозяйства и культуры.

Это обеспечивает нам то, что мы целеустремленно сосредоточиваем главные свои силы на разрешении важнейших проблем и в то же время обеспечиваем весь обширный фронт науки и ее применений в промышленности, сельском хозяйстве, транспорте, связи и военном деле.

В США и Англии во время войны государственные власти занялись «планированием» науки в интересах крупнейших капиталистических монополий; для создания атомной бомбы и для создания радиолокации были сосредоточены большие силы ученых, огромные финансовые и технические средства. Но уже сейчас поднята кампания за «свободу науки». Орган Ассоциации ученых США заявляет, что лучшее обеспечение «свободы науки» — это... финансирование ее отдельными капиталистами — благотворителями.

И в Англии развернулось движение в пользу такой науки, которая не заботилась бы о том, полезна ли она, нужна ли кому-нибудь и для чего-нибудь.

В то время как наука за границей все больше и больше становится орудием агрессии и эксплуатации и всякая научная инициатива, которая затрагивает существенные интересы капитала, подавляется, — советская наука является орудием мира и прогресса, ей предоставлены возможности для широчайшей инициативы и все условия для развития наиболее прогрессивных идей и направлений. Сознание каждого советского ученого, что вся его деятельность нужна его народу, всему человечеству, несомненно, один из мощных стимулов, который дает нашей науке большие преимущества.

В нашей стране широко разворачиваются пограничные области знания; научные исследования не останавливаются на тех перегородках, которые были созданы классификацией отдельных



наук; научная мысль открывает новые проблемы на границах физики и биологии, физики и химии, физики и математики, физики и астрономии и т. д. Эта типичная особенность нашей советской науки определяется целеустремленным планово-социалистическим ее характером.

Естественно, что в то время как источником для создания кадров науки в буржуазных странах является в основном узкий круг обеспеченных людей, у нас широкая масса рабочих и крестьян получает свободный доступ к науке. Талантливые ученые нашей страны могут смело и широко развивать свои идеи и способствовать развитию науки.

И, наконец, крупное наше преимущество—это та последовательная методология диалектического материализма, которая пронизывает науку Советского Союза и, в частности, все наши физические исследования. Ничего подобного за границей нет; в отношении методологии там господствует полная безидейность и даже хуже—часто головы исследователей затемняют религиозные предрассудки, мистицизм и идеализм всех видов.

Индивидуальные работы ученых у нас перерастают в коллективное творчество институтов и академий,двигающих науку вперед и решающих важнейшие народнохозяйственные проблемы.

Критика и самокритика, социалистическое соревнование, методология диалектического материализма, идейная направленность, плановость, указания и деятельная помощь партии и правительства создают почву, на которой расцветают таланты, растут и множатся открытия и изобретения. Такова советская наука, такова и советская физика.

За 30 лет она охватила действительно весь диапазон от механики до ядерной физики, почти без всяких пробелов и вышла далеко за свои пределы в области биофизики, химической физики, геофизики, физики моря, геологии, космогонии и т. д. По всему этому обширному фронту советские физики проложили новые пути, создали новые научные направления и научные школы. К физике вплотную примыкают плодотворные области технической физики, агрофизики, метеорологии, музыкальной акустики.

В годы Великой Отечественной войны физики показали себя достойными сынами своей Родины.

Благоприятные условия, созданные эпохой бурного строительства социалистической индустрии и социалистического сельского хозяйства, привели к мощному росту нашей науки. Культурная революция пополнила ее ряды талантливыми и высококвалифицированными учеными, выдвинутыми из среды рабочего класса и колхозного крестьянства.

Мы можем теперь с надеждой и уверенностью смотреть в великое будущее нашей науки.

Анализируя науку в ее историческом развитии, оценивая условия, в которых она создается, мы не можем не прийти к выводу, что в то время как советская наука растет и развивается в общем движении нашей страны к коммунизму, наука капиталистических стран наталкивается на сотни неустраняемых препятствий и обречена на отставание.

Таковы объективные основы нашей уверенности в том, что советские ученые выполняют задание, поставленное перед ними И. В. Сталиным.



# О введении в СССР абсолютных электрических и магнитных единиц

Доктор техн. наук, проф. М. Ф. МАЛИКОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Менделеева

В 1933 г. VIII Генеральная конференция по мерам и весам, в которой участвовали представители всех государств, подписавших международную метрическую конвенцию, приняла постановление о замене международных электрических единиц абсолютными электрическими единицами и уполномочила свой исполнительный орган — Международный комитет мер и весов — установить порядок и срок перехода на новые единицы после того, как национальные метрологические институты проведут все необходимые подготовительные работы. Намеченный на 1 января 1940 г. переход вследствие мировой войны не состоялся.

В октябре 1946 г. Международный комитет мер и весов, собравшись впервые после мировой войны, вынес окончательное постановление о введении в действие абсолютных единиц с 1 января 1948 г. Таким образом, предпринятая 15 лет назад коренная реформа электрометрии приблизилась к своему осуществлению.

Вопрос о введении системы абсолютных электрических и магнитных единиц в СССР был предметом обсуждения Комиссии по единицам мер Академии наук СССР, работавшей в 1936—1938 гг. под председательством члена-корр. Академии наук СССР, проф. М. А. Шателена, которая рассматривала его в связи с предложением пленарного собрания Международной электротехнической комиссии в Шевенингене-Брюсселе в 1935 г. принять систему Джорджи, основанную на трех механических единицах: метр, килограмм и секунда (система MKS) и четвертой практической электрической единице, выбранной из числа семи единиц: ом, вольт, кулон, ампер, фарада, генри и вебер.

Комиссия по единицам мер, после подробного обсуждения вопроса, не пошла, однако, по пути, предложенному Международной электротехнической комиссией, а остановила свой выбор чет-

*С января 1948 г. в СССР, в соответствии с постановлением Международного комитета мер и весов, принятым в октябре 1946 г., вводятся вместо международных электрических единиц абсолютные электрические и магнитные единицы. Статья М. Ф. Маликова поясняет публикуемый проект положения «Электрические и магнитные единицы абсолютной электромагнитной системы MKSM», составленный Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии им. Менделеева. По статье М. Ф. Маликова и помещаемой далее статье П. Л. Калантарова, а также по проекту положения о новых единицах намечено провести обсуждение.*

вертой единицы на единице магнитной проницаемости, выступив со следующим единогласно принятым предложением:

1. Принять систему единиц, в которой основными являются единицы длины, массы, времени и магнитной проницаемости.

2. В качестве первых трех единиц принять метр, килограмм и секунду, определяемые установленными методами по своим эталонам.

Четвертую единицу определить как  $\frac{10^7}{4\pi}$  магнитной проницаемости пустоты.

3. Присвоить особое наименование единице магнитной проницаемости, составляющей  $\frac{10^7}{4\pi}$  магнитной проницаемости пустоты.

Это предложение было решено сопроводить следующим обоснованием:

1. Абсолютные практические единицы электромагнитных величин являются, по самому определению, точными десятичными кратными или дольными соответствующих единиц именно системы CGS  $\mu_0$ .

В силу этого осуществление абсолютной практической системы возможно только при том условии, что ее основные единицы также будут точными кратными основных единиц системы CGS  $\mu_0$ , в которой магнитная проницаемость пустоты принимается численно равной  $4\pi$  в рационализованной и в нерационализованной системах.

Поэтому, выбирая в качестве основных единиц длины, массы и времени 10 см, 1 000 г и 1 сек. для осуществления абсолютной практической системы, необходимо принять такую четвертую единицу, чтобы числовое значение магнитной проницаемости пустоты было равно точно  $4\pi \cdot 10^{-7}$  — в рационализованной системе или  $10^{-7}$  — в нерационализованной.

Таким образом, в определение четвертой основной единицы любой величины (абсолютный ампер, абсолютный ом и т. п.) неизбежно должно входить, хотя бы в неявном виде, предположение об определенном значении единицы магнитной проницаемости.

Например, система абсолютных практических единиц, построенная на четырех основных единицах—метр, килограмм, секунда и ампер абсолютный,—фактически также является системой, вводящей в качестве четвертой основной единицы единицу магнитной проницаемости, так как самое определение абсолютного ампера по силе взаимодействия между проводами основано на приписывании определенного значения магнитной проницаемости пустоты, поскольку в уравнение, выражающее силу взаимодействия между проводами, неизбежно входит магнитная проницаемость.

Так, определение одного ампера как величины тока, протекающего по параллельным прямолинейным проводам, при условии, что сила взаимодействия на каждый метр провода равна  $2 \cdot 10^{-10} \text{ ст}^1$  при расстоянии между проводами  $a = 1 \text{ м}$ , причем магнитное поле тока возбуждается в вакууме, тем самым является и определением единицы магнитной проницаемости, поскольку рассматриваемая сила выражается уравнением:

$$f_0 = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi a}.$$

Кроме того, нужно принять во внимание, что данное выше определение ампера по силе взаимодействия двух параллельных прямолинейных проводов совершенно законно может быть перенесено на определение ампера по силе взаимодействия проводов, имеющих иную конфигурацию. Но для того, чтобы оба определения единицы тока оказались тождественными при составлении соответствующего уравнения, связывающего силу и ток, необходимым оказывается приписывание определенного значения магнитной проницаемости пустоты.

Из четырех основных единиц только метр и килограмм определяются по искусственно созданным вещественным эталонам, хранящимся в Международном бюро мер и весов. Величины двух других единиц определяются по «естественным эталонам», предоставленным природой в виде: а) процесса вращения Земли, происходящего с точно известной закономерностью, и б) универсальной постоянной—магнитной проницаемости пустоты, характеризующей одно из свойств физического пространства.

Эти естественные эталоны определяют величину соответствующей единицы только в связи со специальными, произвольно установленными условиями:

а) секунда есть одна восемьдесят шесть тысяч четырехсотая  $\left(\frac{1}{86\,400}\right)$  часть промежутка времени между двумя последовательными верхними

кульминациями точки небесной сферы, прямое восхождение которой, отнесенное к средней точке весеннего равнодействия,  $\alpha_m = 18^h 38^m 45^s, 836 + 8\,640\,184^s, 542 K + 0^s, 0929 K^2$ , где  $K$ —частное от деления на 36 525 числа средних солнечных суток, истекших от гринического среднего полудня 31 декабря 1899 г. [Л. 1];

б) единица магнитной проницаемости равна  $\frac{10^7}{4\pi}$  магнитной проницаемости пустоты.

При первичном определении производных единиц, таких, как ампер, вольт, ом и т. д., в предлагаемой системе единиц приходится основываться не на определенных вещественных эталонах, а на физическом эксперименте, в результате которого числовое значение измеряемой величины, а следовательно, и ее единица выражаются через известные параметры эксперимента и через принятое числовое значение магнитной проницаемости пустоты, которая, таким образом, и выполняет функцию эталона.

2. Величина единицы магнитной проницаемости выбрана с таким расчетом, чтобы при пользовании рационализованной системой уравнений получить в качестве единиц электромагнитных величин абсолютные практические единицы.

Для того, чтобы при пользовании нерационализованной системой уравнений получить систему единиц, возможно мало отличающихся от предлагаемой системы, следует изменить единицу магнитной проницаемости, увеличив ее в  $4\pi$  раза. При этом все остальные единицы в этих двух системах совпадут.

3. После выбора единицы магнитной проницаемости в качестве основной было бы неверно выражать ее, как генри на метр или вольтсекунда на метрампер, т. е. через другие основные и даже производные единицы.

Этим обусловлен третий пункт предложения.

Что касается конкретного выбора наименования, то вопрос об этом должен подвергнуться широкому обсуждению, и в настоящее время можно только высказаться за то, чтобы, как и другие единицы практической системы, единица магнитной проницаемости была названа по собственному имени одного из крупнейших ученых, работавших в области изучения электромагнитных явлений. При обсуждении этого вопроса в Комиссии по единицам мер Академии наук СССР некоторыми из членов Комиссии выдвигалось имя Юинга [Л. 2].

Таким образом, Комиссия по единицам мер, по существу, остановилась на абсолютной электромагнитной системе единиц, отличающейся от классической электромагнитной системы CGS  $\mu_0$  лишь выбором основных единиц.

Это решение Комиссии было положено в основу определений электрических и магнитных единиц, разработанных Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии (ВНИИМ) и рассмотренных в мае 1939 г. в особом совещании при председателе Комитета по делам мер и измерительных приборов при СНК СССР с участием представителей Академии наук СССР, на-

<sup>1</sup> 1 стен =  $10^8$  ньютонам.

учно-исследовательских институтов и высших учебных заведений, внесшем ряд изменений и редакционных поправок. Определения в принятой совещанием редакции были тогда же опубликованы [Л. 3].

В начале текущего года ВНИИМ при участии ленинградских электриков разработал предлагаемый проект об электрических и магнитных единицах абсолютной электромагнитной системы MKSM, который должен заменить стандарты: ОСТ 515 «Международные электрические единицы» и ОСТ/ВКС 5578 «Абсолютные магнитные единицы системы CGS».

При построении системы MKSM были приняты во внимание следующие соображения:

1. В систему включены только важнейшие электрические и магнитные единицы, относительно которых достигнуты определенные международные соглашения.

2. В систему включены некоторые механические единицы, необходимые для определения электрических и магнитных единиц.

3. В основу положены определения, принятые совещанием 1939 г., причем определения даны для случая рационализованной системы уравнений, за принятие которой единогласно высказалась Комиссия по единицам мер Академии наук СССР. Эти определения по возможности согласованы с определениями, предложенными в 1946 г. Международным комитетом мер и весов в качестве рекомендуемых и имеющих единственной целью установить лишь теоретические размеры единиц, а не методы, которыми следует пользоваться при их практическом осуществлении<sup>2</sup>.

4. Для единиц магнитной проницаемости принято наименование «магн». Этот вопрос потребовал двукратного рассмотрения. Сначала предполагалось присвоить единице магнитной проницаемости собственное имя одного из ученых, как это рекомендовала Комиссия по единицам мер Академии наук СССР, но затем, ввиду трудности обосновать выбор собственного имени и в связи с тем, что единица магнитной проницаемости является основной единицей системы, а наименования всех остальных основных единиц (метр, килограмм, секунда) образованы из слов древних языков, принято предлагаемое наименование «магн».

5. Определения механических единиц в точности совпадают с определениями, принятыми новым проектом ГОСТ для механических единиц, одобренным в апреле 1947 г. Всесоюзным комитетом стандартов при Совете Министров СССР, и в то же время соответствуют рекомендуемым определениям Международного комитета мер и весов.

6. В отличие от классической электромагнитной системы G S<sub>р.</sub>, переход от основных единиц к производным электрическим и магнитным единицам осуществлен не через формулу Кулона, определяющую единицу магнитной массы, а через формулу взаимодействия проводников, опре-

деляющую единицу силы тока — ампер. Определение ампера совпадает с рекомендуемым Международным комитетом мер и весов.

7. Определения вольта, ома, кулона и фарады соответствуют рекомендуемым Международным комитетом мер и весов. Но для вебера и генри сохранены определения, установленные совещанием 1939 г. и существенно отличающиеся от рекомендуемых Международным комитетом мер и весов, а именно: Международным комитетом вебер определяется как магнитный поток, который, пронизывая цепь из одного витка, производит в ней э. д. с. в 1 V при равномерном убывании до нуля в течение 1 sec, т. е. определяется из соотношения  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ , а генри определяется как индуктивность замкнутой электрической цепи, в которой возникает э. д. с. в 1 V при равномерном изменении силы протекающего через цепь электрического тока со скоростью в 1 A/sec, т. е. определяется из соотношения  $e = -L \frac{di}{dt}$ .

В предлагаемом же проекте положения вебер определяется из соотношения  $\Phi = qr$ , а затем из соотношения  $L = \frac{\Phi}{i}$  определяется генри, чем достигается полное соответствие определения генри с определением фарады из соотношения  $C = \frac{q}{u}$ .

Определения этих единиц из статических соотношений  $L = \frac{\Phi}{i}$  и  $C = \frac{q}{u}$  являются более простыми, чем их определения из динамических соотношений  $L = -\frac{e}{\frac{di}{dt}}$  и  $C = \frac{i}{\frac{du}{dt}}$  (последнее опре-

деление емкости вполне возможно, хотя никогда не предлагалось), так как в два первых определения входят только по две величины ( $\Phi, i$  и  $q, u$ ), а в два вторых — по три ( $e, i, t$  и  $i, u, t$ ). Кроме того, при определениях генри и фарады из динамических соотношений возникают осложнения, так как вследствие явлений скин-эффекта и токов Фуко величины  $L$  и  $C$  зависят от закона изменения во времени величин  $i$  и  $u$ , что вызывает необходимость в специальных оговорках, осложняющих определения единиц. В проводниках, имеющих конечное сечение, невозможно осуществить условие  $e = -\frac{d\Phi}{dt} = \text{const}$

при  $\frac{di}{dt} = \text{const}$ , если ток равномерно изменяется в течение конечного промежутка времени, так как распределение магнитного потока по сечению проводника в этом промежутке времени будет изменяться.

8. Для единицы м. д. с. принято наименование «ампер», завоевывающее все больше и больше сторонников, вместо менее удачного наименования «ампервиток». Однако, ввиду распространенности последнего наименования, оно сохранено в качестве параллельного. Единицу м. д. с. — ампер в силу необходимости приходится определить че-

<sup>2</sup> Международный комитет мер и весов рекомендовал определения для следующих единиц: ньютон, джоуль, ватт, ампер, вольт, ом, кулон, фарада, генри и вебер.

рез ампер—единицу силы тока. Для единицы напряженности магнитного поля принято наименование «ампер на метр», не вызывающее никаких сомнений.

Положение об абсолютных электрических и магнитных единицах дополнено сведениями, необходимыми для успешного и безболезненного проведения реформы, которые нуждаются в следующих пояснениях.

Принятые Международным комитетом мер и весов в 1946 г. соотношения между средними международными омом и вольт-ампером и абсолютными омом и вольт-ампером представляют собой наиболее вероятные значения, установленные на основании экспериментальных работ по абсолютным измерениям, произведенным до войны, которые были полностью закончены только в Бюро стандартов (США) и Национальной физической лаборатории (Англия). Точность этих соотношений порядка 0,001—0,002%. Средние международные ом и вольт были установлены Международным комитетом в 1935 г. после сравнений в Международном бюро мер и весов электрических эталонов разных стран (катушек сопротивления в  $1\ \Omega$  и нормальных элементов) и представляют собой средние значения единиц сопротивления и э. д. с., определяемых государственными эталонами СССР, Великобритании, США, Германии и Японии. Отклонения значений единиц отдельных стран от средних международных значений не превышали 0,001%. Для их учета Международный комитет мер и весов предложил пользоваться данными международных сравнений электрических эталонов в 1937 г., которые являются последними по времени, получившими санкцию Международного комитета.

Поправки для единиц СССР не выходят за пределы точности установленных Международным комитетом соотношений между средними международными электрическими единицами и абсолютными единицами, поэтому введение этих поправок имеет скорее формальное значение, чем практическое. Однако, при их введении переходные соотношения получаются (случайно) более

простыми, а потому и более удобными для пользования. Эти соотношения имеют силу для периода времени 1932—1947 гг.; для более раннего периода возможны отклонения до 0,01% вследствие непостоянства э. д. с. нормальных элементов, служащих эталонами международного вольта. Работы по определению их э. д. с. при помощи серебряного вольтметра (эталона международного ампера) были произведены в метрологических институтах шести государств в 1930—1932 гг. Они и послужили для установления точных соотношений между единицами э. д. с. этих государств.

Во избежание всякого рода недоразумений и ошибок, возможных при пересчетах числовых значений электрических и магнитных величин при переходе от системы МКСМ к системе  $CGS_{\mu_0}$  и от рационализованной системы уравнений к нерационализованной, в положении даны соотношения между соответствующими единицами систем МКСМ и  $CGS_{\mu_0}$  и правила пересчета числовых значений. Все это, безусловно, облегчит переход к новой системе единиц и освоение рационализованной системы уравнений.

В отличие от ОСТ 515 «Международные электрические единицы» из системы МКСМ совершенно исключены кратные и дольные единицы в качестве обязательно применяемых, а вместо них дан полный перечень приставок, служащих для их образования. Сделано это с целью избежать излишнего стеснения в выборе кратных и дольных единиц, который должен основываться исключительно на потребностях практики, возникающих в процессе развития науки и техники.

Остальные дополнительные сведения особых пояснений не требуют.

#### Литература

1. ОСТ/ВКС 7132. Единицы времени.
2. Сборник работ Комиссии по единицам мер. Изд-во Академии наук СССР, стр. 45, 1938.
3. М. Ф. Маликов. Об определении электрических и магнитных единиц в абсолютной электромагнитной системе MKS [μ], 1939.



## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЕДИНИЦЫ АБСОЛЮТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ MKSM

Наименования	Сокращенные обозначения		Определения
	латинским (греческим) шрифтом	русским шрифтом	
1	2	3	4
<b>I. Основные единицы</b>			
<i>Единица длины</i> Метр	m	м	Единица длины, определяемая международным прототипом метра.
<i>Единица массы</i> Килограмм	kg	кг	Единица массы, определяемая международным прототипом килограмма.
<i>Единица времени</i> Секунда	sec s	сек с	Секунда среднего солнечного времени.
<i>Единица магнитной проницаемости</i> Магн	mgn	мгн	Магнитная проницаемость, равная $10\,000\,000/4\pi$ магнитной проницаемости пустоты.
<b>II. Механические единицы</b>			
<i>Единица скорости</i> Метр в секунду	m/sec	м/сек	Скорость равномерно и прямолинейно движущейся точки, перемещающейся на 1 метр в секунду.
<i>Единица ускорения</i> Метр на секунду в квадрате	m/sec <sup>2</sup>	м/сек <sup>2</sup>	Ускорение равномерно-ускоренно и прямолинейно движущейся точки, скорость которой изменяется на 1 метр в секунду в 1 секунду.
<i>Единица силы</i> Ньютон	N	н	Сила, сообщаемая массе в 1 килограмм ускорение в 1 метр на секунду в квадрате.
<i>Единица работы</i> Джоуль или ватт-секунда	J Ws	дж вт-с	Работа, производимая силой в 1 ньютон при перемещении точки приложения этой силы на 1 метр по ее направлению.
<i>Единица мощности</i> Ватт	W	вт	Мощность, при которой в течение 1 секунды равномерно производится работа в 1 джоуль.
<b>III. Электрические и магнитные единицы</b>			
<i>Единица силы тока</i> Ампер	A	а	Сила неизменяющегося электрического тока, который, протекая по каждому из двух бесконечно длинных параллельных прямолинейных проводников ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии в 2 метра друг от друга в однородной и изотропной среде с магнитной проницаемостью в $4\pi$ магн, создает между этими проводниками силу взаимодействия в 1 ньютон на каждый метр длины.
<i>Единица количества электричества</i> Кулон или ампер-секунда	C As	к а-с	Количество электричества, протекающее через поперечное сечение проводника в течение 1 секунды при неизменяющемся токе силой в 1 ампер.
<i>Единица разности электрических потенциалов, электрического напряжения и электродвижущей силы</i> Вольт	V	в	Разность электрических потенциалов между двумя точками линейного проводника, по которому протекает неизменяющийся электрический ток силой в 1 ампер, когда мощность, потребляемая между этими точками, равна 1 ватту.

Продолжение

Наименования	Сокращенные обозначения		Определения
	латинским греческим шрифтом	русским шрифтом	
1	2	3	4
Единица электрического сопротивления Ом	$\Omega$	ом	Электрическое сопротивление между двумя точками линейного проводника, в котором неизменяющаяся разность электрических потенциалов между этими точками в 1 вольт производит ток силой в 1 ампер.
Единица электрической емкости Фарада	F	ф	Электрическая емкость конденсатора, между обкладками которого существует разность электрических потенциалов в 1 вольт, когда он заряжен количеством электричества в 1 кулон.
Единица магнитного потока Вебер	Wb	вб	Магнитный поток, при убывании которого до нуля через поперечное сечение электрической цепи, сцепленной с этим потоком и имеющей сопротивление в 1 ом, протекает количество электричества, равное 1 кулону.
Единица магнитной индукции Вебер на квадратный метр	Wb/m <sup>2</sup>	вб/м <sup>2</sup>	Магнитная индукция, при которой магнитный поток сквозь поверхность в 1 квадратный метр, расположенную в равномерном магнитном поле перпендикулярно к линиям магнитной индукции, равен 1 веберу.
Единица индуктивности и взаимной индуктивности Генри	H	гн	Индуктивность электрической цепи, с которой сцепляется магнитный поток самоиндукции в 1 вебер, при силе неизменяющегося тока в цепи, равной 1 амперу. Взаимная индуктивность двух электрических цепей, с одной из которых сцепляется магнитный поток взаимной индукции в 1 вебер при силе неизменяющегося тока в другой цепи, равной 1 амперу
Единица магнитодвижущей силы и разности магнитных потенциалов Ампер или ампервиток	A Aw	a a-в	Магнитодвижущая сила вдоль замкнутого контура, однократно сцепленного с электрической цепью, по которой протекает ток силой в 1 ампер.
Единица напряженности магнитного поля (магнитной силы) Ампер на метр	A/m	а/м	Напряженность магнитного поля в однородной и изотропной среде на расстоянии в $\frac{1}{2}\pi$ метра от бесконечно длинного прямолинейного проводника ничтожно малого кругового сечения, по которому протекает ток силой в 1 ампер.

## Дополнительные сведения

1. Точные значения вышеуказанных электрических и магнитных единиц определяются государственными эталонами, осуществляемыми и хранимыми Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии им. Менделеева.

2. Для перехода от действовавших в СССР до 1 января 1948 г. международных единиц к абсолютным принимаются следующие соотношения:

1 международный джоуль = 1,00020 абсолютного джоуля  
 1 международный ватт = 1,00020 абсолютного ватта  
 1 международный ампер = 0,99985 абсолютного ампера  
 1 международный кулон = 0,99985 абсолютного кулона  
 1 международный вольт = 1,00035 абсолютного вольта  
 1 международный ом = 1,00050 абсолютного ома

1 международная фарада = 0,99950 абсолютной фарады  
 1 международный вебер = 1,00035 абсолютного вебера  
 1 международный генри = 1,00050 абсолютного генри

Эти соотношения установлены на основании следующих соотношений между средними международными и абсолютными омом и вольт, принятых Международным комитетом мер и весов в 1946 г.;

1 средний международный ом = 1,00049 абсолютного ома  
 1 средний международный вольт = 1,00034 абсолютного вольта,

с учетом соотношений между международными омом и вольт, определяемыми государственными эталонами СССР и средними международными омом и вольт, уста-

новленных путем международных сравнений электрических эталонов разных стран в 1937 г.:

1 международный ом СССР = 1,000010 среднего международного ома

1 международный вольт СССР = 1,000007<sub>5</sub> среднего международного вольта.

3. Во всех случаях, когда необходимо отличить абсолютные единицы от одноименных международных единиц, к их наименованиям прибавляются соответственно слова „абсолютный“ (в сокращенных обозначениях: *abs* и *abs*) и „международный“ (в сокращенных обозначениях: *int.* и *межд.*).

4. Указанные выше единицы связаны с соответствующими единицами абсолютной электромагнитной системы CGS  $\mu_0$  следующими соотношениями:

- 1 магн =  $10^7$  единицам CGS  $\mu_0$
- 1 ньютон =  $10^5$  динам
- 1 джоуль =  $10^7$  эргам
- 1 ватт =  $10^7$  эргам в секунду
- 1 ампер =  $10^{-1}$  единицы CGS  $\mu_0$
- 1 кулон =  $10^{-1}$  единицы CGS  $\mu_0$
- 1 вольт =  $10^8$  единицам CGS  $\mu_0$
- 1 ом =  $10^9$  единицам CGS  $\mu_0$
- 1 фарада =  $10^{-9}$  единицы CGS  $\mu_0$
- 1 вебер =  $10^8$  максвеллам
- 1 вебер на кв. метр =  $10^4$  гауссам
- 1 генри =  $10^9$  единицам CGS  $\mu_0$
- 1 ампер =  $10^{-1}$  гильберта
- 1 ампер на метр =  $10^{-3}$  эрстеда

Примечание. В системе CGS  $\mu_0$  основными единицами служат: сантиметр, грамм, секунда и единица магнитной проницаемости, равная  $1/4\pi$  магнитной проницаемости пустоты при рационализованной системе уравнений и равная магнитной проницаемости пустоты при нерационализованной системе уравнений, причем в этой системе установлены только следующие наименования единиц:

максвелл (Мх; *мкс*) — для единицы магнитного потока,  
гаусс (Gs; *гс*) — для единицы магнитной индукции,  
гильберт (Gb; *гб*) — для единицы магнитодвижущей силы,  
эрстед (Oe; *э*) — для единицы напряженности магнитного поля.

(В скобках указаны сокращенные обозначения.)

5. Этими соотношениями надлежит непосредственно пользоваться для пересчетов числовых значений различных величин при переходе от одной системы единиц к другой во всех случаях, за исключением следующих:

а) При переходе от системы единиц CGS  $\mu_0$  при нерационализованной системе уравнений к системе единиц MKS M при рационализованной системе уравнений следует умножать:

значение магнитодвижущей силы в гильбертах — на  $10/4\pi$ , чтобы получить ее значение в амперах;

значение напряженности магнитного поля в эрстедах — на  $10^{3/4}\pi$ , чтобы получить ее значение в амперах на метр;

значение магнитной проницаемости в единицах CGS  $\mu_0$  — на  $4\pi \cdot 10^{-7}$ , чтобы получить ее значение в магпах.

б) При переходе от системы MKS M при рационализованной системе уравнений к системе единиц CGS  $\mu_0$  при нерационализованной системе уравнений следует умножать:

значение магнитодвижущей силы в амперах на  $4\pi \cdot 10^{-1}$ , чтобы получить ее значение в гильбертах;

значение напряженности магнитного поля в амперах на метр — на  $4\pi \cdot 10^{-3}$ , чтобы получить ее значение в эрстедах;

значение магнитной проницаемости в магпах — на  $10^7/4\pi$ , чтобы получить ее значение в единицах CGS  $\mu_0$ .

Примечание. При переходе от нерационализованной системы уравнений к рационализованной магнитодвижущая сила и напряженность магнитного поля уменьшаются в  $4\pi$  раза, а магнитная проницаемость увеличивается в  $4\pi$  раза, что учтено при установлении вышеуказанных переводных множителей.

6. Наименования кратных и дольных единиц образуются путем применения приставок, указанных в нижеследующей таблице.

Наименования	Отношения к главной единице	Сокращенные обозначения	
		латинским (греческим) шрифтом	русским шрифтом
Пико . . . . .	$10^{-12}$	p	п
Нано . . . . .	$10^{-9}$	n	н
Микро . . . . .	$10^{-6}$	$\mu$	мк
Милли . . . . .	$10^{-3}$	m	м
Сантиметр . . . . .	$10^{-2}$	c	с
Деци . . . . .	$10^{-1}$	d	д
Дека . . . . .	10	da	да
Гекто . . . . .	$10^2$	h	г
Кило . . . . .	$10^3$	k	к
Мега . . . . .	$10^6$	M	М
Гига . . . . .	$10^9$	G	Г
Тера . . . . .	$10^{12}$	T	Т

Примечание. Единицы, кратные по времени ватт—секунде и ампер—секунде, образуются по правилам единиц времени, а именно: ватт-час (Wh; —вт-ч) и ампер-час (Ah; а-ч).

7. Сокращенные обозначения применяются в тексте только после числовых значений величин и пишутся в строку без последующей точки как знака сокращения. После сокращений: *abs.*, *int.* и *abs.*, *межд.* точки ставятся.





# О системах единиц измерения электрических и магнитных величин

Доктор техн. наук, проф. П. Л. КАЛАНТАРОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В последнее время в связи со все более и более широким распространением системы «метр, килограмм, секунда» (MKS), которая нашла применение не

*В статье дано определение понятия «система единиц измерения». Приведен анализ различных систем единиц, применяемых для измерения электрических и магнитных величин, рассмотрен вопрос о рационализации формы уравнений электромагнитного поля и показано, что форма уравнений может быть изменена без изменения системы единиц измерения.*

Понятие о той или иной производной физической величине может быть получено из рассмотрения отношений, а также произведений основных величин и про-

только в технической литературе, но и в отдельных капитальных трудах по физике, усилился интерес к вопросу о системах единиц. Усилению интереса к вопросу о системах единиц способствует намеченный в 1948 г. переход от международных электротехнических единиц к абсолютным, а также переход от нерациональной формы уравнений электромагнитного поля к рациональной, приобретающей все возрастающее число сторонников. Отсутствие достаточной ясности в некоторых вопросах, связанных с системами единиц измерения электрических и магнитных величин и с переходом от нерациональной формы уравнений электромагнитного поля к рациональной, явилось основным побуждением к написанию этой статьи.

изводных величин, понятие о которых уже установлено, причем эти отношения и произведения могут содержать числовые коэффициенты, отличающиеся от единицы или равные ей. Следовательно, любую производную физическую величину  $G$  можно представить в виде произведения числового коэффициента  $k$  и основных величин, взятых в тех или иных целых положительных, равных нулю, или отрицательных степенях. Так, если в данной области физики мы имеем три основных величины  $X, Y, Z$ , то

$$G = kX^pY^qZ^r,$$

где  $p, q, r$  — отвлеченные целые числа.

Основные и производные физические величины. Одной из основных целей, преследуемых при изучении физики, является установление закономерных связей между наблюдаемыми явлениями. Для достижения этой цели в рассмотрении вводят величины, характеризующие интенсивность физических явлений, а также свойства и состояние веществ и сред, принимающих в них участие. Эти величины называют физическими величинами, причем различают основные и производные величины. Под основными физическими величинами мы понимаем величины, имеющие наиболее важное значение в соответствующей области физики и не подлежащие определению через другие величины. Все прочие физические величины, вводимые в рассмотрение и определяемые через основные величины, в отличие от них называют производными величинами. Из понятий об основных и производных физических величинах следует, что число основных величин равняется разности между числом всех величин, введенных в рассмотрение, и числом независимых связей между ними.

Вводя понятие о производной физической величине, мы можем по своему усмотрению выбрать значение числового коэффициента пропорциональности. Для получения наиболее простой системы зависимостей между величинами следует при установлении понятий о вновь вводимых величинах все числовые коэффициенты пропорциональности в упомянутых отношениях и произведениях принимать равными единице. При этом нужно иметь в виду, что, даже приравняв числовые коэффициенты единице во всех зависимостях, определяющих производные величины, в некоторых выражениях, вытекающих из этих зависимостей, мы можем получить числовые коэффициенты, отличающиеся от единицы. Так, например, в выражении для энергии магнитного поля уединенного контура с током  $W_m = \frac{1}{2} Li^2$  мы имеем числовой коэффициент, равный  $1/2$ , который появился в результате интегрирования.

Отвлекаясь от числовых коэффициентов, связь производных величин с основными величинами можно выражать в виде так называемых формул размерности, показывающих, каким основным величинам и в каких степенях взятым пропорцио-

нальна та или иная физическая величина. Желая указать, что данная формула является формулой размерности, каждую из ее частей заключают в квадратные скобки и ставят между ними знак равенства. Из предыдущего выражения для величины  $G$  вытекает следующий общий вид формул размерности:

$$[G] = [X^p Y^q Z^r].$$

Заметим, что произведение  $X^p Y^q Z^r$  принято называть размерностью величины  $G$ . Такой же вид формулы размерности имеют и в тех случаях, когда та или иная физическая величина введена как интеграл или как сумма нескольких физических величин, так как суммировать можно только однородные величины. При этом под однородными величинами мы понимаем физические величины, имеющие одинаковые размерности.

Из сказанного о формулах размерности физических величин вытекает, что эти формулы дают схематическое представление о характере связи, существующей между производными и основными величинами, а следовательно, и о физической природе соответствующих производных величин.

**Системы единиц измерения.** Для сравнения физических величин, отвечающих одному и тому же определению и отличающихся друг от друга только количественно, эти величины измеряют, т. е. определяют, во сколько раз каждая из них больше некоторой определенной величины, отвечающей тому же определению и принятой по тем или иным соображениям за единицу измерения. В соответствии со сказанным, обозначим через  $G$  измеряемую величину и через  $[G_0]$  выбранную нами единицу измерения, имеем

$$G = G_n [G_0],$$

где  $G_n$  — отвлеченное число, являющееся результатом измерения и показывающее, во сколько раз измеряемая величина больше величины, принятой за единицу измерения. При таком условии об измерении физических величин отношение двух величин, отвечающих одному и тому же определению, является отвлеченным числом, не зависящим от выбора единицы измерения.

Пусть некоторая физическая величина  $G$  связана с основными величинами  $X, Y, Z$  соотношением  $G = kX^p Y^q Z^r$ , где  $k$  — принятое нами при определении  $G$  значение числового коэффициента пропорциональности. Это соотношение, установленное независимо от выбора единиц измерения величин  $X, Y, Z, G$ , справедливо при любом выборе этих единиц  $[X_0], [Y_0], [Z_0], [G_0]$ , и из него мы получим:

$$\begin{aligned} G_n [G_0] &= k X_n^p Y_n^q Z_n^r [X_0]^p [Y_0]^q [Z_0]^r = \\ &= k X_n^p Y_n^q Z_n^r [X_0^p Y_0^q Z_0^r], \end{aligned}$$

и далее, положив  $[X_0^p Y_0^q Z_0^r] : [G_0] = b$ , найдем:

$$G_n = b k X_n^p Y_n^q Z_n^r.$$

Таким образом, мы видим, что при произвольном выборе единиц измерения  $[X_0], [Y_0], [Z_0], [G_0]$  выражение, связывающее величины  $X, Y, Z, G$ , отличается от выражения, связывающего их числовые значения, а именно в последнем выражении имеется дополнительный числовой коэффициент  $b$ . Пусть, например, при равномерном движении тела мы условились определять его скорость  $v$  из соотношения  $v = l/t$ , где  $l$  — путь, пройденный телом, а  $t$  — соответствующий промежуток времени. Тогда, выбрав за единицы измерения пути, времени и скорости соответственно 1 метр, 1 секунду и 1 километр в час, мы наряду с соотношением  $v = l/t$ , связывающим путь, время и скорость, получим соотношение  $v_n = 3,6 l_n / t_n$ , связывающее числовые значения этих величин при принятых единицах измерения, или  $v_n = 0,01 l_n / t_n$ , если за единицы измерения примем соответственно 1 сантиметр, 1 секунду и 1 метр в секунду.

Из сказанного следует, что при произвольном выборе единиц измерения, установив систему соотношений между физическими величинами, мы получим еще особую систему зависимостей между числовыми значениями этих величин, причем коэффициенты пропорциональности в последней системе будут, вообще говоря, отличаться от соответствующих коэффициентов в системе зависимостей между величинами и будут изменяться при изменении единиц измерения.

Можно, однако, выбор единиц измерения подчинить условиям, при выполнении которых коэффициенты пропорциональности в системе зависимостей, связывающих числовые значения величин, будут равны соответствующим коэффициентам в системе зависимостей, установленных для физических величин. Для этого необходимо и достаточно, чтобы каждый из дополнительных коэффициентов равнялся единице, т. е. чтобы единицы измерения производных величин удовлетворяли условиям, имеющим следующий вид:

$$[G_0] = [X_0^p Y_0^q Z_0^r].$$

Иными словами, для идентичности системы зависимостей между физическими величинами и системы зависимостей между их числовыми значениями единицы измерения производных величин должны быть связаны с единицами измерения основных величин такими же соотношениями, какими связаны размерности производных величин с размерностями основных величин. Совокупности единиц измерения, удовлетворяющие этим условиям, мы будем называть системами единиц измерения. Применяя для измерения физических величин системы единиц, в формулах размерности под символами, обозначающими величины, мы будем понимать также и единицы измерения этих величин, принадлежащие к одной системе.

Итак, при измерении физических величин единицами одной и той же системы зависимости между величинами представляют собой также и за-

всисмости между их числовыми значениями, что является исключительно важным преимуществом систем единиц измерения по сравнению с совокупностями произвольно установленных единиц измерения.

Из изложенного ясно, что в системе единиц измерения могут быть произвольно выбраны единицы измерения основных величин, не связанных друг с другом какими-либо зависимостями, после чего единицы измерения производных величин должны быть установлены в полном соответствии с формулами размерности. Так, имея в кинематике две основных величины—длину и время—и выбрав за единицу измерения длины 1 метр, а за единицу измерения времени 1 секунду, за единицу измерения скорости мы должны принять 1 метр в секунду, так как размерность скорости равна размерности длины, деленной на размерность времени. Тогда зависимость  $v = l/t$  будет выражать связь не только между путем, временем и скоростью, но и между их числовыми значениями в любой принятой системе единиц.

При рассмотрении систем единиц измерения условимся единицы, устанавливаемые произвольно, называть основными единицами системы, а все прочие единицы, определяемые через основные единицы по формулам размерности, называть производными единицами и заметим, что, вообще говоря, совершенно необязательно за основные единицы системы принимать единицы измерения основных величин. Для возможности построения системы единиц необходимо лишь соблюсти равенство между числом основных единиц системы и числом основных величин в данной области физики, так как при этом необходимое число формул размерности останется неизменным и, следовательно, мы сможем по этим формулам определить все производные единицы системы. Это обстоятельство имеет существенное значение, так как при выборе основных единиц следует руководствоваться метрологическими соображениями, а именно за основные единицы должны быть приняты единицы измерения таких величин, эталоны единиц измерения которых обладают максимальной неизменяемостью с течением времени и могут быть воспроизведены с максимальной степенью точности. Таким образом, мотивы выбора основных величин и величин, единицы измерения которых принимают за основные единицы, различны.

В тех случаях, когда не все основные единицы являются единицами измерения основных величин, для установления непосредственной связи между производными и основными единицами в формулы размерности следует ввести вместо основных величин те величины, единицы измерения которых приняты за основные. Пусть, например, изучая механику, мы приняли за основные величины длину  $[L]$ , массу  $[M]$  и время  $[T]$ , а за основные единицы выбрали единицы длины, энергии  $[W]$  и ускорения  $[A]$ . Тогда, исходя из формул размерности энергии  $[W] = [L^2MT^{-2}]$  и ускорения  $[A] = [LT^{-2}]$ , мы можем найти новые формулы размерности всех механических вели-

чин и, в частности, для размерностей массы и времени получим:

$$[M] = [L^{-1}A^{-1}W] \text{ и } [T] = [L^{1/2}A^{-1/2}].$$

В преобразованных формулах размерности могут, как мы видим, появиться дробные показатели, что не препятствует установлению соответствующих единиц измерения, но лишает эти формулы простоты и ясности и ограничивает широту их применения.

Весьма важно иметь в виду, что формулы размерности не только дают возможность установить производные единицы системы, но также позволяют очень просто определить, как изменятся производные единицы при изменении основных единиц системы. Так, например, из формулы размерности ускорения  $[A] = [LT^{-2}]$  непосредственно следует, что при уменьшении единицы длины в 100 раз и уменьшении единицы времени в 1000 раз единица ускорения увеличится в  $[(10^{-2})^1 \times (10^{-3})^{-2}] = 10^4$  раз.

Итак, система единиц измерения должна удовлетворять двум условиям: во-первых, число основных единиц системы, устанавливаемых произвольно, должно равняться числу основных величин в данной области физики и, во-вторых, все производные единицы системы должны быть определены через основные единицы по формулам размерности. В соответствии с этим все однородные величины, т. е. все физические величины, имеющие одинаковые размерности, должны в данной системе единиц измеряться одной и той же единицей, даже если определения этих величин различны. Так, например, хотя частота  $f = 1/T$  и угловая частота  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$  переменного тока отвечают различным определениям, но, так как они имеют одинаковую размерность, обратную размерности времени, то, установив для измерения частоты единицу 1 Hz, для измерения угловой частоты мы должны пользоваться той же самой единицей. Действительно, только при измерении этих величин одной единицей и отношение этих величин  $\omega/f$  и отношение их числовых значений будет равно отвлеченному числу  $2\pi$ , а это является необходимым следствием из определений упомянутых величин. Точно так же, приняв в качестве единицы измерения силы тока 1 A, этой же единицей следует пользоваться и для измерения м. д. с., так как м. д. с. и сила тока имеют одну и ту же размерность. Особо подчеркнем, что в связи со сказанным рекомендацию Международной электротехнической комиссии об установлении различных единиц измерения активной мощности  $P_a = UI \cos \varphi$ , реактивной мощности  $P_r = UI \sin \varphi$  и кажущейся мощности  $P_i = UI$  в цепи синусоидального переменного тока, а именно ватта, вара и вольтампера, следует признать неправильной. Приняв различные единицы для измерения этих мощностей при рассмотрении отношений между мощностями мы не получили бы отвлеченных чисел, что не соответствовало бы определениям этих величин, а также не могли

бы пользоваться соотношением  $P_i = \sqrt{P_a^2 + P_r^2}$ , так как суммирование величин, измеряемых различными единицами, не имеет смысла. Все поименованные мощности, как величины, хотя и отвечающие различным определениям, но имеющие одинаковые размерности, должны измеряться одной и той же единицей, например, ваттом.

**Основные и производные величины в учении об электромагнитных явлениях.** Для определения числа основных величин в учении об электромагнитных явлениях воспользуемся уравнениями Максвелла в интегральной форме:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{dq}{dt},$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

В эти два уравнения входят шесть величин: длина, время, количество электричества, магнитный поток и напряженности электрического и магнитного полей. Между этими шестью величинами нам не известно каких-либо дополнительных связей, а все прочие величины, вводимые при изучении электромагнитных явлений, могут быть определены через поименованные величины. Отсюда и вытекает, что число основных величин в интересующей нас области физики равно четырем.

Установив число основных величин, остановимся на их выборе. Так как все физические явления происходят в пространстве и во времени, то при изучении любой области физики за две из основных величин следует принять длину и время. Изучая электромагнитные явления, естественно, в качестве основных величин присоединить к длине и времени одну электрическую и одну магнитную величину. В учении об электрическом поле, несомненно, основной величиной является количество электричества, а в учении о магнитном поле столь же фундаментальное значение имеет магнитный поток. Эту совокупность основных величин, предложенную автором статьи [Л. 1], мы обозначим  $(LTQ\Phi)$  и будем в дальнейшем пользоваться ею, так как она обладает некоторыми преимуществами перед другими возможными совокупностями. Следует иметь в виду, что, когда учение об электрических и магнитных явлениях начинало развиваться, предполагали, что все явления природы могут быть сведены к механическим явлениям. В соответствии с этой точкой зрения при рассмотрении электромагнитных явлений, так же как и при рассмотрении механических явлений, вводили лишь три основных величины, в качестве которых, как и в механике, выбирали длину, массу и время.

Установим понятия о производных электрических и магнитных величинах, приняв за совокупность основных величин совокупность  $(LTQ\Phi)$ . При этом условимся называть электрическими те величины, в размерности которых входит количество электричества  $[Q]$  и не входит магнитный поток  $[\Phi]$ , а магнитными — те, в размерности которых входит  $[\Phi]$  и не входит  $[Q]$ . Тогда, исходя из понятия о количестве электричества,

можно установить понятия о следующих производных величинах, образующих группу электрических величин, и вывести формулы их размерности:

$$q \text{ — количество электричества } [Q];$$

$$D = \frac{dq}{ds} \text{ — электрическое смещение } [QL^{-2}];$$

$$F = i = \frac{dq}{dt} \text{ — м. д. с., сила тока } [QT^{-1}];$$

$$H = \frac{F}{dl} \text{ — напряженн. магн. поля } [QL^{-1}T^{-1}].$$

Исходя из понятия о магнитном потоке, можно установить понятия о следующих производных величинах, образующих группу магнитных величин, и вывести формулы их размерности:

$$\Phi \text{ — магнитный поток } [\Phi];$$

$$B = \frac{d\Phi}{ds} \text{ — магнитная индукция } [\Phi L^{-2}];$$

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ — э. д. с. } [\Phi T^{-1}];$$

$$E = \frac{de}{dl} \text{ — напряженн. эл. поля } [\Phi L^{-1}T^{-1}].$$

Рассматривая отношения между электрическими и магнитными величинами, можно установить понятия о ряде электромагнитных величин и вывести следующие формулы их размерности:

$$g = \frac{i}{e} \text{ — электрическая проводимость } [Q\Phi^{-1}];$$

$$r = \frac{e}{i} \text{ — электрическое сопротивление } [Q^{-1}\Phi];$$

$$C = \frac{q}{U} \text{ — электрическая емкость } [Q\Phi^{-1}T];$$

$$L = \frac{\Phi}{i} \text{ — коэффициент самоиндукции } [Q^{-1}\Phi T];$$

$$\epsilon = \frac{D}{E} \text{ — диэл. проницаемость } [Q\Phi^{-1}TL^{-1}];$$

$$\mu = \frac{B}{H} \text{ — магнитная проницаемость } [Q^{-1}\Phi TL^{-1}].$$

При принятой нами совокупности основных величин  $(LTQ\Phi)$  формулы размерности позволяют сразу выделить группу электрических, группу магнитных и группу электромагнитных величин. К такому же разделению величин мы пришли бы, приняв за основные величины, кроме длины и времени, одну электрическую величину и одну магнитную величину, ей аналогичную, например, силу тока и э. д. с., или электрическое смещение и магнитную индукцию. Однако, совокупность  $(LTQ\Phi)$  имеет то преимущество, что она приводит не только к симметрии формул размерности электрических и магнитных величин, но и к симметрии между ними и формулами размерности механических величин [Л. 1].

Во всех приведенных нами определениях физических величин, вводимых при изучении электромагнитных явлений, числовые коэффициенты пропорциональности приняты равными единице.

Это дает основание утверждать, что все соотношения, определяющие введенные нами в рассмотрение физические величины, имеют наибольшую возможную простоту. Из общих определений могут быть получены выражения тех или иных физических величин для частных случаев. Эти последние выражения могут содержать числовые коэффициенты, которые отличаются от единицы и определяются геометрическими особенностями данного частного случая. Так, например, исходя из общего выражения для емкости, можно получить следующие выражения для емкости плоского цилиндрического и сферического конденсаторов:

$$C_1 = \frac{\varepsilon s}{d}, \quad C_2 = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(r_2/r_1)}, \quad C_3 = \frac{4\pi\epsilon r_1 r_2}{r_2 - r_1},$$

причем в первом случае числовой коэффициент равен 1, во втором  $2\pi$  и в третьем  $4\pi$ . Это вполне естественно, так как в первом случае поле однородно, во втором — обладает осевой симметрией, а в третьем — сферической симметрией.

**Нерациональная и рациональная формы уравнений электромагнитного поля.** При развитии учения об электрических и магнитных явлениях в силу ряда причин, имеющих исторический характер, не все физические величины были определены так, как указано выше. Поэтому в некоторые основные зависимости вошел числовой коэффициент  $4\pi$ . Это повлекло за собой отсутствие коэффициента  $4\pi$  в выражениях, определяющих некоторые величины для частных случаев, характеризующихся сферической симметрией, появление коэффициента  $4\pi$  в случаях, когда сферическая симметрия отсутствует, и, кроме того, нарушило симметрию отдельных аналогичных соотношений для электрического и магнитного полей. Так, в частности, при этой исторически сложившейся системе определений электрических и магнитных величин, которая привела к так называемой нерациональной форме соответствующих зависимостей, имеем:

$$D = \frac{\epsilon E}{4\pi}, \quad B = \mu H; \quad W'_e = \frac{DE}{2}, \quad W'_m = \frac{BH}{8\pi};$$

$$\bar{S} = \frac{1}{4\pi} [\bar{E} \cdot \bar{H}]$$

в отличие от симметричной рациональной формы этих зависимостей, а именно:

$$D = \epsilon E, \quad B = \mu H; \quad W'_e = \frac{DE}{2}, \quad W'_m = \frac{BH}{2},$$

$$\bar{S} = [\bar{E} \cdot \bar{H}].$$

Источником нерациональной формы уравнений электромагнитного поля явилось то обстоятельство, что ранее при рассмотрении как электрических, так и магнитных явлений исходили из законов Кулона, написанных в виде

$$f = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad f = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

По сути дела, эти законы дают выражение для механической силы, с которой поле, обладающее

сферической симметрией, воздействует на сосредоточенное количество электричества или на сосредоточенную магнитную массу. Поэтому законы Кулона следует писать в виде, явно отражающем сферическую симметрию поля, а именно:

$$f = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2}, \quad f = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m_1 m_2}{4\pi r^2}.$$

Нетрудно убедиться, что рациональная форма уравнений приводит к полной симметрии зависимостей для электрического и магнитного полей и к большей простоте основных соотношений. При этом числовые коэффициенты  $2\pi$  и  $\pi$  переходят в выражения для случаев осевой или, соответственно, сферической симметрии. Особо следует подчеркнуть, что основные уравнения электромагнитного поля, данные Максвеллом, при рациональной форме их написания, уже приведенной нами, не содержат коэффициента  $4\pi$  и имеют симметричный вид. При нерациональной форме написания этих уравнений симметрия нарушается, так в одно из них входит коэффициент  $4\pi$ , а именно:

$$\oint \bar{H} d\bar{l} = 4\pi \frac{dq}{dt}, \quad \oint \bar{E} d\bar{l} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

На возможность и желательность рационализации уравнений электромагнитного поля первый указал Хевисайд. Однако, Хевисайд связывал рационализацию уравнений с коренным изменением системы единиц измерения, желая получить для магнитной проницаемости пустоты  $\mu_0$  числовое значение, равное 1 или  $10^n$ , где  $n$  — целое число. Последнее требование приводит к единицам, связанным с единицами, глубоко внедрившимися в практику научных и технических измерений, переводными множителями вида  $(4\pi)^m \cdot 10^n$ , причем  $m = \pm 1, 2$  или  $m = \pm 1$ , что исключает практическую возможность перехода к хевисайдовой системе единиц.

Между тем, рационализацию уравнений электромагнитного поля, которая по сути дела сводится к устранению множителя  $4\pi$  из наиболее важных зависимостей, можно осуществить без какого-либо изменения единиц измерения. Чтобы показать это, выясним предварительно роль числовых коэффициентов пропорциональности в выражениях, определяющих производные физические величины. Пусть при изучении какой-либо области физики мы, установив систему зависимостей между величинами, введенными в рассмотрение, определили по своему усмотрению значения числовых коэффициентов пропорциональности в этих зависимостях. Условимся измерять все физические величины единицами одной и той же системы единиц измерения. Тогда изменение числового коэффициента пропорциональности в определении любой из производных величин, не влияющее ни на ее размерность, ни, следовательно, на единицу измерения этой величины, приведет нас или к новому понятию о рассматриваемой физической величине, если старое определение мы заменим новым, или к понятию о новой величине, если старое определение бу-

дет сохранено наряду с новым. В последнем можно убедиться, рассматривая, например, определения частоты  $f = 1/T$  и угловой частоты  $\omega = 2\pi/T$ , отличающиеся друг от друга лишь числовыми коэффициентами пропорциональности.

Для пояснения сказанного рассмотрим очень простой пример. Пусть тело, подвешенное на пружине, совершает незатухающие колебания вдоль вертикальной линии. Как известно, прежде вводили два различных понятия об амплитуде колебаний, а именно, обозначая через  $a$  наибольшее отклонение тела от положения равновесия, иногда амплитуду  $A_m$  колебаний определяли из соотношения  $A_m = a$ , в котором числовой коэффициент равен 1, а иногда амплитуду  $A'_m$  определяли из соотношения  $A'_m = 2a$ , в котором числовой коэффициент равен 2. Ясно, что понятия об этих двух величинах  $A_m$  и  $A'_m$  различны, а именно под  $A_m$  мы понимаем наибольшее отклонение тела от положения равновесия, а под  $A'_m$  — расстояние между наивысшим и наинизшим положениями колеблющегося тела. Обратим особое внимание на физическую обстановку, в которой амплитуда колебаний будет равна единице измерения. Примем за единицу измерения длины 1 м. Тогда в первом случае амплитуда в соответствии с ее определением  $A_m = a$  будет равна единице измерения, т. е. 1 м, когда наибольшее отклонение тела от положения равновесия равно 1 м, а во втором случае амплитуда в соответствии с новым определением  $A'_m = 2a$  будет равна единице измерения, когда наибольшее отклонение тела от положения равновесия равно 0,5 м. Иными словами, увеличив в определении амплитуды числовой коэффициент пропорциональности в два раза, для создания обстановки, в которой амплитуда колебаний в новом ее понимании будет равна принятой единице длины, следует уменьшить в два раза интенсивность соответствующего физического процесса.

Основными зависимостями, в которых следует устранить множитель  $4\pi$  для получения рациональной формы уравнений электромагнитного поля, являются: связь магнитного потока с магнитной массой, рассматриваемой как источник этого потока ( $\Phi = 4\pi m$ ), первое уравнение Максвелла, которое в интегральной форме выражает закон полного тока, а также связь между м. д. с. и полным током ( $F = \oint \vec{H} d\vec{l} = 4\pi \frac{dq}{dt} = 4\pi i$ ), за-

кон магнитной цепи ( $\Phi = \frac{F}{R} = \frac{4\pi i}{R}$ ), связь между магнитной индукцией, напряженностью магнитного поля и интенсивностью намагничивания ( $B = \mu_0 H + 4\pi J$ ), связь между электрическим смещением и напряженностью электрического поля ( $D = \frac{\epsilon E}{4\pi}$ ). Нетрудно убедиться, что для устранения множителя  $4\pi$  из приведенных зависимостей достаточно условиться понимать под магнитной проницаемостью, магнитной массой и

интенсивностью намагничивания величины в  $4\pi$  раз большие, а под напряженностью магнитного поля, м. д. с., магнитным сопротивлением и диэлектрической проницаемостью — величины в  $4\pi$  раз меньшие, чем принималось прежде. При этом множитель  $4\pi$  исчезнет еще в некоторых важных выражениях, как, например, в выражениях энергии электрического, а также и магнитного поля, отнесенной к единице объема поля ( $W'_e = \frac{\epsilon E^2}{8\pi}$

и  $W'_m = \frac{\mu H^2}{8\pi}$ ), вектора Пойнтинга ( $\vec{S} = \frac{1}{4\pi} [\vec{E} \cdot \vec{H}]$ ), но вместе с тем множитель  $4\pi$  появится в других, менее важных выражениях, как, например, в выражениях закона Кулона.

Покажем на примере напряженности магнитного поля  $H$ , создаваемого уединенной магнитной массой  $m$  в среде с магнитной проницаемостью  $\mu$ , что указанное выше изменение понятий о величинах приводит к рационализации зависимостей. Исходя из закона Кулона в нерациональной форме и отмечая при этом все величины знаком ( $'$ ), для напряженности поля имеем:

$$H' = \frac{1}{\mu'} \cdot \frac{m'}{r^2}.$$

Положив  $H' = 4\pi H$ ,  $\mu' = \mu/4\pi$ ,  $m' = m/4\pi$ , получим:

$$4\pi H = \frac{4\pi}{\mu} \cdot \frac{m}{4\pi r^2} \quad \text{или} \quad H = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m}{4\pi r^2}.$$

Наличие коэффициента  $4\pi$  в полученном нами выражении для  $H$ , отвечающем рациональной форме закона Кулона, естественно, так как в рассматриваемом случае поле обладает сферической симметрией.

**Абсолютные системы единиц измерения электрических и магнитных величин.** Абсолютными системами единиц измерения физических величин принято называть такие системы, в число основных единиц которых обязательно входят единица длины ( $L$ ), единица массы ( $M$ ) и единица времени ( $T$ ), т. е. три единицы, принимаемых за основные в большинстве систем единиц измерения механических величин. Первая система абсолютных единиц для измерения магнитных величин была предложена Гауссом в 1832 г. Эта система, в которой за основные единицы были приняты миллиметр, миллиграмм и секунда, была разработана им в связи с изучением земного магнитного поля. При этом Гаусс, исходя из закона взаимодействия двух магнитных масс, данного Кулоном, положил, что магнитная проницаемость является отвлеченным числом, которое для пустоты он принял равным единице. Вебер построил аналогичную абсолютную систему, основываясь на законе взаимодействия двух количеств электричества, данного также Кулоном, и полагая, что диэлектрическая проницаемость пустоты есть отвлеченное число, равное единице. Обеим этим системам Вебер придал законченный и стройный вид. Необходи-

мо отметить, что Гаусс и Вебер при построении абсолютных систем исходили из законов Кулона, написанных в нерациональной форме.

В дальнейшем вопросом об единицах измерения электрических и магнитных величин занимался особый комитет Британской ассоциации для развития наук, образованный в 1861 г., который разработал две системы единиц — абсолютную электромагнитную систему и абсолютную электростатическую систему. В основе этих систем были положены единица длины — сантиметр, единица массы — грамм и единица времени — секунда. Кроме того, было допущено, что в электромагнитной системе, обозначаемой CGSM, магнитная проницаемость пустоты является отвлеченным числом, равным единице, и что в электростатической системе, обозначаемой CGSE, диэлектрическая проницаемость пустоты является отвлеченным числом, равным единице. Формулы размерности в этих системах имеют вид:

$$[G] = [L^p M^q T^r], \text{ и } [G] = [L^p M^q T^r].$$

Из соответствующих формул можно усмотреть, что размерности одной и той же физической величины в электромагнитной и в электростатической системах различны, хотя обе эти системы вполне равноправны. Особо отметим, что в электромагнитной системе размерность коэффициента самоиндукции равна размерности длины, а в электростатической системе размерность емкости также равна размерности длины. И, хотя даже сейчас единицу измерения коэффициента самоиндукции в системе CGSM и единицу измерения электрической емкости в системе CGSE иногда именуют сантиметром, совершенно ясно, что и та и другая величина не могут быть измеряемы единицами длины и что эти величины, как разнородные по своему существу, нельзя измерять одной и той же единицей.

Отмеченные внутренние противоречия, имеющиеся в системах CGSM и CGSE, являются следствием невозможности свести электромагнитные процессы к процессам механическим. Эти противоречия могут быть устранены только путем перехода от систем единиц измерения, построенных на трех основных механических единицах, к системам, построенным на четырех основных единицах, из которых по крайней мере одна должна быть единицей измерения какой-либо электрической или магнитной величины.

Заметим, что, хотя в основу систем CGSM и CGSE положены одни и те же единицы длины, массы и времени, единицы измерения электрических и магнитных величин в этих системах различны. Так, например, единица количества электричества в системе CGSE в  $c$  раз меньше единицы количества электричества в системе CGSM, а единица магнитного потока в системе CGSE в  $c$  раз больше единицы магнитного потока в системе CGSM, где  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/сек. есть скорость света в пустоте.

Стремление объединить системы CGSM и CGSE в одну систему, сохранив в то же время

лишь три основных единицы, являющихся единицами измерения механических величин, привело к системе единиц измерения, получившей наименование системы Гаусса. В основу этой системы, обозначаемой CGS, положены единица длины — сантиметр, единица массы — грамм и единица времени — секунда и, кроме того, в этой системе принято, что диэлектрическая и магнитная проницаемости пустоты суть отвлеченные числа, каждое из которых равно единице. Система CGS требует введения в основные соотношения скорости света в пустоте  $c$ . Так, например, для возможности применить систему CGS уравнения Максвелла приходится писать в виде:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \frac{1}{c} \cdot \frac{dq}{dt}, \quad \oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{d\Phi}{dt}.$$

Однако, даже искусственное и физически совершенно не обоснованное введение скорости света в пустоте в основные зависимости не избавляет гауссову систему от внутренних противоречий. Так, размерности коэффициента самоиндукции и электрической емкости в этой системе равны размерности длины, и, следовательно, единичей измерения всех трех поименованных, несомненно, различных по своей природе физических величин в гауссовой системе является одна и та же единица измерения — сантиметр. Кроме того, в гауссовой системе количество электричества и магнитный поток, как величины, имеющие одну и ту же размерность, должны измеряться одной единицей. То же самое можно сказать про электрическое смещение и магнитную индукцию, про электродвижущую и магнитодвижущую силы, про напряженности электрического и магнитного полей.

Итак, имеются три системы единиц измерения электрических и магнитных величин, построенные на трех основных единицах:

электромагнитная (CGSM), в которой  $\mu_0 = 1$ ,  $\epsilon_0 = 1/c^2$ ,  
электростатическая (CGSE), в которой  $\mu_0 = 1/c^2$ ,  $\epsilon_0 = 1$ ,  
гауссова (CGS), в которой  $\mu_0 = 1$ ,  $\epsilon_0 = 1$ .

Эти значения  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$  соответствуют нерациональной форме уравнений. При переходе к рациональной форме уравнений  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$  будут иметь в этих системах следующие значения:

$\mu_0 = 4\pi$ ,  $\epsilon_0 = 1/4\pi c^2$  в системе CGSM;  
 $\mu_0 = 4\pi/c^2$ ,  $\epsilon_0 = 1/4\pi$  в системе CGSE;  
 $\mu_0 = 4\pi$ ,  $\epsilon_0 = 1/4\pi$  в системе CGS.

Коренные недостатки, свойственные системам единиц измерения электрических и магнитных величин, построенных на трех основных единицах, устраняются при переходе к системам с четырьмя основными единицами. От абсолютных систем CGSM и CGSE проще всего перейти к абсолютным системам, обозначаемым соответственно CGS $_{\mu_0}$  и CGS $_{\epsilon_0}$ . Система CGS $_{\mu_0}$  получается из системы CGSM путем добавления в



качестве четвертой основной единицы магнитной проницаемости пустоты  $\mu_0$  при нерациональной форме уравнений или  $\mu_0/4\pi$  при рациональной форме. При этом считают, что магнитная проницаемость не есть отвлеченное число, а что она является физической величиной, имеющей размерность, которую мы будем обозначать  $[\mu]$ . Система  $\text{CGS}_{\mu_0}$  может быть получена из системы  $\text{CGSE}$  путем добавления в качестве четвертой основной единицы диэлектрической проницаемости пустоты  $\varepsilon_0$  при нерациональной форме уравнений или  $4\pi\varepsilon_0$  при рациональной форме. При этом считают, что диэлектрическая проницаемость также является физической величиной, имеющей размерность, которую мы будем обозначать  $[\varepsilon]$ . Из сказанного следует, что числовой результат измерения любой данной нам физической величины будет одинаков в системах  $\text{CGS}_{\mu_0}$  и  $\text{CGSM}$ . То же можно повторить и относительно систем  $\text{CGS}_{\varepsilon_0}$  и  $\text{CGSE}$ . Формулы размерности в системах  $\text{CGS}_{\mu_0}$  и  $\text{CGS}_{\varepsilon_0}$  имеют соответственно вид:

$$[G] = [L^p M^q T^r \mu^s] \quad \text{и} \quad [G] = [L^p M^q T^r \varepsilon^s].$$

Приняв во внимание, что размерность дроби,  $1/\mu$  равна, как известно, размерности скорости нетрудно убедиться, что размерности одной и той же физической величины в системах  $\text{CGS}_{\mu_0}$  и  $\text{CGS}_{\varepsilon_0}$  одинаковы.

Заметим, что из производных единиц рассмотренных нами систем наименование получили единица силы—дина и единица энергии или работы—эрг. В системе  $\text{CGS}_{\mu_0}$ , кроме того, получили наименование еще четыре единицы: единица магнитного потока—максвелл, единица магнитной индукции—гаусс, единица напряженности магнитного поля—эрстед и единица м. д. с.—гильберт.

**Практические единицы измерения электрически и магнитных величин.** Единицы систем  $\text{CGS}_{\mu_0}$  и  $\text{CGS}_{\varepsilon_0}$  оказались в большинстве случаев неудобными по своей величине для практического применения. Поэтому комитет Британской ассоциации для развития наук установил следующие практические единицы, являющиеся десятичными кратными или дольными единицами системы  $\text{CGS}_{\mu_0}$ : единицу силы тока—ампер, единицу э. д. с.—вольт, единицу электрического сопротивления—ом, единицу электрической емкости—фараду и единицу количества электричества—кулон. Первый международный электротехнический конгресс в 1881 г. допустил эти единицы для практического применения. Второй международный электротехнический конгресс в 1889 г. добавил к практическим единицам единицу энергии—джоуль, единицу мощности—ватт и единицу коэффициента электромагнитной индукции—генри. Международная электротехническая комиссия в 1935 г. присоединила к практическим единицам единицу магнитного потока—вебер, единицу электрической проводимости—сименс и единицу частоты—герц. При этом всегда предполагалось, что

при применении практических единиц единицей времени остается секунда.

Все практические единицы согласованы между собой в том смысле, что применение их не влечет за собой введения в формулы дополнительных числовых коэффициентов. Эти единицы, за исключением фарады, по своей величине оказались удобными для электротехнической практики, и совокупность их получила наименование практической системы единиц. Следует иметь в виду, что совокупность практических единиц не представляет собой системы единиц измерения, так как в ней отсутствует определенная единица длины. Практические единицы принадлежат к электромагнитным единицам, так как они являются производными от единиц электромагнитной системы  $\text{CGS}_{\mu_0}$ , в которой числовое значение  $\mu_0$  принято при нерациональной форме уравнений в точности равным единице.

**Практические системы единиц измерения электрических и магнитных величин.** Для образования практической системы единиц достаточно к поименованным выше практическим единицам присоединить единицу длины. Тот или иной выбор единицы длины определит единицу массы и единицу механической силы, а также все прочие единицы измерения электрических и магнитных величин, как, например, единицы магнитной и диэлектрической проницаемости, магнитной индукции, электрического смещения, напряженностей электрического и магнитных полей.

При рассмотрении вопроса о выборе единицы длины будем исходить из понятия о работе. Для элементарной работы  $dA$  механической силы  $f$  и для элементарной работы в электрической цепи имеем соответственно:

$$dA = f dl \quad \text{и} \quad dA = e idt.$$

Так как размерности правых частей этих уравнений должны быть одинаковы, имеем:

$$[fL] = [MLT^{-2}] = [eIT]$$

и, следовательно,

$$[L^2 MT^{-3} i^{-1} e^{-1}] = 1,$$

где  $[L]$ ,  $[M]$ ,  $[T]$ ,  $[i]$ ,  $[e]$ —единицы измерения длины, массы, времени, силы тока и э. д. с. в некоторой, пока не определенной, системе. Означая индексом „0“ единицы измерения в системе, принятой за исходную, и учитывая, что пометки введения систем, единицы которых связаны с существующими единицами не десятичными переводными множителями, лишены практической ценности, положим:

$$[L] = [L_0] \cdot 10^{\alpha}, [M] = [M_0] \cdot 10^{\beta}, [T] = [T_0] \cdot 10^{\gamma}, [i] = [i_0] \cdot 10^{\delta}, [e] = [e_0] \cdot 10^{\eta}, \text{ где } \alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta \text{—целые положительные или отрицательные числа. Тогда найдем:}$$

$$[L_0^2 M_0 T_0^{-3} i_0^{-1} e_0^{-1}] \cdot 10^{2\alpha + \beta - \gamma - \delta - \eta} = 1,$$

и так как  $[L_0^2 M_0 T_0^{-3} i_0^{-1} e_0^{-1}] = 1$ , ибо  $[L_0]$ ,  $[M_0]$



$[T_0]$ ,  $[l_0]$ ,  $[e_0]$  суть единицы одной и той же системы, то

$$2\alpha + \beta - 3\gamma - \delta - \eta = 0.$$

В качестве исходной системы воспользуемся системой CGS $_{\mu_0}$  и исследуем вопрос об единицах длины и массы в практической системе единиц. Так как единицей времени и в обеих системах является секунда, а единица силы тока и э. с. практической системы — ампер и вольт равны единицам системы CGS $_{\mu_0}$ , умноженным соответственно на  $10^{-1}$  и на  $10^9$ , то  $\gamma = 0$ ,  $\delta = -1$ ,  $\eta = +8$  и, следовательно,

$$2\alpha + \beta = 7.$$

Эта давно известная связь, позволяет весьма просто по выбранной единице длины определить единицу массы в практической системе.

Из возможных практических систем рассмотрим три системы, в которых единицами длины являются соответственно  $10^9$  см, 1 см и  $10^2$  см. В первой из этих систем, носящей имя Максвелла,  $\alpha = 9$  и, следовательно,  $\beta = -11$ , т. е. единица массы равна  $10^{-11}$  г. Единица длины в этой системе носит наименование квадрант, так как она близка к длине четверти земного меридиана. И единица длины, и единица массы в этой системе имеют неудобную величину. Эта система замечательна только тем, что в ней, как показал Максвелл, магнитная проницаемость пустоты при нерациональной форме уравнений имеет числовое значение, равное 1.

Во второй системе за единицу длины принят сантиметр, т. е.  $\alpha = 0$  и  $\beta = 7$ , что приводит к мало удобной единице массы, равной  $10^7$  г, т. е.  $10^4$  т. Последнее обстоятельство и послужило причиной того, что эта система не нашла широкого применения.

В третьей системе единица длины взята равной  $10^2$  см, т. е.  $\alpha = 2$  и  $\beta = 3$ , что приводит к единице массы, равной  $10^3$  г. Эту систему с весьма удобными единицей длины — метром и единицей массы — килограммом предложил в 1901 г. Джорджи. В 1935 г. Международная электротехническая комиссия приняла ее для международного применения. Эта абсолютная система с основными единицами метр, килограмм, секунда в качестве четвертой основной единицы по предложению Джорджи должна была содержать ом. Впоследствии большее число сторонников нашло предложение принять в качестве четвертой основной единицы единицу магнитной проницаемости, связав ее величину совершенно точным отношением с величиной магнитной проницаемости пустоты. Такая точка зрения является единственно правильной, так как практическая система есть система электромагнитная, и, следовательно, в этой системе магнитная проницаемость пустоты должна иметь совершенно точное значение. Поэтому в практической системе магнитная проницаемость пустоты и должна быть принята за основной эталон. Приняв за основной эталон эталон какой-либо иной величины, например, эталон ома, мы должны были бы по мере достижения большей точ-

ности измерений исправлять этот эталон, чтобы числовое значение магнитной проницаемости пустоты, положенное в основу системы, осталось неизменным. Изложенную точку зрения приняла, в частности, в 1938 г. Комиссия по единицам мер Академии наук СССР, работавшая под руководством М. А. Шателена [Л. 2]. Для определения величины единицы магнитной проницаемости в рассматриваемой системе примем во внимание, что для размерности магнитной проницаемости мы имеем:

$$[\mu] = [B] : [H] = [\Phi L^{-2}] : [QT^{-1}L^{-1}] = [\Phi Q^{-1}L^{-1}T]$$

и что 1 вебер =  $10^8$  единиц CGS $_{\mu_0}$ , а 1 кулон =  $10^{-1}$  единиц CGS $_{\mu_0}$ . Поэтому интересующая нас единица магнитной проницаемости, для которой автором статьи предложено наименование магн, будет в  $10^{[-(-1)-(-2)]} = 10^7$  раз больше соответствующей единицы системы CGS $_{\mu_0}$ , т. е. 1 магн =  $10^7$  единиц CGS $_{\mu_0}$ . В дальнейшем абсолютную практическую электромагнитную систему с основными единицами метр, килограмм, секунда, магн мы будем обозначать MKSM.

Единица измерения механической силы в системе MKSM равна  $10^5$  дин. В 1938 г. Международная электротехническая комиссия присвоила этой единице наименование ньютон.

Определим значения магнитной и диэлектрической проницаемостей пустоты при измерении их единицами системы MKSM. Так как 1 магн =  $10^7$  единиц CGS $_{\mu_0}$ , то при нерациональной форме уравнений мы получим  $\mu_0 = 10^{-7}$  магна, а при рациональной —  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  магна  $\approx 1,257 \cdot 10^{-6}$  магна. Для размерности диэлектрической проницаемости имеем:

$[\epsilon] = [D] : [E] = [QL^{-2}] : [\Phi T^{-1}L^{-1}] = [Q\Phi^{-1}L^{-1}T]$  и, следовательно, единица диэлектрической проницаемости в системе MKSM — фарада, деленная на метр, — будет равна  $10^{[(1)-(-8)-(-2)]} = 10^{-11}$  единиц CGS $_{\mu_0}$ . Поэтому для диэлектрической проницаемости пустоты  $\epsilon_0$  при нерациональной форме уравнений мы получим  $\epsilon_0 = 10^{11} c_0^2 F m$ , а при рациональной форме —  $\epsilon_0 = 10^{11} 4\pi c_0^2 F m \approx 8,85 \times 10^{12} F m$ , где  $c_0 = 3 \cdot 10^{10}$  числовое значение скорости света в пустоте, выраженной в сантиметрах в секунду.

Часто, переходя от системы CGS $_{\mu_0}$  к системе MKSM, одновременно переходят от нерациональной формы уравнений к рациональной. В этом случае особое внимание следует обращать на пересчет числовых значений напряженности магнитного поля и м. д. с. При неизменной системе единиц переход от нерациональной формы уравнений к рациональной, связанный с изменением понятий о напряженности магнитного поля и о м. д. с., а именно с уменьшением их в  $4\pi$  раз, влечет за собой уменьшение в  $4\pi$  раз их числовых значений. Кроме того, переходя от системы CGS $_{\mu_0}$  к системе MKSM, следует иметь в виду, что 1 эрстед =  $10^3$  амперам на метр и 1 гильберт =  $10$  амперам. Поэтому при одновременном переходе от системы CGS $_{\mu_0}$  к системе MKSM и от нерациональной формы уравнений к рациональной числовое значение напряженности магнитного

поля, выраженной в эрстедах, следует умножать на  $10^8/4\pi$  для того, чтобы получить ее значение в амперах на метр, а числовое значение м. д. с., выраженной в гильбертах, следует умножить на  $10/4\pi$  для того, чтобы получить ее значение в амперах.

Выше уже было отмечено, что Хевисайд со-прягал рационализацию уравнений с введением новой системы единиц, и были указаны причины, которые исключили возможность практического применения этой системы. Впоследствии была сделана попытка добиться рационализации уравнений путем изменения величины отдельных единиц системы. А именно для рационализации уравнений предлагалось уменьшить в  $4\pi$  раз единицы магнитной проницаемости, интенсивности намагничения и магнитной массы и увеличить в  $4\pi$  раз единицы напряженности магнитного поля, м. д. с., магнитного сопротивления и диэлектрической проницаемости. Такое частичное изменение единиц измерения системы нарушает систему, и мной было показано [Л. 3], что эта попытка приводит к недоразумениям. Не останавливаясь на этом подробно, отметим, что из формул размерности в системах CGS<sub>μ0</sub> и MKSM сразу видно, что изменение единицы магнитной проницаемости, входящей в той или

иной дробной или целой степени в формулы размерности всех электрических и магнитных величин, должно повлечь за собой изменение всех производных единиц за исключением механических. Только что отмеченное предложение об изменении части единиц системы совершенно не согласовано с формулами размерности и приводит поэтому к неприемлемым противоречиям.

Однако, как показано выше, рационализацию уравнений электромагнитного поля можно осуществить, не затрагивая единиц измерения и изменив лишь понятия о нескольких величинах, и это следует сделать, так как рациональная форма уравнений по сравнению с нерациональной отличается значительно большей простотой основных зависимостей и полной симметрией их по отношению к электрическому и магнитному полям.

#### Литература

1. П. Л. Калантаров. Основные величины в учении об электромагнитных явлениях. ДАН, т. IV, № 8, 1936.
2. Сборник работ комиссии по единицам мер ОН АН СССР, стр. 45, 1938.
3. П. Л. Калантаров. О рационализации уравнений электромагнитного поля. Электричество. № 8, 1945.



# Электрическая сварка и резка под водой

*Действительный член Академии наук Украинской ССР К. К. ХРЕНОВ*

Возможность получения устойчивого дугового разряда в жидкой среде известна с конца прошлого столетия. Дуговой разряд в жидкой среде протекает в газовом пузыре, образуемом и непрерывно возобновляемом за счет испарения и разложения окружающей жидкости тепловым действием разряда. Разряд в жидкой среде давно изучался, например в масляных выключателях, и нашел некоторые технические применения, в том числе для изготовления коллоидальных растворов металлов и других веществ, распыляемых дугой в жидкости.

В последнее время дуговой разряд в жидкой среде нашел новое значительное практическое применение в области сварки и резки металлов под водой.

**Первые опыты автора.** Автор занимался изучением и разработкой этих новых методов в Московском электромеханическом институте инженеров транспорта им. Дзержинского (МЭМИИТ). Еще в 1932 г. в сварочной лаборатории МЭМИИТ были поставлены довольно примитивные опыты по сварке со стальными электродами в небольшом бачке с проточной водой. Глубина погружения дуги составляла 300—350 мм. Сварщик погружал в воду кисти рук в резиновых перчатках. Дуга питалась постоянным током от нормального сварочного агрегата. После ряда неудач были достигнуты положительные результаты. Поставленная задача была удовлетворительно решена в лабораторных условиях. Было показано, что при соблюдении определенных условий можно достичь достаточно устойчивое горение сварочной дуги под водой, для чего необходимо нанести на электродный стержень слой обмазки определенной толщины и придать обмазке водонепроницаемость, пропитав ее лаками, парафином и тому подобными веществами.

Обмазка плавится несколько медленнее электродного стержня и создает на конце электрода выступающую вперед чашечку, так называемый «козырек» (рис. 1). Козырек способствует устойчивому существованию газового пузыря между концом электрода и основным металлом.

Газовый пузырь заполнен преимущественно водородом, парами металла и обмазки электро-

*Освещаются предложенные и разработанные в Советском Союзе методы электрической сварки и резки под водой, послужившие основой к созданию новой отрасли ремонта судов — судоремонта под водой. Описано развитие этой новой области техники и современное ее состояние.*

да. Пока существует пузырь, сварочная дуга горит внутри его почти так же спокойно и устойчиво, как и на воздухе, отличаясь лишь немного

повышенным напряжением (на 5—10 V больше, чем на воздухе) вследствие более интенсивного отвода тепла окружающей средой. Разрушение газового пузыря и проникновение воды в столб дуги прекращают ее горение.

Общий вид дуги, горящей под водой, схематически показан на рис. 2. Дуга горит в непрерывно возобновляемом газовом пузыре; избыток газов, образуемых дугой, поднимается отдельными пузырьками на поверхность воды. При поджигании пузырьки газа сгорают без верыва.

При электродах, не содержащих в оболочке (обмазке) веществ, разлагающихся с образованием газов, газовые пузыри, образуемые дугой,

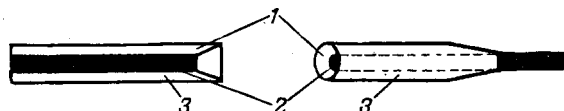


Рис. 1. Козырек на конце электрода.

1—козырек; 2—стержень 3—обмазка.

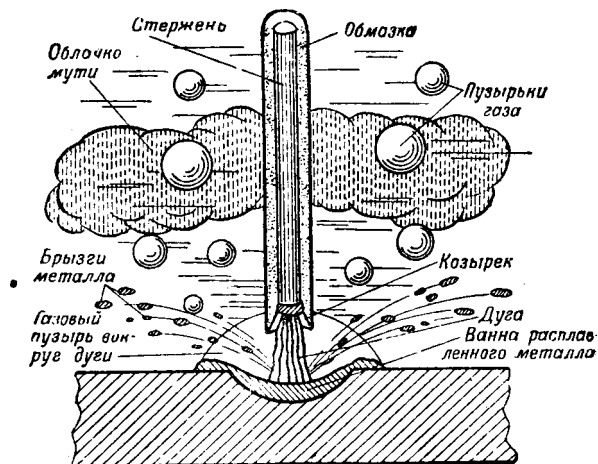


Рис. 2. Горение сварочной дуги под водой.

как показывает химический анализ, заполнены почти чистым водородом. Свободный водород образуется за счет отнятия кислорода от паров воды железом при высоких температурах.

Для обычных электродных обмазок, содержащих органические вещества, газы, образуемые подводной дугой, представляют смесь водорода с газообразными продуктами разложения обмазки. Одновременно дуга образует значительное количество мути темного цвета, поднимающейся кверху и создающей облачко над дугой. Нормальная сварочная дуга в 250—300 А за 1 h горения окрашивает в темный цвет и делает почти непрозрачной до 5—10 м<sup>3</sup> воды. Муть состоит из частиц окислов железа столь мелких, что они не оседают полностью по истечении нескольких суток.

Наиболее важным результатом работ периода 1932 г., несколько неожиданным для того времени, явилось установление интенсивного расплавляющего воздействия подводной дуги на металл. Сейчас, при значительном развитии теоретических представлений о процессах в дуговом разряде, подобный результат представляется естественным: дуга реагирует на усиление охлаждения того или иного участка соответствующим увеличением перепада напряжения и поддерживает, таким образом, автоматическое распределение энергии, соответствующее общему минимуму расхода энергии на поддержание разряда.

Интенсивное плавление делает возможными сварку и резку металла под водой. Дело упрощается установленной опытом легкостью получения устойчивого горения подводной дуги и возможностью питания ее от нормальных источников сварочного тока, постоянного и переменного, применяемых для сварки на воздухе.

Результаты лабораторных работ были с успехом проверены в производственных условиях в середине 1932 г. В том же 1932 г. были сданы в печать два сообщения о проведенной работе — краткое в журнал «Сварщик» и более подробное в Труды МЭМИИТ [Л. 2]. Журнал «Сварщик» напечатал сообщение «Электросварка под водой» [Л. 1] в № 1—2 журнала за 1933 г., вышедшем в марте. Эта статья, насколько известно автору, является первым сообщением в мировой технической литературе о практической возможности выполнения электросварки под водой.

Таким образом, честь создания и первого практического применения процесса подводной электросварки принадлежит Советскому Союзу.

Значение подводной электросварки, как нового технологического процесса, было оценено не всеми сразу, в том числе и автором. С конца 1932 г., почти на 10 лет, автор прекратил свои разработки.

В это десятилетие метод нашел некоторое производственное применение, и были выполнены единичные, но достаточно серьезные работы, из которых можно упомянуть заделку пробойны

днищевой обшивки одного парохода в Ленинградском порту в 1936 г.; работы при подъеме другого парохода в том же году, при снятии с мели ледокола, и два случая заварки водопроводных дюкеров диаметром 750 мм на глубине 8 м. Подводная электросварка в период 1932—1941 гг. развивалась весьма медленно. К началу Великой Отечественной войны мы не располагали ни достаточными кадрами, ни производственным опытом для выполнения серьезных работ.

**Второй этап развития сварки и резки под водой.** С 1942 г. процессы подводной сварки и резки стали изучаться значительно подробнее, и, что особенно важно, они получили весьма широкое практическое применение, вызванное требованиями военного времени. В настоящее время имеется по этим процессам не только лабораторный, но и обширный производственный материал.

В 1942—1943 гг. для развития и производственного освоения подводной электрической сварки и резки сделано значительно больше, чем за все предшествующее десятилетие. В 1943 г. оба технологических процесса были полностью внедрены в производство и практически освоены.

Второй этап исследований автора протекал в совершенно отличных от работ 1932 г. условиях. Работа проводилась в лаборатории, оборудованной мощными техническими средствами, дающими возможность ставить эксперименты в условиях, близких к производственным. Автор вел работу комплексно, занимаясь одновременно лабораторными исследованиями, разрешением ряда производственных вопросов, подготовкой кадров подводных сварщиков и резчиков, повышением квалификации технических руководителей работ, составлением практических руководств и инструктивных материалов.

Подобный комплексный метод работы оказался весьма плодотворным и дал возможность весьма быстро и широко внедрить результаты лабораторных работ в производственную практику. К концу 1943 г. в Советском Союзе работали уже сотни подводных электросварщиков и резчиков, выполнивших под наблюдением квалифицированных технических руководителей ряд крупных производственных работ.

В начале 1942 г. была поставлена техническая задача расчленения обрушенных пролетных строений железнодорожных мостов, находящихся под водой. Применение газокислородной резки затруднялось дефицитом газов и аппаратуры. Автор предложил, основываясь на результатах своих предшествующих работ, использовать для расчленения упавших пролетных строений мостов способ подводной дуговой электрической резки металлическим электродом.

Работы лаборатории значительно способствовали широкому внедрению в производство подводной электрической сварки и резки металлов, в корне изменивших технологический процесс аварийно-спасательных и судоподъемных операций, ремонта подводной части судов и восстановления железнодорожных мостов.

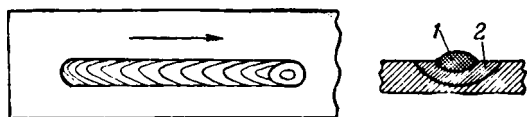


Рис. 3. Валик наплавленного металла.  
1—наплавленный металл; 2—зона влияния.

**Дуговая сварка под водой.** Изложим кратко основные результаты работ, проведенных за последние годы, начав с процесса подводной электросварки.

Наиболее характерным отличием сварки под водой от сварки на воздухе является применение специальных электродов, отличающихся своей наружной оболочкой — обмазкой. В подводных работах пользуются почти исключительно стальными электродами. Стержень обычно изготавливается из стандартной электродной проволоки (ГОСТ 2246) марки I (углерод до 0,10%) или II (углерод до 0,18%), диаметром обычно 5 мм. Для облегчения работы подводного сварщика электродные стержни готовят уменьшенной длины — 350, вместо обычных 450 мм для сварки на воздухе.

Обмазка электрода для условий подводной сварки имеет целью увеличить устойчивость газового пузыря вокруг дуги за счет образования выступающего козырька на конце электрода (рис. 1) и увеличить устойчивость дугового разряда путем введения в столб дуги паров с низким потенциалом ионизации. На образование козырька влияют физические свойства обмазки; козырек должен иметь достаточные размеры и механическую прочность, но не чрезмерные, затрудняющие поддержание требующейся здесь короткой дуги и легкое ее повторное зажигание при обрыве.

Состав обмазки, толщина ее слоя, режим сушки электродов, обеспечивающие нужные свойства козырька, подбираются опытным путем. Обычно применяются обмазки из тонкоразмолотых минеральных веществ, замешанных на водном растворе жидкого стекла. По нанесении обмазки она подсушивается и затем прокаливается при температуре 200—300°С для удаления последних следов влаги и увеличения механической прочности слоя обмазки.

Вторая функция обмазки — усиление ионизации дугового промежутка — осуществляется введением в обмазку соединений, дающих при нагреве пары с низким потенциалом ионизации — в первую очередь соединений щелочных и щелочно-земельных металлов. Обычно такие соединения уже находятся в достаточном количестве в материалах для изготовления обмазок, и их самостоятельно вводить не требуется. В специальных случаях, когда требуется сильно повысить устойчивость дугового разряда, можно дополнительно вводить в обмазку особо сильные ионизаторы. По окончании сушки обмазка пропитывается подходящими составами, придающими ей полную водонепроницаемость, что является необходимым условием для выполнения подводной электросварки.

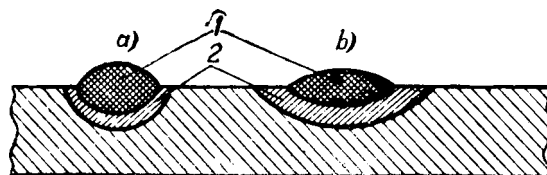


Рис. 4. Сечения валиков, наплавленных под водой (а) и на воздухе (б).  
1—наплавленный металл; 2—зона влияния.

Интенсивное плавление металла подводной дугой дает возможность успешно вести сварку под водой и выполнять все формы сварных соединений, применяемых для сварки на воздухе.

Основным элементом для сварки металлической дугой — под водой и на воздухе — является валик, т. е. полоска наплавленного металла, образующаяся по линии перемещения сварочной дуги (рис. 3). Валик, наплавленный под водой, в поперечном сечении имеет меньшую ширину наплавленного металла и переходной зоны термического влияния (рис. 4), что объясняется усиленным охлаждающим действием водной среды. Химический состав наплавленного металла для случая сварки малоуглеродистой стали удовлетворителен. Можно отметить довольно сильное окисление металла и весьма незначительное содержание азота (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав наплавленного металла при подводной электросварке (содержание в %)

Вид металла	C	Si	Mn	P	S	N
Основной . . . .	0,12	0,01	0,36	0,058	0,032	0,0052
Электродный . .	0,12	0,02	0,43	0,027	0,024	0,0060
Наплавленный . .	0,09	0,01	0,15	0,039	0,033	0,0019

Структура металла сварного соединения носит признаки ускоренного охлаждения, отличающаяся мелкозернистостью. Наплавленный металл засорен неметаллическими включениями выше обычной нормы для сварки на воздухе. Зона влияния сужена, в ней уменьшена и часто мало заметна область перегрева с укрупненным зерном. В сталях, чувствительных к термообработке, явления закалки выражены резче, чем при сварке на воздухе. В соответствии с удовлетворительными химическим составом и структурой наплавленного металла подводная сварка может обеспечить и удовлетворительную прочность сварного соединения, что видно из табл. 2, содержащей результаты испытаний стыковых образцов, сваренных в лаборатории.

Под водой можно выполнить все разнообразие форм сварных соединений, освоенных при надводных работах. Но многие формы соедине-



Рис. 5. Употребительные формы соединений для подводной сварки.

*a*—нахлесточное; *b*—тавровое.

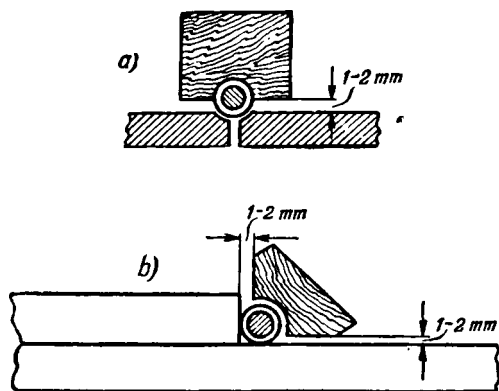


Рис. 6. Формы соединений для подводной сварки угольной дугой.

Таблица 2

Результаты испытаний на растяжение стыковых образцов, сваренных под водой

Номер образца	Предел прочности при растяжении, $\text{kg/mm}^2$	Место разрушения
1	35,1	По основному металлу
2	37,3	То же
3	37,1	То же
4	36,8	То же
5	37,7	То же
6	37,7	То же
7	36,6	Отрыв наплавленного металла от основного

ний, требующие точных движений и хорошей видимости, часто трудны для подводного сварщика. В практике подводных работ чаще всего применяются простейшие валиковые (угловые) однослойные швы, выполняемые за один проход, а из соединений предпочитают одностороннее нахлесточное и тавровое (рис. 5).

Валиковый шов и, в частности, нахлесточное соединение удобны в условиях плохой видимости, обычной для подводных работ, благодаря наличию выступающей кромки, облегчающей ориентацию сварщика. При достаточном навыке сварщик может удовлетворительно выполнять валиковые швы в очень мутной воде с почти полным отсутствием видимости, ведя работу наощупь, ориентируясь по выступающей кромке.

Выполнение подводной сварки связано с рядом трудностей для сварщика. Видимость понижена, и часто сварщик не в состоянии ясно рассмотреть кромки шва, ванну, конец электрода и другие детали, что затрудняет его работу. В мутной же воде, часто встречающейся на практике, в особенности речной, видимость практически совершенно отсутствует. Плохая видимость ведет к дефектам, не встречающимся в надводных работах: смещение швов и пропуски в них.

Устойчивость водолаза недостаточна, нормально водолаз имеет отрицательную плавучесть всего в 3—5  $\text{kg}$  и самые незначительные усилия, вызываемые течением, реакцией вытравляемого воздуха и т. д., влекут за собой непроизвольные перемещения водолаза, нарушающие точность движений, необходимую для выполнения качественной сварки. В нормальном водолазном снаряжении рубаха (скафандр) и рукавицы изготовлены из прочной, но грубой и жесткой резиновой ткани, не рассчитанной на выполнение тонких и точных движений, требуемых техникой сварки. Развитие применений подводной сварки настоятельно требует реконструкции водолазного снаряжения применительно к новым требованиям.

Указанные трудности выполнения подводных сварочных работ могут значительно снижать прочность сварных соединений, хотя качество наплавленного металла удовлетворительно и в благоприятных условиях можно получить сварные соединения высокой прочности.

Впредь до более обстоятельного изучения вопроса автор считал бы возможным принимать для подводных работ, выполненных в нормальных условиях, допускаемые напряжения в размере 50% от значений, установленных для аналогичных работ на воздухе.

За последние годы были подготовлены значительные кадры подводных электросварщиков, и сварка под водой нашла достаточно широкое практическое применение. Завариваются трещины, обвариваются головки заклепок и кромки листов, ввариваются латки и целые листы, производится наплавка изношенных поверхностей, привариваются проушины для крепления стропов при судоподъеме, свариваются и ремонтируются трубопроводы, уложенные под водой, и т. д. Пока имеется опыт подводной сварки преимущественно малоуглеродистой стали, ведутся успешные опыты по сварке бронзы и других металлов. Следует отметить, что подводная сварка дает минимальные деформации изделия ввиду малых размеров зоны разогретого металла, обусловленных интенсивным охлаждающим действием водной среды.

Большой практический интерес представляет механизация подводной электросварки. Здесь не столь важно увеличение производительности, как повышение качества сварки и облегчение труда сварщика. В лаборатории над вопросом механизации подводной сварки работали под руководством автора инженеры К. В. Васильев и

М. С. Кауфман. Удовлетворительные результаты в лабораторных условиях удалось получить, используя видоизмененный способ полуавтоматической сварки «лежащим электродом», применяемым иногда для работ на воздухе.

В заключение описания сварки отметим, что под водой весьма устойчиво горит и хорошо плавит металл угольная дуга. Применение ее для сварки может оказаться целесообразным в тех случаях, когда сварной шов возможно выполнить без присадочного металла за счет оплавления кромок основного металла, как показано на рис. 6. Заметного практического применения подводная сварка угольной дугой пока не получила. Из литературы известно применение в США сварки угольной дугой листов тантала, погруженных в четыреххлористый углерод, для уменьшения разогрева, коробления и воздействия атмосферного воздуха.

**Подводная резка.** Дуговой разряд может быть также успешно использован для резки металлов под водой. Развитие подводной сварки шло очень простым и прямым путем, подводная резка прошла сложный путь.

Различие в ходе развития объясняется отчасти тем, что дуговая сварка до сих пор остается единственным практически пригодным способом для подводных работ, все попытки применить здесь другие методы сварки пока не дали положительных результатов. В противоположность этому, известно несколько практически пригодных, принципиально различных способов подводной резки, относительное значение которых постоянно меняется по мере их развития и усовершенствования.

В начале двадцатого столетия было установлено опытом, что сварочное ацетилено-кислородное пламя при соблюдении некоторых условий может устойчиво гореть под водой и нагревать металл, например сталь, до начала белого каления (но не до плавления). Эта возможность была использована для кислородной резки стали под водой. Направив на разогретый участок металла струю режущего кислорода, можно получить нормальный процесс кислородной резки стали. К началу первой мировой войны процесс кислородной подводной резки и необходимая аппаратура в некоторых странах были доведены до степени совершенства, допускающей практическое использование.

В 1924 г. был сделан первый опыт применения подводной кислородной резки в Советском Союзе. Работа проводилась на импортной аппаратуре. К началу второй мировой войны была удовлетворительно освоена подводная водородно-кислородная резка и начато производство необходимой аппаратуры.

Водородно-кислородная резка получила почти исключительное применение и в других странах. Использование для подогрева других газов, в том числе и ацетилена, встречается редко по причинам, на которых здесь мы не будем останавливаться. До настоящего времени использование подводной газовой резки встречает значительные

затруднения, в том числе трудность обеспечения места работ большим количеством газов в условиях аварийно-спасательных операций. Поэтому давно производились попытки заменить подогревательное пламя резака угольной или металлической дугой, сохранив режущую струю кислорода. Отдельные работы в этом направлении проводились еще в 20-х годах в различных странах, и полученные результаты нашли некоторое практическое применение.

В 1932 г. автор отметил режущее действие подводной дуги и указал на возможность подводной резки без применения кислорода, за счет теплового действия дуги, выплавляющей металл из полости реза.

Все применяющиеся методы используют высокотемпературное пламя и могут быть объединены под общим названием «огневая резка». Далее методы могут быть разделены на кислородную резку, где применяется струя режущего кислорода и основой является химическая реакция сгорания железа в кислороде, и электрическую резку, где отсутствует подача режущего кислорода и основным процессом является выплавление металла тепловым действием дуги.

Ниже приводятся краткие сведения о работах, проведенных в лаборатории автора, по отдельным способам подводной резки и о практическом применении этих способов.

Лаборатория автора поставила своей первой задачей выработать практически пригодный метод чисто электрической дуговой резки, не требующий кислорода. Метод был разработан и достаточно изучен для практических целей в лабораторных условиях и во второй половине 1942 г. был передан на производство. Электрическая подводная резка стальным электродом пользуется значительными токами — до 1000 А и выше — и усиленным слоем электродной обмазки, дающим увеличенный козырек повышенной прочности на конце электрода. Увеличенный козырек удлиняет дугу, повышая ее напряжение до 40—50 В и, соответственно увеличивая мощность, концентрирует нагрев металла, вызывает сильное дутье струи газов, образуемых дугой, направленной на основной металл. Одновременно усиленный козырек облегчает работу резчика, позволяя ему все время касаться электродом металла и «шуровать» жидкий металл в полости реза, как бы выскабливая его оттуда и тем ускоряя процесс резки. Сущность процесса дуговой резки хорошо видна на примере прожигания сквозного отверстия, как показано на рис. 7. Резчик зажигает дугу и, слегка нажимая на электрод, прокалывает или прошивает металл. Электрод идет легко, как бы углубляясь в мягкую пластичную массу. Газы дуги, вырываясь из-под козырька, давят на жидкий металл и выбрасывают его назад на входную поверхность металла. У прожженного отверстия входная сторона имеет наплыв, выходная совершенно гладкая, как показано на рис. 8. Диаметр отверстия на 2—3 мм больше диаметра электрода с обмазкой.



Таблица 3

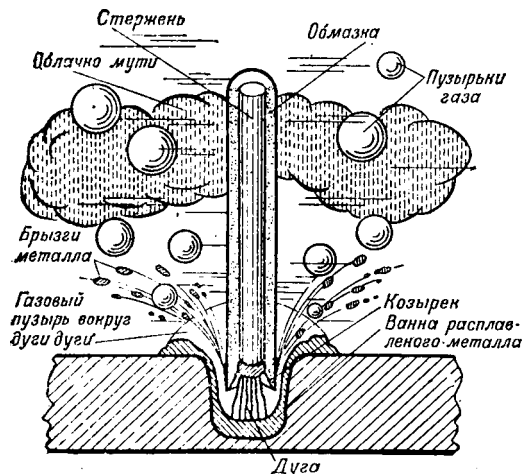


Рис. 7. Прожигание отверстия.



Рис. 8. Сквозное отверстие, прожженное в металле.

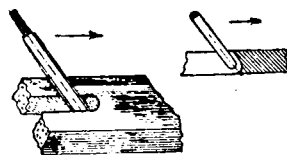


Рис. 9. Непрерывная резка металла.

Непрерывную резку металла производят, наклонив электрод назад и перемещая дугу равномерно вперед по линии реза (рис. 9).

Резка успешно идет на постоянном токе, когда применяется нормальная полярность (минус на электроде), но возможна и на переменном токе. Для случайных работ небольшого объема по резке можно пользоваться электродами для сварки, для более крупных работ лучше пользоваться специальными электродами.

О возможностях метода может дать представление одна из первых работ, выполненных при помощи подводной электрорезки.

У одного из железнодорожных мостов весенним паводком 1942 г. было разрушено защитное ограждение у опор из шпунтовых балок Лакка-ванна, забитых в грунт. Разрушение ограждения повело к подмыву опор и угрожало безопасности моста в весенний паводок 1943 г. Было решено срезать стенки из шпунтовых балок у дна. Всего предстояло срезать 432 балки общим протяжением поперечного реза — 137 м, что представляло крупнейшую работу подобного рода в практике Советского Союза. Работа велась со льда, временами при сильных морозах. Работали одной дугой током до 900 А от трех параллельно соединенных сварочных агрегатов СМГ-2", двигатели агрегатов питались трехфазным током от электростанции поезда. Работу проводили курсанты, обученные в лаборатории, пользуясь электродами, изготовленными там же.

Все балки срезали за 40 смен по 6 часов одной дугой. Средняя производительность за 6 часов — 10 балок, максимальная — 20 балок. Для кислородно-водородной резки практикой в Советском Союзе были установлены цифры со-

Толщина металла, мм	Ток, А	Время резки 1 м, мин	Расход электродов на 1 м реза, шт.
5	500	0,10	2
10	600	0,25	5
15	700	0,60	10
20	800	1,50	20
30	900	3,0	50

ответственно 2 и 4 балки, т. е. электрическая резка оказалась производительнее газовой в 5 раз.

Данные относительной производительности дуговой резки при диаметре электрода в 7 мм в благоприятных условиях даны в табл. 3.

На толщинах до 15 мм дуговая резка стальным электродом может успешно конкурировать с любым существующим способом резки. Для больших толщин выбор метода резки определяется рядом соображений, на которых здесь не будем останавливаться. Достоинства дуговой резки: простота и удобство процесса, отсутствие расхода газов; расходуются лишь электроэнергия и простые дешевые электроды. Основным недостатком — необходимость мощного источника тока, отсутствие которого часто заставляет отказываться от использования метода. Производительность на больших толщинах недостаточна. В настоящее время метод широко применяется в Советском Союзе.

Возможна дуговая резка и угольным электродом, которая иногда применяется для мелких случайных работ.

Лаборатория уделяла внимание кислородно-электрической резке. Опыты с подачей кислорода по отдельной насадке оказались неудачными. Удовлетворительные результаты удалось получить лишь с трубчатыми электродами, когда сам электрод является одновременно и кислородным мундштуком. Наилучшие результаты пока получены с трубчатыми стальными электродами. Проще всего изготовлять такие электроды из толстостенных цельнотянутых стальных трубок внутренним диаметром 1,5—2 мм и наружным — 5—7 мм. Такие трубки изготовляются нашей промышленностью; для электродов можно использовать отходы и бракованные трубки. Трубка режется на куски и покрывается обмазкой, как электроды для подводной сварки. Держатель должен подводить к электроду одновременно ток и кислород ко внутреннему каналу, для пуска кислорода держатель имеет вентиль. Задача конструирования держателя для кислородно-электрической резки решена вполне удовлетворительно.

Электрокислородная резка оказалась весьма мощным средством, режет практически любые толщины. Для малых и средних толщин чистое



время резки (время горения дуги) на 1 м реза составляет всего 3—7 мин., что является весьма удовлетворительным результатом для подводных работ. Ток дуги производит лишь начальный подогрев металла, для чего достаточно около 300 А, т. е. можно пользоваться любым стандартным сварочным агрегатом, и задача питания места работ током очень упрощается. Кислород расходуется очень экономично, его требуется раза в 3—4 меньше, чем при водородно-кислородной резке. Все показатели электрокислородной резки очень высоки по качеству реза, производительности, отнесенной ко времени горения дуги, стоимости работ. Автор считает, что этот метод для большинства случаев является наилучшим.

Но метод имеет и существенные недостатки, устранение или уменьшение которых необходимо для широкого использования метода. Пока дороги и дефицитны цельнотянутые стальные трубки. Мал срок службы электрода, расплавляемого дугой и сжигаемого кислородом: в среднем электрод сгорает полностью за 1 мин. Смена электрода в условиях подводных работ, при стесненности движений водолаза, непригодности водолазного снаряжения занимает довольно много времени, тем более, что в это время нужно посредством сигналов провести выключение и включение тока, закрытие и открытие кислородного вентиля, нужно найти место перерыва в резе и подвести к нему дугу и т. д. Все эти потери времени при существующих конструкциях держателей и электродов в значительной степени превышают время сгорания электрода. Горит электрод 1 мин, а его замена часто занимает до 3—4 мин. При подобных условиях выгода электрокислородной резки значительно снижается. Поэтому лаборатория работала и работает над проблемой усовершенствования электрокислородной резки за счет упрощения и удешевления электрода и увеличения срока его службы.

Были разработаны электроды со сплошным стальным стержнем; для подачи кислорода вдоль электрода кладется тонкая стеклянная (термометрическая) трубка с внутренним диаметром 1,5—2 мм, скрытая в слое обмазки. Отнесение кислородной струи на некоторое расстояние от стального стержня увеличивает срок службы электрода, он составляет до 2,5 мин. Недостатком электрода является сложность его изготовления и малая механическая прочность.

Работниками речного флота были предложены электроды, трубка которых изготавливается из стальной ленты протяжкой через волоочильную доску. Шов уплотняется лишь сжатием в процессе протяжки. Трубки покрываются обмазкой обычным порядком. По опытам лаборатории правильно изготовленные трубки этого типа не пропускают кислорода по шву и работают вполне удовлетворительно, заменяя цельнотянутые трубки. Изготовление таких трубок не требует сложного оборудования и может быть организовано на местах. Опыты с медными трубчатыми элект-

родами не дали положительных результатов. Также лаборатории не удалось получить удовлетворительных результатов с электродами из специальных материалов, например различных окислов. Удовлетворительные результаты были получены с угольными электродами с внутренней медной или стеклянной трубкой для кислорода.

Срок службы электрода длиной 250 мм составляет 8—10 мин. Электрод нашел практическое применение. Недостатки его: сложность изготовления, загрязнение режущей струи окисью углерода, слишком большой внешний диаметр электрода, затрудняющий введение его в полость реза, что иногда требуется.

Усовершенствованием и развитием угольных электродов являются трубчатые электроды, стержень которых изготовлен из соединений кремния типа силит, глобар и т. п. Электроды по конструкции подобны угольным, отличаясь отсутствием внутренней медной трубки, поскольку материал стержня мало чувствителен к действию кислорода. По опытам лаборатории электроды такого типа обладают хорошей стойкостью, срок службы — 12—15 мин для длины 250 мм, основная область применений — резка металла небольшой толщины до 15—20 мм.

Работы лаборатории в области газовой-кислородной резки сводились к проведению сравнительных испытаний различных образцов водородно-кислородной аппаратуры. Значительно интереснее работы лаборатории по кислородной резке на жидком горючем. Обычно резка ведется на водороде, который мало экономичен, неудобен для транспорта, так как стальной баллон весом около 60 кг при давлении 150 ат содержит всего 0,54 кг водорода. Кроме того, водород не дает светящегося ядра в пламени, что затрудняет водолазу регулирование пламени. Экономически очень выгоден переход на жидкое горючее, например бензин, 1 кг которого заменяет по меньшей мере 2 баллона с водородом весом по 60 кг и дает более горячее пламя со светящимся ядром, облегчающим регулирование.

Попытки создать подводный бензорез предпринимались давно, еще до войны. До последнего времени они не давали удовлетворительных результатов, за рубежом работы в этом направлении не опубликовывались.

В результате длительной упорной работы И. С. Дмитриев создал в лаборатории советский подводный бензорез, показавший в лабораторных условиях достаточно хорошие результаты. В этом бензорезе бензин предварительно испаряется электрическим нагревателем, встроенным в бензорез.

Сотрудники лаборатории — А. Б. Ежиков и В. М. Агапов — сконструировали и построили советский бензорез без электрического подогрева, в нем бензин предварительно тонко распыляется кислородной струей. Бензорез находится в стадии внедрения в производство.

В результате работ по кислородной резке лаборатория настолько освоила управление горением пламени под водой, что в конце 1945 г.

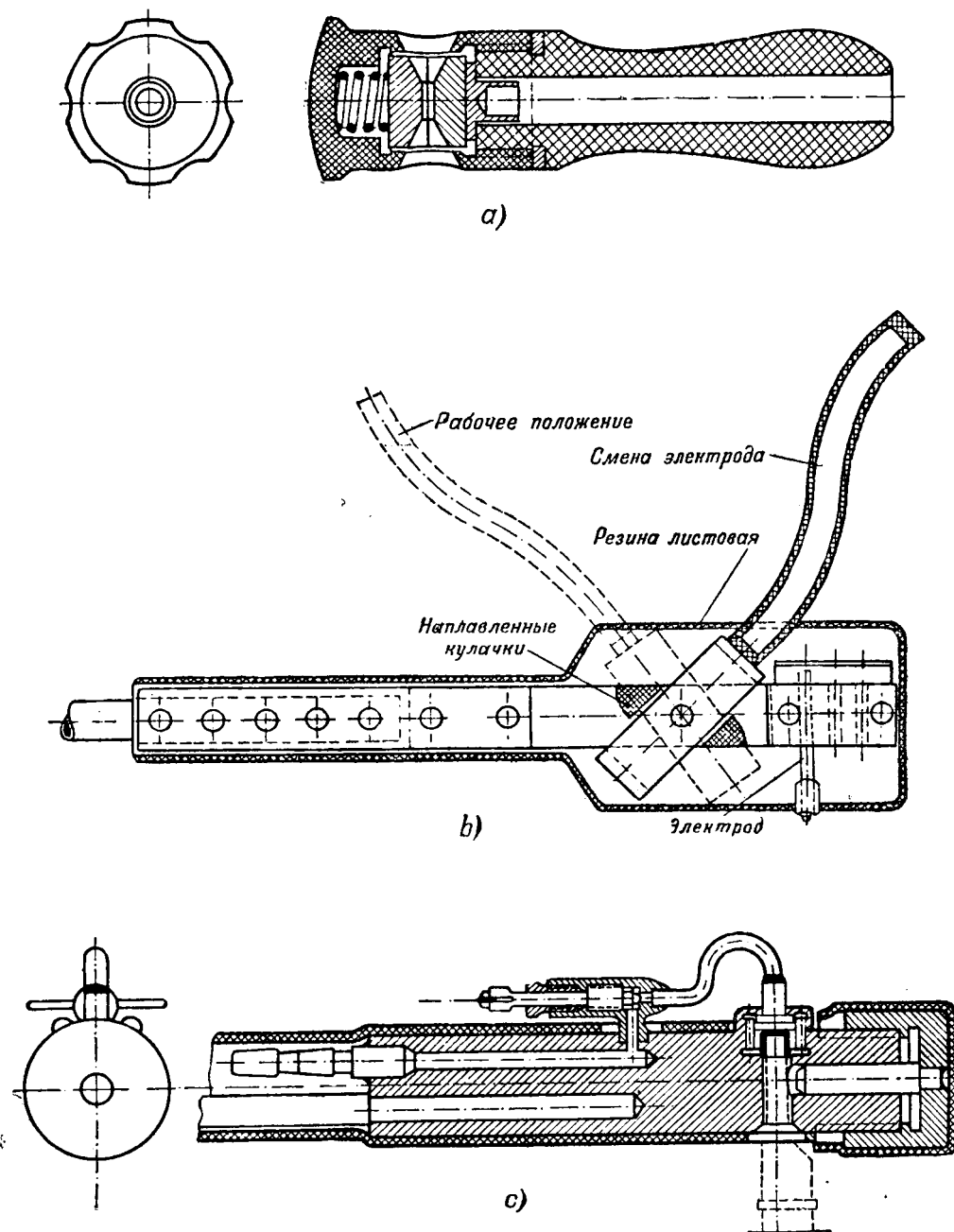


Рис. 10. Держатели электродов для подводных работ.  
 а—для электросварки; б—для электрорезки; с—для кислородной резки.

возникла мысль, которую впервые четко сформулировал Г. Ф. Болховитинов, — о теплотехническом использовании подводного пламени и создании нового типа парового котла с подводной горелкой. Опыты, проведенные на простейшей модели, дали положительные результаты, легко удавалось нагревать и доводить до кипения значительные объемы воды с высоким к. п. д. Автор ведет лабораторное изучение использования парогазовой смеси, образуемой погруженной горелкой, как теплоносителя, например, для центрального отопления. Автор полагает, что в связи с растущей газификацией Советского Союза котлы с погруженной горелкой, являющиеся новым словом теплотехники, представляют опреде-

ленный интерес и должны стать предметом изучения и исследования.

Практические применения подводной резки весьма широки и разнообразны: расчленение судовых корпусов и отделение их частей для облегчения подъема; расчленение обрушенных металлических пролетных строений мостов для расчистки русел и извлечения металла; прорезка люков для входа водолазов внутрь корпуса судов, иногда для спасения экипажа (подводные лодки), прорезание отверстий для крепления стропов при судоподъеме; разделка пробойн, удаление рванин и вмятин; срезка шпунтовых стенок, удаление поврежденных участков подводных трубопроводов, срезка тросов; намотавшихся

на гребные винты, и т. д. Сотни подобных работ были выполнены за время войны в Советском Союзе.

Очень крупные работы описаны и в зарубежной литературе, например работы, выполненные в Пирл-Харбор.

Опыт военного времени доказал преимущество электрических методов резки, они получили очень широкое распространение и начали применяться и в надводных работах. Практическая ценность электрической подводной сварки и резки увеличивается несложностью и доступностью необходимой аппаратуры. Питание дуги может производиться от нормальных сварочных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания без каких-либо переделок. Лишь для чисто электрической резки (без кислорода) приходится прибегать к специальным мощным агрегатам или же (что хуже) к параллельному соединению нормальных сварочных агрегатов. Отечественные агрегаты «САК» приходится соединять по 3 штуки, удовлетворительная работа возможна при хорошем качестве автоматических регуляторов числа оборотов двигателей и перекрестном соединении обмоток возбуждения генераторов. При наличии переменного тока возможна работа от сварочных трансформаторов.

Существенное значение имеет конструкция держателей. Держатель должен быть хорошо изолирован для устранения утечек тока и из соображений безопасности надежно зажимать электрод и допускать удобную и быструю смену электродов в условиях подводных работ (рис. 10). Наиболее трудны условия работы электрокислородных держателей. Держатели для электрической резки должны обеспечивать очень надежный контакт электродов; плохой контакт быстро подгорает, несмотря на охлаждающее действие водной среды. На сварочном проводе обязательно ставится рубильник для включения и выключения сварочного тока по сигналам водолаза. Необходим телефон для связи с водолазом; ввиду сложности производимых работ обычная связь по сигнальному концу совершенно недостаточна. Часто требуется устройство подводного электрического освещения места работ.

Использование электрической дуги влечет за собой дополнительные требования к технике безопасности, помимо установленных для водолазного дела. Приходится защищать зрение водолаза, так как излучение дуги, несмотря на поглощающее действие водного слоя, обычно все же слишком сильно для глаза. К стеклу переднего иллюминатора водолазного шлема, изнутри крепится цветное защитное стекло, закрывающее часть поля зрения. Меняя положение головы, водолаз может смотреть или через защитное стекло, или мимо него. Густота окраски защитного стекла подбирается по состоянию воды. Водолазная станция должна иметь набор стекол разной густоты окраски, так как состояние воды и степень ее прозрачности часто меняются.

Серьезные опасения внушала возможность поражения водолаза электрическим током. Сей-

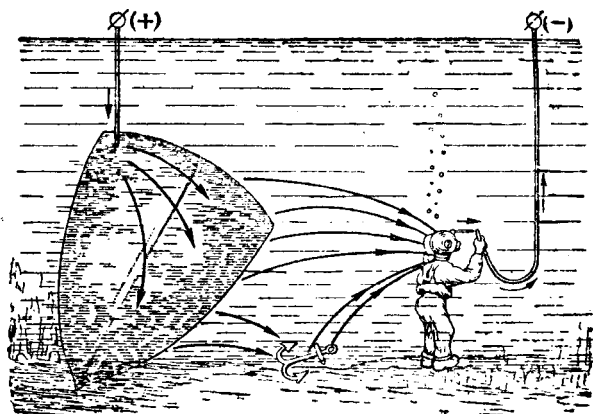


Рис. 11. Зажигание дуги на шлеме водолаза.

час на основе значительного опыта можно сказать, что опасность поражения током меньше, чем мы ожидали. Необходимо следить за изоляцией тела водолаза от металлических частей водолазного снаряжения — шлема и манжеты (нагрудника), исправностью рукавиц водолазной рубахи, исправностью изоляции держателя электродов и токоподводящего провода к нему. На проводе к держателю ставится рубильник, у которого непрерывно находится дежурный на сигнальном конце. Он включает и выключает ток по сигналам водолаза. Наиболее опасным моментом является смена электрода, она должна производиться обязательно при выключенном токе. Во избежание ошибок при включениях тока и для ускорения работы мы разработали автоматическую схему включения и выключения сварочного тока посредством контактора.

**Некоторые вопросы техники безопасности.** Помимо поражения током имеется опасность прожигания дугой шлема или манжеты водолаза. При подводных работах все металлические предметы в окружающей зоне оказываются включенными в цепь через воду, и дуга зажигается при замыкании электрода на любой металлический предмет, безразлично, присоединен ли он к цепи металлическим проводом или нет. Таким образом, случайное прикосновение электрода к шлему или манжете вызывает вспышку дуги и мгновенный прожог тонкого металла, как показано на рис. 11. Подобные случаи довольно часты на производстве, особой опасности они обычно не представляют, так как нормально воздух подается водолазу в избытке, в случае прожога водолаз перестает травить воздух и дает сигнал о подъеме. Для устранения прожогов и уменьшения разрушения металла электролизом рекомендуется покрывать металлические части водолазного снаряжения слоем прочной изоляции.

**Заключение.** Опыт работ позволил практически установить влияние различных факторов на подводный дуговой разряд. Увеличение глубины усиливает расплавляющее действие дуги и тем повышает ее сварочные свойства. Известны примеры выполнения работ на глубине 85 м, близкой к пределу возможностей человеческого

организма в нормальном водолазном снаряжении.

Известны эксперименты по дуговому разряду в газе с давлением до 1200 ат, и автор позволяет себе утверждать, что любая возможная глубина не будет мешать горению подводной дуги. Предел здесь ставится возможностями человеческого организма и несовершенством существующего водолазного снаряжения. Содержание соли в воде вносит некоторые затруднения, усиливая требования к изоляции и пропитке электродов, но не является серьезным препятствием к использованию подводной дуги.

Не является препятствием и скорость течения. На всех скоростях, на которых мог еще удержаться водолаз, горение подводной дуги протекало без осложнений.

Результаты проведенных работ открыли новое поле применений для электрического дугового разряда — сварку и резку металлов под водой. Эти новые виды работ одновременно значительно расширили технические возможности человека в подводном мире. Технические средства, применимые в подводных работах, очень скудны, и новые методы являются существенным их расширением. Подводная сварка и резка послужили, например, основой подводного судоремонта, т. е. ремонта подводной части судов на плаву без постановки судна в док; этот новый процесс судоремонта уже дает крупный экономический эффект и сильно сокращает время ре-

монта. Особенностью электрической сварки и резки является практическая пригодность их для любых глубин. Поэтому электрическая сварка и резка будут сопутствовать человеку на наибольших глубинах, которых он когда-либо достигнет для выполнения судоподъемных и других технических работ.

В заключение отмечу, что изложенные в настоящей статье результаты достигнуты усилиями сотен людей. Особенно должны быть отмечены усилия персонала лаборатории подводной электросварки и резки и славных советских подводников, с большим мужеством, искусством и настойчивостью решавших трудные, а часто и опасные практические задачи.

#### Литература

1. К. К. Хренов. Электросварка под водой. Сварщик, № 1—2, 1933.
2. К. К. Хренов и М. Л. Лившиц. Электрическая дуговая сварка под водой. Труды МЭМИИТ, вып. III, 1934.
3. К. К. Хренов. Электрорезка металла под водой. Трансжелдориздат, изд. ГУВВР НКПС, 1942.
4. К. К. Хренов. Наставление по подводной электрической сварке и резке металлов. Военмориздат, изд. АСУ НКВМФ, 1943.
5. К. К. Хренов. Подводная электрическая сварка и резка металлов. Военное изд-во МВС, 1946.
6. К. К. Хренов. Электрическая сварка и резка под водой. Сборник, посвященный 75-летию академика Е. О. Патона. Изд-во Академии наук УССР, 1946.



# Расчетный стол переменного тока

Член-корреспондент Академии наук СССР И. С. БРУК, кандидат техн. наук  
С. С. ЧУГУНОВ и кандидат техн. наук М. С. ЛИБКИНД

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Эксплуатация современных мощных электро-энергетических систем немыслима без тщательного технического анализа их поведения в нормальных и аварийных режимах. Для решения вопросов устойчивости параллельной работы, рационального распределения нагрузок между станциями системы, определения токов короткого замыкания, настройки релейной защиты и автоматики и других целей требуются детальные и весьма трудоемкие расчеты. Сложность и длительность анализа системных вопросов, выполняемого с помощью карандаша и бумаги, так велики, что становится целесообразным на некоторых этапах анализа заменить вычисления непосредственными измерениями токов, напряжений и мощностей в некоторой электрической цепи, отображающей исследуемую систему [Л. 1]. Такая «механизация» расчетной работы дает огромный выигрыш во времени и экономит труд квалифицированных инженеров, так как измерения по заданной программе могут выполняться работниками гораздо более низкой квалификации.

Устройства для выполнения расчетов на моделях, так называемые расчетные столы, имеют значение не только как средства анализа работы электрических энергосистем, действующих или проектируемых. Они могут быть с успехом применены для решения ряда вопросов из других областей техники и науки. Электрические цепи, набираемые на расчетном столе, состоят из источников переменного тока и пассивных элементов  $R, L, C$  с линейной характеристикой. Состояние таких цепей описывается, как известно, системой алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами. Результаты измерений на столе представляют собой решение этой системы. Таким образом, расчетный стол, при надлежащем его исполнении, можно использовать для решения системы алгебраических уравнений и некоторых других математических задач. Происхождение этих задач не имеет значения, и

Для расчетов сложных электрических систем применяются специальные модели, так называемые расчетные столы. Расчетные столы значительно ускоряют анализ поведения систем и открывают новые эффективные возможности решения технических и научных задач как из области электротехники, так и из других областей знания. В статье дается краткое описание построенного в Энергетическом институте Академии наук СССР расчетного стола универсального назначения, работающего на переменном токе при частоте 400 Hz.

они могут относиться к любой области научного знания [Л. 2, 3, 4].

Укажем для примера на одно из возможных применений расчетного стола в технике, а именно в теории автоматического регулирования.

Проектирование и исследование устройств автоматического регулирования наиболее эффективно может быть проведено путем построения частотно-фазовых характеристик. В конечном счете это сводится к рассмотрению некоторой эквивалентной электрической цепи, находящейся под воздействием синусоидального напряжения переменной частоты. Эквивалентная электрическая цепь набирается на расчетном столе и выполняются требуемые измерения, причем частота питания сохраняется неизменной, а параметры схемы соответствующим образом изменяются. Такой метод нахождения частотно-фазовой характеристики представляет большие удобства для целей анализа.

Современные универсальные расчетные столы переменного тока представляют собой довольно сложные и дорогие установки. Тем не менее число их быстро растет. Преимущества, связанные с применением расчетных столов, оправдывают большие затраты на их сооружение.

Существующие в СССР расчетные столы питаются от источников нестабильной частоты и напряжения, в них не предусмотрена в должной мере централизация управления и измерения, так что обслуживание этих столов не может производиться одним оператором. Наличие нескольких наблюдателей и нестабильность источника питания приводят иногда к неточным результатам, для устранения которых требуется повторение измерений. Кроме того, действующие расчетные столы имеют узкое целевое назначение моделей электроэнергетических систем [Л. 5]. Этим назначением определяется количество и качество их элементов, недостаточное для универсального расчетного стола.

В начале 1947 г. в Энергетическом институте

Академии наук СССР была введена в эксплуатацию первая очередь нового расчетного стола переменного тока. Эта установка благодаря ряду усовершенствований, часть которых осуществлена в первой очереди стола, превосходит по своим качествам современные расчетные столы, построенные в Америке [Л. 6].

К числу таких усовершенствований относятся: точная стабилизация напряжения и частоты питания, размещение генераторных единиц в пределах досягаемости одного сидящего оператора, удобная кнопочная система вызова любого элемента схемы на измерительный комплект<sup>1</sup>, компактное коммутационное поле и др.

В проекте расчетного стола предусмотрены: 1) элементы с произвольно устанавливаемой нагрузочной характеристикой; 2) приборы для непосредственного измерения сдвига фаз между напряжениями или токами в любом месте схемы или фазы этих величин относительно общей оси отсчета; 3) генераторные элементы с автоматической регулировкой напряжения по величине и по фазе, и др. Эти устройства разрабатываются и будут вводиться в действие по мере их осуществления.

Настоящая статья имеет своей целью краткое описание действующей части расчетного стола, построенного в Лаборатории электросистем Энергетического института Академии наук СССР. Подробное описание стола, а также вопросы его использования предполагается изложить в отдельном сообщении.

**Общее описание расчетного стола и основные принципы его построения.** Расчетный стол имеет 14 источников переменного тока (генераторных единиц), изображающих генераторы или станции исследуемой электрической системы, и вмещает до 300 элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$  и др. для составления схем замещения трансформаторов, линий передачи и нагрузок системы. Такое количество генераторных единиц и элементов дает возможность воспроизвести на расчетном столе любую электроэнергетическую или иную сложную систему<sup>2</sup>.

Каждый элемент и каждая генераторная единица имеют на коммутационном поле свой двухпроводный штепсель, с помощью которого на поле гнезд набирается анализируемая схема. Напряжение каждой генераторной единицы раздельно регулируется по величине и по фазе. Заданные величины индуктивности, емкости или активного сопротивления элементов устанавливаются с помощью ключей.

При большом числе элементов расчетного стола важно уменьшить их размеры. С этой

целью частота<sup>3</sup> питающего тока выбрана равной 400 Hz, номинальное напряжение — 50 V и номинальный ток — 50 mA. Повышенная частота и малый номинальный ток позволили уменьшить размеры и вес индуктивных катушек, конденсаторов, трансформаторов, активных сопротивлений и др. Одновременно оказалось возможным использовать в расчетном столе стандартную слаботочную коммутационную аппаратуру, проверенную десятилетиями эксплуатационного опыта. Выбор малого номинального тока стал возможным лишь благодаря применению в расчетном столе прецизионных усилителей для измерения токов и напряжений.

Для удобства эксплуатации расчеты на столе выполняются в относительных единицах: номинальное напряжение 50 V и номинальный ток 50 mA приняты за единицу (100%), и все величины токов, напряжений, сопротивлений и т. д. выражаются в процентах от выбранных единиц. Единицей (100%) мощности соответственно является мощность 2,5 W, единицей сопротивления — 1 000  $\Omega$  и т. д. Расчет в относительных единицах облегчает работу на столе и переход от результатов измерений в набранной на столе цепи к анализируемой, в действительности существующей системе.

Все измерения на расчетном столе производятся одним комплектом измерительных приборов, установленным на пульте управления и подключаемым к любому элементу схемы с помощью реле. Комплект измерительных приборов состоит из вольтметра, амперметра и ваттметра, с помощью которого измеряется активная или реактивная мощность. Применение одного комплекта измерительных приборов для выполнения всех измерений повышает их точность и уменьшает вероятность ошибочных измерений.

Точность измерений на расчетном столе, если иметь в виду его применение для анализа электроэнергетических систем, в большинстве случаев должна быть несколько выше, чем точность определения параметров рассчитываемой системы, т. е. порядка 3—5%. Более жесткие требования предъявляются к столу при использовании его для решения других задач. Погрешности измерений на расчетном столе универсального назначения должны быть возможно меньше. Пределы здесь устанавливаются размерами и стоимостью всего устройства.

<sup>3</sup> Применение более высокой частоты, например 10 000 Hz, как это сделано в одном из последних американских расчетных столов [Л. 7], при большом количестве элементов и универсальном назначении стола, представляет значительные трудности. Опытный стол на 10 000 Hz, построенный в США, содержит всего 56 элементов при четырех генераторах. Этот новый расчетный стол, как видно из его описания, не имеет каких-либо особых технических или эксплуатационных достоинств по сравнению со столами на частоте 400—500 Hz. Стоимость нового стола оказалась приблизительно в два раза меньше (по оценке американских авторов). Целесообразность применения частоты выше 400—500 Hz для стола универсального назначения и с большим количеством элементов еще недостаточно выявилась и требует дальнейших исследований.

<sup>1</sup> Новейшие американские расчетные столы, описания которых появились в 1945—1946 гг. после разработки нашего проекта, также снабжены кнопочным вызовом [Л. 7, 8].

<sup>2</sup> С помощью метода аналогий на расчетном столе могут быть воспроизведены и другие физические системы (электромеханические, механические и т. д.).



Рис. 1. Пульт расчетного стола.

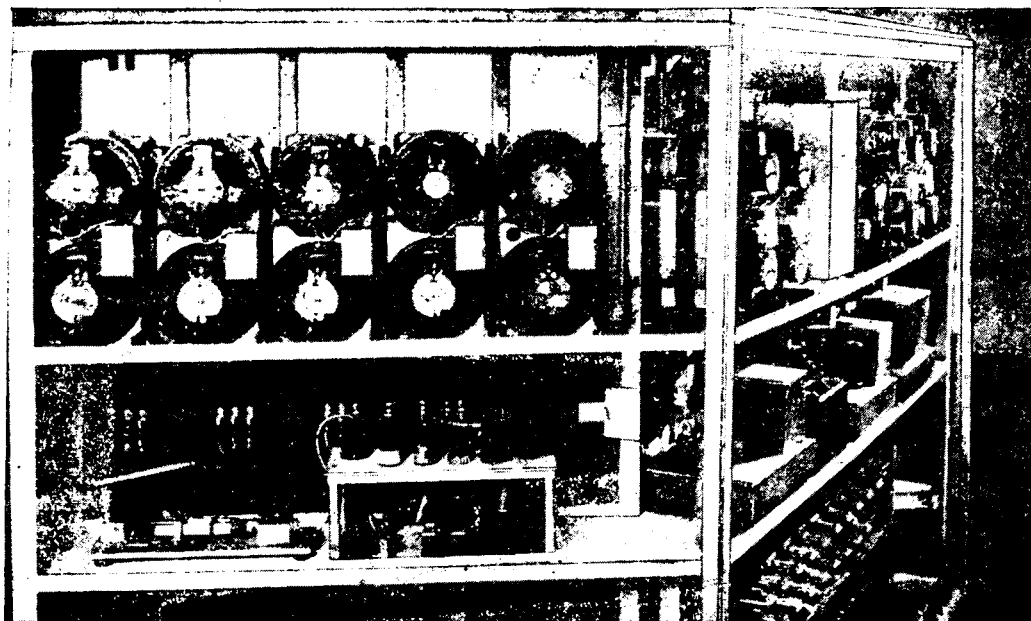


Рис. 2. Открытый пульт расчетного стола. Вид с задней стороны.

В построенном расчетном столе погрешности от паразитных параметров соединительных проводов, погрешности измерительных приборов, усилителей, шунтов и добавочных сопротивлений, отклонения сопротивления элементов от номинала и др. не превышают, взятые в отдельности, 0,3% от выбранных единиц. Исключением является изменение индуктивностей в зависимости от тока и потери в индуктивных катушках, превышающие указанную выше цифру. Отступление от принятой величины погрешности допущено для индуктивных катушек по соображениям экономики и необходимости удержать их размеры в разумных пределах.

Питание генераторных единиц расчетного стола производится от специального генератора

при напряжении 220 В. Величина напряжения и частота поддерживаются с точностью большей, чем 0,1%.

Для удобства оператора, работающего на столе, предусмотрена возможность понижения напряжения, подводимого к столу, ровно в 2 и 4 раза. Пониженное напряжение может потребоваться, например, при замерах токов короткого замыкания.

При компоновке расчетного стола было обращено внимание на удобство работы с ним и на максимальное укорочение линий связи между элементами, генераторными единицами, измерительным комплектом, с одной стороны, и коммутационным полем, с другой стороны. Все управление расчетным столом, автоматика для выбора



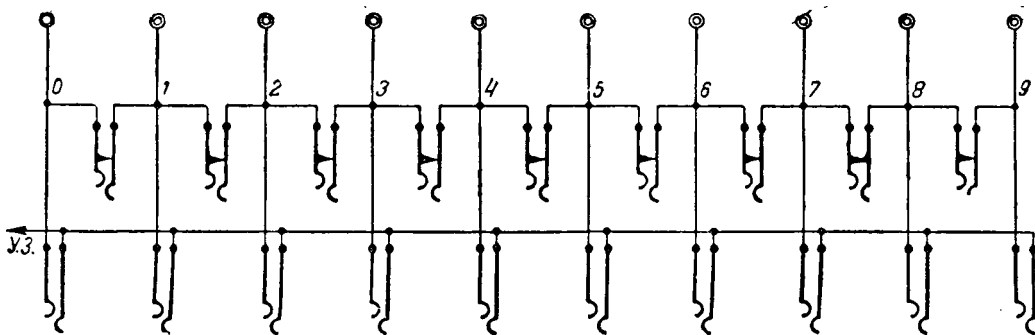


Рис. 3. Схема соединений одной секции поля гнезд.

места измерения в схеме и измерительные приборы расположены на пульте (рис. 1, 2). Там же помещены генераторные единицы, напряжение которых устанавливается оператором по величине и по фазе. Благодаря централизации органов управления и контроля, а также стабилизации источника питания, исключающей необходимость одновременных замеров в разных частях схемы, работа на столе может проводиться одним человеком. После того как заданная схема набрана на коммутационном поле и установлены требуемые величины входящих в схему элементов, оператор выполняет необходимые измерения, сидя за пультом. Оператор должен отойти от пульта только для внесения изменений в набранную схему.

Элементы расчетного стола размещены в 10 секциях несущего каркаса, в центре которого находится коммутационное поле. Несущий каркас установлен против пульта управления и измерения. Такое расположение обеспечивает кратчайшую длину линий связи и удобные подходы к любому элементу или коммутационному полю для оператора.

**Коммутационное поле.** Коммутационное поле состоит из поля гнезд и поля штепселей, служащих для набора исследуемой схемы.

Для облегчения набора схемы и упрощения коммутационного поля применены двухпроводные шнуры, двухпроводные штепселя телефонного типа и соответственно двухпроводные гнезда. Поле штепселей состоит из трехсот пронумерованных штепселей элементов, 14 штепселей генераторных единиц, 29 пар штепселей, закороченных и соединенных между собой попарно (перемычек), и двух выделенных однопроводных штепселей от измерительного комплекта.

Поле штепселей разделено на две части, расположенные над и под полем гнезд. Концы шнуров от штепселей разделаны на гребенках-шнуродержателях, расположенных в задней части коммутационного поля. К гребенкам-шнуродержателям подходят экранированные кабели от элементов и генераторных единиц.

Поле гнезд вмещает до 39 одинаковых секций. Каждая секция состоит из трех рамок с гнездами. Первая (нижняя) рамка секции имеет десять двухпроводных гнезд телефонного типа. Вторая (средняя) рамка секции содержит девять та-

ких же гнезд, расположенных над промежутками между гнездами нижней рамки. Третья (верхняя) рамка имеет десять нормальных однопроводных штепсельных гнезд, расположенных над гнездами нижней рамки. Схема соединения гнезд одной секции приведена на рис. 3. Девять гнезд средней рамки нормально замкнуты и соединены последовательно. Десять гнезд нижней рамки нормально разомкнуты и включены между точками соединения 0, 1, 2, 3... 9 и общим проводом — условной землей. Условная земля всех секций соединена между собой и выведена на измерительный комплект.

Электрические схемы можно рассматривать как ряд соединенных между собой цепочек из последовательно и параллельно включенных элементов. Это положение используется при наборе исследуемой схемы на поле гнезд. Последовательные элементы цепочки включаются в гнезда средней рамки. При вставлении штепселя в гнездо средней рамки цепь в гнезде разрывается и между точками соединения оказывается включенным элемент. Параллельные элементы цепочки включаются в гнезда нижней рамки и тем самым оказываются присоединенными между соответствующей точкой соединения 0, 1, 2, 3 и т. д. и общим проводом — условной землей. Для соединения цепочек между собой в точках разветвления пропускается одно гнездо (или несколько гнезд при нескольких ответвлениях) средней рамки, в которое включается один штепсель перемычки. Второй штепсель перемычки включается в первое гнездо средней рамки следующей секции, на которой подобным же образом собирается вторая цепочка и т. д. Генераторные элементы включаются в схему так же, как остальные ее элементы. Если количество элементов в цепочке превышает количество гнезд, имеющееся в секции, последнее гнездо секции соединяется при помощи перемычки с первым гнездом следующей секции, на которой продолжается набор остальных элементов цепочки. Подобный способ набора схемы легко осваивается в эксплуатации, удобен и нагляден.

Одиночные гнезда верхней рамки в каждой секции присоединены к узловым точкам 0, 1, 2, 3... 9 и служат для включения в любую из этих точек схемы упомянутых выше однопроводных штепселей, выведенных к измерительным приборам.



**Измерительный комплект.** Измерительный комплект состоит из трех измерительных приборов: амперметра, вольтметра и ваттметра, контрольной генераторной единицы, делителей напряжения, шунтов и ряда переключателей, собранных на двух вертикальных панелях слева и справа от центральной панели, предназначенной для измерительных приборов (рис. 1). В измерительный комплект входят также два усилителя — усилитель тока и усилитель напряжения.

Схема измерительного комплекта приведена на рис. 4. К измерительному комплекту подходят три шины, на которые подключается тот или иной элемент и два провода от двух выделенных штепселей коммутационного поля: один для измерения напряжения относительно любой точки схемы и другой — для измерения тока короткого замыкания любой точки схемы на общий провод.

Подключение нужного элемента или генераторной единицы к измерительным шинам производится с помощью релейной автоматики, путем набора трехзначного номера элемента на кнопочной станции, расположенной на пульте по правую руку от оператора. Кнопочная станция имеет три десятка кнопок для трех ступеней набора — первой, второй и третьей цифры трехзначного номера. Кнопки снабжены сигнальными лампочками, указывающими набранные цифры. При наборе номера с помощью наборных реле включается исполнительное реле соответствующего элемента или генераторной единицы. Исполнительное реле разрывает один провод от элемента или генераторной единицы и включает в разрыв две измерительные шины. Второй провод элемента присоединяется к третьей измерительной шине. С помощью специальной схемы из блокирующих и сбрасывающих реле осуществляется полная

блокировка от возможности одновременного включения двух элементов и автоматический сброс включенных ранее цифр набираемой и последующих декад.

Кнопочная система значительно упрощает подключение измерительного комплекта к элементам. Одновременно исключается необходимость в специальном поле ключей и подводке концов от элементов на пульт, что сильно удлинит бы кабели и внесло дополнительные паразитные емкости и сопротивления, увеличивающие погрешности расчетов на столе.

С измерительных шин напряжение подается через делитель напряжения на вход усилителя напряжения. Измеряемый ток подается на один из семи шунтов, падение напряжения с которого снимается на вход усилителя тока. На выход усилителя напряжения включен вольтметр и одна из двух обмоток ваттметра, на выход усилителя тока — амперметр и другая обмотка ваттметра.

Измерительные приборы выбраны электродинамической системы, как обладающие наибольшей точностью для измерения переменных токов. Конструктивное оформление приборов — профильного типа, со световым отсчетом.

Усилители стабилизированы применением отрицательной обратной связи [Л. 9]. Они являются усилителями мощности и имеют потребление на входе  $0,25 \text{ VA}$  при мощности на выходе порядка  $2 \text{ W}$ , достаточной для электродинамических приборов. Погрешность коэффициента усиления не превышает  $0,2\%$ , погрешность угла —  $20'$ . Силовое питание усилителей производится от шин  $400 \text{ Hz}$ ,  $220 \text{ V}$ , напряжение на которых стабилизировано, вследствие чего отпадает надобность в специальном стабилизаторе напряжения.

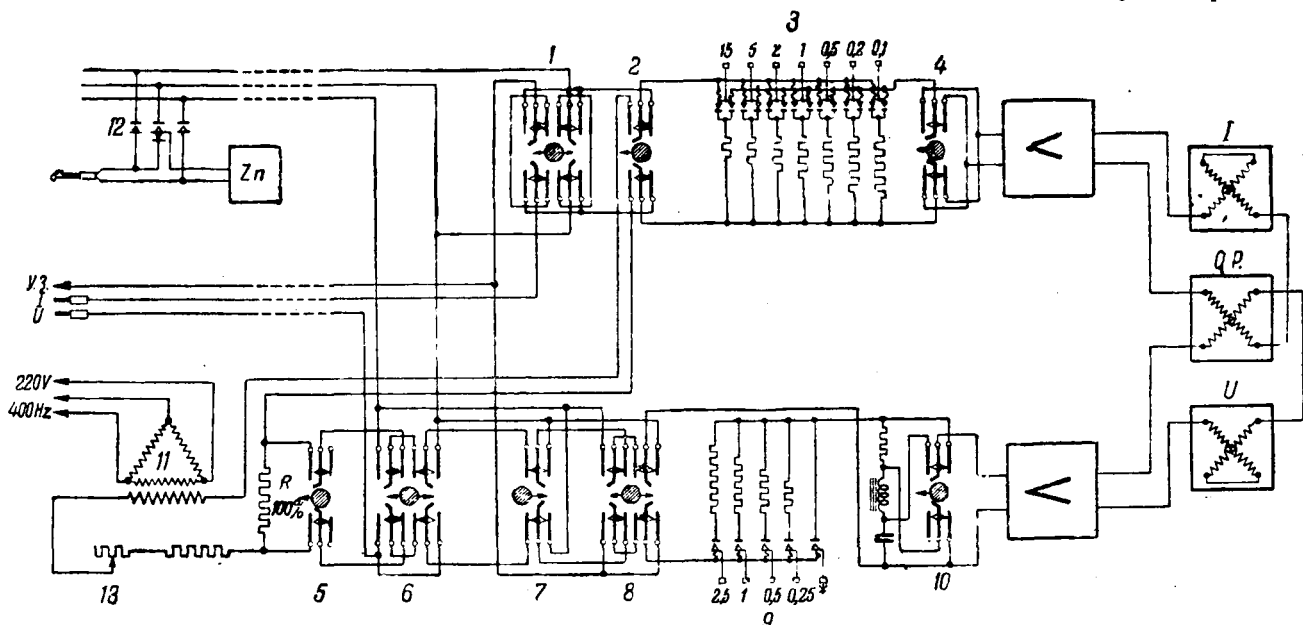


Рис. 4. Схема измерительного комплекта.

1—ключ для измерения тока через элемент или тока на условную землю из любой точки схемы, в которую включен штепсель тока на коммутационном поле; 2—ключи для измерения контрольного тока; 3—кнопки для переключения пределов тока; 4, 5, 6, 7 и 8—ключи для изменения фазы вектора тока на  $180^\circ$ ; измерения контрольного напряжения; напряжения между концами элемента и любой точкой схемы, в которую включен штепсель напряжения  $U$  на коммутационном поле; напряжения на элементе и напряжения между концами элемента и условной землей; 9—кнопки для переключения пределов напряжения; 10—ключ для изменения фазы вектора напряжения на  $90^\circ$ ; 11—фазорегулятор контрольного генератора; 12—исполнительное реле, подключающее элемент к измерительным шинам; 13—дополнительное регулируемое сопротивление.

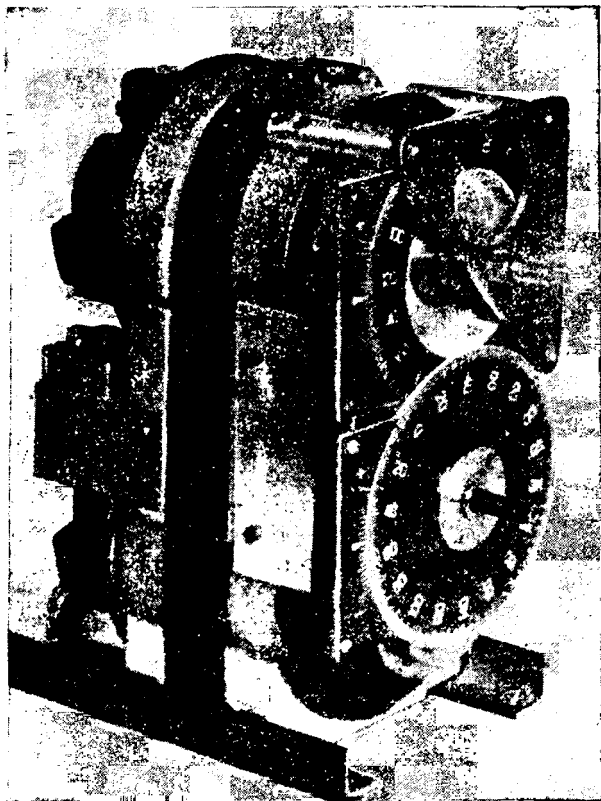


Рис. 5. Генераторная единица.

На панели переключений (рис. 1, справа от центральной вертикальной панели) расположены: кнопки 3 и 9 (рис. 4) с механической блокировкой для переключения пределов тока и напряжения, ключ 4 для изменения фазы вектора тока на  $180^\circ$ , ключ 10 для изменения фазы вектора напряжения на  $90^\circ$  при измерении реактивной мощности, ключи 5 и 2 для включения приборов на контрольное напряжение и ток, ключ 1 для измерения тока через элемент или тока на условную землю из любой точки схемы, в которую включен выделенный штепсель тока 1 на коммутационном поле, три ключа для измерения напряжения: ключ 7—между концами элемента, ключ 8—между одним или другим концом элемента и условной землей и ключ 6—между одним или другим концом элемента и любой точкой схемы, в которую включен выделенный штепсель напряжения  $U$  на коммутационном поле. Все ключи снабжены электрической блокировкой, которая исключает возможность одновременных подключений.

Шкалы измерительных приборов градуированы в процентах. Пределы шкал тока имеют множители 15—5—2—1—0,5—0,2—0,1. Пределы шкал напряжения имеют множители 2,5—1—0,5—0,25. Потребление делителя напряжения равно 0,15 мА, т. е. 0,3% от номинального тока. Падение напряжения на шунтах составляет 0,1 В, т. е. 0,2% от номинального напряжения.

Контрольная генераторная единица (рис. 1, слева от центральной вертикальной панели) представляет собой градуированный фазорегулятор

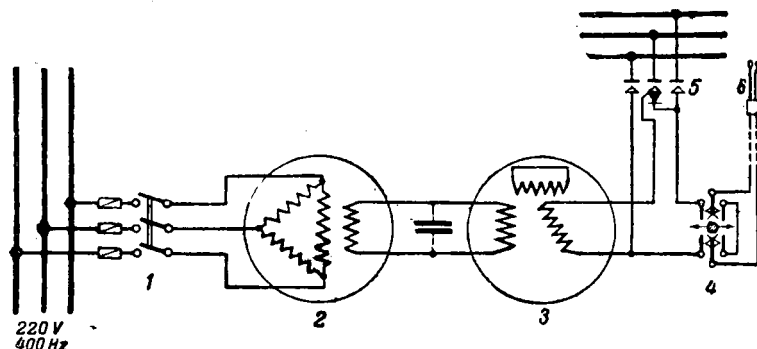


Рис. 6. Схема генераторной единицы.

1—выключатель; 2—фазорегулятор генераторной единицы; 3—потенциал-регулятор генераторной единицы; 4—трехпозиционный ключ; 5—исполнительное реле, включающее генераторную единицу на измерительные шины; 6—двухпроводный штепсель на поле штепселей.

11 (рис. 4), питающийся от общих шин генераторных единиц, на выходе которого включены последовательно калиброванное нагрузочное сопротивление  $R = 100\%$  и добавочное регулируемое сопротивление 13. Контрольная генераторная единица предназначена для контроля измерительных приборов; для измерения ваттметром проекций вектора тока или напряжения на любую заданную ось, устанавливаемую фазорегулятором; для измерения фазы компенсационным методом и других вспомогательных измерений.

**Генераторные единицы.** На фиг. 5 показана одна из 14 генераторных единиц. Она состоит из фазорегулятора и потенциал-регулятора, снабженных шкалами для установки фазы и величины напряжения. Схема генераторной единицы показана на рис. 6. Генераторные единицы расположены на пульте по семь с каждой стороны (рис. 1) и легко доступны для управления. Фазорегуляторы генераторных единиц питаются от общих трехфазных шин 400 Hz при нормальном напряжении 220 В или пониженном в два—четыре раза (110 или 55 В). Каждая генераторная единица имеет свой трехполюсный выключатель на входе и трехпозиционный ключ на выходе. Среднее положение ключа — генераторная единица отсоединена от схемы. Второе положение — генераторная единица включена в схему. Третье положение — генераторная единица отключена и клеммы со стороны исследуемой схемы замкнуты накоротко. Выход каждой генераторной единицы соединен кабелем со своим двухпроводным штепселем на коммутационном поле.

Для компенсации реактивного тока, потребляемого потенциал-регулятором, параллельно выходу фазорегулятора включена емкость.

Фаза напряжения плавно регулируется в пределах от 0 до  $360^\circ$ , при точности отсчета по шкале порядка  $10'$ . При изменении фазы вектора напряжения величина его изменяется не более чем на 0,2%.

Напряжение на выходе генераторной единицы плавно регулируется от 0 до 250% (от 0 до 125 В при нормальном напряжении питания 220 В) с точностью отсчета по шкале порядка 0,5%.

**Элементы  $R$ ,  $L$ ,  $C$ .** Все элементы  $R$ ,  $L$ ,  $C$  монтируются на одинаковых шасси. На передней

панели шасси установлены ключи, с помощью которых набирается нужная величина сопротивления, индуктивности или емкости. Большинство элементов  $RL$  (рис. 7) — комбинированные, т. е. каждый из них содержит индуктивности и активные сопротивления, которые с помощью ключа, расположенного в центре панели, могут включаться последовательно или параллельно.

Сопротивления и индуктивности разделены на декады. Каждая декада состоит из четырех сопротивлений или индуктивностей с отношением  $1:2:2:5$  и соответственно — четырех ключей на передней панели. Отношение  $1:2:2:5$  дает возможность набрать любую цифру декады при минимальном количестве сопротивлений или индуктивностей и при минимальном количестве их разновидностей, что имеет существенное значение при массовом изготовлении большого количества индуктивностей и сопротивлений.

Для удобства работы на расчетном столе все индуктивности и сопротивления выражаются в процентах от номинального значения индуктивного или активного сопротивления, равного  $1000 \Omega$  при частоте  $400 \text{ Hz}$ .

Учитывая применения стола к расчетам электрических систем, элементы  $RL$  изготовлены пяти типов, с разными наборами сопротивлений и индуктивностей (см. таблицу).

Данные элементов  $R, L, C$

	Количество	Полная величина сопротивления, %	Наименьшая ступень регулировки, %	Количество сопротивлений в элементе
Элементы $L$	14	$X = 410$	1	10
Элементы $RL3$	20	$\{R = 11$	0,1	8
		$\{X = 11$	0,1	8
Элементы $RL4$	50	$\{R = 61$	0,1	11
		$\{X = 61$	0,1	11
Элементы $RL6$	35	$\{R = 1110$	1	12
		$\{X = 1000$	10	8
Элементы $RL7$	10	$\{R = 11100$	10	12
		$\{X = 11100$	10	12
Элементы $C$	20	$X = 111$	0,1	12

Максимальные значения длительных токов и напряжений определены в 125% ( $62,5 \text{ V}$ ) для напряжения и 500% ( $250 \text{ mA}$ ) для тока. Малые сопротивления или индуктивности (до 20%) рассчитаны по максимальному длительному току (500%). Большие сопротивления или индуктивности (более 20%) рассчитаны по максимальному длительному напряжению (125%).

Активные сопротивления — провололочные, намотаны на дюралевые или текстолитовые трубки диаметром 25 мм и длиной 105 мм. Обмотка бифилярная или бифилярно-секционированная для сопротивлений  $1000 \Omega$  и выше.

Подгонка сопротивлений производилась с точностью 0,1% от номинала для сопротивлений до 100% и 0,1% от величины сопротивления — для остальных сопротивлений. Реактанс активных сопротивлений не превышает 0,1% при частоте  $400 \text{ Hz}$ , что соответствует постоянной времени около  $4 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$ .



рис. 7. Элементы  $RL$

Сопротивления, легко отъемные и взаимозаменяемые, устанавливаются на патрубках, завальцованных в шасси. Трубки с сопротивлениями расположены вертикально для улучшения условий охлаждения. Для уменьшения емкости сопротивлений металлические трубки, на которых они намотаны, изолированы от шасси прокладками.

При конструировании индуктивных катушек мы стремились получить большую постоянную времени при минимальных размерах и обеспечить простоту массового изготовления. Поэтому индуктивности выполнены в виде отдельных катушек на железе с воздушным зазором. Применение катушек с отпайкой было отвергнуто вследствие сложности изготовления и подгонки отпайки. Магнитопроводы всех катушек как маленьких, так и больших собираются из закрытых Ш-образных штамповках одного размера с зазором в среднем керне. При таком исполнении магнитопровода отпадает необходимость в сложной конструкции для стяжки железа, обеспечивающей неизменность зазора. Часть катушек снабжена магнитопроводами из молибденового пермаллоя толщиной 0,28 мм, в остальных применена обычная трансформаторная сталь толщиной 0,35 мм.

Индуктивные катушки собраны на прессшпанных кольцах с прямоугольной просечкой для магнитопровода, в стаканах из листового железа, являющихся одновременно креплением катушки и ее экраном. До установки в стаканы катушки пропитаны битумом.

Постоянная времени для катушек от 5% и выше получилась не менее  $1 \cdot 10^{-2} \text{ sec}$  (добротность при частоте  $400 \text{ Hz}$   $Q \approx 25$ ). Для катушек с магнитопроводом из пермаллоя соответственно  $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ sec}$ . (или  $Q \approx 32$ ).

Изменение индуктивности в зависимости от тока выходит за пределы погрешностей, выдерживаемых в других элементах расчетного стола. При особо точных измерениях предусматривается пользование поправочной таблицей. Наибольшее изменение индуктивности катушек с сердечником

из пермаллоя при изменении тока от нуля до максимально допустимого не превышает 4%. Для катушек с сердечником из трансформаторной стали наибольшее изменение индуктивности (при изменении тока в тех же пределах) не превышает 8%.

Элементы *C* собраны из слюдяных конденсаторов. Угол потерь составляет практически ничтожную величину. Смонтированы эти элементы на таких же шасси, как и остальные элементы. Основные данные элементов *C* приведены в таблице.

**Питание расчетного стола.** Питание расчетного стола производится от трехфазного синхронного генератора 400 Hz, 220 V, 3 000 об/мин, вращаемого двигателем постоянного тока. Напряжение генератора строго симметрично и имеет синусоидальную форму. Агрегат 400 Hz снабжен центробежным ограничителем скорости.

Все управление агрегатом питания, включая автотрансформатор для понижения напряжения в два и в четыре раза, автоматизировано и производится с пульта расчетного стола.

Для поддержания частоты с точностью 0,1% применен регулятор частоты<sup>4</sup>, имеющий в качестве эталона камертон с частотой собственных колебаний 400 Hz. Камертон снабжен двумя катушками. Одна из них питается от шин генератора и заставляет камертон совершать вынужденные колебания с частотой этого генератора. Фаза этих колебаний зависит от величины и знака разности между частотой собственных колебаний камертона и частотой генератора. Во второй катушке камертона возбуждается переменная э. д. с., синфазная со скоростью колебаний камертона, которая подается на специальную электронную схему. При отклонении частоты генератора в ту или другую сторону от собственной частоты колебаний камертона на выходе схемы появляется напряжение того или иного знака. Это напряжение подается на сетку электронной лампы, шунтирующей обмотку возбуждения двигателя. Тем самым соответственно повышается или понижается скорость двигателя. Камертонный регулятор показал себя за время годовой работы как весьма надежное устройство.

Для грубого визуального контроля частоты на пульте расчетного стола установлен тахоуказатель дистанционного тахометра, датчик которого связан с валом синхронного генератора. Для точного контроля частоты применена электронная индикаторная лампа (6E5), расположенная на пульте и включенная в схему регулятора частоты. Эта лампа служит индикатором резонанса камертона и реагирует на ничтожные отклонения от резонансной частоты.

Для стабилизации напряжения применен электронный регулятор, действующий по принципу сравнения выпрямленного стабилизируемого напряжения с напряжением на потенциометре, ток в котором устанавливается по нормальному эле-

менту. Разность напряжений между напряжением на шинах и напряжением на потенциометре усиливается и подается на дополнительную обмотку возбуждения возбuditеля синхронного генератора.

Для контроля стабильности напряжения на пульте установлен прибор, показывающий упомянутую выше разность напряжений. Шкала прибора градуирована в процентах и по нему непосредственно видно отклонение напряжения от заданной величины. Этот же прибор используется для контроля тока потенциометра по нормальному элементу, для чего предусмотрена переключающая кнопка и реостат точной регулировки тока потенциометра.

Питание потенциометра производится от сухой батареи 100—200 V, напряжение которой при работе меняется незначительно вследствие малости тока, потребляемого потенциометром.

Эксплуатация регулятора напряжения показала, что он полностью удовлетворяет своему назначению, обеспечивая стабильность напряжения в пределах 0,1%.

Стабильность частоты и напряжения питания, синусоидальная форма кривой напряжения, строгая симметрия фаз и весьма малые падения напряжения в цепях питания обеспечивают необходимую точность расчетов и удобство работы на столе.

Описанный расчетный стол находится в эксплуатации уже более года. За это время на столе выполнен ряд расчетов электроэнергетических систем и решены некоторые другие задачи. Опыт эксплуатации показал, что новый расчетный стол представляет собой надежное и удобное в работе устройство.

Универсальность стола позволяет применять его для решения задач в различных областях науки и техники.

В сооружении расчетного стола принимали активное участие кандидат техн. наук В. И. Горюшкин и инж. Н. В. Паутин, выполнившие ряд проектно-расчетных работ. Большую работу по постройке стола выполнил коллектив мастерских лабораторий.

#### Литература

1. С. А. Лебедев, П. С. Жданов. Устойчивость параллельной работы электрических систем. Госэнергоиздат, 115 стр., 1934.
2. И. С. Брук. О некоторых методах механического решения системы линейных алгебраических уравнений. Электричество, стр. 17, № 11, 1945.
3. И. С. Брук. Об устойчивости электрических систем. Электричество, стр. 9, № 9, 1945.
4. N. H. Meyers and N. R. Schultz. A. C. Network Analyser, GER, т. 49, стр. 34. September, 1946.
5. Д. И. Азарьев. Модель электрических систем. Электричество, стр. 17, № 5, 1947.
6. R. G. Lorraine, H. P. Kuehni. A New A. C. Network Analyser. El. Eng. Tr., т. 57, стр. 67, 1938.
7. I. D. Ryder, W. B. Boast. A New Design for the A. C. Network Analyser. El. Eng. T., т. 65, стр. 674, 1946.
8. W. W. Parker. Dual A. C. Network Calculator El. Eng. May, стр. 182, 1945.
9. С. С. Чугунов. Прецизионный усилитель для измерений переменных токов с малым потреблением. ЖТФ, т. XII, вып. 6, стр. 292, 1942.

<sup>4</sup> Описание регулятора будет дано в отдельной работе.

# Расчет электрических цепей с учетом гистерезиса

Инж. Л. А. БЕССОНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

**Аналитическое выражение гистерезисной петли.** Вопросом аналитического выражения гистерезисной петли, имеющим теоретическое и практическое значение, занималось много исследователей. Однако, на русском языке обзора этих работ нет. Опубликованы лишь отдельные работы русских авторов. Ввиду широкого применения цепей с насыщенными дросселями этот вопрос в настоящее время стал актуальным. Целесообразно перед описанием нашего метода, примененного автором при расчетах, вкратце рассмотреть все известные автору принципиально различные методы, появившиеся до сих пор, с точки зрения применимости их к аналитическому расчету электрических цепей, содержащих дроссели со сталью, с учетом гистерезиса и указать области, где эти методы уже применены.

Еще в 1887 г. Релей [Л. 1] предложил выразить гистерезисную петлю в области слабых полей (приблизительно до 0,5 Ое) в виде двух уравнений (пользуемся обозначениями Релея):

$$J = \alpha H + \beta H'^3 \times \\ \times \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{H}{H'} \right)^2 \right\}$$

и

$$J = \alpha H + \beta H'^2 \times \\ \times \left\{ -1 + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{H}{H'} \right)^2 \right\}.$$

Первое уравнение соответствует движению от  $H'$  к  $-H'$ , второе — движение от  $-H'$  к  $H'$ . Здесь  $\pm H'$  — крайние значения напряженности поля;  $H$  и  $J$  — соответственно текущие значения напряженности поля и намагниченности,  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты.

Дан критический обзор различных методов аналитического выражения гистерезисных петель с точки зрения применимости их к расчету электрических цепей, содержащих дроссели с учетом гистерезиса. Излагаются два новых метода автора и дана методика расчета таких цепей.

Эти выражения совпадают с действительной петлей лишь в точках  $\pm H'$ , а в промежуточных точках приближены.

В предположении, что  $H = H' \cos \theta$  ( $\theta = \omega t$ ), после преобразований получаем:

$$J = \alpha' \cdot \cos \theta + \beta' \left\{ \cos \theta + \frac{1}{2} \sin^2 \theta \right\} \text{ при изменении } \theta \text{ от } 0 \text{ до } \pi;$$

$$J = \alpha' \cos \theta + \beta' \left\{ \cos \theta - \frac{1}{2} \sin^2 \theta \right\} \text{ при изменении } \theta \text{ от } \pi \text{ до } 2\pi;$$

где  $\alpha H' = \alpha'$  и  $\beta H'^2 = \beta'$ .

Разложив  $\sin^2 \theta$  в ряд синусов, Релей получает окончательное выражение в виде:

$$J = (\alpha' + \beta') \cdot \cos \theta + \beta' \times \\ \times \left\{ \frac{4}{3\pi} \cdot \sin \theta - \frac{4}{15\pi} \cdot \sin 3\theta - \frac{4}{105\pi} \cdot \sin 5\theta - \dots \right\}.$$

Способ Релея пригоден только лишь к релейской области кривой намагничивания, применения к расчету электрических цепей со сталью способ не нашел.

Мюллендорф в 1907 г. [Л. 2] показал в предположении синусоидального изменения напряженности поля ( $H = H_m \cdot \sin \omega t$ ), что индукция приближенно может быть выражена следующим образом:

$$B = B_{\max} \cdot \frac{\sin (\omega t - a_1 \cdot \cos \omega t)}{\cos (a_2 \cos \omega t)}.$$

Здесь  $a_1$  и  $a_2$  — постоянные петли, которые практически лежат в интервале от 0,2 до 0,8.

Область изменения  $\omega t$  от  $0^\circ$  до  $\frac{\pi}{2}$  соответствует ветви VI—I—II петли (рис. 1), интервал от  $\frac{\pi}{2}$  до  $\pi$  соответствует ветви II—III; от  $\pi$  до  $\frac{3}{2}\pi$  соответствует ветви III—IV—V; и от  $\frac{3}{2}\pi$  до  $2\pi$  соответствует ветви V—VI.

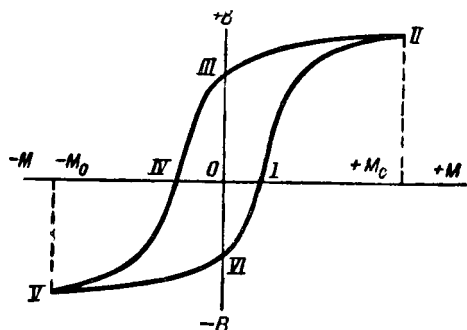


Рис. 1.

Постоянные  $a_1$  и  $a_2$  меняются при переходе от одной петли к другой и для конкретной петли определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{при } H=0 (\omega t=180^\circ), B=B_r= \\ = B_{\max} \cdot \frac{\sin(180^\circ + a_1)}{\cos(-a_2)}; \end{aligned}$$

$$\text{при } B=0 H=H_c=H_{\max} \sin \omega t$$

$$\text{или } \omega t = \arcsin \frac{H_c}{H_{\max}}$$

и это значение  $\omega t$  подставляется в выражение

$$\frac{\sin(\omega t - a_1 \cdot \cos \omega t)}{\cos(a_2 \cos \omega t)} = 0.$$

Степень приближения петли, описываемой двумя уравнениями Мюллendorфа, к действительной петле гистерезиса, как признает сам Мюллendorф, невысока. Он пытался применить свои формулы к вычислению потерь на гистерезис, однако полученное им выражение не интегрировалось точно и не нашло практического применения. При расчете электрических цепей со сталью применить уравнения Мюллendorфа трудно, так как неизвестны аналитические выражения коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  через  $B_{\max}$ ,  $H_c$ ,  $H_{\max}$ .

Томсон в 1910 г. [Л. 3] предложил выразить петлю гистерезиса в виде гармонического ряда фигур Лиссажу, причем он предлагал разложение на фигуры Лиссажу производить не аналитически (в зависимости от  $B_{\max}$ ,  $H_c$ ,  $H_{\max}$ ), а графически. Такое разложение для  $n$  разных петель давало  $n$  рядов, коэффициенты которых не были аналитически связаны. Насколько известно, в расчете электрических цепей со сталью практического применения способ Томсона не нашел.

В. Аркадьев в 1913 г. [Л. 4] заменил петлю гистерезиса эллипсом и ввел понятие комплексной магнитной проницаемости для вычисления потерь на гистерезис.

Миттельштрассом [Л. 22] был предложен способ определения консумптивной  $\rho'_m$  и консервативной  $\rho''_m$  частей комплексной магнитной проницаемости  $\mu$ , которые определялись в предположении синусоидального изменения напря-

женности поля из основных гармоник консумптивной и консервативной частей индукции. Определение  $\rho'_m$  производится по площади петли проницаемости, а определение  $\rho''_m$  производится по площади гистерезисной петли, построенной в координатах  $B$  и  $\sqrt{H_0^2 - H^2}$ .

Вюршмидт [Л. 5] и Оллендорф [Л. 6] для вычисления потерь на гистерезис также предложили заменить петлю эллипсом. Такая замена с точки зрения вычисления потерь на гистерезис приводит к цели и имеет большое теоретическое значение, однако она может применяться к расчету цепей со сталью лишь при малых индукциях.

Еще в 1874 г. Больцман предложил заменить обычный закон Гука, в котором не учитывается зависимость напряжения в данный момент от напряжений в предшествующие моменты, более общим законом — законом упругости Больцмана:

$$\gamma(t) = \alpha x(t) + \int_{-\infty}^t \varphi(t - \tau) x(\tau) d\tau,$$

где  $\gamma$  — тензор деформаций;  $x$  — тензор напряжений;  $\alpha$  — тензор констант упругости;  $t$  — время;  $\tau$  изменяется в пределах от  $-\infty$  до  $t$ . Интеграл в правой части уравнения учитывает деформации от напряжений, действовавших до момента времени  $t$ .

Аналогично закону Больцмана, Вито Вольтерра [Л. 7] в начале текущего столетия предложил выразить зависимость индукции в данный момент  $B(t)$  не только в виде функции от напряженности только в данный же момент, но и от напряженности в предыдущие моменты ( $-\infty < \tau < t$ ). Эта зависимость называется законом магнитного последствия Вольтерра:

$$B(t) = f[H(t)] + \int_{-\infty}^t F[\mu(t) - \tau H(\tau)] d\tau.$$

Интеграл в правой части дает зависимость  $B(t)$  от напряженности в предыдущие моменты. Леви-Чивита [Л. 7] показал, что функция  $F$ , входящая под интеграл, должна быть нелинейной. Несмотря на теоретическую правильность закона магнитного последствия Вольтерра, практическая его применимость ограничена следующим: характер экспериментальной нелинейной функции  $F$  неизвестен, кроме того, присутствие интеграла в правой части чрезвычайно увеличило бы расчетные трудности, если бы даже вид функции  $F$  и был известен. По утверждению В. И. Коваленкова [Л. 8, стр. 137] до сих пор нет расчетов даже самых простейших цепей со сталью, основанных на применении закона Вольтерра.

Впервые Акулову удалось составить уравнение кривой намагничивания для кристаллов и поликристаллов ферромагнетика, исходя из закона магнитной анизотропии.

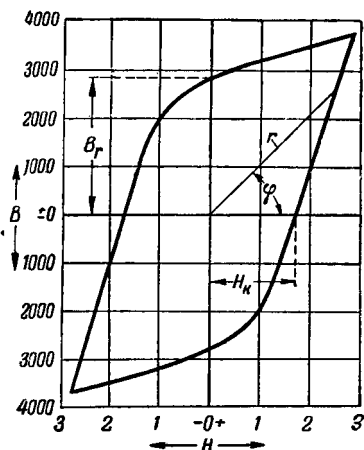


Рис. 2.

Для практических расчетов цепей со сталью оно неприменимо, так как дает математическое описание не петли, а S-образной кривой.

Далее рассмотрим различные по форме, но в принципе родственные методы Гробе [Л. 10] и Саммерса [Л. 11], с одной стороны, и Кауэра [Л. 12], — с другой. Первые два автора поступили следующим образом: поскольку, в предположении  $B = B_{\max} \cos \omega t$  напряженность  $H = f(t)$  есть периодическая функция, симметричная относительно оси абсцисс, то она может быть выражена рядом Фурье:

$$H = h \{ \cos(\omega t + \gamma_1) + \eta_3 \cdot \cos(3\omega t + \gamma_3) + \eta_5 \cdot \cos(5\omega t + \gamma_5) + \dots \},$$

где  $h$  — амплитуда первой гармоники;  $\eta_n$  — отношение амплитуды  $n$ -ой гармоники к амплитуде первой;  $\gamma_n$  — начальные фазы. Взяв почти одинаковую сталь и почти одинаковые  $B_{\max}$  (15 380 и 15 500 G), они независимо друг от друга разложили петлю в ряд до 9-й гармоники включительно. Результаты были, естественно, очень схожи.

Для сравнения истинной петли с расчетной Гробе взял четыре гармоники ряда, но все же расчетная петля несколько пульсировала вокруг истинной. Гробе применил свой ряд к вычислению потерь на гистерезис, что ему удалось легко сделать, так как все члены  $\int H dB$  при интегрировании дают нуль, кроме произведения первых гармоник. Кауэр поступил несколько иначе, он принял  $H = H_m \cdot \cos \omega t$  и в ряд Фурье разложил  $B$ .

Практически ценность этих двух родственных методов ограничивается тем, что зависимость  $h$ ,  $\eta_n$  и  $\gamma_n$  от  $B_{\max}$ ,  $H_c$  и  $B_r$  не поддается аналитическому выражению, так что для описания  $n$  гистерезисных петель, соответствующих различным  $B_m$ , надо иметь  $n$  рядов. Практического применения к расчету цепей со сталью сделано не было.

Секвенц [Л. 13] предложил два способа описания гистерезисной петли в полярных координатах.

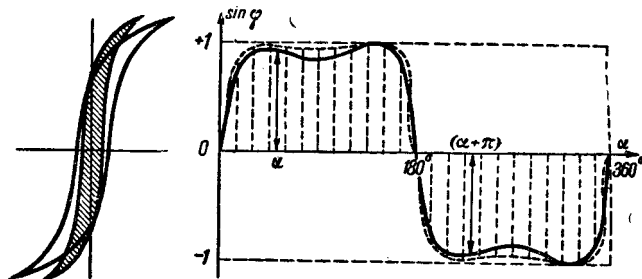


Рис. 3.

натах и один способ описания в прямоугольных координатах. Первый из способов описания петли в полярных координатах относится к слабым полям, когда радиус-вектор пересекает петлю только в одной точке (рис. 2). В этом случае

$$H = m_h \cdot r \cdot \cos \varphi \text{ и } B = m_b \cdot r \cdot \sin \varphi.$$

Здесь  $m_h$  и  $m_b$  — масштабы,  $r$  — радиус-вектор, а  $\varphi$  — полярный угол.

Радиус-вектор, являясь функцией полярного угла  $\varphi$ , может быть выражен в виде ряда из четных гармоник:

$$\begin{aligned} r &= \sum_{n=0, 2, 4, 6, \dots} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) = \\ &= \sum_{n=0, 2, 4, 6, \dots} C_n \cdot \sin(n\varphi + \psi_n), \end{aligned}$$

где

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \text{ и } \operatorname{tg} \psi_n = \frac{A_n}{B_n}.$$

Коэффициенты ряда  $C_n$  и начальные фазы  $\psi_n$  при переходе от одной петли к другой меняются. Анализ этой сложной зависимости Секвенцем не проводится. Способ удачно был им применен для вычисления потерь на гистерезис: площадь петли

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} r^2 d\varphi = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left[ \sum C_n \sin(n\varphi + \psi_n) \right]^2 d\varphi = \\ &= \pi \cdot C_0^2 + \frac{\pi}{2} \sum_{n=2, 4, 6, \dots} C_n^2. \end{aligned}$$

Вообще этот способ, пожалуй, наиболее удачный из всех, предлагавшихся до сих пор, однако область его применения — лишь слабые поля, а главный недостаток опять тот, что нет аналитической зависимости коэффициентов ряда от  $B_m$ .

Второй способ Секвенца описания петли в полярных координатах (рис. 3) заключается в следующем.

Если обозначить через  $r_{\min}$  — наименьший радиус-вектор петли, а через  $r_{\max}$  — наибольший

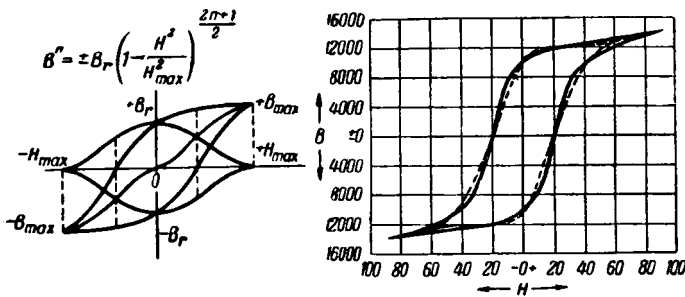


Рис. 4.

радиус-вектор, соответствующий вершине петли, то

$$r = r_{\min} + (r_{\max} - r_{\min}) \cdot \sin^2 \alpha,$$

где  $\alpha$  — некоторый вспомогательный угол, изменяющийся от 0 до  $2\pi$ . Тогда синус полярного угла  $\varphi$  может быть разложен в ряд по синусам и косинусам этого вспомогательного угла  $\alpha$  —

$$\sin \varphi = \sum_{n=1,3,5,\dots} (A_n \cdot \cos n\alpha + B_n \cdot \sin n\alpha),$$

а дальше  $H$  и  $B$  определяются так же, как и в предыдущем случае, именно:

$$H = m_n \cdot r \cdot \cos \varphi \quad \text{и} \quad B = m_n \cdot r \cdot \sin \varphi.$$

Разложение  $\sin \varphi$  в ряд проводится для каждого конкретного случая следующим образом: так как  $r_{\min}$  и  $r_{\max}$  известны и для каждой точки на петле известны  $r$  и  $\varphi$ , то, подставляя  $r$ ,  $r_{\min}$  и  $r_{\max}$  в уравнение  $r = r_{\min} + (r_{\max} - r_{\min}) \cdot \sin^2 \alpha$ , можно вычислить  $\alpha$  и по точкам построить кривую, имеющую вспомогательный характер,  $\alpha = f(\varphi)$ , от которой нетрудно перейти к кривой  $\sin \varphi = f_1(\alpha)$ . Последняя кривая и разлагается в ряд Фурье. Особенность зависимости  $\sin \varphi = f_1(\alpha)$  такова, что коэффициенты ряда убывают медленно. Сам Секвенц в своей статье разлагает  $\sin \varphi$  в такой ряд для двух петель, однако практического его применения не приводит, даже более того, он считает, что этот способ имеет, повидимому, лишь теоретическую ценность.

Способ Секвенца [Л. 13] описания петли в прямоугольных координатах основывается на предложении Шварца [Л. 14] выразить петлю в виде суммы двух кривых, одной основной, ординаты которой равны полусумме ординат петли, и другой вспомогательной, имеющей вид, изображенный на рис. 4, слева. Для вспомогательной кривой Секвенц принимает следующее уравнение:

$$B'' = B_r \left( 1 - \frac{H^2}{H_{\max}^2} \right)^{\frac{2n+1}{2}},$$

где  $B''$  — ордината вспомогательной кривой;  $B_r$  — остаточная индукция,  $H$  — текущая, а  $H_{\max}$  — максимальная напряженность поля;  $n = 9$ .

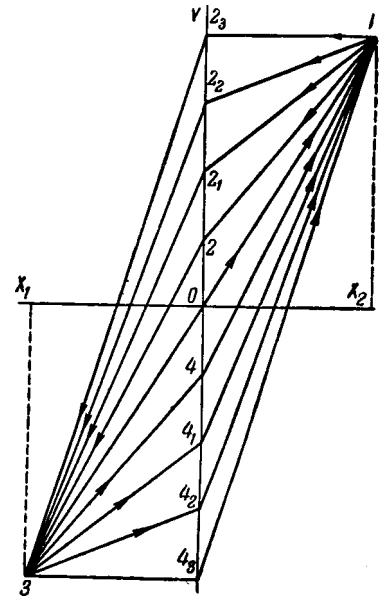


Рис. 5.

На рис. 4, справа, пунктиром нанесена петля, получающаяся от наложения на основную кривую вспомогательной кривой. Основную кривую Секвенц рекомендует выражать по Келселю. Как видно из рисунка, совпадение получается удовлетворительным. Каких-либо расчетных применений этой формулы Секвенц не приводит.

В. И. Коваленков и Мачинский [Л. 8, 15] предложили кривую намагничивания с учетом гистерезиса выразить в виде  $y = \varphi_n[f(x)]$ , где  $f(x)$  есть начальная кривая намагничивания, а  $\varphi_n$  — функция, которая выражает изменение кривой при каждом изменении направления течения процесса, причем эта функция  $\varphi$  при каждом повороте алгебраически одна и та же. Насколько известно из литературы, ими рассмотрены случаи, когда как начальная кривая намагничивания, так и вся гистерезисная петля представлены в виде прямолинейных отрезков.

Так, например, для случая, изображенного на рис. 5 [заимствован из Л. 8, стр. 146], начальная кривая намагничивания запишется двумя уравнениями:

$$v_1 = f(x) \text{ — прямая } 01$$

и

$$-y'_1 = f(-x) \text{ — прямая } 03.$$

Уравнение же самого шлейфа, составленного из четырех прямолинейных отрезков, выразится в виде четырех уравнений:

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 + \sigma \cdot (y_{1x_2} - y_1) && \text{для участка } 1-2_3, \\ -y'_2 &= y'_1 - \sigma \cdot (y'_{1x_1} - y'_1) && \text{для участка } 2_3-3, \\ -y'_3 &= y'_1 + \sigma \cdot (y'_{1x_2} - y'_1) && \text{для участка } 3-4_3, \\ y_3 &= y_1 - \sigma \cdot (y_{1x_2} - y_1) && \text{для участка } 4_3-1. \end{aligned}$$



Каждое из этих четырех уравнений является уравнением прямой:

$y_{1x_2}$  — значение функции  $y_1$  при  $x = x_2$ ;

$y'_{1x_1}$  — значение функции  $y'_1$  при  $x = x_1$  и т. д.;

$\sigma$  — так называемая функция поворота. В нашем случае она равна по величине единице, знак же ее, уже учтенный в этих уравнениях, зависит от знака и направления изменения  $x$ . В указанных работах авторами не рассматривались случаи, когда  $\sigma$  нелинейно или когда  $\sigma$  зависит от времени, а также не проводилось каких-либо расчетов цепей со сталью с учетом гистерезиса. Авторы отмечают, что прямолинейно-кусочная аппроксимация петли не претендует на математическую строгость и на физическое соответствие нелинейным гистерезисным явлениям.

Два новых метода приближенного аналитического выражения кривой намагничивания с уче-

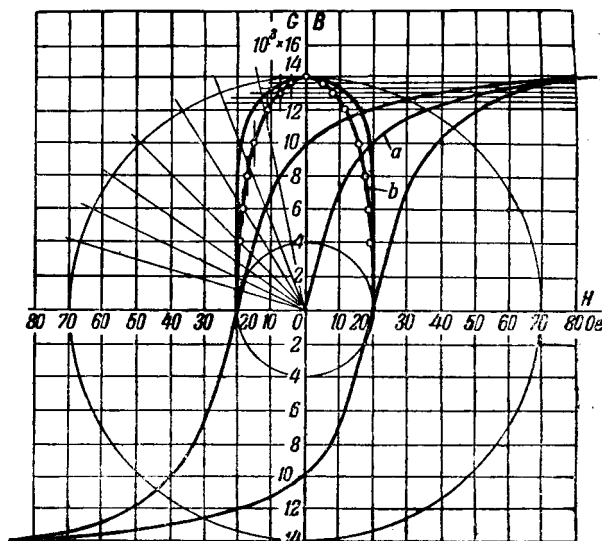


Рис. 6.

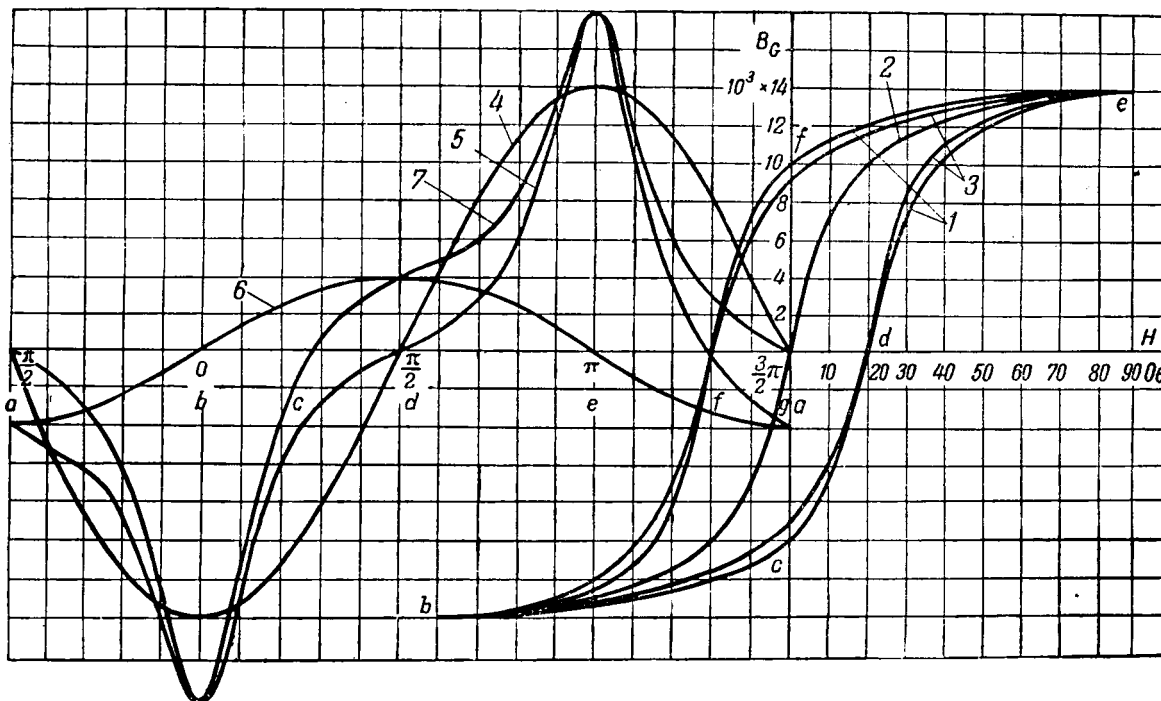


Рис. 7.

том гистерезиса, предлагаемые автором, заключаются в следующем.

Обозначим через  $i_{cp} = f(B)$  аналитическое выражение средней кривой намагничивания, под которой понимается не кривая, ординаты которой равны полусумме соответствующих ординат петли (как у Шварца и у Секвенца), а кривая, абсциссы которой равны полусумме соответствующих абсцисс петли. Тогда для получения петли к средней кривой намагничивания должны прибавляться соответствующие абсциссы  $i_{дон} = f_1(B)$ , величина которых зависит от  $B$ , а знак от направления про-

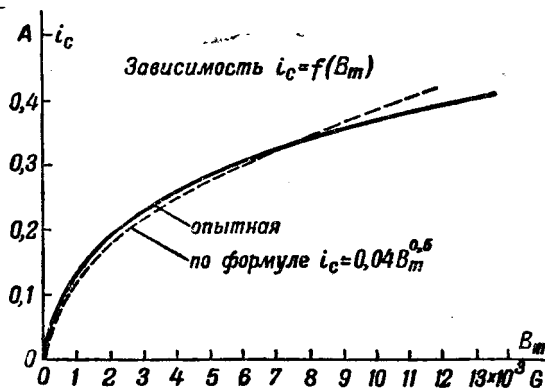


Рис. 8.

цесса. Если представить кривую  $i_{\text{дон}} = f_1(B)$  графически в осях  $B, i_{\text{дон}}$ , то это будет кривая, по форме близкая к эллипсу (рис. 6), а семейство кривых  $i_{\text{дон}} = f_1(B)$  при различных  $B_m$  даст семейство кривых, по форме также близких к эллипсам. Тогда в случае постоянного тока имеем

$$i = i_{cp} + i_{\text{дон}} = f(B) \pm i_c \cdot \sqrt{1 - \dots}$$

В случае же переменного тока как индукция, так и ток являются периодическими функциями и могут быть разложены в ряд Фурье. Также можно разложить в ряд и  $i_{\text{дон}}$ .

$$i_{\text{дон}} = \sum_{n=1}^m i_n \cdot \cos(n\omega t + \varepsilon_n).$$

Так как слагающие высших гармоник, входящие в  $i_{\text{дон}}$ , малы по сравнению с полным током  $i = f(B) + i_{\text{дон}}$ , то мы можем пренебречь высшими гармониками в разложении  $i_{\text{дон}}$ , оставив только первую гармонику, амплитуду которой примем равной коэрцитивной силе  $i_c$ .

Таким образом, имеем:

$$i = f(B) + i_c \cdot \cos(\omega t + \varepsilon),$$

где  $\varepsilon$  — фаза индукции относительно напряжения на входе цепи.

На рис. 7 справа даны три кривых (1, 2, 3). Кривая 1 это кривая той же петли, которая приведена в статье Секвенца, внутри этой петли построена кривая 2  $i_{cp} = f(B)$ . В результате наложения получается гистерезисная петля (кривая 3). Наложение производится так: к абсциссам кривой 2 прибавляются ординаты кривой 6, соответствующие одному и тому же моменту времени. По оси абсцисс, слева, на том же рисунке отложено время и построено четыре кривых:

кривая 4 —  $B = B_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ , кривая 5 — ток безгистерезисной составляющей, кривая 6 — гистерезисный ток  $i_c \cos(\omega t + \varepsilon)$ ;  $\left(\varepsilon = -\frac{\pi}{2}\right)$

и кривая 7 — полный ток, равный сумме безгистерезисного и гистерезисного тока. На оси абсцисс отмечены точки  $a, b, c, d, e, f$ , соответствующие одноименным точкам на петле. Совпадение истинной петли с расчетной, получающейся в результате наложения, можно считать удовлетворительным.

$i_c$  является функцией от  $B_m$ . Пусть эта функция  $\varphi(B_m)$ . Имея опытно снятое семейство гистерезисных петель, можно построить кривую

$i_c = \varphi(B_m)$ . Оказывается, что эта кривая поддается простому аналитическому выражению  $i_c = \gamma B_m^n$  с практически достаточной точностью (рис. 8). Здесь  $\gamma$  — коэффициент;  $B_m$  — максимальная индукция; степень  $n$  равна 0,3–0,5.

Итак

$$i = f(B) + \varphi(B_m) \cdot \cos(\omega t + \varepsilon)$$

или

$$i = f(B) + \gamma B_m^n \cdot \cos(\omega t + \varepsilon).$$

Вид  $f(B)$ , как и всегда при аналитическом расчете цепей со сталью, выбирается таким, чтобы получающиеся нелинейные дифференциальные уравнения для цепей, подлежащих расчету, можно было проинтегрировать точно или приближенно. В случае точной интеграции функция  $f(B)$  часто выражается в виде гиперболического синуса (Оллендорф [Л. 16] и Осовец [Л. 17]), в случае приближенной интеграции хорошие результаты дает аппроксимация в виде полинома (Фельдбаум [Л. 18] и Гусаков [Л. 19]) вида:

$$f(B) = \alpha B + \beta B^3,$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, которые следует определять по методу наименьших квадратов [Л. 20, 21]. Согласно этому методу коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  должны быть выбраны таким образом, чтобы сумма квадратов разностей  $[\alpha B_n + \beta B_n^3 - f(B_n)]$  была наименьшей, т. е. чтобы был минимум выражения

$$S = \sum [\alpha B_n + \beta B_n^3 - f(B_n)]^2;$$

здесь  $B_n$  — индукция в том диапазоне кривой, для которого производится аппроксимация, а  $f(B_n)$  — ток  $i_{cp}$  при  $B = B_n$ .

Для вычисления условий минимума необходимо, чтобы

$$\frac{dS}{d\alpha} = 0 \text{ и } \frac{dS}{d\beta} = 0,$$

что приводит к уравнениям:

$$\frac{dS}{d\alpha} = \sum_{n=1}^N 2[\alpha B_n + \beta B_n^3 - f(B_n)] \cdot B_n = 0,$$

$$\frac{dS}{d\beta} = \sum_{n=1}^N 2[\alpha B_n + \beta B_n^3 - f(B_n)] \cdot B_n^3 = 0.$$

После преобразований получаем два расчетных уравнения, линейных относительно  $\alpha$  и  $\beta$ ,

$$\alpha \cdot \sum B_n^3 + \beta \cdot \sum B_n^4 - \sum f(B_n) \cdot B_n = 0$$

и

$$\alpha \sum B_n^4 + \beta \sum B_n^6 - \sum f(B_n) \cdot B_n^3 = 0.$$

**Методика расчета цепей со сталью с учетом гистерезиса.** Ввиду того, что заранее до проведения расчета неизвестны  $B_m$ , а на переменном токе и  $\epsilon$ , которые будут в какой-либо цепи при приложении к ней напряжения, расчет цепей со сталью с учетом гистерезиса может производиться методом последовательных приближений.

Вначале в дифференциальное уравнение цепи подставляется ток в виде  $i = f(B)$  и уравнение интегрируется. После интегрирования можно найти первое приближение для  $B_m$  (и для  $\epsilon$ ), затем производится интегрирование дифференциального уравнения цепи с учетом гистерезисной составляющей тока (интегрирование можно назвать „гистерезисной“). После интегрирования находят второе приближение для  $B_m$  (и  $\epsilon$ ) и сравнивают с первым. Если требуется большая точность, то производится корректировка результатов гистерезисного интегрирования при новых  $B_m$  и  $\epsilon$ .

Рассмотренная выше методика была применена к расчету сравнительно сложной цепи, состоящей из сопротивления, емкости, индуктивности рассеяния и дросселя со сталью. Результаты расчетов были сравнены с осциллограммой. Точность в определении амплитуд гармоник тока была порядка 5%, фазы гармоник тока были определены с точностью 5—7°.

В заключение автор считает своим долгом отметить, что при разработке темы им были получены весьма ценные советы и указания от члена-корр. АН СССР К. А. Круга и проф. К. М. Поливанова.

## Литература

1. Lord Rayleigh. Notes on Electricity and Magnetism. Philosophical Magazine, 23—III, p. 225, 1887.
2. E. Müllendorf. Erfahrungsformel für die Hysteresekurve, ETZ, Bd. 28, S., 361, 1907.
3. S. P. Thomson. Hysteresis loops and Lissajous figures, Electrician, v. 65, p. 1058, 1910.
4. В. К. Аркадьев. Ж. Р. Ф. О., стр. 312, № 45, 1913.
5. Joseph Wurchmidt. Zeit. für Physik, B. 29, S. 175, 1924.
6. Franz Ollendorf. A. f. E., B. 14, S. 431, 1925.
7. Vito Volterra. Leçons sur les fonctions de lignes, 1913.
8. В. И. Коваленков. Основы теории магнитных цепей. Изд. АН СССР, 1940.
9. Francis Bitter. Introduction to the Ferromagnetism, London, 1937.
10. Gustav Grobe. Ein analytischer Ausdruck für die Hystereseschleife. ETZ, № 23, S. 559, 1934.
11. C. M. Summers. Mathematical Expression of a saturation curve. GER, 36, p. 182, 1933.
12. W. Cauer. Wirksame Permeabilität und Eisenverlusten in Blechen und Drähten. A. f. E., Bd. 15, S. 398, 1925.
13. H. Sequenz. Beiträge zur Gleichung der Hystereseschleife, A. f. E., № 24, S. 387, 1935.
14. J. Schwarz. Détermination des pertes par hysteresis dans un échantillon de métal. RGE, XXII, p., 617, 1927.
15. В. И. Коваленков и Мачинский. Методы математического описания явлений последействия. А и Т, 1939.
16. Franz Ollendorf. Zur qualitativen Theorie gesättigter Eisendrosseln, A. f. E., № 21, S. 6, 1928.
17. С. М. Осовец. Дроссели насыщения, диссертация, ВЭИ, 1945.
18. А. А. Фельдбаум. Магнитный усилитель напряжения. А и Т., № 5, 1939.
19. В. Д. Гусаков. Об индуктивности дроссельной катушки подмагниченной постоянным током. Электричество, № 19, 1935.
20. А. Н. Крылов. Лекции о приближенных вычислениях, изд. АН СССР, 1933.
21. Я. С. Безикович. Приближенные вычисления, ОНТИ, 1937.
22. К. А. Mittelstrass. A. f. E., № 18, S. 595, 1927.
23. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы, в металлах. ОНТИ 1934.



### О потерях электроэнергии в связи с погрешностями приборов учета у бытовых потребителей

Инж. Г. В. СЕРБИНОВСКИЙ и инж. Э. С. ИОХВИДОВ

Многие энергосистемы продают электроэнергию непосредственно индивидуальным бытовым потребителям, у которых установлено очень большое количество счетчиков. Было решено проверить возможные погрешности в работе этих счетчиков и их влияние на величину общесистемных потерь энергии.

Точность работы счетчиков 2-го класса, включенных в цепь без измерительных трансформаторов, должна не выходить за пределы допустимой погрешности  $\pm 2,5\%$  при условии, что нагрузка на счетчик находится в пределах от 5 до 125% номинального тока счетчика, а напряжение на клеммах счетчика поддерживается равным номинальному. Подавляющее большинство счетчиков, установленных у индивидуальных бытовых потребителей, имеет номинальный ток 5 А и номинальное напряжение 120 и 127 В. Вместе с тем, нагрузка многих счетчиков в отдельные часы суток значительно превышает 5 А, а величина напряжения у потребителей во многих случаях ниже номинального напряжения счетчика. В лаборатории электросчетчиков Энергосбыта Мосэнерго было произведено исследование работы обычных квартирных счетчиков в условиях перегрузки их по току и пониженного напряжения.

Исследованию были подвергнуты счетчики наиболее распространенных в Москве типов. По всем исследованным типам счетчиков были сняты семейства кривых зависимости погрешности счетчика от перегрузки по току при различных напряжениях на клеммах счетчика. Кривые снимались по сравнению с эталонными приборами при нормальной частоте. На базе полученных опытных кривых по каждому типу счетчиков было построено семейство кривых для условного «среднего» квартирного счетчика, учитывающее процентное соотношение количеств счетчиков разных типов в Москве. Это семейство кривых показано на рис. 1.

Как видно из кривых рис. 1, обычные счетчики в условиях пониженного напряжения и большой перегрузки работают с недопустимо большой отрицательной погрешностью, достигающей до 30% при нагрузке порядка 300% от номинальной и понижении напряжения ниже номинального на 40%. Такие большие погрешности являются

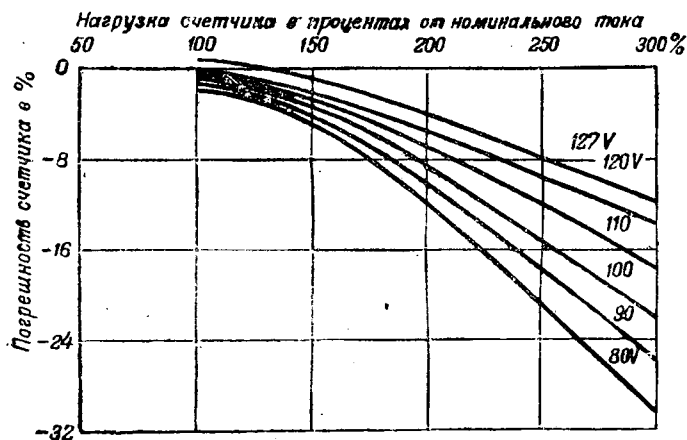


Рис. 1. Погрешности условного счетчика в зависимости от нагрузки при различных напряжениях.

результатами резкого возрастания так называемого «токового торможения» счетчика с ростом нагрузки и сложных взаимодействий в магнитных цепях катушки напряжения счетчика, обусловленных его конструктивными особенностями, практически не позволяющими создать счетчик с допустимой степенью точности учета при произвольно широком изменении нагрузки и напряжения.

Интересно подсчитать для условий Москвы величину недоучтенной энергии вследствие перегрузки счетчиков и пониженного напряжения. Подобный подсчет может быть произведен только по средним данным. Поэтому исследование и расчеты были проведены по следующему методу: 1) определялась средняя величина напряжения на клеммах счетчиков у потребителей и 2) фактически имеющиеся перегрузки счетчиков; 3) по совокупности данных, указанных в пп. 1 и 2, подсчитывалась величина энергии, полезно отдаваемой бытовым потребителям Москвы, но неучитываемой счетчиками.

Определение среднего напряжения на зажимах счетчиков у потребителей. Для определения размеров истинной погрешности счетчиков необходимо определить режим напряжения на зажимах счетчика. Было решено по возможности точнее определить среднее напряжение, которое

в расчете должно быть применено ко всем счетчикам Москвы. Главным в исследовании является совмещенное воздействие на погрешность счетчика пониженного напряжения и перегрузки, так как наилучшее напряжение у потребителей сопутствует часам пик нагрузки. Поэтому исследованы были напряжения, имеющиеся у потребителей в часы вечернего максимума нагрузки. Для определения среднего напряжения на клеммах счетчика были обработаны данные замеров напряжения в различных элементах распределительной сети, а именно: на сборках низкого напряжения в трансформаторных помещениях, на концах вводных кабелей, на зажимах домовых вводов и в оконечных точках внутридомовых сетей.

Для этого было построено семейство кривых зависимости погрешности среднего счетчика от напряжения при разных нагрузках. Перестроенные таким образом кривые показаны на рис. 2.

Как видно из кривых, зависимость величины погрешности счетчика от напряжения почти прямолинейна. Поэтому величина среднего напряжения во всех элементах сети вычислялась как частное от деления суммы произведений величин напряжения на количество элементов, имеющих это напряжение, на общее количество замеренных элементов (сборок, вводов).

$$E_{cp} = \frac{E_1 \cdot n_{E_1} + E_2 \cdot n_{E_2} + E_3 \cdot n_{E_3} + \dots}{n_{E_1} + n_{E_2} + n_{E_3} + \dots}$$

По данным средних напряжений, определенных во всех элементах, по вышеприведенной формуле были определены размеры средних величин падения напряжения во всех звеньях сети от сборки в трансформаторном помещении до зажимов квартирного счетчика, т. е. падение напряжения во вводном кабеле или воздушной линии, во вводной опайке в дом и во внутридомовой сети от ввода до счетчика.

Средние величины падения напряжения подсчитывались сопоставлением средних напряжений в началах и концах линий.

Исходя из рассчитанного среднего напряжения на сборке низкого напряжения в трансформаторном пункте и средних падений напряжения во всех элементах сети, стало возможным рассчитать среднее напряжение на зажимах квартирного счетчика Москвы. Оно было рассчитано, исходя из схемы, показанной на рис. 3.

Падение напряжения до среднего ввода кабеля было принято равным половине среднего падения напряжения во всем кабеле, а падение напряжения от ввода до среднего (в схеме домовой сети) счетчика было принято равным половине среднего падения напряжения во внутридомовой сети.

Напряжение на зажимах условного квартирного счетчика Москвы получилось равным 112,1 V.

Для проверки правильности рассчитанного среднего напряжения было произведено сравнение полученных результатов с другими имеющимися данными, прежде всего с данными официальных годовых отчетов Московской кабельной сети. Сравнение показало, что по всем элементам расчетной схемы расчетные напряжения получались выше действительных.

Еще более высокую разницу между расчетными данными и действительностью дало сравнение результатов расчета с данными замеров, произведенных Энергосбытом в апреле 1947 г. По данным замеров на большом числе случайных вводов среднее напряжение на вводе в дом получилось равным 109,2 V, в то время как по расчету оно получилось равным 114,8 V.

Сравнение убедительно показало, что данные расчета напряжения на зажимах среднего счетчика получились завышенными по сравнению с действительно имеющимся средним напряжением у потребителей. Поэтому потери от погрешности счетчиков, рассчитанные исходя из этого напряжения, получатся несколько меньше действительных, что должно служить запасом достоверности расчета.

Исходя из данных расчета и приведенных выше сопоставлений из семейства кривых среднего условного счетчика, была выбрана для дальнейших расчетов кривая, соответствующая напряжению 110 V, как наиболее близкому к расчетному.

Учет перегруженных счетчиков. Единственные данные, по которым можно судить о нагрузке счетчиков, — это

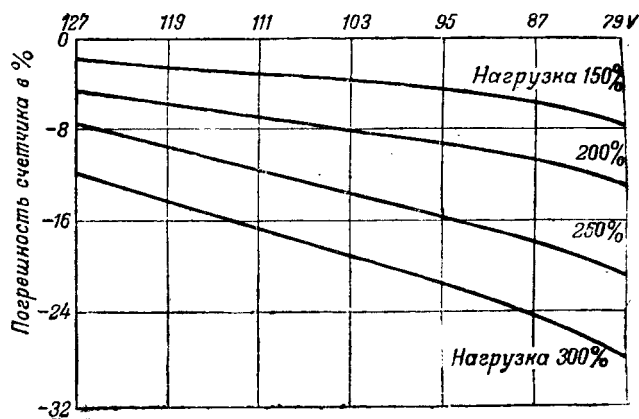


Рис. 2. Погрешности условного счетчика в зависимости от напряжения при различных нагрузках.

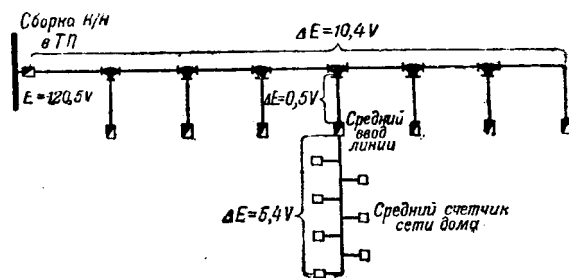


Рис. 3. Схема для вычисления напряжения на клеммах счетчика у среднего индивидуального бытового потребителя Москвы.

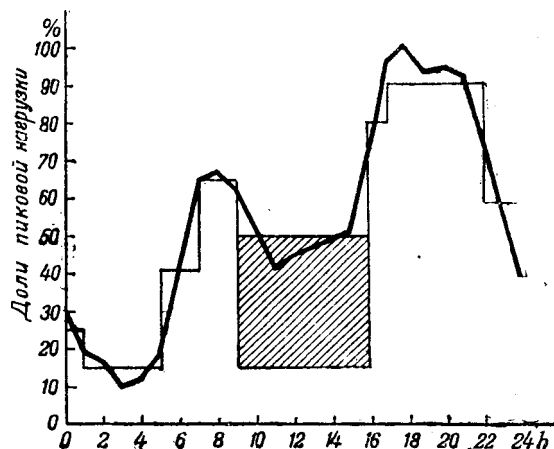


Рис. 4. Типовой суточный график нагрузки средней квартиры Москвы в декабре 1946 г.

ежемесячные расходы энергии, записываемые контролерами Энергосбыта.

Для расчетов были использованы имевшиеся в Энергосбыте типовые графики нагрузки крупных жилых массивов, снятые регистрирующими приборами в декабре, причем были отобраны графики, не имеющие в своем составе нагрузки магазинов, мастерских и других сопутствующих бытовым потребителям нагрузок. Из графика жилого массива была также исключена круглосуточная нагрузка домовых котельных, насосных и других коммунальных потребителей. Подобный расчетный график изображен на рис. 4.

Как видно из рисунка, этот график вполне соответствует имеющимся в литературе графикам бытовых потребителей и логическим заключениям о размере бытовой нагрузки в разные часы суток у потребителей, пользующихся частично нагревательными приборами.

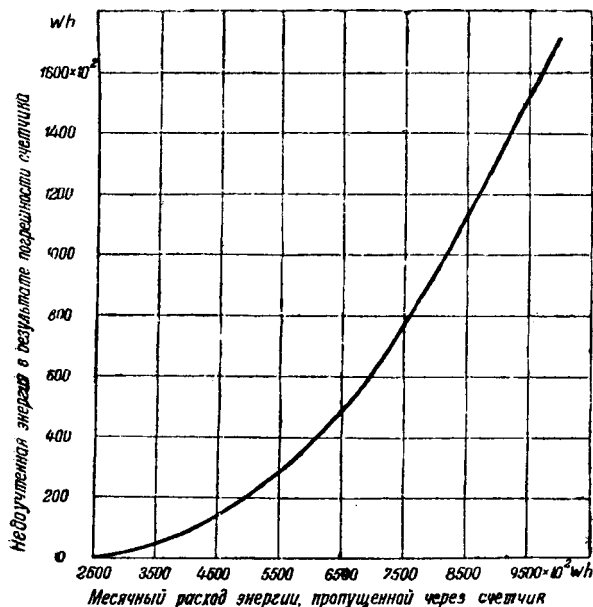


Рис. 5. Расчетная кривая абсолютной отрицательной погрешности пятиамперного счетчика в зависимости от месячного расхода энергии, пропущенной через счетчик.

Для удобства расчета график был заменен ступенчатой кривой (рис. 4) с разделением всего графика на 8 зон. Ордината каждой зоны графика была подсчитана как среднеарифметическая ординат зоны извилистого графика.

Далее, принимая максимальную нагрузку равной 5—7, 5—10—12, 5—15 и 20 В и расчетное напряжение 110 В, подсчитали соответствующую токовую нагрузку по каждой зоне, потребляемую нагрузку в ваттах, суточные и расчетные месячные расходы энергии потребителями.

Данные расчета показали, что расход энергии порядка 2 500 гектоваттчасов в месяц соответствует нормальной 100%-ной нагрузке счетчика в вечерний максимум и недогрузке счетчика в остальные часы суток, т. е. работе счетчика в пределах допустимой погрешности. Более высокие месячные расходы энергии соответствуют работе счетчика в определенные часы суток с перегрузкой и, следовательно, как видно из кривых погрешности, значительным отрицательным погрешностям.

Следует отметить, что принятие пограничной цифры расхода энергии в 2 500 гектоваттчасов приводит к значительному занижению общих результатов расчета, так как в рассматриваемом графике нагрузка в светлые (дневные) часы суток принята 56% от пиковой (вечерней), т. е., как это было указано выше, график предусматривает довольно широкое использование нагревательными приборами (иначе объяснить значительную дневную нагрузку в квартире нельзя). В то же время очень большое число потребителей пользуется для целей нагрева газовыми приборами. Нагрузка у таких потребителей в дневные часы суток должна быть близкой к нулю, так же как и глубокой ночью. Если учесть такой дневной провал нагрузки, показанный на рис. 4 заштрихованной зоной, то пограничный с перегрузкой счетчика месячный расход энергии снизится до 2 000 гектоваттчасов. Однако ввиду отсутствия достаточно обоснованных данных о количествах потребителей, не пользующихся электронагревом, для дальнейших расчетов пограничный месячный расход энергии был оставлен равным 2 500 гектоваттчасов.

После того, как рассчитали амперную нагрузку счетчика по каждой зоне графика при разных заданных максимальных нагрузках, определили процент перегрузки счетчика в каждой зоне. Затем, пользуясь кривой погрешности, определили процент отрицательной погрешности счетчика для каждой нагрузки и каждой зоны, и абсолютные величины погрешности.

Результаты расчетов позволили построить кривую зависимости абсолютной величины месячной погрешности счетчика от месячного расхода энергии, показанную на рис. 5.

Расчет суммарных потерь энергии от погрешности счетчиков. Для подсчета суммарной величины коммерческих потерь энергии потребовалось произвести анализ расхода энергии всеми индивидуальными бытовыми потребителями Москвы за декабрь 1946 г. Для ускорения работы были рассмотрены месячные расходы энергии за декабрь 1946 г. только по 10% потребителей. Счета потребителей были взяты выборочно по разным районам города — в центре и на окраинах города. По каждому участку потребители рассматривались без всякой выборки, в порядке их записи в книгах контролеров.

Результаты обработки счетов показали, что из рассмотренных потребителей 40,8% оказались имеющими расход энергии выше, чем 2 500 гектоваттчасов в месяц. Счетчики у этих потребителей в отдельные часы суток работали в режиме перегрузки. По 34,1% счетчиков расход энергии свидетельствовал о перегрузке счетчика в отдельные часы свыше, чем на 150%. Эти цифры показывают, что защита счетчиков от перегрузки организована еще весьма недостаточно.

Для того чтобы убедиться в том, что рассмотренные 10% счетов достаточно верно отражают общую картину у всех потребителей, было произведено сравнение по среднему расходу энергии на один счетчик. Суммарный расход энергии по рассмотренным счетам был поделен на количество рассмотренных счетов и результат деления был сопоставлен с частным от деления суммарного отпуска электроэнергии всем индивидуальным бытовым потребителям города в декабре на общее количество квартирных счетчиков. Величины среднего расхода энергии, приходящегося на один счетчик по 10% и по всем 100% потребителей, почти точно сошлись. Это дало право распространить результаты исследования части счетов на всех потребителей.

Затем свели в таблицы счета с разными месячными расходами энергии и, пользуясь кривой рис. 5, определили размер абсолютной отрицательной погрешности счетчиков по отдельным группам счетов и по всем рассмотренным счетам за декабрь 1946 г.

Сравнивая реализацию энергии бытовыми потребителями в декабре с реализацией в другие месяцы года и учитывая изменение графика нагрузки бытовых потребителей по месяцам, подсчитали годовые коммерческие потери энергии происходящие от погрешности квартирных счетчиков.

Результаты подсчетов оказались весьма существенными. Достаточно указать, что для условий декабря коммерческие потери от отрицательной погрешности квартирных счетчиков получились равными 0,67% от отпуска энергии с шин всех станций Мосэнерго и 7,34% от величины реализации энергии бытовыми потребителями. Расчет показал, что в течение года система недоучитывает десятки миллионов отпущенных потребителям киловаттчасов и несет убытки на многие миллионы рублей. Эти данные преуменьшены из-за принятия за основу слишком высокого среднего напряжения у потребителей и графика с большим процентом дневной нагрузки. Истинную величину коммерческих потерь энергии от погрешности квартирных счетчиков по режиму декабря следует принять близкой к 1% от отпуска энергии с шин станций.

Однако, если даже остановиться на более чем скромных результатах изложенного исследования, то и в этом случае полученные погрешности весьма значительны для энергосистем и энергокомбинатов самостоятельно продающих энергию индивидуальным бытовым потребителям, а также для коммунальных хозяйств городов, перепродающих энергию индивидуальным потребителям.

**Заключение.** Изложенные выше результаты требуют проведения ряда мероприятий, направленных к изжитию выявленных коммерческих потерь энергии. Мероприятия эти должны заключаться в следующем: 1) уделить значительно больше внимание мероприятиям по поддержанию у потребителей нормального напряжения; 2) широко внедрить установку у счетчиков тепловых реле (описано в статье Г. В. Сербиновского, «Электрические станции», № 6, 1946), защищающих счетчик от больших перегрузок; 3) проводить разукрупнение учета энергии там, где через

один счетчик снабжается энергией несколько квартир; 4) поставить перед Министерством электропромышленности вопрос о расширении выпуска десятиамперных счетчиков, так как неизбежный дальнейший рост бытового потребления электроэнергии делает явно необходимой установку таких счетчиков в квартирах.

Одновременно следует рассмотреть вопрос об изменении стандарта на счетчики электрической энергии в сторону уменьшения номинального напряжения квартирных счетчиков с 127 до 115—110 В.

Исследование работы приборов учета следует распространить и на системы объединенного учета и на приборы учета на промышленных предприятиях, а также на счетчики, установленные для контроля энергии, проходящей по отдельным элементам энергосистемы.

Целесообразно, например, исследовать вопрос о соответствии коэффициентов трансформации трансформаторов напряжения номинальным напряжениям счетчиков, исходя из существующих напряжений на шинах распределительных устройств. Также следует рассмотреть вопрос о том, как влияет на погрешности учета установка трансформаторов тока с повышенным коэффициентом трансформации (исходя из требований термической устойчивости токам короткого замыкания). Не исключено, что количественный анализ погрешности учета от вышеуказанных причин даст не менее ощутимые для энергосистем результаты, чем погрешность квартирных счетчиков.

Вопросам организации учета энергии, исследованию и устранению погрешностей в работе приборов учета, безусловно, следует уделять большое внимание.



## Уравнения гармонических сложной кривой тока в цепи с железом

Инж. А. А. ВОСКРЕСЕНСКИЙ

Горький

Форма кривой тока в цепи с железом, если не учитывать активной слагающей, обусловленной потерями на гистерезис и токи Фуко, определяется основной кривой намагничивания. При больших значениях амплитуды индукции вполне допустимо, ради упрощения расчетов, пренебречь активной слагающей тока. Анализ несинусоидальных кривых тока по основной кривой намагничивания облегчается значительно тем, что кривые намагничивания способны удовлетворять вполне определенному виду уравнений. Это свойство кривых позволяет дать уравнения для вычислений аналитическим путем содержания гармонических тока и напряжения в цепи с железом.

При синусоидальном изменении индукции кривые тока и магнитной индукции одновременно проходят свои нулевые и максимальные значения. Кривая тока получается симметричной относительно середины полупериода и между двумя нулевыми значениями. Это позволяет ограничиться рассмотрением одной четверти периода переменного тока [Л. 1].

Амплитуды гармонических определяются из выражения

$$A_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} y \sin kx dx. \quad (1)$$

Уравнения кривой тока можно получить, если воспользоваться уравнением кривой намагничивания [Л. 2].

$$AW = m e^{aB}, \quad (2)$$

где  $AW$  — удельные ампервитки намагничивания;  
 $B$  — индукция в железе;  
 $m$  и  $a$  — константы железа.

Полагая  $AW \equiv i$ , запишем уравнение (2) в виде:

$$i = m_1 e^{aB}. \quad (3)$$

Уравнение для тока при синусоидальном изменении индукции будет иметь вид:

$$i = m_1 e^{aB_m \sin \omega t}. \quad (4)$$

Согласно (1)–(4) гармонические составляющие тока при синусоидальном изменении индукции определяются:

$$I_{km} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} m_1 e^{aB_m \sin x} \sin kx dx. \quad (5)$$

Вычисляя приближенно значение интеграла, получаем выражения для первых одиннадцати гармонических тока:

$$I_{1m} = 1,27 m_1 e^{0,82aB_m}, \quad (6a)$$

$$I_{3m} = m_1 (0,805 e^{0,55aB_m} - 0,402 e^{0,98aB_m}), \quad (6b)$$

$$I_{5m} = m_1 (0,489 e^{0,35aB_m} + 0,253 e^{0,99aB_m} - 0,524 e^{0,82aB_m}), \quad (6в)$$

$$I_{7m} = m_1 (0,322 e^{0,26aB_m} + 0,375 e^{0,9aB_m} - 0,402 e^{0,65aB_m} - 0,167 e^{aB_m}), \quad (6г)$$

$$I_{9m} = m_1 [0,167 e^{aB_m} + 236 (e^{0,26aB_m} + e^{0,707aB_m}) - (0,333 e^{0,5aB_m} + 0,236 e^{0,966aB_m})], \quad (6д)$$

$$I_{11m} = m_1 [(0,086 e^{0,26aB_m} + 0,236 e^{0,707aB_m} + 0,322 e^{0,966aB_m}) - (0,167 e^{0,5aB_m} + 0,288 e^{0,966aB_m} + 0,167 e^{aB_m})]. \quad (6е)$$

Уравнения для индукции при синусоидальном изменении тока из (3) можно представить в виде:

$$B = \frac{1}{a} \ln \frac{I_m}{m_1} \sin \omega t. \quad (7)$$

Согласно (1) и (7), гармонические составляющие индукции при синусоидальном изменении намагничивающего тока определяются:

$$B_{km} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{a} \ln \left( \frac{I_m \sin x}{m_1} \right) \sin kx dx. \quad (8)$$

Вычисляя приближенно значения интеграла для первых одиннадцати гармонических индукций, получаем:

$$B_{1m} = 1,27 \frac{1}{a} \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 0,31 \right), \quad (9а)$$

$$B_{3m} = 0,402 \frac{1}{a} \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 1,6 \right), \quad (9б)$$

$$B_{5m} = 0,217 \frac{1}{a} \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 1,91 \right), \quad (9в)$$

$$B_{7m} = 0,128 \frac{1}{a} \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 2,07 \right), \quad (9г)$$

$$B_{9m} = 0,069 \frac{1}{a} \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 2,6 \right), \quad (9д)$$

$$B_{11m} = 0,022 \frac{1}{a} \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 3,4 \right). \quad (9е)$$

По величинам гармонических можно определить амплитуды и эффективные значения токов и напряжений.

При определении величин напряжения по гармоническим сложной кривой индукции для каждой гармонической индукции необходимо учесть кратность ее частоты по отношению к основной частоте.

Для амплитуды индуктированной э. д. с. для каждой гармонической в отдельности имеем:

$$E_m = cf B_m. \quad (10)$$

где  $c = 2\pi QW \cdot 10^{-8}$ ;  $Q$  — сечение железа;  $W$  — число витков;  $B_m$  — амплитуда соответствующей гармонической индукции.

Выражения для амплитуд гармонических напряжений при синусоидальном изменении тока из (9), (10) будут иметь вид:

$$E_{1m} = 1,27 \frac{1}{a} cf \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 0,31 \right), \quad (11а)$$

$$E_{3m} = 1,2 \frac{1}{a} cf \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 1,6 \right), \quad (11б)$$

$$E_{5m} = 1,085 \frac{1}{a} cf \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 1,91 \right), \quad (11в)$$

$$E_{7m} = 0,896 \frac{1}{a} cf \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 2,07 \right), \quad (11г)$$

$$E_{9m} = 0,621 \frac{1}{a} cf \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 2,6 \right), \quad (11д)$$

$$E_{11m} = 0,242 \frac{1}{a} cf \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 3,4 \right), \quad (11е)$$

Амплитуда результирующей сложной кривой напряжения будет равна сумме амплитуд гармонических. Путем сложения уравнений (11) можно получить формулу для подсчета амплитуды напряжения при синусоидальном изменении намагничивающего тока:

$$E_m = 5,32 \frac{1}{a} cf \left( \ln \frac{I_m}{m_1} - 1,63 \right). \quad (12)$$

Если взять корень квадратный из суммы квадратов уравнений (11), получим формулу для подсчета эффективного значения напряжения при синусоидальном изменении тока:

$$E = \frac{1}{a} \frac{c}{\sqrt{2}} f \sqrt{5,5 \left( \ln \frac{I_m}{m_1} \right)^2 - 15,9 \ln \frac{I_m}{m_1} + 14,9}. \quad (13)$$

Ошибки, которые могут быть допущены при подсчете гармонических, возникают вследствие: 1) приближенного решения интегралов (5) и (8); 2) неточности следования кривой намагничивания принятому уравнению (2); 3) пренебрежения активной составляющей тока.

Сравнение результатов вычислений гармонических индукции по уравнениям (9) с величинами, полученными путем разложения в гармонический ряд способом Рунге [Л. 1], показали, что приближения, допущенные при решении интеграла (8) для гармонических составляющих индукции (9), не вносят заметных ошибок. Отклонения амплитуд гармонических, определенных по уравнению (8), находятся в пределах третьего знака. Относительно большие ошибки получают при подсчете гармонических тока по уравнениям (6).

Точность подсчета по этим уравнениям повышается с увеличением кратности гармонической и доходит до полного совпадения для 9-й и 11-й гармонических, уравнения которых точно совпадают с суммой членов ряда Рунге. Для 1-й и 3-й гармонических ошибки при подсчете по уравнениям (6) достигают 10—12%.

При вычислении констант кривой намагничивания, охватывающих области высоких насыщений, следует определять константы по ординатам участка кривой, находящегося в области насыщения. При этом расчетные ординаты для начальных индукций могут значительно (50% и выше) отличаться от действительных. Однако, отклонение начальных ординат не оказывает заметного влияния на точность определения гармонических.

Суммарные величины ошибок, обусловленных приближенным решением интегралов и отклонением действительных ординат кривой намагничивания от ординат, подсчитанных по уравнению кривой намагничивания, как показали сравнительные подсчеты, не превышают 1—1,5%.



при вычислении гармонических составляющих индукции и 10—15% для гармонических составляющих тока.

Величины ошибок, обусловленных пренебрежением активной составляющей тока, будут велики в области начальных индукций и уменьшаются по мере увеличения индукции. В области средних и высших индукций пренебрежение активной составляющей тока вполне допустимо при подсчете величин 1-й, 5-й, 9-й и т. д. гармонических. Величину ошибок для этой группы гармонических можно приближенно оценить по  $\cos \varphi_0$  железа, учитывая, что гармонические, обусловленные активной составляющей тока, сложатся с гармоническими, определенными по основной кривой намагничивания под углом, близким к  $90^\circ$ .

В значительно большей мере скажется пренебрежение активной составляющей тока для 3-й, 7-й, 11-й и т. д. гармонических.

Из уравнений (6) следует, что при определенных значениях индукции величины этих гармонических падают до нуля и гармонические меняют знак (фазу). Действительный характер изменения величин гармонических будет отличаться от следующего по уравнениям (6) вследствие участия в токе активной составляющей.

Пренебрежение активной составляющей тока для последней группы гармонических допустимо только при значениях амплитуды индукции, соответствующих переходу кривой намагничивания в область насыщения [где гармонические имеют отрицательный знак при вычислении по уравнениям (6)].

**Пример.** Пусть требуется определить амплитуду и эффективное значение напряжения, которое возникнет на зажимах вторичной обмотки одновиткового трансформатора тока с коэффициентом трансформации 600/5, если разомкнуть обмотку при номинальном первичном токе.

Трансформатор имеет следующие размеры сердечника: внутренний диаметр  $d = 21$ , внешний диаметр  $D = 31$ , высота  $h = 25$  см. Число витков вторичной обмотки по обмоточному коэффициенту трансформации  $W = 120$ . Сечение железа трансформатора (без учета коэффициента заполнения)

$$Q = \frac{31,0 - 21,0}{2} \cdot 25,0 = 125 \text{ см}^2;$$

средняя длина магнитного пути

$$l_{cp} = \frac{31,0 + 21,0}{2} \cdot 3,14 = 81,5 \text{ см.}$$

При разомкнутой вторичной обмотке первичные ампервитки будут полностью намагничивающими. Удельные ампервитки намагничивания

$$AW_{y\partial} = \frac{600 \cdot \sqrt{2}}{81,5} = 10,3 \frac{AW}{\text{см}}.$$

Удельным ампервиткам намагничивания соответствует индукция 13 000 Gs.

Константы железа для диапазона индукций 12 ÷ 15 000 Gs:

$$m = 0,024; a = 0,5 \cdot 10^{-3};$$

постоянные трансформатора

$$c = 2 \cdot 3,14 \cdot 125 \cdot 120 \cdot 10^{-8} = 94 \cdot 10^{-5}.$$

Амплитуда напряжения по уравнению (12) при  $f = 50$  Hz

$$E_m = 5,32 \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3}} 94 \cdot 10^{-5} 50 \left( \ln \frac{10,3}{0,024} - 1,63 \right) = 2220 \text{ V.}$$

Эффективное напряжение по уравнению (13)

$$E = \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3}} \frac{94 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{2}} \cdot 50 \times \\ \times \sqrt{5,5 \left( \ln \frac{10,3}{0,024} \right)^2 - 15,9 \ln \frac{10,3}{0,024} + 14,9} = 740 \text{ V.}$$

#### Литература

1. К. А. Круг. Основы электротехники, т. II, Госиздат, 1932.
2. А. А. Воскресенский, Е. Ф. Воскресенская. Уравнения кривых намагничивания трансформаторной стали. Электричество, № 4, 1946.



## Новая схема возбуждения генератора в системе Леонарда

Доктор техн. наук проф. Д. П. МОРОЗОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Предлагаемая новая система возбуждения генератора<sup>2</sup> преобразовательного агрегата Леонарда предназначена прежде всего для тех случаев, когда требуется обеспечить быстрое протекание переходных процессов. Это может, например, иметь место, когда генератор питает двигатель реверсивного исполнительного механизма малой мощности и время пуска, реверса и торможения двигателя составляет десятки

доли секунды (приводы специального назначения). Быстрое протекание процесса возбуждения генератора требуется также и в том случае, когда он служит в качестве возбудителя или подвозбудителя главных машин в системах мощного электропривода или в сложных схемах электромашиной автоматики. Это требование является основным и тогда, когда генератор используется как питающий источник в системе регулятора того или иного назначения.

Рассмотрим основные положения на примере реверсивного электропривода малой мощности.

Двигатель  $D$  исполнительного механизма

<sup>1</sup> Доклад, читанный автором на научно-технической сессии ВНИТОЭ по электрическим машинам. Ленинград, ноябрь, 1946.

<sup>2</sup> Справка № 758/НКЭП, 13 марта, 1945.

(рис. 1) получает питание от генератора  $\Gamma$ , который вращается с постоянной скоростью приводным двигателем, не показанным на рисунке. Обмотка возбуждения  $OB$  генератора подключена к цепи его якоря, как показано на рис. 1, и получает питание в общем случае от отдельного возбудителя  $B$ . Цепь обмотки возбуждения возбудителя приключается, как это обычно применяется в подобных схемах, к средней точке и к рукоятке потенциометрического реостата  $ПР$ , который обтекается током от вспомогательной сети (аккумуляторная батарея). Установкой и перемещением рукоятки потенциометра вправо или влево от средней точки определяется направление вращения и скорость двигателя исполнительного механизма при пуске, реверсе и торможении.

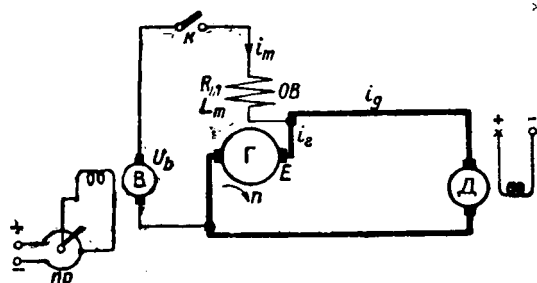


Рис. 1. Схема реверсивного электропривода малой мощности с новой системой возбуждения генератора.

Здесь имеет место каскадная схема возбуждения, но генератор вместо обычного независимого возбуждения получает специальное включение своей обмотки возбуждения, которое обеспечивает ряд ценных свойств, а в том числе и малую инерционность переходных процессов. Можно сказать, что в данном случае обмотка возбуждения генератора включена последовательно (встречно) с э. д. с. его якоря, так как в установившемся режиме ток возбуждения определяется разностью между напряжением возбудителя и напряжением на зажимах генератора

$$I_m = \frac{U_b - U_g}{R_m}. \quad (1)$$

Если приводный двигатель исполнительного механизма включен, то ток возбуждения генератора будет замыкаться через цепь якоря двигателя.

Допустим, что напряжение возбудителя составляет 30 В, генератор должен обеспечить номинально 24 В и, таким образом, обмотка его возбуждения рассчитывается на 6 В.

Отвлекаясь от действительного способа управления системой, предположим, что при постоянном значении напряжения возбудителя  $U_b$  внезапно замыкается ключ  $K$  на схеме рис. 1, а двигатель исполнительного механизма отключен<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> При отключенном двигателе исполнительного механизма генератор будет работать в режиме серийной машины—двигателя на вал параллельно с основным приводным двигателем.

Тогда процесс установления намагничивающего тока, а значит и э. д. с. генератора будет подчиняться уравнению

$$U_g = e + i_m R_m + L_m \frac{di_m}{dt}. \quad (2)$$

Здесь  $R_m$ —сопротивление обмотки возбуждения генератора (сопротивлением якоря генератора пренебрежем);

$e$ —э. д. с. генератора;

$L_m$ —индуктивность обмотки возбуждения генератора (индуктивностью его якоря пренебрежем). Так как при постоянной скорости генератора

$$e = k i_m, \quad (3)$$

где  $k$ —коэффициент пропорциональности между намагничивающим током и э. д. с. ненасыщенного генератора, то

$$U_g = i_m (R_m + k) + L_m \frac{di_m}{dt} \quad (4)$$

или

$$\frac{U_g}{R_m + k} = i_m + \frac{L_m}{R_m + k} \frac{di_m}{dt} \quad (5)$$

и

$$I_m = i_m + T \frac{di_m}{dt}. \quad (6)$$

Здесь  $I_m$ —установившееся значение тока;  
 $T$ —электромагнитная постоянная времени. Поведение тока возбуждения и э. д. с. во времени подчиняется закону экспоненциальной функции, и на основании (6) можно записать:

$$\left. \begin{aligned} i_m &= I_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \\ e &= E_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Постоянная времени

$$T = \frac{L_m}{R_m + k}. \quad (8)$$

Нетрудно подсчитать, что, при отмеченном выше соотношении напряжения на якоре генератора к напряжению на обмотке его возбуждения величина  $k$ , имеющая размерность сопротивления, будет равна  $4R_m$ , а действующая электромагнитная постоянная будет уменьшена против собственной электромагнитной постоянной времени обмотки возбуждения в 5 раз. Если положить, что величина этой последней для машин, например, мощностью 1÷3 кВт составляет примерно 0,2 сек., то действующая электромагнитная постоянная времени будет равна 0,04 сек. Имеется полная возможность к тому, чтобы получить для нее и еще меньшие значения.

Таким образом, система практически обладает весьма малой инерционностью переходных процессов. Необходимая величина электромагнитной инерции легко может быть установлена соответствующим выбором параметров, в первую

очередь соотношением напряжений якоря генератора и его обмотки возбуждения.

Мощность, потребная от возбудителя, невелика. Допустим, что мощность главного генератора равна 1 kW. Мощность, теряемую в обмотке его возбуждения, оценим в 3%, т. е. 30 W. При выбранном нами соотношении напряжений якоря генератора и его обмотки возбуждения от возбудителя потребуется большая мощность в отношении  $\frac{30}{6}$ , т. е.  $30 \cdot 5 = 150$  W, т. е. 15% от мощности генератора.

Тепловые потери в обмотке возбуждения возбудителя оценим в 5% от его мощности, т. е.  $150 \cdot 0,05 = 7,5$  W. Эта незначительная мощность и должна быть доставлена от потенциометрического реостата.

Таким образом, малая инерционность переходных режимов и незначительная мощность цепи управления будут обеспечены в предлагаемой системе.

Если учесть, что в данной системе электропривод содержит обычные машины нормального исполнения, то она представляет несомненный интерес для практической реализации.

Однако, этим не исчерпываются ценные свойства описанной системы возбуждения главного генератора. Нетрудно показать, что э. д. с. генератора будет весьма мало зависеть от скорости вращения первичного двигателя в широком диапазоне ее изменения (конечно, при условии, что возбудитель не расположен на общем валу с генератором).

Действительно, для установившегося режима будет справедливо, если пренебречь падением напряжения в якоре генератора, следующее уравнение:

$$U_g = I_m R_m + E, \quad (9)$$

где  $E$  — э. д. с. генератора, которая может быть выражена:

$$E = k I_m = \beta n I_m. \quad (10)$$

Подставив в (9) значение  $I_m$  из (10) и решив это уравнение относительно  $E$ , получим:

$$E = U_g \frac{\beta n}{R_m + \beta n}. \quad (11)$$

Так как при выбранном напряжении на обмотке возбуждения  $R_m$  значительно меньше, чем  $\beta n = k$ , то на основании (11) можно установить, что э. д. с. генератора будет изменяться в значительно меньшей степени, чем скорость  $n$ . Если, например, скорость вращения  $n$  упадет вдвое, то намагничивающий ток возрастет, и изменение э. д. с. будет значительно меньше, чем вдвое.

Пусть при номинальной скорости генератора  $\beta n_n = k_n = 4 R_m$ , как это отмечалось выше. В этом случае по формуле (11)  $E = 0,8 U_g$ . Если скорость генератора упадет вдвое, то  $\beta n = 0,5 k_n = 2 R_m$ . И в этом случае э. д. с. генератора, как это нетрудно подсчитать, будет равна  $0,66 U_g$ . Таким образом, при падении скорости на 50% э. д. с.

генератора упадет лишь на 17,6%. Чем меньше будет выбрано расчетное напряжение обмотки возбуждения, тем меньше будет изменение э. д. с. генератора при изменении скорости его вращения.

Именно для целей поддержания постоянства напряжения подобная система возбуждения генератора была применена<sup>4</sup> фирмой Julius Penntsch A. G<sup>4</sup>.

Малое изменение напряжения на зажимах генератора определяется также и тем положением, что оно при всех обстоятельствах установившегося режима равно напряжению возбудителя за вычетом падения напряжения на обмотках возбуждения, а это последнее выбирается в данном случае малым:

$$U_z = U_g - I_m R_m. \quad (12)$$

Важно отметить, что в данной системе возбуждения генератора влияние остаточного магнетизма будет значительно уменьшено. Поясним это на примере схемы рис. 1. Пусть двигатель исполнительного механизма отсоединен, а рукоятка потенциометрического реостата поставлена в нулевое (среднее) положение. Нетрудно видеть, что э. д. с. генератора от остаточного магнетизма направлена навстречу э. д. с. якоря возбудителя от остаточного магнетизма этого последнего.

Это очень важное обстоятельство обеспечит получение малой — ползучей — скорости двигателя исполнительного механизма на пологой механической характеристике, что расширяет область применения описанной схемы<sup>5</sup>.

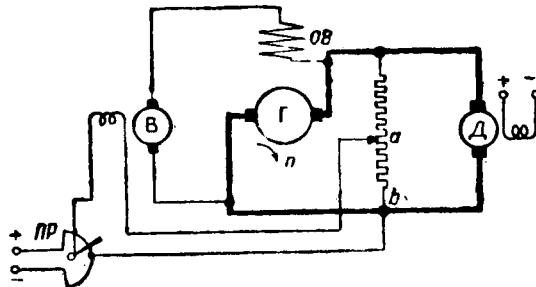


Рис. 2. Схема реверсивного электропривода малой мощности с форсированием переходных процессов и регулированием напряжения.

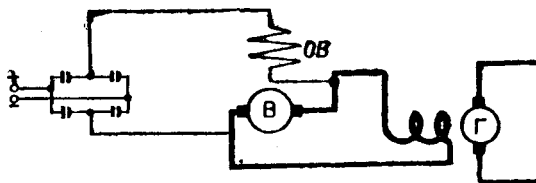


Рис. 3. Генератор с новой системой возбуждения в качестве возбудителя.

<sup>4</sup> Э. Арнольд. Машины постоянного тока, т. II, Гостехиздат, 1931.

<sup>5</sup> Испытания, проведенные в условиях лаборатории, показали, что в данной системе возможно получить 0,5% от номинальной скорости на пологой механической характеристике.

Электромагнитная постоянная времени, определяемая формулой (8), а также намагничивающий ток генератора, а значит и его э. д. с., будут весьма мало зависеть от температурных условий, так как величина  $k$  (эквивалент сопротивления от э. д. с. генератора) значительно больше, чем зависящее от температуры омическое сопротивление  $R_m$ .

Можно предполагать, что в отношении устойчивости в переходных режимах описанная система будет достаточно надежна. Колебания э. д. с. генератора, могущие возникнуть по тем или иным причинам, будут демпфироваться соответствующим и весьма быстрым изменением намагничивающего тока генератора. В связи с этим отпадает необходимость в специальных и сложных демпфирующих устройствах, как это имеет, например, место в случае питания мало-мощного реверсивного двигателя непосредственно от амплидина. Этот вопрос подлежит более детальному теоретическому и экспериментальному исследованию.



## Металлокерамические контакты с окисью кадмия

*Доктор техн. наук В. В. УСОВ*

*Научно-исследовательский институт Министерства электропромышленности СССР*

Контакты электрических аппаратов, работающих при нагрузках выше некоторого предела, подвергаются износу, вызываемому, главным образом, термическим действием дуги, возникающей в контактном промежутке в момент размыкания цепи. Опыты дают зависимость потери веса контактов вследствие эрозии от тока  $I$ , схематически изображенную на рис. 1.

Видно, что при некоторой величине тока линейно возрастающая с током<sup>1</sup> эрозия катода сменяется быстро усиливающейся эрозией анода, уже не подчиняющейся линейному закону. При этом на поверхностях контактов появляются брызги расплавленного материала контактов. Эрозия анода такого типа должна быть приписана термическому действию дуги, которое маскирует процесс распыления катода ионной бомбардировкой, определяющей характер эрозии в области II рис. 1.

На практике термическое действие дуги размыкания приводит к оплавлению, разбрызгиванию и испарению материала контактов, их деформации, нарушению проводимости вследствие окисления (в случае неблагородных металлов) или приварке контактов друг к другу.

Так, испытания показали, что серебряные контакты на магнитном пускателе П-221 оказались совершенно непригодными при токе в 200 А

В системе электропривода, данного на рис. 1, возможно применить форсирование с одновременным дополнительным регулированием напряжения по известному методу, как это изображено на рис. 2.

Если генератор с рассмотренной системой возбуждения применить в качестве возбудителя, то схема включения получит вид согласно рис. 3. Постоянная времени обмотки возбуждения главной машины здесь будет выбрана в соответствии с требуемыми условиями переходных режимов, а электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения возбудителя будет сведена к минимальному значению, как это обычно требуется в каскадных системах возбуждения.

Все методы и средства для форсирования и регулирования переходных процессов могут быть здесь применены, как и в обычных схемах контактно-релейной или электромашинной автоматики.

[Л. 1]. В подобных условиях работы, т. е. при достаточно больших токах, но при отсутствии специальных мер для гашения дуги, однофазные по структуре материалы, как чистые металлы или сплавы типа твердых растворов, дающие хорошие результаты в области нагрузок II, оказываются малоустойчивыми против эрозии.

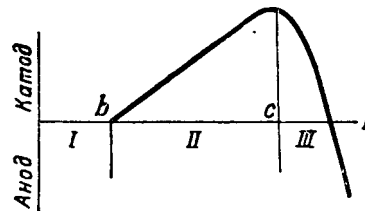


Рис. 1. Эрозия контактов в зависимости от величины разрываемого тока.

Большим успехом контактной техники явилась разработка многофазных композиций, одним из представителей которых являются контакты с окисью кадмия. Контакты этого типа оказались во много раз более изнаноустойчивыми, чем чистое серебро [Л. 1, 2].

Микроструктура композиции: в основной массе серебра равномерно распределены зерна окиси кадмия. Термическая устойчивость подобного рода композиций может быть показана, если материал поместить на короткое время в печь при температуре несколько выше точки плавления

<sup>1</sup> Точнее, с количеством электричества, протекающего в форме дуги.

серебра. В то время как при такой «термической пробе» чистое серебро оплавляется в виде капли, композиции сохраняют свою форму, выделяя лишь часть серебра в виде наплыва — в тем меньшей степени, чем выше содержание окиси кадмия.

Термическая стойкость композиций рассматриваемого типа как и Ag—W, Ag—Mo, Cu—W и др. основана на том, что легкоплавкая фаза после расплавления удерживается в порах, образованных тугоплавкой фазой капиллярными силами, как любая жидкость в пористом теле при условии смачиваемости.

Термически устойчивой оказалась также композиция с окисью цинка. Однако, испытание таких контактов показало их непригодность вследствие быстрого нарушения контактной проводимости в результате образования на контактной точке изолирующей пленки.

**Особые свойства окиси кадмия.** Среди окислов различных металлов окись кадмия отличается сравнительно высокой проводимостью, являясь полупроводником.

Проводимость окиси кадмия, измеренная нами, оказалась того же порядка, который дают Баумбах и Вагнер для окиси кадмия при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении ( $2,7 \div 150 \Omega^{-1} \text{см}^{-1}$ ) [Л. 3], меняясь в зависимости от способа получения. Другие окислы металлов с той же проводимостью, что у окиси кадмия, неизвестны, но некоторые сульфиды, селениды и теллуриды являются полупроводниками. Нами были испытаны в виде композиций с серебром сернистый свинец и сернистая медь (проводимость порядка  $10^3 \Omega^{-1} \text{см}^{-1}$ ). Оказалось, что после первых разрывов контактная проводимость нарушалась вследствие образования непроводящих пленок из окислов указанных металлов в результате окисления сульфидов.

Другим свойством, отличающим окись кадмия от окислов других металлов, является диссоциация ее при температуре несколько выше  $1000^\circ \text{C}$  с образованием лишь газообразной фазы, так как точка кипения кадмия лежит при  $770^\circ \text{C}$ . Окислы других металлов или практически не разлагаются при нагревании, или разлагаются на кислород и металл при значительно более высоких температурах, чем окись кадмия. На рис. 2 изображена кривая потери веса порошка окиси кадмия в зависимости от температуры прокаливания.

Видно, что энергичное разложение окиси кадмия начинается при температуре выше  $1000^\circ \text{C}$ . Так как температура в дуге не ниже  $2000^\circ \text{C}$ , диссоциация зерен окиси кадмия в районе действия дуги должна происходить мгновенно с выделением значительного объема газообразных продуктов.

Расчет показывает, что при температурах дуги диссоциация одного зерна окиси кадмия дает объем газообразных продуктов в  $10^4$  раз больше объема окиси. Такое взрывообразное

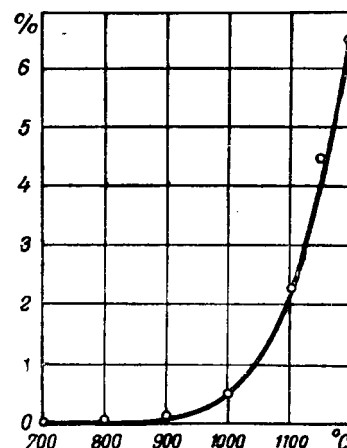


Рис. 2. Потеря веса (в %) окиси кадмия (за 30 мин.) в зависимости от температуры нагрева.

выделение газов, возможно, действует гасящим образом на дугу.

Действие окиси кадмия, повышающее износостойкость контактов, заключается, по нашему мнению, в следующем. При появлении дуги в момент размыкания контактов зерна окиси, лежащие вблизи ее основания, взрывообразно разлагаются, выдувая и деионизируя дугу и сокращая тем время ее существования. Изучение микролифов контакта в районе действия дуги показало, что вблизи кратера, оставленного дугой, зерна окиси исчезли, но, как видно на продольном шлифе, разложение окиси кадмия произошло лишь у самой контактной поверхности. Таким образом, вследствие мгновенного нагревания дугой лишь самого поверхностного слоя, микроструктура основной массы контакта не меняется и тем обеспечивается его термическая устойчивость.

Налет окиси кадмия, получившийся в результате окисления паров кадмия в области более низкой температуры и осевший на контактах, препятствует свариванию последних при замыкании, не нарушая при этом контактной проводимости.

Таким образом, электропроводность и способность диссоциировать при сравнительно низких температурах (но выше точки плавления серебра) с образованием только газообразных продуктов делает окись кадмия специфически пригодным материалом для контактных композиций.

**Свариваемость контактов.** Существенным достоинством контактов с окисью кадмия является их стойкость против взаимного приваривания во время работы.

На рис. 3 и 4 даны кривые, характеризующие частоту и среднюю прочность приваривания контактов разного состава. Кривые построены по результатам многочисленных контрольных испытаний контактов, выпускавшихся мелкими сериями. Испытания на приваривание проводились по схеме рис. 5. Приваривание происходило в момент замыкания контактов под грузом  $P = 1 \text{ kg}$  благодаря вспыхивавшей дуге.

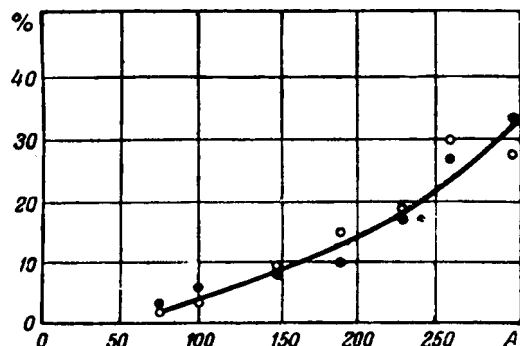


Рис. 3. Частота (в %) привариваний контактов в зависимости от тока.

Прочность приваривания измерялась грузом  $Q$ , необходимым для отрыва контактов друг от друга, за вычетом контактного давления  $F=Q-\frac{1}{2}P$ .

Физические свойства композиций с окисью кадмия и выбор оптимального состава. Увеличение содержания окиси кадмия увеличивает твердость композиции и уменьшает свариваемость, но увеличивает ее пористость и уменьшает электропроводность. Решающим критерием при выборе нижней границы содержания окиси кадмия является термическая проба, а при выборе верхней границы — электропроводность. Оптимальным следует считать среднее содержание окиси кадмия, если принять во внимание также значительно большую сопротивляемость привариванию этих контактов.

**Область применения контактов с окисью кадмия.** Контакты этого типа предназначаются для аппаратов повышенной мощности, при которой серебряные контакты недостаточно стойки, но где не применяются специальные средства дуго-

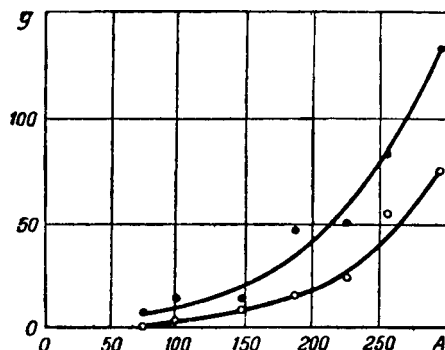


Рис. 4. Средняя прочность привариваний контактов в зависимости от тока.

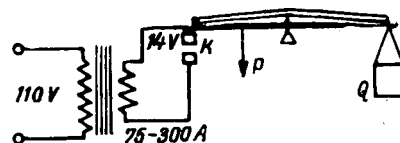


Рис. 5. Схема аппарата для испытания контактов на приваривание.

гашения и контактное давление мало. Эти контакты пригодны для мостиковых реле, магнитных пускателей и тому подобных аппаратов.

#### Литература

1. В. В. Усов и М. Д. Поволоцкая. ВЭП, № 3, стр. 14, 1946.
2. F. R. Hensel, E. I. Larsen. Metal Technology, т. 12, № 1, стр. 47, 1945.
3. H. H. Baumbach, C. Wagner. Zeitschrift für physikalische Chemie, т. 22, стр. 199, 1933.



## К статье С. М. Сердинова „К проблеме энергоснабжения электрических железных дорог большой протяженности“

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 9, 1947)

Член-корр. Академии наук СССР  
М. А. ШАТЕЛЕН

Статья С. М. Сердинова затрагивает очень актуальный вопрос об электроснабжении строящихся и намеченных к строительству в ближайшем будущем электрических железных дорог. Этому вопросу пока уделялось мало внимания, между тем он заслуживает глубокой разработки. С. М. Сердинов рассматривает все главные вопросы и статья его имеет несомненный интерес.

Хотелось бы сделать следующие замечания.

1. Почему для сравнений взято напряжение в 154 kV? Ведь стандартные напряжения, применяемые на линиях электропередачи, установлены 110 и 220 kV. Насколько известно, только часть сети Днепрогэса работает на 150 kV.

2. Неясны соображения о расстоянии между снабжающими дорогу электростанциями. Эти соображения могут быть применены только в случае изолированной электростанции. В случае же, если дорога питается от общих электроснабжающих систем районов, по которым они проходят, то эти соображения отпадают.

3. Неясны соображения относительно преимуществ применения для электропередачи (в отношении электрификации железных дорог) постоянного тока высокого напряжения. Эти соображения желательно развить.

4. Желательно подробнее рассмотреть вопрос о роли железнодорожных подстанций для электрификации прилегающих местностей, в частности сельского хозяйства. На возможность широкого использования этих подстанций для улучшения культурных условий населения указывал еще в 20-х годах крупнейший специалист по электрификации железных дорог, покойный проф. А. В. Вульф.

Доктор техн. наук, проф. В. В. БОЛОТОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Проблема энергоснабжения электрифицированных железных дорог не может быть оторвана от общей проблемы электрификации страны и должна решаться в комплексе с задачами районного энергоснабжения. Однако, соображения и расчеты С. М. Сердинова слишком условны. Нельзя забывать, что электропотребление страны происходит на ее территории крайне неравномерно. Преобладающая часть электропотребления сосредоточена на относительно небольших площадях промышленных и населенных центров и составляет при этом относительно небольшую долю общего энергопотребления этих районов. Электропотребление же остальной территории, составляющее лишь небольшую долю общего электропотребления, крайне рассредоточено и далеко от той нормы электропотребления на 1 km<sup>2</sup>, из которой исходит С. М. Сердинов.

Желательно, чтобы подстанции электрифицированных железных дорог могли служить и центром электрифика-

ции прилегающего района. Если в районе подстанции нет промышленных узлов, нагрузка района будет незначительна по сравнению с нагрузкой электрифицированного транспорта и удовлетворение этого требования не создает новых трудностей. Наоборот, в случае расположения подстанции вблизи промышленного узла или крупного населенного центра нагрузка последних будет в большинстве случаев превышать нагрузку транспорта. Основной задачей в этом случае явится задача энергоснабжения промышленности, а задача энергоснабжения электрифицируемого транспорта легко решается попутно.

Задача выбора схемы энергоснабжения электрифицируемого транспорта должна быть поставлена поэтому несколько иначе, чем ее ставит С. М. Сердинов. Дело не только в разрешении отдельных, предложенных им «основных» вопросов, но прежде всего в общем плане электрификации нашей страны и, в частности, тех районов, по которым проходят электрифицируемые железнодорожные магистрали, потребность которых должна быть учтена в расходной части плана. Энергоснабжение электрифицируемых железных дорог должно быть подчинено общему плану электрификации страны. Во всех случаях, когда железнодорожные магистрали проходят по промышленным районам (Европейская часть СССР), снабжение их энергией должно происходить от районных электрических станций. При выборе объектов нового строительства, естественно, должны быть использованы все возможности новой техники в отношении привлечения наиболее благоприятных, экономически выгодных энергоресурсов. Проблема комплексного разрешения задач энергоснабжения района во всей ее сложности, определяемой удовлетворением полной потребности района в электроэнергии, тепле и топливе, явится в этом случае доминирующей. При этом для энергетически бедных районов со всей остротой встанет задача дальнейшей передачи электроэнергии.

Несколько иначе будет стоять вопрос при электрификации магистральных железных дорог большого протяжения, проходящих по некоторым еще слабо освоенным районам Сибири и Севера. В этом случае задача энергоснабжения района ввиду незначительности и рассредоточенности потребления может отойти на второй план.

Почти несомненно, что любая железнодорожная магистраль должна хотя бы своими концевыми участками захватить и развитые промышленные районы с уже существующими и развивающимися электроэнергетическими системами. Линия питания железнодорожной связи осуществит в какой-то мере связь между этими районами и эта связь должна быть использована. В связи с этим возникает не совсем четко охарактеризованная С. М. Сердиновым проблема использования линии переменного или постоянного тока как для питания электрифицируемой магистрали, так и в качестве питающей или маневренной межрайонной связи. Следует признать, таким образом, что своевременно поставленные С. М. Сердиновым вопросы электрификации железных дорог большой протяженности являются еще более актуальными и требующими решения вопросами общего плана электрификации страны.

## Кандидат техн. наук И. И. ИВАНОВ

*Центральный отдел энергетического хозяйства Министерства путей сообщения СССР*

Рассматривая вопрос о нагрузках и указывая, что в связи с электрификацией железных дорог одновременно будут решаться и задачи электрификации промышленности, сельского и коммунального хозяйств, С. М. Сердинов ограничивает область комплексного решения этих задач только «новыми промышленно осваиваемыми районами». Вряд ли следует делать заведомые ограничения для районов в той или иной мере уже освоенных, так как и в этих районах вследствие линейного характера трассы электрифицируемой железной дороги возникают реальные предпосылки для присоединения в целом ряде случаев к тяговым подстанциям местных электрических нагрузок в зонах, расположенных между промышленными центрами и не охватываемых районными сетями. Исключения могут составить, очевидно, лишь те районы, где уже осуществлена сплошная электрификация и где, следовательно, перевод железной дороги на электрическую тягу не создает существенно новых условий для местных потребителей электроэнергии. Исходя из этого, комплексную электрификацию железных дорог и прилегающих районов следует связывать не только с освоением этих районов, но и со степенью электрификации их территории.

В социалистическом хозяйстве при переводе железных дорог на электрическую тягу создаются особенно благоприятные условия для сплошной электрификации прилегающих районов. Пренебречь этими условиями, тем более в общей перспективе, было бы недопустимо. Поэтому при перспективном проектировании тяговых подстанций и линий электропередачи к ним следует учитывать местные нагрузки, соответствующие уровню районов сплошной электрификации. При этом должны учитываться не только сельскохозяйственные нагрузки, но также нагрузки местной промышленности и других мелких предприятий, обычные для районных центров и небольших городов. Естественно предположить, что далеко не единичными окажутся случаи, когда присоединение к тяговой подстанции нагрузок того или иного районного центра или небольшого города в народнохозяйственном отношении будет значительно выгоднее, чем сохранение в эксплуатации имеющихся в этих населенных пунктах мелких и малозакономерных энергоустановок, использующих часто даже жидкое топливо.

С. М. Сердинов указывает, что «величины так называемых районных нагрузок устанавливаются без достаточных обоснований», однако со своей стороны не предлагает какой-либо определенной методики исчисления такого рода нагрузок. Вряд ли можно признать убедительными приводимые им априорно цифровые значения таких нагрузок для различных районов. Прежде всего следует отметить, что сами по себе эти нагрузки в изложении автора статьи должным образом не координированы: автор не уточнил, к чему относятся приведенные им цифры в киловаттах на квадратный километр территории того или иного района, т. е. к шинам ли потребителя, районной ли подстанции и т. п. В последнем случае расположение подстанции в схеме и территориально должно быть, очевидно, заранее оговорено; кроме того, для обеспечения сопоставимости цифр должна бы иметь место достаточно широкая типизация. Такого рода привязка местных нагрузок отличалась бы известной сложностью и условностью. Судя по тому, что автор арифметически складывает и районные (местные) и тяговые нагрузки и на основании итога определяет мощности тяговых подстанций, можно думать, что предлагаемые им значения районных нагрузок представляют собой нагрузки, как бы заранее уже отнесенные к шинам какой-то условной тяговой подстанции. Иными словами, рекомендуя, казалось бы, общие нормативы для районных нагрузок, которые объективно существуют независимо от наличия электрической тяги поездов, автор в скрытой форме неразрывно связывает эти районные нагрузки с тяговыми подстанциями, расположенными каким-то вполне определенным способом. Возникает попутно вопрос, так же ли относятся к неким условным тяговым подстанциям приводимые С. М. Сердиновым данные о нагрузках на 1 км<sup>2</sup> по США за 1945 г., так как автор должен был, видимо, сопоставлять данные, отнесенные к тождественным условиям, хотя едва ли можно признать уместным в данном случае это сравнение.

Рекомендации С. М. Сердинова относительно нормативов для районных нагрузок конкретно не дифференцируются по основным составляющим, тогда как эти составляющие (нагрузки сельскохозяйственные, коммунальные, мелкопромышленные) для одних и тех же географических районов могут встречаться в различных сочетаниях, давая соответственно в сумме различные абсолютные значения.

Помимо чисто тяговых и районных нагрузок должны учитываться еще и общетранспортные нагрузки, о которых автор совершенно не упоминает, как-то: освещение территорий станций, механизация погрузочно-разгрузочной и сортировочной работы на железнодорожных станциях, связь, электрическая централизация, автоблокировка, вагонные и локомотивные (электровозные) депо и т. п. Даже на полевых (промежуточных) железнодорожных станциях, расположенных обычно на 8—12 км друг от друга, насчитываются нагрузки, пренебрегать которыми в общем электробалансе также не следовало бы. На 1 км железнодорожного пути годовой расход электроэнергии на такие общетранспортные нужды уже сейчас измеряется тысячами киловатт-часов, резко возрастаая для грузонапряженных и технически оснащенных магистралей. Резюмируя замечания по разделу о нагрузках, следует признать, что С. М. Сердиновым этот раздел и методологически и в цифровых значениях освещен довольно поверхностно.

Что касается выбора схемы линии передачи для питания тяговых подстанций, то здесь следует прежде всего указать, что пересчет нагрузок в соответствии с высказанными выше замечаниями способен повлиять на результаты выбора схемы. Далее, вряд ли было бы справедливо полагать однозначным решение этого вопроса для самых разнообразных условий. Автор приводит сравнение различных показателей по двум вариантам схемы всего лишь для одного из участков. Едва ли можно основываться при решении рассматриваемого вопроса на расчетах только по одному из участков, тем более, что автор не указывает характеристик этого участка и насколько эти характеристики являются типичными. Нет сомнения в том, что здесь необходимо провести ряд детальных подсчетов и что для различных условий могут быть получены и различные решения.

Целый ряд вопросов, возникающих в области планирования энергетики всех отраслей народного хозяйства в связи с электрификацией железных дорог, необходимо углубленно проработать. Дискуссия должна наметить основные вехи для успешного и плодотворного развертывания этой работы.

**Инж. Л. О. ГРУБЕР**

*Транстехпроект Министерства путей сообщения СССР*

С. М. Сердинов правильно указал, что ряд электрифицируемых линий будет проходить в районах, где отсутствуют развитые энергетические системы, в связи с чем перевод железных дорог на электрическую тягу из чисто транспортной проблемы перерастает в проблему народнохозяйственную, так как сооружение новых электростанций и связывающих их протяженных линий электропередачи будет способствовать быстрой электрификации различных отраслей народного хозяйства районов, прилегающих к железным дорогам. Таким образом, проблема энергоснабжения железных дорог должна решаться комплексно, в тесной увязке с вопросами размещения производительных сил в народнохозяйственном разрезе.

Новизна и сложность проблемы требуют привлечения к ее решению специалистов ряда отраслей народного хозяйства. Целесообразно уже сейчас заняться разработкой этой комплексной проблемы и привлечь к ней Академию наук СССР, отраслевые научно-исследовательские институты и проектные организации.

По поводу некоторых частных, чисто энергетических вопросов, затронутых в статье С. М. Сердинова, следует отметить следующее.

Неправильно безоговорочное утверждение, что зона охвата электрификацией районов, прилегающих к железным дорогам, расширяется с повышением напряжения магистральных линий электропередачи, питающих тяговые подстанции. Зона охвата прилегающих районов будет за-



висеть от величины напряжения распределительных линий электропередачи, идущих в стороны от железной дороги. С увеличением зоны охвата будут возрастать нагрузки, а это в некоторых случаях может вызвать и повышение напряжения магистральных линий при заданном расположении генерирующих точек.

В статье не получили отражения специфические особенности тяговой нагрузки. В периоды длительных интенсивных перевозок нагрузка возрастает в 1,3—1,6 раза по сравнению со средней нагрузкой. Если даже считать, что в периоды интенсивных перевозок электростанции будут работать без резерва с полным использованием всей установленной мощности, то при обычных перевозках на электростанциях будет находиться в резерве от 30 до 60% установленной мощности. В случае, если будет признано необходимым иметь некоторый резерв и в периоды интенсивных перевозок, то резервы мощностей в энергетических системах еще больше возрастут. Поэтому необходима специальная разработка вопроса рационального использования этих резервов мощности.

Сомнительным представляется утверждение автора о том, что при расстоянии между электростанциями 350—450 км гарантируется питание тяговых подстанций и в случае аварийного отключения одной из электростанций. Действительно, в этом случае средняя нагрузка на двухцепную линию электропередачи, получающую одностороннее питание, составит для районов II группы  $150 \cdot 10^3$  kW, а для районов III группы  $240 \cdot 10^3$  kW. Элементарный расчет показывает, что в случае выпадения одной из электростанций потребуются существенные ограничения не только районных, но и тяговых нагрузок. Учитывая надежность работы современных мощных электростанций представляется возможным не рассматривать как расчетный режим работы при выпадении электростанций.

Технические показатели двух схем питания тяговых подстанций, приведенные автором, базирующиеся на работах, выполненных Теплоэлектропроектом, совершенно не учитывают стоимости энергоснабжения района. Можно полагать, что учет стоимости энергоснабжения района, особенно при значительных размерах районных нагрузок, может существенно изменить эти показатели.

**Инж. А. Н. САРКИСОВ**

*Баку*

Электрификация железных дорог, как и вообще электрификация многих отраслей народного хозяйства, помимо эксплуатационных удобств имеет в виду основную экономическую задачу—сокращение потребления топлива и связанных с ним расходов по сооружению складов, транспортировке и т. д.

Несмотря на явные преимущества электрифицированной железной дороги, имеется ряд затруднений, основным из которых является часто отсутствие достаточной резервной мощности электросистем, обслуживающих электрифицируемые железные дороги.

Вопрос перевода существующей железной дороги на электротягу практически следует решать одновременно и совместно с развитием всей промышленности района.

Постановка С. М. Сердиновым вопроса о переводе на электротягу существующих железных дорог на больших протяжениях с одновременным строительством специальных больших тепловых электростанций является «академичной». Помимо расчетов о рентабельности перевода железной дороги на электротягу следует, очевидно, учитывать также реальную обстановку и возможности. В период восстановления и развития всего народного хозяйства Союза нельзя требовать исключительных преимуществ в отношении электроснабжения существующих железных дорог, в ущерб важнейших отраслей промышленности, от которых зависит дальнейший подъем народного хозяйства. Правильнее было бы говорить о рентабельности и целесообразности электрификации грузонапряженных магистралей железной дороги в перспективе, за пределами 1950—1955 гг.

С. М. Сердинов неправ, требуя для обеспечения электрифицируемых железных дорог сооружения новых электростанций. Этот вопрос следует решать комплексно, с точки зрения народного хозяйства.

Автор статьи допускает в своих расчетах (например, говоря о размещении электростанций) задачу использования гидроэнергетических ресурсов страны. Однако вследствие применения относительно низкого напряжения—110 kV, приходит к выводу о невозможности использования гидроэнергетических ресурсов, если они расположены вдали от железной дороги. Для передачи большой мощности на далекие расстояния следует выбирать напряжения: 220 kV или 380 kV, что сделало бы возможным широкое использование гидроэнергетических ресурсов.

Если принять предложенное С. М. Сердиновым расстояние между электростанциями в 350 км при выбранном уровне напряжения 110 kV, а нагрузки тяговых подстанций 20 тыс. kW (с учетом нагрузки района), с коэффициентом мощности 0,8 и расположить их через каждые 30 км, то даже при нормальном их питании с двух концов потери напряжения получатся весьма большими (порядка 26%). Очевидно, что при аварийном отключении одной из питающих электростанций гарантировать, как это делает автор статьи, бесперебойное питание токоприемников от оставшейся в работе электростанции было бы невозможно вследствие недопустимо больших потерь напряжения, если бы даже мощность электростанции и была в этом случае достаточной.

Считая гидроэлектростанции основной базой для широкой электрификации железных дорог, мы отнюдь не исключаем необходимость в некоторых случаях строительства тепловых электростанций. В этих случаях, однако, расставлять их на большие расстояния друг от друга (350—450 км) нецелесообразно, так как этим создаются лишь дополнительные затруднения при передаче электроэнергии. Распределение электроэнергии на генераторном напряжении или на напряжении 35 kV дало бы возможность отказаться от сооружения линий электропередачи с очень тяжелыми проводами (АСУ-300, МП-240 и др.) и от применения дефицитного и дорогостоящего оборудования на 110—380 kV.



## К статье Х. Ф. Фазылова

# „Обобщенный метод расчета потокораспределения мощностей в сложных цепях“

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 11, 1946)

**Доктор техн. наук, проф. Н. Н. ЩЕДРИН**

В связи с опубликованными (Электричество, № 6, 1947) замечаниями П. Л. Калантарова и Л. А. Цейтлина по статье Х. Ф. Фазылова «Обобщенный метод расчета потокораспределения мощностей в сложных цепях» (Электричество, № 11, 1946) считаю необходимым высказать следующие свои соображения о статье Х. Ф. Фазылова:

1. Никаких принципиальных ошибок в статье Х. Ф. Фазылова не содержится, так как принципиальные ошибки влекут за собой последствия, ошибочные в фактическом отношении. Этого нет в статье Х. Ф. Фазылова. Можно говорить лишь об известной неточности и неудачности примененных им некоторых словесных выражений.

2. Поскольку из статьи Х. Ф. Фазылова можно согласно мнению П. Л. Калантарова и Л. А. Цейтлина вывести заключение, что имеющиеся им в виду «существенные ограничения» справедливости равенства  $\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1$  заключаются в «трансформационных соотношениях», то это — по существу то же самое, что утверждается и авторами письма, отмечаящими наличие взаимной индукции между фазами и поэтому относящими рассматриваемый Х. Ф. Фазыловым четырехполосник к разряду активных. При этом следует иметь в виду, что Х. Ф. Фазылов нигде в своей указанной статье не высказывает утверждения, что его четырехполосник является пассивным.

3. Четырехполосник, рассматриваемый Х. Ф. Фазыловым, является особым, комбинированным трехфазным четырехполосником, отличающимся по своим свойствам от обычно используемых однофазных четырехполосников. В его элементах не содержится никаких независимых э. д. с., и он может быть разложен на ряд чисто пассивных четырехполосников. Поэтому четырехполосник Х. Ф. Фазылова я лично не стал бы относить к разряду активных. Впрочем, это спор о словах.

4. Х. Ф. Фазылов нигде не утверждает, что зависимость вида  $\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = e^{j2\theta}$  представляет что-либо замечательное. Однако, применительно к расчету не абстрактных цепей переменного тока, а реальных трехфазных сетей энергетических систем она заслуживает особого внимания.

5. Х. Ф. Фазылов нигде не утверждает (это ему явно стремятся приписать авторы письма), будто зависимость вида  $\dot{A}\dot{B} - \dot{B}\dot{C} = e^{j2\theta}$  может иметь место только при наличии «трансформационных соотношений» (взаимной индукции). Ему, несомненно, известна моя статья (Электричество, № 5, 1946), где приведен пример симметричной трехфазной цепи, которая, будучи составлена из пассивных и не связанных взаимной индукцией элементов, характеризуется зависимостью указанного вида при условии, если соответствующие уравнения отнесены к одной определенной фазе.

6. Замечание Х. Ф. Фазылова о принципе взаимности Максвелла относится к представленной в его статье системе уравнений сети. Эти уравнения совершенно правильны. Однако, это — очевидный факт, что они в общем случае формально не удовлетворяют принципу взаимности. Последнее объясняется особой природой упомянутых уравнений (отнесение к одной фазе при наличии скрытого учета взаимной индукции между фазами). Но сказать, что эти особые уравнения формально не удовлетворяют принципу взаимности, это значит утверждать, что принцип взаимности не имеет формально в отношении их силы.

Такие утверждения не могут покушаться на справедливость физического принципа взаимности при соблюдении тех условий, для которых он установлен.

7. Хотя данная дискуссия показывает, что формулировка некоторых выражений в статье Х. Ф. Фазылова не со-

всем удачна, статья его не содержит неправильных и необоснованных утверждений, которые ему несправедливо ставятся в упрек П. Л. Калантаровым и Л. А. Цейтлиным.

**Доктор техн. наук, проф.  
П. Л. КАЛАНТАРОВ и Л. А. ЦЕЙТЛИН**

Ответные замечания Х. Ф. Фазылова (Электричество, № 6, 1947) не изменили нашего мнения о допущенных им ошибках. По содержанию этого ответа мы ограничимся сейчас лишь следующими краткими замечаниями, имеющими непосредственное отношение к существу дела:

1) Х. Ф. Фазылов не обратил внимания на наше замечание, что в соотношении  $\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1 \cdot e^{j2\theta}$ , предлагаемом им для эквивалентных четырехполосников, модуль правой части в общем случае может отличаться от единицы, и продолжает именовать это соотношение «универсальным»;

2) термин «пассивный четырехполосник» не нуждается в каких-либо новых определениях, данные же нами пояснения необходимы для того, чтобы вскрыть сущность ошибки, допущенной Х. Ф. Фазыловым;

3) Х. Ф. Фазылов воздержался от прямого ответа на вопрос о характере рассматриваемых им эквивалентных четырехполосников и ограничился ссылкой на Гардера, который также еще не решил этого вопроса;

4) вопреки утверждению Х. Ф. Фазылова принцип Максвелла применим к любой многофазной цепи в такой же мере, как и к однофазной, но применение этого принципа, сформулированного Максвеллом для одной э. д. с., к системе э. д. с. является, вообще говоря, незаконным, а поэтому отрицательные результаты, полученные Х. Ф. Фазыловым, не дают никаких оснований для сомнений в общности максвеллова принципа взаимности;

5) по поводу соображений Н. Н. Щедрина для краткости мы заметим лишь, что ошибки есть ошибки и что, например, возведение соотношения, пригодного только для частного случая, в ранг универсального соотношения вряд ли можно относить к неточностям и, тем более, признавать правильным и обоснованным утверждением, — такая чрезмерная снисходительность может принести горькие плоды.

**Кандидат техн. наук Х. Ф. ФАЗЫЛОВ**

Существо вопросов, затронутых в дискуссии по моей статье, подробно освещено в моем ответе на первые замечания П. Л. Калантарова и Л. А. Цейтлина. Выступление Н. Н. Щедрина подтверждает правильность моих положений и несколько их дополняет. Поэтому я могу ограничиться кратким ответом (по пунктам) на вторые замечания моих критиков.

1. Вынужден напомнить, что в своей статье, рассматривая эквивалентный четырехполосник для реального элемента оборудования — трехфазного бустер-трансформатора с поперечным регулированием, — я показал, что между постоянными этого четырехполосника имеет место соотношение

$$\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1 \cdot e^{j2\theta}, \quad (1)$$

а следовательно, соотношение

$$\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1 \quad (2)$$

не является общим при расчетах сетей современных энергосистем.

В первом замечании критики центр тяжести был в том, что я допустил «принципиальные ошибки», указывая на недостаточную общность соотношения (2) в применении к эквивалентным четырехполосникам и на необходимость замены его более общим соотношением (1). Во втором замечании центр тяжести неожиданно оказался в том, что соотношение (1) не является вполне общим. Отмечу, что долгое время соотношение (2) считалось справедливым для любых эквивалентных четырехполосников и комбинаций из них, отображающих элементы трехфазной сети с постоянными параметрами и не содержащие внутренних независимых э. д. с., и это однако, не вызывало никаких возражений со стороны лиц, работающих в области теории электрических цепей (понятием эквивалентного четырехполосника, явно или неявно, пользуются все, имеющие дело с расчетами трехфазных сетей энергетических систем).

Для расчетов сетей современных энергосистем соотношение (1) является практически универсальным, так же как до появления новых видов оборудования, было практически универсальным соотношение (2). Из характера моей статьи очевидно, что я не ставил перед собой задачи разработки общей теории эквивалентных четырехполосников, тем более, что само понятие эквивалентного четырехполосника (теперь принятое и самими критиками) ранее не было четко сформулировано. К этой задаче, имеющей самостоятельное значение, следует вернуться, но уже не в рамках настоящей дискуссии.

2. Термин «пассивный четырехполосник» действительно не нуждается в каких-либо новых определениях, но «пояснения», данные мне критиками, не верны и противоречат общему понятию пассивности в применении к многофазным цепям.

3. Критики в первом замечании утверждают, что рассматриваемый мной четырехполосник является активным в противоположность Гардеру, который осторожно назвал подобный четырехполосник «не строго пассивным». Я не ставил перед собой никаких терминологических задач,

оставаясь все время на позициях физического существа вопроса. Если же решать вопрос терминологии, то я согласен с Н. Н. Щедриным, что нет никаких оснований называть рассматриваемый четырехполосник активным. Условие пассивности—отсутствие внутри цепи независимых источников э. д. с.—надо понимать в смысле невозможности появления токов и напряжений в элементах без приложения к их зажимам напряжений. Это условие вовсе не затрагивает наличия симметричного обмена энергиями между фазами через взаимную индукцию. С этой позиции рассматриваемый мной трехфазный элемент цепи является чисто пассивным и его отображение—эквивалентный четырехполосник—я назвал бы просто пассивным эквивалентным четырехполосником, или, если термин «эквивалентный» недостаточно выразителен, пассивным псевдочетыреполосником, оттенив тем самым, безусловно, пассивный характер отображаемой цепи и условность ее отображения четырехполосником.

4. Приходится, к сожалению, еще раз напомнить, что мы имеем дело с эквивалентными четырехполосниками, дающими однофазное отображение реальной многофазной симметричной цепи. Применение принципа Максвелла к цепям из этих четырехполосников, как указывают сами критики, «является, вообще говоря, незаконным», что я и отметил в своей статье, указав на конкретные условия, при которых применение этого принципа становится незаконным.

Мне представляется, что дискуссия подтвердила выводы, сделанные мной в ответе на первые замечания критиков, несмотря на то, что П. Л. Калантаров и Л. А. Цейтлин остались при своем первоначальном мнении, в пользу которого они, однако, не привели убедительных доводов.

В заключение позволю себе выразить надежду, что некоторый пробел общей теории цепей, вскрытый благодаря дискуссии, будет восполнен, а наша учебная литература подойдет ближе к современной инженерной практике.



## Николай Гаврилович Славянов

К 50-ЛЕТИЮ СО ДНЯ СМЕРТИ

Академик В. П. НИКИТИН

Пятьдесят лет тому назад умер Николай Гаврилович Славянов, принадлежавший к тем зачинателям развития прикладного электричества, имена которых составляют славу и гордость русского народа. С именем Николая Гавриловича связано одно из выдающихся русских изобретений—электрическая дуговая сварка металлическим электродом, являющаяся доминирующей в промышленности всего мира в настоящее время.

Заслугой Н. Г. Славянова является не только развитие способа дуговой электросварки им созданного путем применения металлического электрода, но и практическое его осуществление в промышленном масштабе. Им была дадена жизнь методу, остающемуся ведущим в технике наших дней.

Николай Гаврилович Славянов родился 23 апреля (5 мая) 1854 г. в Задонском уезде Воронежской губ. Образование получил сперва в Воронежской гимназии, которую окончил в 1872 г. с золотой медалью, затем в Петербургском горном институте. По окончании института в 1877 г. уехал работать инженером на уральские заводы.

Будучи металлургом по своему специальному образованию, Николай Гаврилович с первых же шагов своей деятельности заинтересовался новой тогда отраслью знаний—электротехникой и глубоко ее изучил. В период работы Николая Гавриловича на пермских пушечных заводах, в Мотовилихе, его познания в области прикладного электричества были настолько обширны, что он самостоятельно конструировал различные электрические аппараты и машины, в которых на заводе встречалась надобность.

Начав с простейших, он перешел к конструированию и постройке динамомашинок для освещения заводских зданий и дуговых ламп с регуляторами его изобретения. Наибольшее развитие его работы получили в новой тогда совершенно области применения электрического тока, для целей промышленного нагрева. Он изобрел и разработал «способ и аппараты для электрической отливки металлов» и «способ электрического уплотнения металлических отливок».

Первая из этих работ представляет собою способ электросварки металлов посредством электрической дуги, образованной между изделием и металлическим электродом. При разработке своего способа Николаю Гавриловичу пришлось столкнуться с чрезвычайно сложным по тому времени вопросом питания электрическим током дуги и ее устойчивой работой. Им впервые был тогда разработан и осуществлен, для поддержания дуги между изделием и металлическим электродом, по мере его плавления, специальный полуавтомат, ставший предтечей современных автоматических сварочных установок.

Кроме того, им была также разработана и построена динамомашина для питания дуги при сварке. В другой своей работе Николай Гаврилович использовал электрическую дугу для уплотнения больших стальных отливок. В этом случае одним из электродов является поверхность уплотняемого слитка, другим—стальной или угольный стержень. Поддержание теплом дуги верхней части слитка в расплавленном состоянии способствует удалению через нее выделяющихся газов из металла при его застывании; так как сжатие металла при застывании слитка будет сопровождаться свободным понижением уровня жидкого металла, в верхней части слитка усадочные пустоты должны быть меньше, или даже совсем отсутствовать. По опытам Н. Г. Славянова ему удавалось получать стальные отливки в сотни килограммов (до 12 000 kg) с весьма малыми усадочными пустотами. Этот способ электрического уплотнения отливок не потерял своего интереса и в наши дни. Работы Н. Г. Славянова в области, созданной им, электрической сварки принесли ему мировую славу.

В 1890—1891 гг. Н. Г. Славянов получил патенты на свой способ электрической отливки металлов в России, Франции, Великобритании, Германии, Австро-Венгрии, Бельгии и им были сделаны заявки в США, Швеции и Италии.

В написанной им книге «Электрическая отливка металлов» (СПб, 1892 г.) Н. Г. Славянов сообщает подробнейшие сведения по технологии процесса и устройству, разработанного им автомата для металлического электрода или как он называл его «плавыльника». Главное отличие своего способа Н. Г. Славянов считал в наливании расплавленного электрическим током металла на часть поверхности металлической вещи, причем эта поверхность также более или менее расплавляется и соединяется (сливается) с наливаемым металлом в высшей степени совершенно. Отливаемым металлом служит металлический стержень, который вместе с тем составляет один из электродов дуги. Электрическая дуга поддерживается автоматически помощью специального регулятора.

В этой работе Н. Г. Славянов дал законченную технологию дуговой электрической сварки, предусматривающую применение защитных флюсов и легирующих и раскисляющих присадок. Эти мероприятия, повышающие качество сварного шва применяются и в современной технологии в виде электродных обмазок и флюсов для автоматической дуговой сварки.

Разработанная Николаем Гавриловичем методика горячей сварки или сварки с предварительным подогревом основного металла изделия в значительной своей части и доныне не утратила своего значения.

Будучи крупнейшим инженером своего времени, с глубокими знаниями металлургии и электротехники Н. Г. Славянов не ограничивался теоретическими изысканиями и лабораторными работами, а широко использовал получаемые результаты на практике, в промышленности.

Впервые Н. Г. Славянов применил свой способ на пермских пушечных заводах, в Мотовилихе, где им в течение первых 3½ лет было произведено 1 631 самых разнообразных работ. Сохранившиеся до наших дней образцы сварки и наплавки разнородных металлов по своему совершенному исполнению не уступают современным образцам, а некоторые, как например, наплавка бронзы на сталь являлись до последнего времени непревзойденными. Работы Н. Г. Славянова получили высокую оценку и всеобщее признание. Им посвящались многочисленные статьи в русских и иностранных журналах. «За самостоятельные и выдающиеся труды», продемонстрированные на IV электрической выставке в 1892 г., Русское техническое общество присуждает ему высшую награду, а в 1893 г. на Всемирной выставке в Чикаго (США) ему присуждается медаль.

В самоотверженном творческом труде над своими изобретениями и их внедрением в заводскую практику Николай Гаврилович не щадил своего здоровья. Умер он 43 лет 5 (17) октября 1897 г., проработав на заводах всего лишь двадцать лет. Похоронен Н. Г. Славянов на кладбище Мотовилиховского горного завода (близ Перми).

Сущность способа, созданного Н. Г. Славяновым, остается неизменной до наших дней, но в практическом применении в способ вносились и вносятся усовершенствования, диктуемые современными требованиями получения соединения, равнопрочного основному металлу.

К таким усовершенствованиям относятся применение специальных покрытий—обмазок на электродах, назначением которых является, помимо увеличения устойчивости дуги, улучшение химического состава и структуры сварного шва. Развитие подобных покрытий—обмазок обеспечило значительное повышение качества сварки.

В последнее время получили развитие автоматы, в которых одновременно с подачей электрода в шов подается раздробленное зернообразное покрытие—флюс. При этом дуга между металлическим электродом и изделием горит под слоем флюса, и шов защищается от воздействия воздуха. Этот метод сварки был широко осуществлен в нашей промышленности под руководством действительного

члена Украинской Академии наук Е. О. Патона. Электрическая дуговая сварка металлическим электродом под флюсом получила распространение в США и других странах под названием способа «Юнионмелт». Претензии некоторых американских ученых, пытавшихся трактовать способ «Юнионмелт» как изобретенный ими новый способ сварки, основанный на генерации тепла в расплавленном флюсе, являются неправильными и в основе своей порочными. Как показали исследования, проведенные советскими учеными, в качестве источника плавления металла в этом способе используется главным образом электрическая дуга между металлическим электродом и изделием. Способ сварки под флюсом, по основному своему принципу—источнику тепла, не отличается от способа Н. Г. Славянова, а представляет лишь его современную модификацию. Развитие основного способа сварки металлическим электродом, созданного Славяновым, путем применения дополнительных мероприятий в виде обмазок, флюсов сообщает ему новую практическую ценность, позволяя в соответствии с современными требованиями, повысить производительность труда и улучшить качество сварного шва.

Выдающееся русское изобретение—дуговая электрическая сварка металлическим электродом—еще в двадцатых годах нынешнего столетия именовалась во всей заграничной литературе, как «Способ Славянова». Но теперь капиталистическая печать, тенденциозно стремящаяся принизить роль русских в развитии техники, замалчивает значение работ Н. Г. Славянова, давшего в руки современной индустрии могучее орудие новой технологии.

В нашей стране электрическая дуговая сварка получила широкое промышленное применение после Великой Октябрьской социалистической революции и в настоящее время является ведущим технологическим процессом при изготовлении всех видов металлических конструкций.

За годы сталинских пятилеток выросла новая массовая профессия электросварщика. В высших учебных заведениях созданы кафедры и факультеты, готовящие кадры инженеров по сварочным специальностям. Развернулась научно-исследовательская работа в целом ряде лабораторий и научно-исследовательских институтов. Идея Н. Г. Славянова до сих пор служит путеводными звездами всем совершенствующим электрическую сварку. Имя Н. Г. Славянова с уважением и благодарностью вспоминает русский народ. Память о нем будет жить вечно в истории мировой науки и техники.



## Дуговые вентили повышенного давления для передачи энергии постоянным током

(Обзор)

Сведения, опубликованные в мае 1947 г. в швейцарском журнале Bull. ASE, показывают, что в Германии велись до 1945 г. работы по сверхвысоковольтному преобразователю, превосходящему по мощности существующие типы выпрямителей — дуговому вентилю повышенного давления. Работы по дуговым вентилям держались в 1935—1945 гг. в секрете, и их результаты стали доступными только после разгрома гитлеровской Германии.

Дуговой вентиль состоит из двух одинаковых твердых металлических электродов, обдуваемых сильным потоком воздуха или иного газа под давлением в несколько атмосфер. Периодически, 1 раз в период приложенного напряжения, между электродами зажигается электрическая дуга с помощью вспомогательного устройства того или иного типа. Дуга горит в течение всей проводящей части периода вентиля, энергично охлаждаясь газовым потоком. В момент прохождения анодного тока через дугу дуга гаснет, пространство между электродами быстро деионизируется газовым потоком и электрическая прочность вентиля восстанавливается. В течение нерабочей части периода вентиль не проводит ток. В начале следующего периода на него вновь подается зажигающий импульс и т. д. Таким образом, вентильное действие дугового преобразователя основано не на различии в свойствах самих электродов, как в ртутных выпрямителях или тиристорах, а исключительно на выборе момента подачи зажигающих импульсов; изменяя этот момент, можно заставить ток протекать через вентиль в любом требуемом направлении. В данном случае можно говорить об «искусственном вентильном действии».

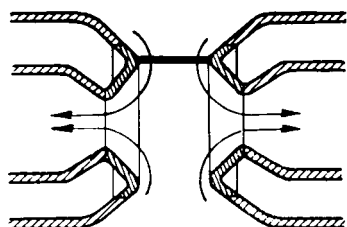
В первоначальной конструкции дугового вентиля, предложенной Э. Марксом еще в 1932 г., имелась только одна пара электродов (рис. 1, слева). Зажигание осуществлялось периодическим пробоем промежутка между электродами, для чего к ним кратковременно прикладывалось очень высокое напряжение от трансформатора Тесла. Эта конструкция была весьма несовершенной. Применение напряжения зажигания, намного превосходящего рабочее напряжение вентиля, утяжеляло условия работы изоляций всей установки. Далее, под действием газового потока дуга растягивалась в длину, что приводило к излишнему повышению падения напряжения в ней. Наконец, вентильная прочность снижалась по мере обгорания электродов, поверхность которых быстро становилась шероховатой.

Значительным шагом вперед было введение экранирующих электродов  $S_1 - S_2$ , обхватывающих главные электроды [ $H_1 - H_2$ ] (рис. 1, середина). Экранирующие

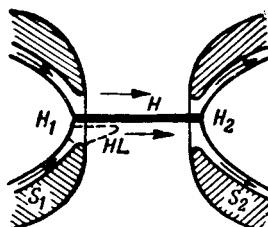
электроды направляют газовый поток таким образом, что канал дуги остается прямолинейным в течение всего периода горения и не растягивается в длину. Благодаря этому падение в дуге сокращается в 3—4 раза. Далее, наличие экранирующих электродов резко снижает в обратный полупериод максимальный градиент потенциала у поверхности главных электродов, подверженной непосредственному воздействию дуги. Обращенные друг к другу поверхности экранирующих электродов, между которыми приложено полное обратное напряжение вентиля, не обгорают и остаются гладкими. Наконец, введение экранирующих электродов позволяет существенно упростить аппаратуру зажигания: для зажигания достаточно пробивать узкий промежуток между одним из главных и соответствующим экранирующим электродом, для чего требуется примерно в 10 раз меньше напряжение, чем для зажигания дуги непосредственно между главными электродами. Возникающая вспомогательная дуга  $HL$  переносится затем газовым потоком на главные электроды и зажигает тем самым главную дугу  $H$ .

Описанный способ зажигания и связанный с ним переход к аксиальной несимметричной системе дутья имели свои недостатки. Четкость фиксации момента зажигания главной дуги была мало удовлетворительной. Продукты распыления электродов и химические соединения, образующиеся в дуге, частично переносились газовым потоком на внутренние изолирующие поверхности вентиля и со временем могли нарушить его изоляционные свойства. Обгорание главных электродов влияло на условия зажигания вспомогательной дуги, что снижало надежность зажигания. Скорость деионизации была недостаточной.

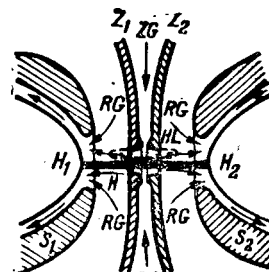
В последних конструкциях дуговых вентилях, описанных в статье А. Эрка [Л. 1] для зажигания используется два специальных зажигающих электрода  $Z_1 - Z_2$  (рис. 1, справа), расположенных по середине между главными. Коренным образом изменена также система дутья. При подаче импульса напряжения на зажигающие электроды возникает вспомогательная дуга между кольцеобразными выступами, расположенными вблизи осевой линии вентиля. Аксиальный газовый поток  $ZG$  выдувает дугу через круглые отверстия в зажигающих электродах и гонит ее в виде двух светящихся острий по направлению к главным электродам. При приближении вспомогательной дуги  $HL$  к поверхности главных электродов происходит пробой промежутка между последними и зажигается главная дуга  $H$ . Обгорание главных электродов не влияет на надежность зажигания.



1932 г.



1935 г.



1940—1945 г.

Рис. 1. Электроды дуговых вентилях.

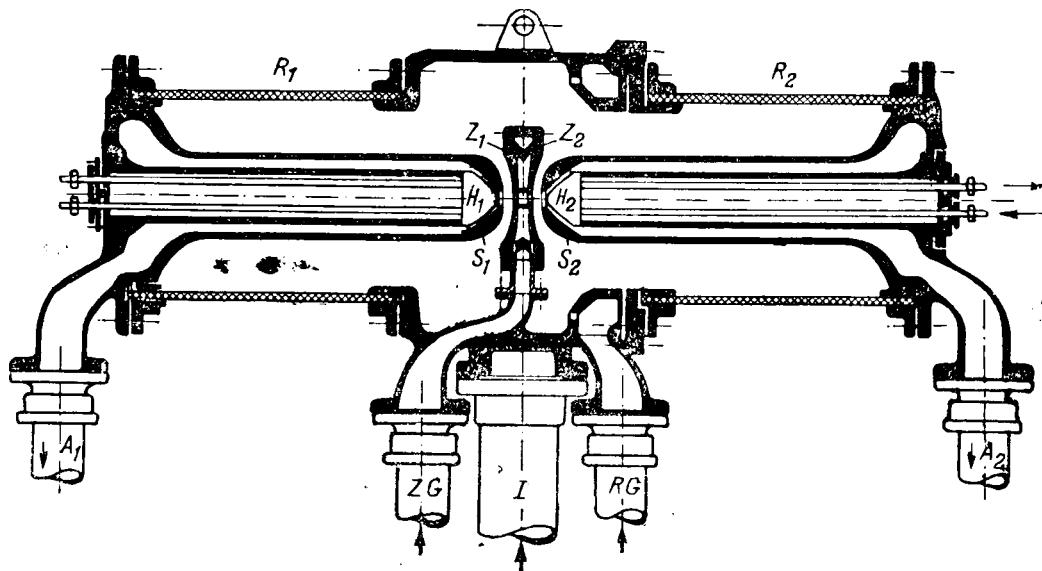


Рис. 2. Разрез дугового вентиль с двумя промежутками.

Скорость аксиального дутья значительно выше, чем в прежних конструкциях и в отдельных частях вентиль соизмерима со звуковой скоростью. Повышение скорости дутья позволило значительно уменьшить разброс моментов зажигания — примерно до  $1^\circ$  — и ускорить процесс деионизации после погасания главной дуги. Помимо аксиального дутья в вентиле предусмотрен еще второй газовый поток — радиальное дутье  $RG$ , роль которого заключается в отводе тепла из канала дуги вблизи главных электродов и в улучшении условий деионизации этой части дуги. У поверхности главных электродов оба газовых потока соединяются и далее протекают через щель между главными и экранирующими электродами на выхлоп. Все продукты распыления электродов при этом быстро удаляются из вентильного промежутка и не могут вызвать загрязнения внутренних изолирующих поверхностей. Общий расход газа определяется условиями отвода тепла из канала дуги. Допустимая длительность непрерывной работы вентиль определяется условиями обгорания главных электродов. При токах до 200 А и неподвижных электродах эта длительность составляет около пятидесяти часов; по истечении этого срока нужно сменить наконечники главных электродов, состоящие из электролитической меди, серебра или сплава обоих металлов. При токах свыше 200 А нужно применять вращающиеся электроды. Обгорание имеет минимум при вполне определенной температуре электродов; охлаждение их не должно быть поэтому чрезмерно интенсивным. В качестве газовой среды в прежних конструкциях применялся азот (с небольшой примесью кислорода), циркуляция газа была замкнутой. Однако, при замкнутой циркуляции не удавалось избежать загрязнения изоляции продуктами распыления. В настоящее время в дуговых вентиль применяется тщательно осушенный воздух; отработанный воздух выбрасывается вместе с окислами азота, возникающими в дуге, в окружающее пространство. В ранних конструкциях дуговых вентиль для уменьшения обгорания применялось вращение дуги магнитным дутьем; в настоящее время этот прием не применяется.

На рис. 2 изображен разрез современного дугового вентиль простейшего типа. Аксиальное дутье подводится к кольцевой камере между зажигающими электродами через изолирующую трубу  $ZG$ , радиальное дутье — к другой кольцевой камере через трубу  $RG$ . Выхлопные трубы обозначены через  $A_1$  и  $A_2$ . Вентиль в целом смонтирован на изоляторе  $I$ , несущем металлический центральный цилиндр. Металлические крышки, на которых крепятся главные и экранирующие электроды, изолированы относительно центрального цилиндра репелитивными цилиндрами  $R_1—R_2$ . Главные электроды охлаждаются водой.

Экранирующие электроды гальванически связаны с главными. Один из зажигающих электродов присоединен

к центральному цилиндру непосредственно, другой — через высокоомное сопротивление; кроме того, оба присоединены к средней точке емкостного делителя напряжения, включенного между главными электродами. Таким образом, обратное напряжение вентиль делится на 2 равные части; между каждым экранирующим и соответствующим зажигающим электродом действует 50% обратного напряжения.

Вентильная прочность каждого из обоих промежутков, включенных между собой последовательно, может быть определена, по крайней мере при небольших давлениях и расстояниях, по формуле:

$$U_{sp} = 15 - 20 \, pd,$$

где  $p$  — абсолютное давление в  $\text{kg/cm}^2$ ;  
 $d$  — расстояние между электродами в см.

При расстоянии 2,5 см и давлении в  $2,5 \, \text{kg/cm}^2$  каждый промежуток способен выдержать амплитуду напряжения до 100 кВ. Если обратное напряжение вентиль в целом не превышает 100 кВ, вентиль будет нормально работать со 100%-ным запасом надежности; при случайном пробое одного из промежутков, вызванном, например, попаданием проводящей частицы в газовый поток, вторая половина вентиль сможет обычно выдержать полное напряжение, и обратное зажигание вентиль в целом не произойдет. В этом — одно из крупнейших преимуществ новой конструкции.

Опыты показали, что увеличивать расстояние между экранирующими и зажигающими электродами свыше 2,5 см нецелесообразно, так как при больших расстояниях скорость восстановления электрической прочности становится недостаточной. Далее, повышение давления выше  $2,5 \, \text{kg/cm}^2$  мало сказывается на возможностях повышения вентильной прочности. Следовательно, увеличить рабочее напряжение вентиль с двумя промежутками существенно выше 100 кВ на данном этапе не представляется возможным. Для более высоких напряжений были построены вентиль с 4 и даже 6 последовательными промежутками.

Вентиль с 4 промежутками на 200 кВ, 200 А изображен в разрезе на рис. 3. Он снабжен двумя парами зажигающих электродов  $Z_1—Z_2$  и  $Z_3—Z_4$ . При зажигании возникают одновременно 2 вспомогательные дуги, каждая из которых перекрывает по 2 промежутка. В середине вентиль помещена выхлопная камера  $AS$ , в которую притекает с обеих сторон часть аксиального и радиального потоков. Обе вспомогательные дуги соединяются в центре выхлопной камеры. Возникающая вслед за этим главная дуга горит прямолинейно между главными электродами, проходя через центральные отверстия всех остальных электродов и выхлопной камеры. Как зажигающие электроды, так и выхлопные камеры присоединены



к емкостному делителю, обеспечивающему равномерное распределение обратного напряжения на все 4 промежутка.

К вентилю присоединено 7 изолирующих труб—2 для аксиального, 2— для радиального потока и 3 выхлопных. На подводящих трубах и каналах установлены сетки  $E$  для предотвращения попадания взвешенных частиц в вентиль.

Отличительная черта конструкции вентиля по рис. 3 заключается в применении изолирующих цилиндров двух разных диаметров, телескопически вдвинутых один в другой. Этот прием позволил сократить общую длину вентиля почти в 2 раза без нарушения необходимых изоляционных расстояний—около 60 см по наружной поверхности каждого цилиндра.

Наиболее мощный и высоковольтный из разработанных до сих пор типов дуговых вентиляй имеет 6 промежутков. В него вмонтировано 3 пары зажигающих электродов, к каждой из которых подводится воздух под давлением, и 2 выхлопные камеры (рис. 4). Главная дуга зажигается тремя одновременно возникающими вспомогательными дугами. Вентиль рассчитан на номинальное напряжение 400 kV. Ввиду того, что каждый из промежутков выдерживает 100 kV, пробой одного из них и даже одновременный пробой двух промежутков не приводит к обратному зажиганию вентиля в целом. Номинальный ток вентиля равен 200 А при применении неподвижных и 500 А при применении вращающихся электродов. Предельная проектная мощность 6-фазной группы таких вентиляй, соединенных по мостовой схеме, равна, следовательно, 200 000 kW при выпрямленном напряжении 400 kV. Если эти данные будут подтверждены в эксплуатационных условиях, надобность в дальнейшем повышении мощности и напряжения вентиляй отпадет надолго, так как лимитирующими факторами станут мощность и напряжение питающих трансформаторов.

Вентиль с 6 промежутками имеет длину 2,80 м и максимальный диаметр 1,32 м. Эти габариты—весьма скромные для столь мощного высоковольтного аппарата—удалось обеспечить благодаря телескопическому расположению изолирующих цилиндров и смещению фланцев подводящих и выхлопных трубопроводов по периферии цилиндра. Крепления отдельных электродов выполнены таким образом, что все встроенные части вентиля легко доступны при ревизии.

Вентиля всех трех типов снабжены глазками и, в случае надобности, зеркальными отражателями, позволяющими наблюдать с помощью синхронно вращающегося стробоскопического диска возникновение, горение и погасание главных и вспомогательных дуг в каждом из промежутков.

При дальнейшем усовершенствовании дуговых вентиляй основное внимание будет обращено на снижение потерь в дуге и расхода энергии на собственные нужды. В результате повышения скорости дутья и перехода к работе на выхлоп мощность компрессоров резко возросла по сравнению с прежними конструкциями и достигает до 1,5% от мощности преобразовательной установки.

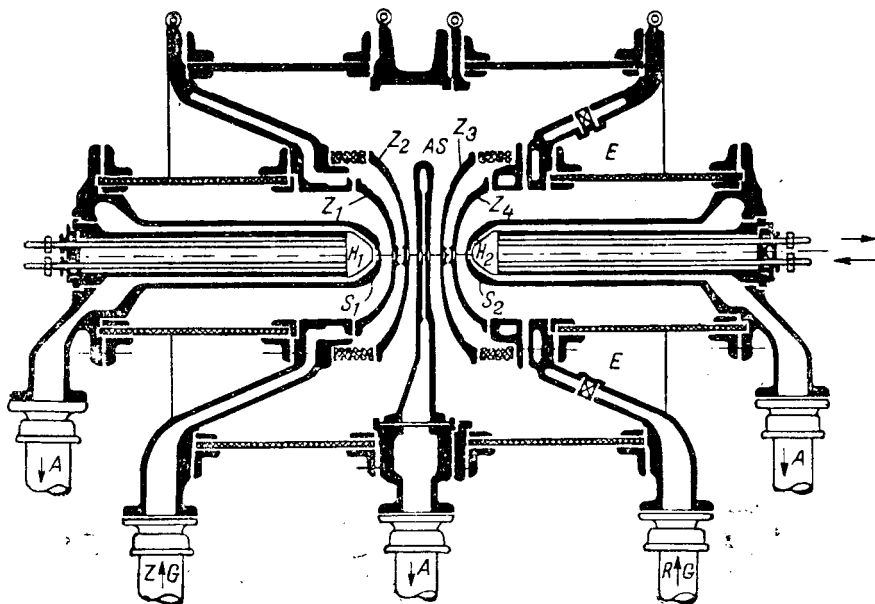


Рис. 3. Разрез дугового вентиля с 4 промежутками.

Такой же порядок величин имеют суммарные потери в дуге, также возросшие по сравнению с конструкцией 1935 г. в результате увеличения расстояния между главными электродами и повышения скорости аксиального дутья. Падение в дуге обратно пропорционально  $\sqrt{I}$ .

Эрк считает возможным в будущем существенно сократить как потери в дуге, так и расход воздуха путем синхронного колебательного перемещения электродов в осевом направлении. Этот путь представляется нам, однако, для высокоответственных установок малоперспективным, так как он сокращает возможности безинерционного регулирования и защиты.

Испытание дуговых вентиляй производилось первоначально в искровой схеме по Э. Марксу, причем на вентиль попеременно подавались большой ток и высокое напряжение от двух разных источников. Начиная с 1941 г. в западной части Германии был осуществлен ряд опытных установок для исследования работы дуговых вентиляй и вспомогательных устройств к ним в эксплуатационных условиях при длительной реальной нагрузке.

Первой из этих установок была выпрямительная подстанция 75 kV, 15 000 kW в Халлендорфе (вблизи Брауншвейга). На подстанции были установлены 3 дуговых вентиля по рис. 3, включенных по обычной трехфазной схеме выпрямления на шины 110 kV крупной районной подстанции, без специального выпрямительного трансформатора. Общая катодная точка вентиляй служила положительным полюсом, отрицательным служила нейтраль одного из трансформаторов 20 000 kVA на районной подстанции. Вся выпрямленная мощность гасилась в мощном нагрузочном сопротивлении, включенном между этими двумя точками. При перегрузках, обратных зажиганиях и коротких замыканиях установка мгновенно отключалась прекращением подачи зажигающих импульсов.

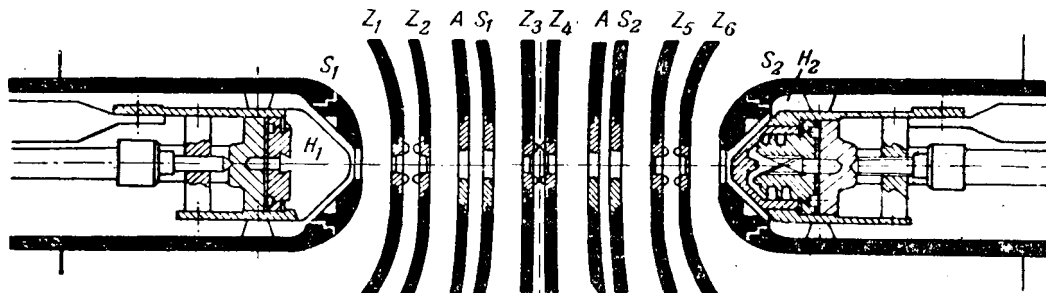


Рис. 4. Электроды дугового вентиля с 6 промежутками.



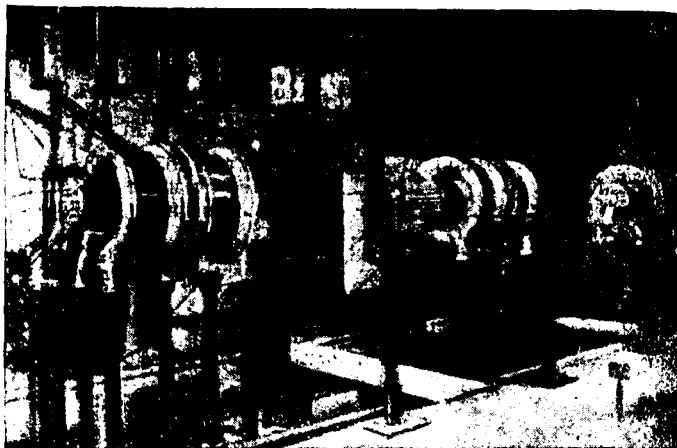


Рис. 5. Опытная трехфазная выпрямительная установка 15 000 kW в Халлендорфе.

Для каждого вентиля имелась, кроме того, сигнализация обратных зажигания и пропусков зажигания.

Эта установка изображена на рис. 5. Вентили подвешены на металлической конструкции, над ними подвешены конденсаторы емкостного делителя — по одному на каждый из четырех промежутков. Зажигающие импульсы подавались через изолирующие трансформаторы (по 2 на каждый вентиль), установленные на полу за вентилями.

Испытания проводились в течение 2 000 рабочих часов при разных давлениях, скоростях потока и моментах зажигания. На вентили ложилось при этом обратное напряжение в 160 kV. Вентили выдерживали это напряжение даже при замыкании накоротко двух промежутков из 4 на каждом вентиле. Все опыты показали, что дуговые вентили с 4 промежутками удовлетворяют поставленным требованиям. Проведенные испытания эквивалентны испытанию группы из 6 вентилях, включенных по мостовой схеме, на 150 kV, 30 000 kW.

Для исследования явлений, возникающих при передаче постоянным током на дуговых вентилях, в 1942 г. была оборудована опытная линия электропередачи между подстанциями Лерте и Мисбург вблизи Ганновера. Для этой цели была выделена трехфазная кабельная линия 60 kV длиной в 5 км между обеими подстанциями. На каждом конце линии было установлено по 6 дуговых вентилях с двумя промежутками, соединенные по мостовой схеме. Вентили были присоединены к шинам 60 kV трехфазного тока без трансформаторов через дроссельные катушки и токоограничивающие сопротивления (последние были впоследствии закорочены). Выпрямленное напряжение составляло 80 kV, передаваемая мощность — до 16 000 kW.

Как следует из статьи Эрка, лично принимавшего участие в наладке линии Лерте—Мисбург, на линии были предусмотрены все основные регулирующие защитные и блокировочные устройства, требуемые для работы передачи постоянным током. Имелось автоматическое пусковое устройство, позволявшее избежать нежелательных колебаний напряжения при пуске. Передаваемая мощность регулировалась фазорегулятором в сеточной цепи вспомогательных тиратронов, управлявших моментом зажигания дуговых вентилях. Сеточная защита прекращала подачу зажигающих импульсов при сверхтоках, перенапряжениях и при «опрокидывании» инвертора и тем самым мгновенно отключала установку в целом. Минимальная защита отключала установку при очень малых токах, когда ток в линии становился прерывистым. Защита от обратного тока блокировала подачу зажигающих импульсов в том случае, если полярность напряжения между главными электродами в момент подачи импульса вызвала бы протекание тока в нежелательном направлении (эта блокировка необходима в связи с отсутствием естественного вентильного действия у дуговых преобразователей).

На инверторном конце имелись далее устройства для автоматического восстановления работы инвертора при

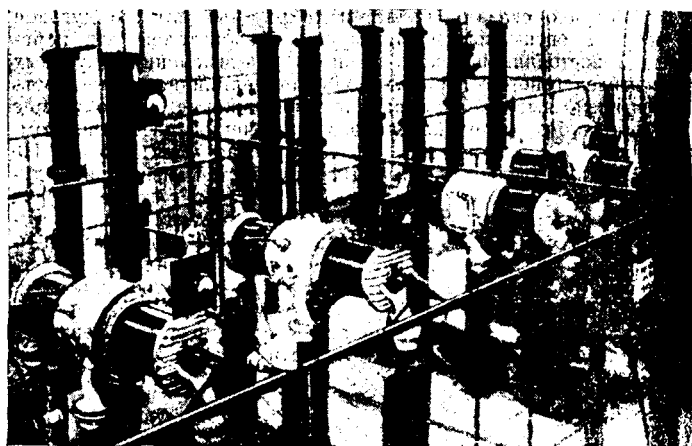


Рис. 6. Выпрямительная подстанция опытной передачи Лерте—Мисбург.

«опрокидывания», а также для АПВ. При «опрокидывании» инвертора устройство АПВ блокировало зажигание выпрямителя в течение 8 периодов, затем автоматически восстанавливало нормальную работу передачи.

Закрытая часть выпрямительной подстанции изображена на рис. 6. Конденсаторы, установленные за вентилями, используются для замедления нарастания обратного напряжения в конце коммутации. Опыт показал, что при больших значениях емкостей этих параллельных конденсаторов возникают чрезмерные толчки разрядного тока в момент зажигания вентилях, и могут произойти обрывы главной дуги в работающих вентилях. Это обстоятельство ставит предел возможности замедления нарастания обратного напряжения параллельными конденсаторами.

По устранении небольших дефектов опытная передача работала почти на полную мощность; система регулирования и управления действовала исправно. Среди первоначальных трудностей можно отметить возникновение резонанса между емкостью кабеля и индуктивностью сглаживающего дросселя для частоты 6-й гармоники. Это явление было устранено подключением дополнительной емкости параллельно к кабелю.

После проведения большого числа опытов по передаче (длительностью по 10—20 часов каждый) и одного испытания длительностью в 72 часа было принято решение осуществить длительную непрерывную работу передачи. Однако, это решение не было реализовано в связи с разрушением инверторной подстанции в Мисбурге прямым попаданием авиабомбы. Устройство для искусственной коммутации инвертора, установленное в Мисбурге, не смогло быть опробовано по той же причине.

На основании изучения работы первых двух установок было начато строительство опытной передачи постоянным током значительно большего масштаба. Передачу предполагалось производить между районными подстанциями Халлендорф и Лерте, с использованием существующей трехфазной воздушной линии 220 kV длиной 45 км. На каждом конце намечалось установить по 6 вентилях с 6 промежутками, присоединенных без трансформаторов к трехфазным шинам 220 kV. Напряжение передачи было принято соответственно равным 300 kV, передаваемая мощность 150 000 kW. В случае успешной работы линии на эту мощность предполагалось в перспективе удвоить число вентилях, установить трансформаторы 220/280 kV и довести напряжение передачи до 800 kV при мощности 400 000 kW.

В дальнейшем было принято решение ограничиться на первых порах в целях экономии строительством только одной подстанции — в Халлендорфе, предусмотрев возможности работы установки в режиме рекуперации (3 вентиля в выпрямительном и 3 вентиля в инверторном режиме) через включенную шлейфом линию Халлендорф—Лерте. К моменту прекращения работ в 1945 г. строительная часть подстанции была закончена, из 6 вентилях на 400 kV были смонтированы 2, имелись в наличии составные части остальных 4.

Трудно сказать, является ли ртутный или же дуговой вентиль оптимальным типом преобразователей для передачи постоянным током. В пользу применения дуговых вентилях говорят гораздо большая единичная мощность вентилях, высокое запирающее напряжение, позволяющее обойтись без последовательного включения вентилях, компактность, дешевизна, более простая технология. Не представляет принципиальных трудностей изготовить дуговые вентили для наружной установки, что в случае ртутных вентилях по меньшей мере сомнительно. Отсутствие естественного вентильного действия у дуговых вентилях создает возможность изменять направление потока энергии в линии постоянного тока без переключений в силовой цепи.

С другой стороны, недостатками дуговых вентилях являются на данном этапе отсутствие серьезного экспло-

атационного опыта, необходимость периодической смены наконечников главных электродов, меньшая скорость восстановления вентильной прочности, и, особенно, значительный расход энергии на потери и собственные нужды.

### Литература

1. A. Eгk. Bull. ASE, № 11, стр. 295 — 308, 1947.
2. Ю. В. Буткевич, А. М. Бронштейн, В. А. Бережинский. Дуговые вентили повышенного давления. Госэнергоиздат, 59 стр., 1941.
3. E. Marx. ETZ, № 38, стр. 1119—1120, 1939.
4. W. G. Thompson. IEEE, № 502, стр. 437—473, 1938.
5. E. Marx. Lichtbogenstromrichter. Berlin, 1932.

Кандидат техн. наук Я. М. ЧЕРВОНЕНКИС

## ЭЛЕКТРОПРИВОД

### Электрическая установка для взлета самолетов. *El. Manufacturing*, № 1, стр. 144—148, 1947<sup>1</sup>

Описывается установка электрической катапульты («электропульта») на экспериментальном аэродроме Patuxent River в штате Maryland (США).

Основной частью или взлетной дорожкой «электропульта» служит вторичная обмотка ротора (в данном случае — неподвижного), устроенная в виде медных стержней с замыкающими их с обеих сторон шинами. Медные стержни уложены в пакетах железа шириной около 300 мм. Общее протяжение такого «ротора» — 420 м.

Первичная обмотка статора расположена в движущейся тележке, на которой устанавливается самолет. Высота тележки — 14 см. Обмотка помещена в нижней части тележки, отстоящей от поверхности развернутого ротора на величину воздушного зазора, равного приблизительно 4,75 мм. Подводка тока к движущейся тележке (статору) осуществляется от уложенных в специальные каналы медных троллеев помощью скользящих по ним медно-графитных башмаков. Плотность тока в башмаках в момент взлета, т. е. при пике нагрузки в 7 000 А, достигает 26 А/см<sup>2</sup>. Для обеспечения контакта между токо-съемными башмаками и медными рельсами—троллями—при скоростях взлета порядка 320 км/ч потребовалось создать повышенное давление в контактах около 5 кг/см<sup>2</sup>.

При разбеге без нагрузки тележка достигает скорости в 363 км/ч за период около 3 сек. и на дистанции, меньшей 150 м.

Реактивный самолет применяемого здесь типа требует обычно взлетной дорожки длиной около 600 м, но с помощью «электропульта» он получает скорости взлета («отрыва от земли») в 187 км/ч на пути всего лишь 100 м за время в 4,1 сек. В течение этих нескольких секунд тележка потребляет мощность около 12 000 кВт. Частота трехфазного тока, питающего установку, падает от номинальной — 216 Нз до приблизительно 192 Нз. Но даже при этой пониженной частоте «синхронная» линейная скорость бегущего поля равна все же около 400 км/ч.

Максимальный к. п. д. электромагнитного механизма, представляемого «электропультой» (как двигателя с прямолинейным движением) составляет 75% и достигается при скорости движения тележки около 354 км/ч.

Разработаны проекты более мощных и технически более совершенных «электропульт», которые смогут разгонять самые большие из существующих самолетов до скорости около 350 км/ч на дистанции всего лишь в 150 м, тогда как некоторые современные самолеты нормально требуют взлетной дорожки длиной до 1 200 м. В этих проектах максимальное ускорение ограничивается величиной  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  для того, чтобы свести к минимуму неприятные ощущения для пассажиров самолета при взлете.

<sup>1</sup> См. первый реферат «Электрическая катапульта» (Электричество, № 5, 1947), где дано общее описание устройства таких катапульти. В настоящем реферате содержатся дополнительные данные к цифровым показателям катапульти.

Силовая станция для питания «электропульта» электрической энергией состоит из установки по системе Леонарда, в которой сдвоенный авиадвигатель вращает непосредственно соединенный с ним генератор постоянного тока в 750 кВт, 250 В. Последний питает двигатель постоянного тока в 1 000 л. с., несущий на своем валу маховик и трехфазный генератор в 4 500 кВА при  $\cos \varphi = 0,8$ , 1 000 В, 216 Нз, рассчитанный на 1 300 синхронных об/мин.

Маховик имеет диаметр 2,6 м при ширине обода около 0,5 м и весит 24 т. Для разгона маховика до его полной скорости требуется 8 мин. При пике нагрузки скорость агрегата падает с 1 300 об/мин до 1 150 об/мин.

Помимо экспериментальных и других сухопутных аэродромов намечается применение «электропульта» в пловучих аэропортах, на аэродромах в центре города, где ограничено их пространство, а также для использования старых аэродромов, оставленных в свое время из-за недостаточности протяжения взлетной дорожки.

**Примечание референта.** Первый реферат об электрической катапульте привлек к себе внимание читателей и вызвал ряд откликов с их стороны. Кандидат техн. наук Л. И. Штурман (Москва) сообщает, что принцип получения регулируемой характеристики моментов в магнитофугальных устройствах, состоящий в применении обмоток с различным сопротивлением на отдельных участках и использованный в «электропульте», не является американским изобретением. На устройство магнитофугального двигателя по такому именно принципу в СССР было выдано авторское свидетельство еще до войны (см. авторское свидетельство на «Асинхронный двигатель», выданное на имя Л. И. Штурмана за № 59171 от 15 марта 1940 г.).

Инж. П. С. Бондаренко (Днепропетровск), касаясь причин переноса питания током «электропульта» с неподвижной обмотки—«дорожки» на подвижную—«тележку», справедливо отмечает, что помимо причин, указанных в примечании к реферату, питание подвижной обмотки статора (на «тележке») позволяет обойтись без передвижных скользящих контактов для неподвижной обмотки. Последние были бы необходимы для последовательного замыкания накоротко концов трехфазной обмотки статора по отдельным секциям, по мере прохождения ротора—«тележки», если бы обмотка статора была размещена неподвижно на «дорожке».

Кандидат техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

### Борьба с гололедом на контактном рельсе. *Modern Transport*, № 1452, стр. 8, 1947.

Для удаления гололеда с контактного рельса на Южной железной дороге (Англия) применялись специальные скребки, монтируемые на особых вагонах. Однако, при толстой корке льда требовалось большое давление скребка и ножи последнего быстро изнашивались и выходили из строя. Поэтому был введен метод смазывания головки

контактного рельса перед наступлением гололеда маслом. Зимой ежедневно в 20 час. 30 мин. Главное управление получает официальный прогноз погоды, который передается диспетчером трех постов телеуправления устройствами энергоснабжения. Диспетчеры, кроме того, получают сводки температуры и общих условий погоды из различных пунктов линии. На основе всех данных диспетчеры делают заключение о возможности гололедообразования и при угрозе последнего дают приказ в отдел эксплуатации о высылке поездов для смазывания рельсов.

В поезд включается специально оборудованный вагон с запасом низкосортного незамерзающего масла. Емкость резервуара для масла — 3500 л. Масло насосом подается к соплам, расположенным над головкой контактного рельса. Система электромеханической блокировки автоматически переключает сопла при переходе контактного рельса с одной стороны пути на другую и прекращает подачу масла при остановке поезда. Запаса масла хватает на пробег 1 200—1 500 км.

На линии имеется 9 вагонов с таким оборудованием, распределенных по сети в районах, наиболее подверженных гололедам. Поезда с вагонами для смазки работают по специальному графику и объезжают все главные направления сети. Для них обычно применяется электрическая тяга, но в случае необходимости могут быть использованы паровозы или тепловозы.

Масло не предотвращает отложения льда на рельсах, но вследствие смазки влага не примерзает к рельсу, а образует пористую пленку, легко скалываемую даже нормальным токоприемником. Своевременно нанесенная смазка значительно облегчает удаление гололеда. Но этот способ неприменим при внезапно наступающей гололедной погоде. Для борьбы с гололедом в таких условиях в настоящее время делают опыты использования специальных жидкостей, расплавляющих уже отложившийся лед. Однако, все подобные жидкости по природе своей являются более или менее токопроводящими и должны применяться с предосторожностями во избежание замыкания контактного рельса на землю. Для этих жидкостей в вагонах для смазки установлены резервуары по 700 л. Этот способ должен быть испытан в линейных условиях.

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

**Троллейбус с напряжением в контактном проводе 1000 V. Modern Transport, № 1455, стр. 15 и 20, 1947.**

В 1940 г. линия междугороднего трамвая между городами Альтштеттен и Бернек в северо-восточной Швейцарии длиной 11 км заменена троллейбусом с рабочим напряжением 1 000 V. Такая величина напряжения позволила избежать постройки новой тяговой подстанции, используя подстанцию, питающую зубчатую дорогу в Гэ. Для начала эксплуатации приобретено 5 машин. Электрическое оборудование рассчитано на возможное использование напряжения от 1 500 до 1 750 V, для чего требуется перемотка двигателя.

По техническим условиям троллейбус должен преодолевать подъемы в 60 ‰. Максимальная скорость троллейбуса 65 км/ч. Вес машины со всем оборудованием 5,5 т.

Машина может, питаясь от аккумуляторной батареи, двигаться по участкам, не оборудованным контактной сетью, а на длинных участках, — получая энергию от агрегата, размещенного на особом прицепе. Передача осуществляется валом троллейбусного типа с дифференциалом. Машина оборудована воздушным тормозом, действующим на колеса, и ручным, действующим на передачу.

Всего в машине 60 мест для сидения и стояния. Рама сварная из легкой стали. Двери двухстворчатые, автоматические, шириной 700 мм. На машине установлен двоянный двигатель по типу тандем, включенный последовательно.

Основные данные троллейбуса: мощность на валу двигателя — длительная 56, часовая — 80 kW. Мощность на ободе колеса — длительная — 53, часовая — 76 kW. Ско-

рость при длительном режиме — 33, при часовом — 26 км/ч. Длительный ток 70, часовой — 100 А. Номинальное напряжение 900 V. Диаметр колес 985 мм. Передаточное число 1 : 9,58. Длина кузова 9 950, ширина — 2 415, высота пола над мостовой 700 мм.

Штанги для токоосема имеют длину 6 170 мм; они обеспечивают возможность отхода машины от оси контактных проводов на 4,5 м.

Штанги опускаются нажатием кнопки в кабине водителя. Мотор-компрессор и отопительная аппаратура питаются непосредственно от контактного провода. Двигатель компрессора имеет мощность 1,25 л. с. Напряжение на нем снижается специальным реостатом до 600 V. Управление электропневматическое. Цепи управления питаются от кадмиево-никелевой аккумуляторной батареи 24 V емкостью 45 Ah.

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

**Стандартные сельские линии. El. Times, m. 111, № 2892, стр. 386, 1947.**

В одном из районов Англии (Newbury) с преимущественно сельскими потребителями осуществлялось строительство сельских линий по новому Британскому стандарту (BS 1320). В 1940 г. была сооружена первая опытная линия. С 1942 г. построено 5,48 км напряжением 11 kV. Опоры линий деревянные. Три провода размещаются горизонтально на стальных незаземленных траверзах с штыревыми изоляторами. Расстояние между проводами 750 мм. Для опор использовались пихта, лиственница и ель. Угловые, конечные и ажурные опоры укрепляются проволочными оттяжками.

Хотя стандарт относится к напряжениям до 11 kV и сечениям проводов до 32,2 мм<sup>2</sup>, но те же конструкции применялись для проводов с сечением до 129 мм<sup>2</sup>, а также для напряжения 33 kV. В последнем случае расстояние между проводами увеличивалось до 1 050 мм, а на концах и тяжелых участках линий применялись П-образные опоры. Всего построено 140 км линий 33 kV и предполагается построить еще 170 км.

За время эксплуатации на новых линиях не было поломок. Отсутствовали также пожары опор и удары людей и животных от соприкосновения с опорами, чего боялись противники незаземленных траверзов. Не было случаев повреждения линий вследствие перекрытия изоляторов птицами и тяжелых метеорологических условий. Отмечена только одна грозовая авария — расщепление опоры при прямом ударе молнии. Сборка и установка опор проста. Новые сельские линии на 10—15% дешевле старых, главным образом, за счет уменьшения расстояния проводов от поверхности земли, допускаемого стандартом.

Кандидат с.-х. наук И. А. БУДЗКО

**J. S. Francis. Электрический расчет сельских многократнозаземленных линий. El. World, m. 127, № 13, стр. 59—60, 1947.**

При расчете однофазных сетей с многократнозаземленным проводом, которые имеют преобладающее распространение в сельских и пригородных районах США, потеря напряжения в заземленном проводе обычно принимается равной потере напряжения в незаземленном проводе. В действительности, вследствие протекания части тока заземленного провода непосредственно в землю, потеря напряжения в нем меньше на 25—35%. Пользуясь формулами Карсона, автор находит величину кажущегося сопротивления  $Z_g$  (вследствие протекания тока по проводу) и  $Z_{gm}$  (по земле):

$$Z_g = r + j \cdot 0,00457 \cdot f \cdot \lg \frac{2h}{R} + 0,004044 \cdot f \cdot (P + jQ)$$

при  $\theta = 0$ ;

$$Z_{gm} = j \cdot 0,04657 \cdot f \cdot \lg \frac{\sqrt{(2h)^2 + S^2}}{S} + 0,0044 \cdot f \cdot (P + jQ)$$

$$\text{при } \theta = \arctg \frac{S}{2h}$$

В этих формулах:  $h$  — средняя высота провода над грунтом (в футах);  $S$  — расстояние между проводами (в футах);  $f$  — частота в Hz;  $r$  — активное сопротивление провода в  $\Omega$  на милю (1,6094 км);  $R$  — средний радиус провода;

$$P = \frac{\pi}{8} - \frac{p \cdot \cos \theta}{3\sqrt{\frac{p}{2}}} + \frac{p^3}{16} \theta \cdot \sin 2\theta + \frac{p^2 \cdot \cos 2\theta}{16} (0,6723 + \ln \frac{2}{p});$$

$$Q = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{p} + p \frac{\cos \theta}{3\sqrt{\frac{p}{2}}};$$

$$p = 1,713 \cdot 10^{-3} h \sqrt{\frac{f}{R_g}}; R_g \text{ — удельное сопротивление}$$

грунта в  $\Omega \cdot m$ .

Величины  $Z_g$  и  $Z_{gm}$  для стандартных в США проводов приведены в нижеследующей таблице (при частоте 60 Hz,  $h = 25$  футов,  $S = 5$  футов,  $R_g = 100 \Omega \cdot m$ ):

Провод	Сечение, мм <sup>2</sup>	Число жил	$\Omega$ на милю	
			активное сопротивление	$Z_g$
Медный . . . . .	33,6	3	0,873	$0,996 + j 1,536$
Медный . . . . .	26,7	3	1,101	$1,194 + j 1,550$
Медный . . . . .	21,2	1	1,374	$1,467 + j 1,573$
Медный . . . . .	13,3	1	2,185	$2,278 + j 1,601$
Сталеалюминиевый .	33,6	6×1	1,41	$1,50 + j 1,56$
Сталеалюминиевый .	21,2	6×1	2,24	$2,33 + j 1,58$
Сталеалюминиевый .	13,3	6×1	3,56	$3,65 + j 1,61$
Сталемедный . . . .	21,2	1×2	1,40	$1,49 + j 1,58$
Сталемедный . . . .	13,3	1×2	2,25	$2,34 + j 1,61$

$$Z_{gm} = 0,0935 + j \cdot 0,7698$$

Общее кажущееся сопротивление многократноеземленного провода  $Z = Z_g - \frac{Z_{gm}^2}{Z_g}$ .

Изменения проводимости грунта, расстояния между проводами и числа жил в них мало влияют на окончательный результат. Многочисленные опыты показали, что подсчет потери напряжения этим методом дает значения в среднем на 5% ниже действительных, что и было учтено путем повышения величины общего кажущегося сопротивления. При наиболее распространенных в США марках медных, сталеалюминиевых и сталеалюминиевых проводов сечением 13—34 мм<sup>2</sup> в подземном проводе протекает 19—43% тока. Для облегчения расчетов определена постоянная потери напряжения для однофазных многократноеземленных линий. Трехпроводные линии (два фазных провода и нулевой) дают потерю напряжения, очень близкую к половине определенной для однофазных линий.

Метод автора в течение нескольких лет применяется в проектной практике.

Кандидат с.-х. наук И. А. БУДЗКО

## ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

### О нормировании скорости восстановления напряжений.

На первой послевоенной (ноябрь 1946 г.) 17 сессии Французского общества инженеров-электриков подвергся обсуждению вопрос о нормировании частоты собственных колебаний электрической сети, как характеристики жесткости сети по отношению к выключателям. С точки зрения большинства присутствовавших на сессии нормированию подлежит не скорость восстановления напряжения — обычная характеристика жесткости сети, а частота собственных колебаний, как наиболее простая, независимая и наиболее легко рассчитываемая и измеряемая величина.

В докладе «Предложения к стандарту на выключатели» Сен-Жермен предложил указанную частоту считать по формуле:

$$f = \frac{K}{\sqrt{U}},$$

где  $U$  — номинальное напряжение сети, а  $K = 50 \cdot 10^3$ .

Исходя из того, что частота собственных колебаний сети, главным образом, определяется частотой собственных колебаний трансформатора  $2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , Дормон дал следующий вывод формулы Сен-Жермена. Индуктивность трансформатора

$$L = k \frac{xU^2}{P},$$

где  $k$  — постоянная;  $P$  — номинальная мощность трансформатора;  $x$  — реактивное сопротивление в процентах, относенное к номинальной мощности.

Поскольку индуктивность пропорциональна линейным размерам трансформатора, а мощность — четвертой степени этих размеров, то  $x$  пропорционально  $\sqrt{P}$ . Поэтому индуктивность пропорциональна

$$\frac{3}{4} U^2 P$$

С другой стороны, емкость пропорциональна поверхности обмоток, т. е. квадрату линейных размеров или  $\sqrt{P}$  и обратно пропорциональна расстоянию между обмотками, которые приблизительно пропорциональны  $U$ .

Таким образом, емкость пропорциональна  $\frac{\sqrt{P}}{U}$  и, следовательно, частота

$$\left( U^2 P^{-\frac{3}{4}} \frac{1}{U} \right)^{-\frac{1}{2}} = U^{-\frac{1}{2}} P^{\frac{1}{8}}$$

Так как  $P^{\frac{1}{8}}$  изменяется незначительно с изменением  $P$ , то частоту можно считать только обратно пропорциональной  $\sqrt{U}$ , что и принято в формуле Сен-Жермена.

Тезнер (доклад «Стандарт и испытания выключателей»), соглашаясь в общем с формулой Сен-Жермена, указал, однако, что при напряжениях до 17,5 kV необходимо ее дополнить шкалой частот, величины которых обратно пропорциональны отключаемому мощностям. Последнее объясняется тем, что при напряжениях до 17,5 kV имеются малые понижающие трансформаторы, при отключении которых (при коротком замыкании за трансформатором) частота собственных колебаний значительно выше, чем при отключении на шинах станции, а мощность короткого замыкания значительно меньше. То же касается и отключения короткого замыкания до и за реактором. В связи с этим Тезнер предлагает установить:

для мощностей

$$\begin{array}{ll} 501 \div 1000 \text{ тыс. kVA} & \text{частоты } 10 \cdot 10^3 \div 15 \cdot 10^3 \text{ Hz} \\ 251 \div 500 \text{ тыс. kVA} & \text{15} \cdot 10^3 \div 22 \cdot 10^3 \text{ Hz} \\ 0 \div 250 \text{ тыс. kVA} & \text{20} \cdot 10^3 \div 30 \cdot 10^3 \text{ Hz} \end{array}$$



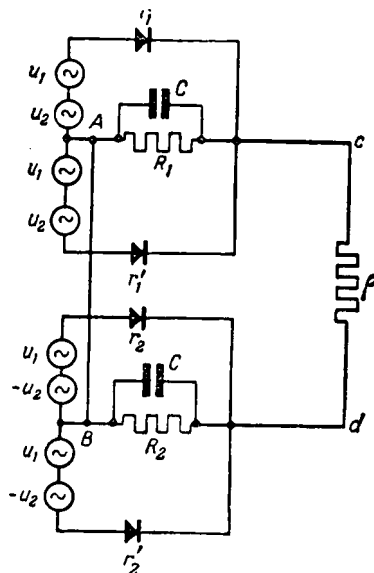


Рис. 2.

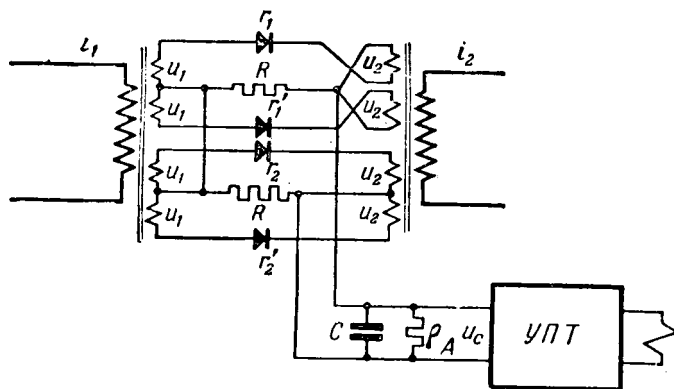


Рис. 3.

жение от трансформатора напряжения подается к зажимам  $cd$  через фазовый контур ФК-2.

Для осуществления полной защиты линии по указанному принципу требуется между двумя концами линии иметь три дуплексных или шесть симплексных каналов связи, по два на каждый фазовый провод. Эти шесть каналов можно получить по одному дуплексному высокочастотному каналу с использованием многократной модуляции несущих частот различными звуковыми частотами. Таким образом, система передачи заключается в том, что на каждом из концов линии три фазовых тока модулируют три звуковые частоты, которые в свою очередь модулируют несущую. Если нет необходимости в пофазном отключении, то защита сравнивает фазы токов на выходах комбинированных фильтров  $I_1 + kI_0$ ; в этом случае она также требует дуплексного высокочастотного канала, но несущие частоты этого канала могут модулироваться непосредственно токами на выходах фильтров без применения звуковых частот.

При системе многократной модуляции на звуковых частотах требуется применение фильтров звуковых частот для разделения каналов. Эти фильтры представляют собой инерционные системы, которые вносят паразитный фазовый сдвиг в передаваемые напряжения промышленной частоты. Для компенсации этого фазового сдвига в цепь местного тока включен фазовый контур, как показано на рис. 1.

Данная защита имеет оригинальную схему сравнения фаз, на работе которой следует остановиться подробнее. Принципиальная схема сравнения показана на рис. 2, полная схема — на рис. 3. На схеме от трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  подаются напряжения  $u_1$  и  $u_2$ , пропорциональные

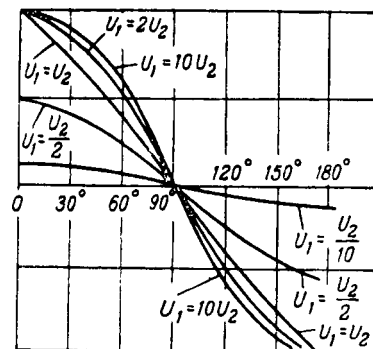


Рис. 4.

местному току данной фазы  $i_1$  и току  $i_2$  той же фазы на противоположном конце линии. Схема содержит два двухполупериодных выпрямителя  $r_1, r_1'$  и  $r_2, r_2'$ , один из которых питается суммой напряжений  $u_1 + u_2$ , а другой — их разностью  $u_1 - u_2$ . Выходное напряжение получается на сопротивлении  $\rho$ , которое должно быть значительно больше нагрузочных сопротивлений выпрямителей  $R_1$  и  $R_2$ . С сопротивления  $\rho$  напряжение подается на усилитель постоянного тока УПТ и далее на отключающее реле.

Характер напряжения на сопротивлении  $\rho$  зависит от вольтамперной характеристики выпрямителей  $r_1, r_1', r_2, r_2'$ .

Для случая параболической характеристики зависимости напряжения на сопротивлении  $\rho$  от напряжений  $u_1$  и  $u_2$  выражается формулой

$$U_p = 2aRU_1U_2 \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $a$  — коэффициент пропорциональности, определяемый характеристикой выпрямителей;

$R$  — сопротивление нагрузки выпрямителей;

$U_1, U_2$  — амплитуды переменных напряжений  $u_1$  и  $u_2$ ;

$\varphi$  — угол сдвига фаз между напряжениями  $u_1$  и  $u_2$ ;

В случае линейных характеристик выпрямителей напряжение на сопротивлении  $\rho$  определяется выражением

$$U_p = \frac{2b}{\pi} R \left[ \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \varphi} - \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \varphi} \right], \quad (2)$$

где  $b$  — сопротивление выпрямителя в проводящей области.

На рис. 4 изображена зависимость  $U_p$  по формуле (2) от угла сдвига фаз и соотношения амплитуд напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . Кривые показывают, что при равенстве  $U_1$  и  $U_2$  схема дает почти линейную зависимость изменения выходного напряжения от сдвига фаз  $U_1$  и  $U_2$ . Так как усилитель постоянного тока, подключенный к сопротивлению  $\rho$ , создает ток в отключающем реле только при отрицательных напряжениях на выходе, то зона действия составляет  $\pm 90^\circ$  по отношению к случаю полного совпадения фаз, т. е. полная зона работы составляет  $180^\circ$ .

Данная схема сравнения фаз представляет собой не что иное, как купроксный ваттметр, на который вместо тока и напряжения подаются два напряжения, пропорциональные токам по концам защищаемого фазового провода. В качестве элемента сравнения можно было бы применить обычное механическое реле мощности, однако последнее обладает большим потреблением и потому менее удобно.

Данная защита испытывалась как в лаборатории, так и на линии 150 кВ Гивор-Солей. Защита была установлена на этой линии с действием на сигнал и показала правильную работу при имевших место внешних коротких замыканиях и коротких замыканиях в зоне защиты. Следует отметить интересный эксперимент по исследованию прохождения тока высокой частоты в случае замыкания на землю фазы, по которой происходила передача. При замыкании на землю провода, по которому производилась высо-

кочастотная передача, напряжение высокой частоты на приемном конце, замеренное на активном сопротивлении в 400  $\Omega$ , уменьшилось всего в два раза. На основании этих экспериментов был сделан вывод о том, что при однофазных замыканиях на землю, даже при замыкании той фазы, по которой производится передача высокой частоты, не происходит нарушения высокочастотного канала.

Анализ описанной защиты [Л. 4] дает основание сделать следующее заключение:

1. Защита осуществляет пофазное отключение, причем отключение поврежденной фазы не влияет на работу защиты на неповрежденных фазах. Это имеет существенное значение, так как за последнее время наметилась тенденция к более широкому применению систем с пофазным отключением и пофазным АПВ.

2. Сравнение фаз полных токов по концам защищаемого участка с точки зрения правильности действия дифференциально-фазной защиты имеет некоторые преимущества перед сравнением фаз токов положительной последовательности.

3. Благодаря отсутствию специального пускового органа схема обладает высокой чувствительностью.

4. Применение узкополосных фильтров звуковых частот значительно повышает помехоустойчивость схемы.

К числу недостатков защиты относятся следующие:

1. Относительная сложность всей системы. Кроме обычного приемопередатчика на каждый конец линии требуется три ламповых ограничителя, три генератора звуковой частоты, три модулятора, три демодулятора, три двухкаскадных усилителя постоянного тока и т. д. Такая сложная многоламповая схема не сможет надежно работать от напряжения станционной батареи 110 В, так что для нее потребуется специальная вольтодобавочная батарея.

2. Система непрерывного действия и отсутствие пускового органа могут при повреждении отдельных цепей привести к ложному действию защиты.

3. Непрерывная подача в линию высокой частоты связана с влияниями канала защиты на другие высокочастотные каналы линии электропередачи и линий связи, проходящих вблизи защищаемой линии.

4. Зона действия защиты по углу мала по сравнению с другими системами защиты. Это особенно существенно при работе по первому варианту, т. е. с использованием комбинированного фильтра  $I_1 + kI_0$ .

5. При одностороннем питании могут иметь место режимы коротких замыканий, при которых фазовые соотношения полных токов по концам поврежденного участка линии будут неблагоприятны с точки зрения действия защиты (например, замыкание между двумя фазами или одностороннее замыкание на землю в случае отсутствия заземленной нулевой точки на приемном конце). Если при одностороннем питании токи нагрузки на приемном конце создают достаточную модуляцию, то возможен отказ в работе защиты.

6. Система переключения дифференциально-фазной защиты на ваттметровую при нарушении высокочастотного канала может привести к тому, что защита может действовать при выпадении системы из синхронизма. При нарушении устойчивости системы реле минимального полного сопротивления  $PP$  и реле  $R$  могут одновременно держать замкнутыми контакты на выходе  $\Phi K-2$  за счет того, что реле  $R$  имеет выдержку времени на отпадание.

## Литература

1. M. F. Cohen. Le développement des protections sélectives des lignes par courants porteurs. Bull. SFE, № 60, 1946.
2. A. Maret. Protection différentielle, relais compensé et relais électronique. Bull. ASE, № 18, 1938.
3. Labouret. Bull. SFE, m. 3, август, 1943.
4. M. A. Chevallier. Protection paramétrique par courants porteurs pour lignes et câbles à haute tension. Bull. SFE, № 60, 1946.

Доктор техн. наук, проф. Г. И. АТАБЕКОВ,  
Инж. Г. В. МИКУЦКИЙ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

O. L. Boothby, R. M. Bozorth. Новый магнитный материал с высокой проницаемостью. J. Appl. Phys., m. 18, № 2, стр. 173, 1947.

Изготовлен новый сплав, названный суперпермаллоем. При использовании его в форме ленты толщиной 0,025 мм в качестве сердечника трансформаторов он имеет начальную магнитную проницаемость  $\mu_0$  от 50 000 до 120 000 G/Oe, в то время как молибденовый пермаллой имеет  $\mu_0$  в пределах от 10 000 до 20 000 G/Oe. Высокая проницаемость нового сплава объясняется низким значением константы анизотропии и магнитострикции. Большую роль при изготовлении сплава играют чистота исходных материалов и правильная «пермаллойная» термическая обработка, т. е. соответствующая скорость охлаждения, упорядочивающая атомную структуру Fe и Ni. Суперпермаллой имеет состав: 79% Ni, 0,5% Mo, 15% Fe и 0,5% Mn. Примеси Si, S и др. ниже, чем у обычных промышленных ферромагнитных сплавов. Материал плавится в вакуумной индукционной печи и прокатывается обычным способом в виде ленты. В качестве электрической изоляции ленты используется суспензия из магнезии и четыреххлористого углерода; толщина пленки достигает 0,012 мм на каждую сторону. Термическая обработка состоит из отжига в атмосфере водорода при 1300°С и последующего охлаждения. В интервале значений индукции 7 000 ÷ 8 000 G проницаемость суперпермаллоя снижается быстрее, нежели у молибденового пермаллоя

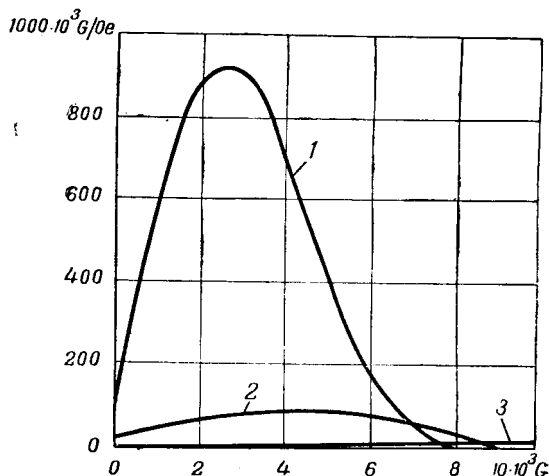


Рис. 1.

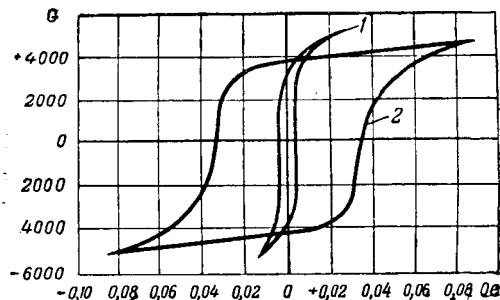


Рис. 2.

и железа. Величина индукции насыщения  $B_s = 7900$  G; коэрцитивная сила 0,01 ÷ 0,02 Oe; удельное электрическое сопротивление составляет 64  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ . На рис. 1 показаны зависимости  $\mu = f(B)$  для суперпермаллоя (кривая 1), молибденового пермаллоя (кривая 2) и железа (кривая 3). Потери на гистерезис для суперпермаллоя за период приблизительно в 10 раз меньше, чем для молибденового пермаллоя (при тех же условиях). На рис. 2 приведены петли гистерезиса для суперпермаллоя (кривая 1) и молибденового пермаллоя при максимальной индукции 5000 G и толщине листа 0,35 мм.

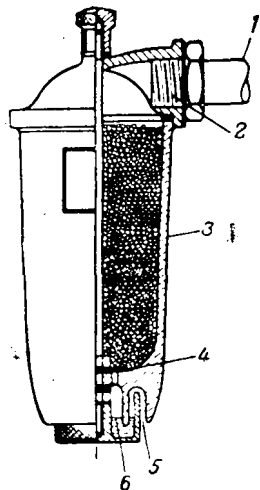
Инж. П. П. ХРАМОВ



## РАЗНОЕ

**Силикагелевый поглотитель для трансформаторов.**  
*MV, т. 22, № 358, стр. 120, 1947.*

Силикагель применяется как вещество, способное поглощать влагу, для заполнения осушителей, включаемых между консерваторами маслонаполненных трансформаторов и наружным воздухом. При охлаждении трансформатора засасываемый им воздух осушается, и таким образом изоляция трансформатора защищается от увлажнения.

**Силикагелевый поглотитель.**

1 — трубы для присоединения к трансформатору; 2 — выход воздуха; 3 — прозрачный сосуд с силикагелем; 4 — медный упор; 5 — вход воздуха; 6 — уровень масла в лабиринте, отделяющем силикагель от атмосферы.

Увлажненный силикагель подвергается сушке посредством нагрева, после чего становится вновь пригодным к употреблению. Для контроля степени увлажненности силикагель подкрашивается кобальтовой синькой; изменение цвета в розовый указывает на увлажнение силикагеля и необходимость его смены или сушки. На рисунке изображена конструкция силикагелевого влагопоглотителя; особенностью его является применение кожуха из прозрачной пластмассы, благодаря чему изменение цвета легко заметно снаружи. Высота поглотителя — 220 мм.

Кандидат техн. наук **Б. М. ТАРЕЕВ**

**Н. S. Double. Выпрямители, управляемые дросселями насыщения.** *Post Office El. Eng. Journal, т. 39, ч. III, 1946.*

Автор предлагает выпрямители, управляемые дросселями насыщения и предназначенные для буферной работы с батареями, называть, в отличие от выпрямителей других назначений, автозарядными устройствами (auto-chargers).

Предполагается классифицировать виды нагрузок выпрямителей по следующим типам потребных для них характеристик: 1) Постоянство выходного напряжения при изменяющейся нагрузке; такова характеристика выпрямителя общего типа, если употреблять термин «постоянство напряжения» не в строгом его значении. 2) Постоянство тока при изменяющемся напряжении на нагрузке. В выпрямителях с подобными характеристиками нуждаются некоторые электрохимические процессы — гальваностения, заряд батарей. 3) Характеристика, соответствующая режиму буферной работы батарей. Некоторые потребители (ручные и небольшой мощности автоматические телефонные станции, железнодорожная сигнализация, многие виды индикаторной и выключающей аппаратуры) допускают колебания напряжения на банке, выходящие за пределы 1,87—2,25 В. В этих случаях нет нужды поддерживать батарею в полностью заряженном состоянии. Периоды нагрузки сменяют интервалы с режимом, близким к холостому ходу. Эксплуатация считает, что достаточно в этих случаях обеспечить «ускоренный заряд» до 2,35 В на банку с последующим зарядным режимом при токе, несколько превосходящем необходимый для покрытия потерь. Такое использование гарантирует многолетний срок службы батарей.

Другие установки (крупные телефонные станции, усилители, постоянно приключенное к батарее служебное освещение) требуют строгого поддержания напряжения в пределах 1,87—2,25 В на банку. Подобным потребителям необходимы выпрямители, способные поддерживать постоянство напряжения при изменяющейся нагрузке. В этих случаях должен быть обеспечен полный заряд батарей. Иногда применяют в этих установках вспомогательные зарядные устройства с целью обеспечения быстрого заряда батареи до величины, превосходящей 2,25 В на банку после выпадания источника питания.

Принципиальная схема выпрямителя, управляемого дросселем насыщения, показана на рис. 1, а. Опыт показывает, что рационально выбрать потерю напряжения в дросселе

$$\frac{U_m - U_t}{U_m} 100 \geq 15\%.$$

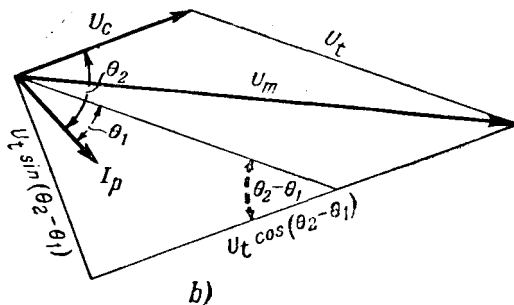
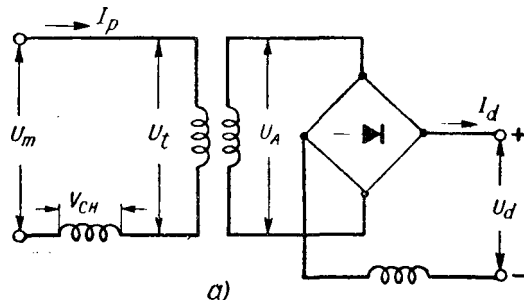


Рис. 1.

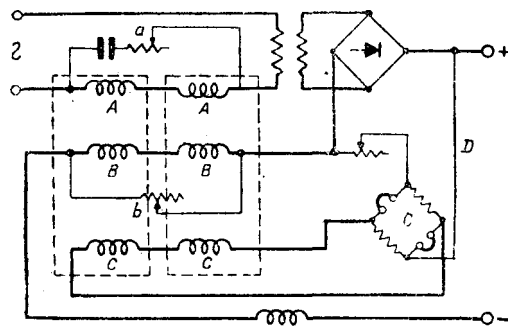


Рис. 2.

Приблизительно, переменный ток дросселя

$$I_p = 1,2 \frac{I_d}{r} + I_0 \frac{U_t}{U_m},$$

где  $I_0$  — ток холостого хода при напряжении  $U_m$ .

Напряжение на дросселе

$$U_c = \sqrt{U_m^2 - U_t^2 \sin^2(\theta_2 - \theta_1)} - U_t \cos(\theta_2 - \theta_1).$$

Типичные способы подключения обмоток дросселя показаны на рис. 2. Дублирование дросселей дает, как известно, некоторые преимущества в части характеристик дросселя. Шунтирование сопротивлением  $b$  позволяет осуществить тонкую подгонку ампервитков возбуждения.



Применение одной лишь серийной обмотки возбуждения  $B$  (положительная обратная связь) дает уже возможность получить характеристику, в известной мере приближающуюся к характеристике постоянства напряжения при изменяющейся нагрузке. Аналогично, шунтовая обмотка  $C$  дает характеристику, близкую к характеристике постоянства тока при изменяющемся напряжении нагрузки.

Дальнейшего приближения к стабильному напряжению можно достичь, подключая параллельно обмотки переменного тока цепь из последовательно соединенных конденсатора и сопротивления.

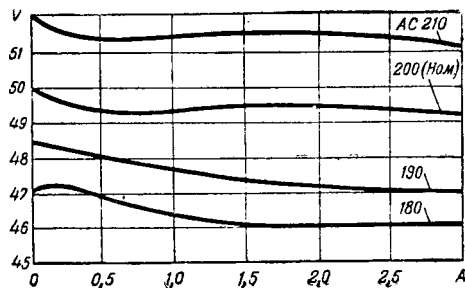


Рис. 3.

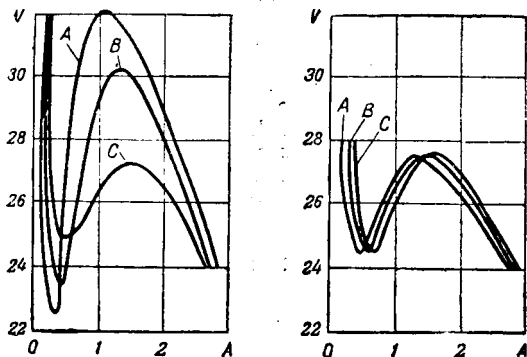


Рис. 4.

Подключение баррETERного моста  $c$ , отрегулированного на нуль тока питаемой им обмотки в точке, соответствующей номинальному значению напряжения выхода, также дает следующую степень приближения к режиму постоянства напряжения. Например, тенденции к повышению напряжения выхода сопутствует, вследствие нарушения баланса моста, снижение общего числа ампервитков возбуждения. Это устройство дает также известную стабилизацию от колебаний напряжения сети. Иногда требуется обеспечить только лишь стабилизацию от колебаний напряжения сети, тогда баррETERная схема  $c$  приключается на вход через самостоятельный трансформатор и выпрямитель.

На первом этапе разработки выпрямительного устройства число серийных ампервитков следует выбирать из

условия равенства напряжения при холостом ходе и нагрузке, равной трем четвертям номинальной.

Спад характеристик (см. ниже рис. 5) в целях исключения перегрузок выпрямителя током, выше номинального, достигается применением шунтирующего конденсатора. Емкость конденсатора выбирается из условия резонанса его с дросселем при заданных переменных и постоянных ампервитках.

Спада характеристики можно также достичь шунтовой обмоткой, работающей дифференциально с серийной. Число витков шунтовой обмотки выбирается из условия равенства нулю полных ампервитков подмагничивания в точке спада.

На рис. 3 показаны вольтамперные характеристики выпрямителя общего назначения, отнесенного выше к группе 1 (постоянство напряжения при переменной нагрузке). Схема его довольно строго выполнена по рис. 2. Самым существенным отклонением является то, что шунт  $b$  выполнен индуктивным. Индуктивный шунт позволяет поддерживать напряжение в предусмотренных пределах при переходном процессе изменения нагрузки. Колебания выходного напряжения при этом процессе обычно неизбежны вследствие сопутствующего процессу изменению напряжения на катодном дросселе. БаррETERная схема обеспечивает в устройстве поддержание напряжения в пределах 46—52 В при изменении напряжения сети на  $\pm 5\%$ ,  $-10\%$ .

Характеристики автозарядного устройства, выполненного без шунтовой обмотки, показаны слева на рис. 4. Кривая  $A$  получена при сравнительно большом значении  $a$  и малом  $c$ , кривая  $B$  — при обратном соотношении. Рисунок иллюстрирует, каким гибким средством управления является дроссель насыщения.

На правом графике рис. 4 кривая  $A$  относится к случаю относительно малого конденсатора и большого сопротивления  $a$ ; кривая  $B$  — наоборот, соответствует малому  $a$  и большому значению емкости.

На рис. 5 даны характеристики автозарядного устройства с ионным выпрямителем, обеспечивающего

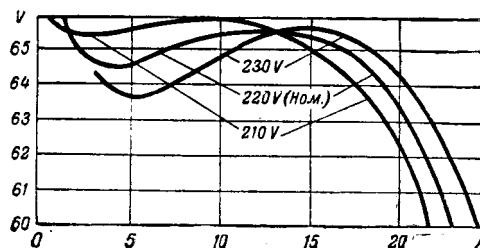


Рис. 5.

поддержание напряжения батарей из 29 банок в пределах 63—66 В при нагрузке устройства током до 20 А. Приблизительно при этом значении тока наступает спад характеристики, что исключает перегрузку выпрямителя (номинальный ток выпрямителя 25 А).

За последние 10 лет установлено от двух до трех тысяч автозарядных устройств, управляемых дросселями насыщения.

Инж. И. И. РАТГАУЗ



## Крановые и металлургические электродвигатели

Кандидат техн. наук Г. С. ПЛИСС

Всесоюзный комитет стандартов при Совете Министров СССР

*Всесоюзным комитетом стандартов утверждены внесенные Министерством электропромышленности проекты стандартов на крановые и металлургические электродвигатели в качестве государственных общесоюзных стандартов со сроком введения с 1 апреля 1948 г.: ГОСТ 184-47 «Электродвигатели постоянного тока крановые и металлургические» взамен ГОСТ 184-41; ГОСТ 185-47 «Электродвигатели трехфазного тока асинхронные крановые и металлургические» взамен ГОСТ 185-41. Освещаются основные требования, установленные в новых стандартах на крановые и металлургические электродвигатели в сопоставлении со старыми стандартами.*

Законом о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг. предусматривается дальнейшая механизация трудоемких процессов в различных отраслях промышленности. К мероприятиям по механизации относятся, например: оснастка рудных, угольных и коксовых складов металлургических и коксохимических заводов современными грузоподъемными кранами, выпуск мощных электрических экскаваторов и др. подъемно-крановых механизмов. Предусматривается также выпуск важнейших для металлургии агрегатов: блюмингов, рельсобалочных станков, тонколистостанов непрерывной прокатки и др.

Специфические особенности приводов подъемно-крановых механизмов и вспомогательных приводов металлургических агрегатов: большая частота включений или реверсов, значительные перегрузочные моменты, малое время разгона, — требуют применения специальных крановых и металлургических электродвигателей. Эти электродвигатели получили также и особые конструктивные формы, определившиеся условиями их размещения, монтажа и эксплуатации.

Питание крановых и металлургических электродвигателей связано с общей системой распределения электрической энергии на промышленных предприятиях. В зависимости от принятой на данном предприятии системы тока (постоянный или переменный ток), а также в зависимости от требуемых рабочих характеристик электродвигателей, применяют крановые и металлургические электродвигатели постоянного тока (чаще на металлургических предприятиях) или асинхронные трехфазного тока.

За последние годы во всех странах на предприятиях, в том числе и на металлургических, произошли серьезные сдвиги в направлении расширения области применения крановых и металлургических электродвигателей переменного тока. В Германии, например, до 1914 г. переменным током питались только 30—35% кранов, а в 1941 г. уже 90% всех работающих кранов питались переменным током. Такой сдвиг в направлении применения в крановых подъемных механизмах электродвигателей переменного тока вы-

зван преимуществом распределения электроэнергии переменного тока в сравнении с постоянным током и улучшением конструкций и рабочих характеристик крановых и металлургических электродвигателей переменного тока.

Распространенность и ответственное назначение крановых электродвигателей послужили причиной стандартизации их в ряде стран: в США, в Германии, в Чехословакии и др. В стандартах указанных стран устанавливаются номинальные напряжения, мощности и скорости вращения электродвигателей.

В СССР крановые электродвигатели впервые были стандартизованы в 1934 г.: ОСТ НКТП 7306/363 «Электродвигатели крановые и подъемные постоянного тока» и ОСТ НКТП 7307/364 «Электродвигатели крановые и подъемные трехфазного тока». В этих стандартах были установлены номинальные напряжения, мощности, скорости вращения электродвигателей, отдельные технические требования к ним и методы их испытаний.

В 1941 г. указанные стандарты были пересмотрены и заменены Государственными общесоюзными стандартами ГОСТ 184-41 «Электродвигатели крановые, подъемные и металлургические постоянного тока» и ГОСТ 185-41 «Электродвигатели крановые, подъемные и металлургические трехфазного тока». Этими стандартами были несколько расширены пределы мощностей изготавливаемых электродвигателей, уточнены и дополнены технические требования к ним. Однако, утвержденные в 1941 г. стандарты базировались на устаревших конструкциях электродвигателей постоянного тока серии КПД и электродвигателей трехфазного тока серии КТ и ее модификаций КТК и КТС, хотя и надежных в эксплуатации, но уже к тому времени устаревших по своим техническим показателям и обладавших рядом недостатков, основные из которых следующие: а) низкие динамические свойства (повышенное время разгона и большой маховой момент ротора или якоря); б) пониженная кратность отношения пускового и максимального моментов вращения к номинальному; в) недостаточный диапазон мощностей в верхней части

шкалы; г) неудовлетворительное использование активных материалов у машин малых мощностей в связи с применением изоляции класса «А»; д) резкое снижение мощности при продолжительности включения — ПВ свыше 40% у электродвигателей трехфазного тока и невозможность продолжительного включения электродвигателей (их шунтовых обмоток) постоянного тока в диапазоне мощности от 30 до 100 kW.

Все эти недостатки послужили причиной того, что Комитет стандартов ограничил срок действия утвержденных им в 1941 г. стандартов на крановые и металлургические электродвигатели (ГОСТ 184-41 и ГОСТ 185-41) и поручил Министерству электропромышленности разработать новые проекты стандартов взамен утвержденных, в которых должно быть предусмотрено повышение технических показателей до уровня, соответствующего современным требованиям, предъявляемым к машинам этого типа.

В сентябре 1947 г. Всесоюзным комитетом стандартов были утверждены внесенные Министерством электропромышленности проекты стандартов на крановые и металлургические электродвигатели в качестве Государственных общесоюзных стандартов со сроком введения с 1 апреля 1948 г.: ГОСТ 184-47 «Электродвигатели постоянного тока крановые и металлургические» (взамен ГОСТ 184-41) и ГОСТ 185-47 «Электродвигатели трехфазного тока асинхронные крановые и металлургические» (взамен ГОСТ 185-41).

Указанные стандарты распространяются на электродвигатели постоянного тока (ГОСТ 184-47) и трехфазного тока асинхронные (ГОСТ 185-47) — применяемые на кранах всех видов, на подъемных механизмах передвижения промышленного типа, на электрических лебедках и на приводах вспомогательных механизмов металлургических агрегатов (доменных печей, сталеплавильных цехов, прокатных станков).

Стандартами установлено, что электродвигатели предназначены для работ, отличающихся условиями: а) частого пуска и реверсирования; б) частого электрического и механического торможения; в) значительных и частых механических толчков и ударов и г) быстрого пуска, реверсирования и торможения механизма.

По форме исполнения в дополнении к выпускавшимся ранее электродвигателям (с горизонтальным валом) стандартами предусмотрено, что по требованию заказчиков изготавливаются электродвигатели мощностью до 50 kW с вертикальным расположением вала. Для электродвигателей мощностью до 50 kW введено также исполнение с фланцевым креплением (вместо крепления только на лапах), изготавливаемые по требованию потребителя.

По способу защиты от внешних воздействий и способу охлаждения электродвигатели постоянного тока разделяются на закрытые с естественным охлаждением (основное исполнение), закрытые с независимой вентиляцией — продуваемые и защищенные с самовентиляцией, как это было предусмотрено и в замененном стандарте (ГОСТ 184-41), а электродвигатели трехфазного тока — на закрытые обдуваемые с самовентиляцией (основное исполнение) и закрытые с естественным охлаждением (дополнительное исполнение).

Открытые электродвигатели трехфазного тока с естественной вентиляцией, предусмотренные замененным стандартом (ГОСТ 185-41), в новый стандарт (ГОСТ 185-47) не включены. Характерной особенностью нового стандарта на электродвигатели трехфазного тока, базирующегося на новой серии электродвигателей (МТ), является включение в него электродвигателей с внешней самовентиляцией (вентилятор, насаженный на вал двигателя с внешней стороны подшипниковой щиты, прогоняет воздух по поверхности остова, имеющего аксиальные ребра).

Стандартами предусматривается, что электродвигатели предназначены: а) для повторно-кратковременного режима работы с относительностью включения — ПВ = 15%; 25%; 40% и 60% (ПВ = 60% введен вновь). Под повторно-кратковременным режимом работы электродвигателей понимается чередование кратковременных рабочих периодов с кратковременными отключениями — паузами — и обозначается сокращенно «ПВ». Под «ПВ» понимается отношение времени рабочего периода к продолжительности рабочего цикла — суммарной продолжительности рабочего периода и паузы; б) для кратковременного (60-минутного) режима работы; в) для продолжительного режима работы (для этого режима работы предназначены только электродвигатели постоянного тока закрытые и продуваемые и электродвигатели трехфазного тока закрытые обдуваемые с самовентиляцией).

Продолжительный режим работы отмененными стандартами (ГОСТ 184-41 и ГОСТ 185-41) не предусматривался. Работа электродвигателей при продолжительностях больших, чем это ранее было установлено в стандартах, и даже при ПВ = 100% расширяет область применения электродвигателей, выпускаемых по вновь утвержденным стандартам в частности, для привода механизмов длительно прерывистого режима, характеризующихся чередованием холостого хода механизма и циклической ударной нагрузки, например, прессы, ножницы, штамповальные станки.

Основным режимом работы крановых и металлургических электродвигателей является повторно-кратковременный режим с ПВ = 25%. Мощность, соответствующая этому режиму, является номинальной для данного типа электродвигателей.

Электродвигатели изготавливаются с двумя выступающими одинаковыми концами вала, что можно использовать в случае поломки одного конца вала. Электродвигатели изготавливаются на подшипниках качения (шариковых и роликовых). Вновь введено требование о том, что по механической прочности электродвигатели должны выдерживать 1500 включений в час при совместном действии механического и электрического торможения и что винтовые соединения электродвигателей должны быть защищены от самоотвинчивания. Из соображений безопасности эксплуатации предусмотрено, что один из выступающих концов вала электродвигателя должен быть снабжен защитным металлическим колпачком и что на корпусе должен быть болт для заземления.

Основные детали (подшипниковые щиты, вал, щеткодержатели, коллектор, контактные кольца, катушки возбуждения, якорь, ротор) однотипных электродвигателей с одинаковыми номинальными данными должны быть взаимозаменяемы.

Впервые стандартами устанавливается перечень запасных частей, приспособлений и отдельных вспомогательных устройств, являющихся непосредственной принадлежностью электродвигателей при их эксплуатации, которые должны поставляться комплектно с электродвигателями. Так, комплектно с электродвигателями должны поставляться: один комплект щеток, одна коробка щеткодержателя с нажимным устройством, изолятор щеткодержателя или заизолированный палец щеткодержателя. По требованию заказчика электродвигатели должны состоять из приспособлений для пристройки электрических тормозов непосредственно к корпусу электродвигателя.

Ниже приводятся технические требования, характерные для электродвигателей в зависимости от рода тока.

**Крановые и металлургические электродвигатели постоянного тока (ГОСТ 184-47).** Электродвигатели изготавливаются на номинальные напряжения 220 и 440 V, причем электродвигатели на напряжение 220 V должны допускать их последовательное соединение без заземления средней точки.

Электродвигатели в закрытом исполнении с естественным охлаждением (основное исполнение) изготавливаются на номинальные мощности в пределах от 1,5 до 300 kW вместо пределов от 3 до 155 kW, предусмотренных ранее в замененном стандарте. Твердая шкала мощностей стандартом не установлена, а нормирован лишь коэффициент нарастания мощности электродвигателей в зависимости от зон мощностей (под коэффициентом нарастания мощности

понимают отношение большей из двух смежных мощностей электродвигателей к меньшей).

Для электродвигателей мощностью до 50 kW коэффициент нарастания мощности установлен в пределах от 1,25 до 1,7, а для электродвигателей мощностью свыше 50 kW в пределах от 1,25 до 1,4.

По способу возбуждения электродвигатели исполняются как серийные, компаундные (с отношением чисел ампервитков шунтовых серийных равным примерно 1), шунтовые и шунтовые со стабилизирующей обмоткой.

Наиболее распространенным исполнением электродвигателей является серийное. Для этого исполнения электродвигателей стандартом нормированы номинальные скорости вращения в зависимости от мощности: для электродвигателей до 20 kW в пределах 1100—600 об/мин; для электродвигателей от 21 до 50 kW 600—500 об/мин и для электродвигателей мощностью свыше 50 kW 500—375 об/мин.

Установленный диапазон скорости вращения электродвигателей соответствует оптимальным значениям, установленным международной практикой.

Стандартом предусматривается продолжительное включение шунтовых и компаундных электродвигателей, что не предусматривалось в замененном стандарте. Невозможность длительного включения шунтовых обмоток выпускаемых в настоящее время машин серии КПД является одним из основных дефектов машин этой серии. Предусмотрено также исполнение электродвигателей с шунтовой обмоткой, рассчитанной на 50% номинального напряжения и допускающей также работу с форсированием при пуске (включение шунтовой обмотки на полное номинальное напряжение).

Введение шунтовых обмоток с форсированием при пуске, применяемое в современных схемах электроприводов различных механизмов, позволяет увеличить кратность пусковых моментов и тем самым динамические показатели электродвигателей.

Установлен диапазон регулирования скорости вращения электродвигателей на напряжение 220 V: для шунтовых электродвигателей со стабилизирующей обмоткой в пределах 2,5 : 1 (ослаблением поля шунтовой обмотки) при максимальном вращающем моменте равном 0,8 номинального и максимальной скорости вращения, а для шунтовых электродвигателей в пределах 2 : 1 (ослаблением поля) при моменте равном 0,8 номинального.

Кроме того регламентировано регулирование скорости вращения шунтовых электродвигателей на напряжение 220 V (за исключением электродвигателей, соединяемых последовательно) в пределах 2 : 1 повышением приложенного напряжения. При этом электродвигатели должны допускать максимальный вращающий момент до 1,5 номинального при максимальных оборотах.

Значительно повышена в сравнении с ГОСТ 184-41 перегрузочная способность электродвигателей на напряжение 220 V по вращающемуся моменту.

Особенно, это относится к электродвигателям мощностью свыше 50 kW, что видно из табл. 1.

За номинальный момент, по отношению к которому устанавливается кратность, принимают момент вращения закрытого электродвигателя с естественным охлаждением при ПВ = 25%.

Кратность пусковых и максимальных моментов по отношению к номинальному вращающему моменту для краново-металлургических электродвигателей на 220 V, установленная в 1940 г. нормами АОИМ (Американского общества инженеров металлургов), соответствует табл. 2.

По приведенным нормам выпускают краново-металлургические электродвигатели американские и английские заводы.

Из сравнения таблиц 1 и 2 можно видеть, что нормы перегрузочной способности краново-металлургических электродвигателей, установленные ГОСТ 184-47 находятся на уровне, а для отдельных мощностей превышают иностранные нормы.

Электродвигатели серийного исполнения, согласно требованиям стандарта, должны быть рассчитаны на максимальную скорость вращения, в 3,5 раза превышающую номинальную по основной шкале оборотов (вместо 2,5 по замененному стандарту), с вращающим моментом в 0,7 от номинального при электрическом торможении (вместо 0,5

Таблица 1

Исполнение электродвигателя по роду возбуждения	Отношение максимально-допустимого вращающего момента к номинальному							
	При номинальном напряжении на зажимах и соответствующей скорости вращения				При трогании с места, а также при скорости вращения не выше 20% номинальной			
	По ГОСТ 184-47		По ГОСТ 184-41		По ГОСТ 184-47		По ГОСТ 184-41	
	До 50 kW	Свыше 50 kW	По ГОСТ 184-41	Повышение момента для двигателей свыше 50 kW в %	До 50 kW	Свыше 50 kW	По ГОСТ 184-41	Повышение момента для двигателей свыше 50 kW в %
Серийный . . . . .	4	4,5	4	12,5	5	5,5	4,8	14,5
Компаундный . . . . .	3,5	4	3,5	14,0	4,5	5	4,3	16,5
Шунтовой на 50% номинального напряжения (с форсированием при пуске) и шунтовой со стабилизирующей обмоткой . . . . .	3	3,3	—	—	3,6	4	—	—
Шунтовой с обмоткой возбуждения на номинальное напряжение . . . . .	2,5	2,8	2,2	27,0	3	3,3	2,6	27

Таблица 2

Исполнение двигателя по роду возбуждения	При полной скорости	При пуске
Серийный . . . . .	4,0	5,0
Компаундный . . . . .	3,5	4,5
Шунтовой . . . . .	3,0	3,6

от номинального по замененному стандарту) и в 2 раза превышающим номинальный при механическом торможении.

Электродвигатели должны выполняться с изоляцией класса «В» и «ВС». Только для электродвигателей мощностью до 4 kW и для шунтовых обмоток электродвигателей мощностью до 25 kW при диаметре обмоточной меди, меньшем 1 mm допускается применение изоляции класса «А». Электродвигатели весом более 600 kg, для удобства монтажа, ремонта и осмотра, выполняются с разъемным остовом.

Важнейшим показателем краново-металлургических электродвигателей, характеризующим их динамические качества, является так называемая «механическая постоянная времени», определяемая по формуле:

$$t = \frac{GD^2 n}{375 M_{\max}}$$

где  $t$  — механическая постоянная времени в сек;

$GD^2$  — маховой момент якоря,  $\text{kgm}^2$ ;

$n$  — номинальная скорость вращения, об/мин;

$M_{\max}$  — максимальный вращающий момент при номинальном напряжении,  $\text{kgm}^2$ .

Механическая постоянная времени серийных электродвигателей основной шкалы оборотов должна быть не больше 0,07 сек для мощностей до 50 kW включительно и не больше 0,10 сек для мощностей выше 50 kW.

Далее стандартом нормированы правила приемки, методы испытаний, маркировка и документация.

Электродвигатели крановые и металлургические постоянного тока, выполненные в соответствии с ГОСТ

184-47, окажутся вполне современными, будут отвечать требованиям кранового, металлургического и других приводов с большой частотой включения. Повышение перегрузочной способности электродвигателей, улучшение их динамических качеств, повышение механической прочности, применение современных видов изоляции и введение разъемного остова обеспечат надежную работу и удобство обслуживания электродвигателей в эксплуатации.

Крановые и металлургические электродвигатели переменного тока (ГОСТ 185-47). Электродвигатели изготавливаются на напряжения 220 или 380 В при соединении обмоток статора соответственно в треугольник или в звезду и на напряжение 500 В при соединении обмоток статора в звезду.

Электродвигатели выполняются как с трехфазной обмоткой ротора (и с контактными кольцами), так и с короткозамкнутым ротором. Трехфазный электродвигатель с контактными кольцами занимает ведущее место в краново-подъемных установках, работающих на переменном токе, особенно для приводов значительных мощностей. Электродвигатели с короткозамкнутым ротором применяются для приводов малой мощности.

Электродвигатели в зависимости от синхронного числа оборотов изготавливаются на номинальные мощности в пределах, указанных в табл. 3.

Как видно из приведенной таблицы, ГОСТ 185-47 установлены мощности для электродвигателей с контактными кольцами в пределах от 2 до 250 кВт (вместо пределов от 2,2 до 125 кВт, предусмотренных ранее в замененном стандарте—ГОСТ 185-41), а для электродвигателей с короткозамкнутым ротором от 2 до 40 кВт (вместо пределов от 2,4 до 32 кВт, установленных в замененном стандарте).

Стандартом не установлена твердая шкала мощностей краново-металлургических электродвигателей трехфазного тока, а нормирован лишь коэффициент нарастания мощности в пределах от 1,25 до 1,7 для электродвигателей до 50 кВт и в пределах от 1,25 до 1,4 для электродвигателей свыше 50 кВт. Короткозамкнутые электродвигатели по требованию потребителей должны изготавливаться в двух-, трех- и четы-

Таблица 3

Скорость вращения электродвигателей, об/мин.	Пределы мощностей, кВт	
	Электродвигатели с контактными кольцами	Электродвигатели с короткозамкнутым ротором
600	от 30 до 250	—
700	от 7 до 40	от 7 до 40
1000	от 2 до 30	от 2 до 30
1500	—	от 1 до 5

рехскоростном исполнении. Короткозамкнутые электродвигатели изготавливаются со скольжением порядка 10% при ПВ = 25%.

Механическая постоянная времени ( $t = \frac{CD^2n}{375M_{\max}}$ ) в зависимости от пределов мощностей приведена в табл. 4.

Кратность максимального вращающего момента ( $M_{\max}$ ) электродвигателей с контактными кольцами и по отношению к номинальному моменту ( $M_{\text{ном}}$ ) (при ПВ = 25%) в зависимости от мощности должна отвечать табл. 5.

Таблица 4

Пределы мощностей, кВт	до 25	Свыше 25 и до 75	Свыше 75
$t$ , sec. (не более)	0,10	0,12	0,14

Для электродвигателей с короткозамкнутым ротором кратность максимального и начального пускового вращающих моментов электродвигателей по отношению к номинальному (при ПВ = 25%) должна быть для электродвигателей мощностью до 8 кВт не ниже 2,5 и для электродвигателей мощностью более 8 кВт не ниже 2,8.

Таблица 5

Пределы мощностей, кВт	5	Свыше 5 и до 10	Свыше 10
$M_{\max}$ $M_{\text{ном}}$ (не ниже)	2,3	2,5	2,8

Кратность минимального вращающего момента в процессе пуска по отношению к номинальному должна быть не ниже 85% установленной стандартом кратности начального пускового вращающего момента по отношению к номинальному вращающему моменту, а расчетная кратность тормозного момента вращения (при скольжении от 200% до 100%) по отношению к номинальному должна быть не ниже 70% кратности начального пускового момента по отношению к номинальному вращающему моменту.

Указанные требования кратности вращающих моментов распространяются на случаи соединения электродвигателя с приводимым механизмом как посредством муфты, так и посредством зубчатой передачи.

Введен ряд конструктивных улучшений и предусмотрено применение более усовершенствованных материалов.

Электродвигатели выполняются с изоляцией классов «В» и «ВС». Только для электродвигателей мощностью до 4 кВт включительно и при диаметре обмоточной меди менее 1 мм допускается применение изоляции класса «А». Контактные кольца изготавливаются из латуни или бронзы вместо стали. Введена перегородка для защиты обмотки от попадания щеточной пыли и другие конструктивные усовершенствования.

В стандартах на краново-металлургические электродвигатели постоянного и переменного тока не предусматривается твердая шкала мощностей. Между тем нормирование твердой шкалы мощностей и монтажных размеров электродвигателей крайне необходимо с целью достижения большей стандартизации электроаппаратов, работающих в схеме краново-металлургических электродвигателей, магнитных устройств и защитных панелей. Твердая шкала мощностей и монтажных размеров электродвигателей значительно облегчит работу монтажников и работников эксплуатации. Поэтому Всесоюзный комитет стандартов поручил Министерству электропромышленности разработать на указанные электродвигатели проект стандартной шкалы мощностей и монтажных размеров.



## Новые электротехнические стандарты

Всероссийским комитетом стандартов при Совете Министров СССР утвержден ряд новых электротехнических стандартов. Краткие аннотации этих стандартов приведены ниже.

**ГОСТ 3729-47. Машины электрические и непосредственно соединяемые с ними неэлектрические. Высоты оси вращения (взамен ОСТ НКТП 8858/2209).** Утвержден 1 июля 1947 г. со сроком введения для электрических машин с 1 января 1948 г. и для неэлектрических машин с 1 января 1949 г.

Стандарт распространяется на все электрические машины с горизонтальной осью вращения, а также на неэлектрические вращающиеся машины, предназначенные для непосредственного соединения с электрическими машинами на общей фундаментной плите.

Распространение нового стандарта не только на все электрические машины, как это было предусмотрено ОСТ НКТП 8858/2209, но и на неэлектрические вращающиеся машины, предназначенные для непосредственного соединения с электрическими на общей фундаментной плите (как например, центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры и т. п.), должно облегчить и обеспечить правильный монтаж аппаратов. Учитывая, однако, то обстоятельство, что на высоты оси неэлектрических машин до сего времени не было стандарта и что в настоящее время размеры этих машин не всегда укладываются в предусмотренную новым стандартом шкалу высот оси, Комитет Стандартов установил срок введения нового стандарта для неэлектрических машин на год позднее, чем для электрических.

Стандарт устанавливает шкалу высот оси от 25 до 1 000 мм, причем для размеров свыше 1 000 мм следует брать значения между 100 и 1 000 мм из этой шкалы, умноженные на 10. Из 64 значений высот оси, приведенных в стандарте, 33 отмечены как предпочтительные для нового проектирования, что должно способствовать сокращению количества различных габаритов (монтажных размеров) машин и в то же время обеспечивает достаточный выбор размеров. Шкала высот оси составлена по нормальным рядам чисел с некоторым округлением и согласована с международным стандартом.

Стандартом установлены допускаемые предельные отклонения от номинальных значений высот оси (от минус 0,5 до минус 2,5 мм в зависимости от значения высоты). Наибольшие отклонения от параллельности оси вращения по отношению к плоскости основания машины не должно превосходить допускаемых максимальных отклонений высоты оси от номинальных значений. Старый стандарт не предусматривал определенных требований в отношении параллельности оси вращения к плоскости основания машины.

**ГОСТ 3730-47. Машины электрические. Концы валов конические (взамен ОСТ 3605 и ОСТ НКТП 8857/2208).** Утвержден 1 июля 1947 г. со сроком введения с 1 января 1949 г.

Стандарт устанавливает размеры конического конца вала со стороны привода и распространяется на нормальные и специализированные электрические машины. Для тяговых и специальных электрических машин стандарт является рекомендуемым.

Введение нового стандарта вызвано тем, что ныне действующий ОСТ НКТП 8857/2208 обязателен только для вновь проектируемых машин. Машины, спроектированные до введения этого стандарта, изготавливаются с концами валов других размеров. Это обстоятельство, при котором основные размеры концов валов у машин, спроектированных в разные годы, существенно различны, создает значительные трудности для проектирующих и эксплуатирующих организаций из-за необходимости применения соединительных муфт различных размеров. Однако, срок введения нового стандарта установлен лишь с 1 января 1949 г., исходя из того, что к этому времени наметчено внедрение новых серий крановых и металлургических электродвигателей, где главным образом применя-

ются конические концы валов, и должны быть сняты с производства некоторые устаревшие серии машин.

В основу стандарта положен ОСТ НКТП 8357/2208, который согласован с международным стандартом.

Стандарт устанавливает шкалу диаметров конца вала (от 16 до 220 мм при конусности 1 : 10) и соответствующую ей шкалу длин конца вала (от 40 до 350 мм полная длина, включая часть вала с резьбой, и соответственно от 28 до 280 мм длина конусной части). Из 37 значений диаметров 18 отмечены в стандарте, как предпочтительные.

В стандарте указаны размеры шпонок и глубина их врезания, а также допуски на коническую часть вала, на глубину врезания и размеры шпонок, на ширину паза под шпонку и на резьбу на конце вала. Эти данные в ныне действующем ОСТ НКТП 8857/2208 отсутствуют.

В новый стандарт наряду с исполнением конца вала с непосредственным переходом его цилиндрической части в коническую, где размеры конической части вала жестко связаны с размерами его цилиндрической части, предусмотрено исполнение, дающее конструктору возможность выбирать размеры конуса меньшие, чем это обусловлено диаметром вала. Введение в стандарт этого нового исполнения конца вала позволит получить минимальные размеры шестерни, насаживаемой на вал, и минимальные габариты редуктора.

**ГОСТ 3698-47. Реле тока вторичные защитные. ГОСТ 3699-47. Реле напряжения вторичные защитные.** Утверждены 7 июня 1947 г. со сроком введения с 1 января 1948 г.

Стандарты являются дополнением к утвержденному в 1941 г. ГОСТ 711-41 «Реле вторичные защитные (основной стандарт)» и устанавливают дополнительные требования к реле тока и напряжения вторичным защитным. На реле минимального тока, а также на реле тока и напряжения, воспринимающая часть которых реагирует на разность моментов, вызванных действием сравниваемых двух или более токов или напряжений, стандарты не распространяются.

В зависимости от числа встроенных в корпус элементов реле могут выпускаться однополюсными (1 реле в корпусе), двухполюсными (2 реле в корпусе) и трехполюсными (3 реле в корпусе).

Номинальный ток реле тока с максимальной уставкой до 10 А включительно должен быть не ниже тока максимальной установки. Номинальный ток реле тока с максимальной уставкой более 10 А должен быть не менее 10 А. Реле напряжения должны исполняться на номинальные напряжения 30, 60 или 100 В. Кратность шкалы реле (отношение максимальной установки тока или напряжения к минимальной) должна быть не менее двух.

Время действия быстродействующих реле тока и быстродействующих реле максимального напряжения должно быть 0,15 сек при кратности тока (напряжения) по отношению к уставке тока (или соответственно напряжению) 1,2 и ниже и 0,03 сек при кратности 3 и ниже. Время действия небыстродействующих реле тока и небыстродействующих реле максимального напряжения должно быть при тех же кратностях соответственно 0,3 и 0,1 сек. Время действия реле минимального напряжения при отношении величины напряжения к уставке напряжения не ниже 0,5 должно быть 0,04 сек для быстродействующих и 0,15 сек для небыстродействующих реле.

Коэффициент возврата (отношение тока или напряжения возврата подвижной части реле в исходное положение к току или соответственно напряжению срабатывания) у реле тока и реле максимального напряжения должен быть  $0,85^{+0,03}$  (реле с нормальным коэффициентом возврата) и  $0,93^{+0,03}$  (реле с повышенным коэффициентом возврата). У реле минимального напряжения коэффициент возврата должен быть соответственно не выше 1,25 и не выше 1,1.

Выдержка времени реле тока с ограниченно-зависимой характеристикой должна зависеть от тока только до кратности, не превосходящей 10 по отношению к току установки; выше этого предела выдержка времени изменяется не



более, чем на 0,1 sec при изменении тока уставки в 2 раза.

Реле тока с выдержкой времени в обесточенном состоянии должно иметь время возврата подвижной системы в исходное положение не более 0,1 sec (ускоренный возврат) или не более 10 sec (замедленный возврат). Инерционная ошибка для реле тока с ускоренным возвратом должна быть не более 0,1 sec, а для реле с замедленным возвратом не более 0,3 sec.

Разброс тока трогания реле тока (отношение тока трогания реле на определенной уставке к среднему арифметическому пяти измеренных токов трогания) не должен превышать  $\pm 3\%$ .

В стандарте приведены также требования к контактам реле, к присоединению проводов к реле, к выводам катушек, к шкалам реле и некоторые другие.

Гарантийный срок безотказной работы реле должен быть согласно стандарту не менее 3 лет со дня выпуска с завода при условии хранения, транспортировки, монтажа и эксплуатации реле в соответствии с инструкцией завода-изготовителя, согласованной с заказчиком.

**ГОСТ 3686-47. Микафоллий** (взамен ГОСТ 2857-45 в части микафоллия). Утвержден 2 июня 1947 г. со сроком введения с 1 октября 1947 г.

Стандарт распространяется на микафоллий марок ММГ, МММ, ММШ, МФГ, МФМ и МФШ, применяемый в качестве электроизоляционного материала в электрических машинах и аппаратах.

В обозначении марок микафоллия первая буква обозначает «микафоллий», вторая буква—вид слюды (мусковит или флогопит), третья буква—склеивающий лак (Г—глифталевый, М—масляно-глифталевый, Ш—шелачный).

Микафоллий выпускается в рулонах шириной 400 мм и более или в листах. Номинальные толщины микафоллия 0,15; 0,20 и 0,30 мм.

Среднее значение пробивной напряженности электрического поля микафоллия марок ММГ, МММ и ММШ должно быть не менее 16  $kV_{eff}/mm$ , а для марок МФГ, МФМ и МФШ не менее 13  $kV_{eff}/mm$ . Минимальное значение пробивной напряженности электрического поля в любой точке микафоллия должно быть не менее 75% среднего значения, установленного стандартом. По требованию заказчика микафоллий должен поставляться со средним значением пробивной напряженности электрического поля, повышенным до 25%.

В стандарте приведены характеристики материалов (слюда, бумага, лаки), из которых должен изготавливаться микафоллий, а также правила приемки и испытаний микафоллия и требования к его упаковке и маркировке.

**ГОСТ 1149-47. Цоколи Свана для электрических ламп накаливания** (взамен ГОСТ В-1149-41). Утвержден 3 июля 1947 г. со сроком введения с 1 января 1948 г.

Стандарт распространяется на цоколи Свана типов IC-9-1, IC-15-1, 2C-15-1, 2C-22-2 и 2C-22-3. Цоколи типа IC-9-1 предназначены для напряжений не более 36 В. Цоколи остальных типов предназначены для напряжений до 250 В. В обозначении типов цоколей первая цифра указывает число контактов, буква С—наименование цоколя («Сван»), число после буквы—округленную величину наружного диаметра стакана цоколя в миллиметрах, последняя цифра отсутствие или величину ранта (1—рант отсутствует, 2—рант малый, 3—рант большой).

Стандарт устанавливает размеры цоколей, материалы, из которых они должны изготавливаться, толщину цинкового покрытия корпусов и штифтов цоколей и требования к их внешнему виду.

Изоляция между контактными пластинками, а также между каждой из контактных пластинок и корпусом цоколя должна выдерживать в течение 1 мин испытательное напряжение 500 В переменного тока частотой 50 Hz для цоколей типа IC-9-1 и 1500 В для цоколей остальных типов. Сопротивление изоляции между контактными пластинками цоколя, а также между каждой из контактных пластинок и корпусом цоколя должно быть не менее 2 МΩ.

В стандарте приведены также правила и методы ис-

пытаний цоколей и требования к их упаковке и маркировке.

**ГОСТ 1827-47. Сопротивления добавочные отдельные для вольтметров.** Технические условия (взамен ГОСТ 1827-42). Утвержден 21 мая 1947 г. со сроком введения с 1 ноября 1947 г.

Стандарт распространяется на отдельные закрытые индивидуальные и калиброванные добавочные сопротивления вольтметров, служащие для расширения предела измерений напряжения постоянного тока до 15 000 В, работающие при температурах от  $-15$  до  $+35^{\circ}C$  и относительной влажности от 30 до 80%.

**ГОСТ 3747-47. Трубки изоляционные полутвердые резиновые** (взамен ОСТ 376). Утвержден 3 июля 1947 г. со сроком введения с 1 сентября 1947 г.

Стандарт распространяется на полутвердые резиновые трубки внутренним диаметром от 5 до 36 мм, применяемые для дополнительной изоляции изолированных проводов постоянного и переменного тока, напряжением до 500 В.

**ГОСТ 3484-46. Трансформаторы. Методы испытаний.** Утвержден 31 декабря 1946 г. как рекомендуемый.

Стандарт распространяется на методы типовых и контрольных испытаний вновь изготовленных силовых трансформаторов. На специальные трансформаторы (для ртутных выпрямителей, электропечей и т. п.) стандарт распространяется только в том случае, если в стандартах или технических условиях на эти трансформаторы нет других указаний.

Стандарт устанавливает методы следующих испытаний трансформаторов: определение коэффициента трансформации; проверка группы соединений и измерение сопротивления обмоток; испытание электрической прочности изоляции; опыт холостого хода; опыт короткого замыкания, испытание на нагрев; испытание баков, испытание приспособлений (переключателей ответвлений и реле газовой защиты).

Стандарт разработан кандидатом техн. наук Э. А. Манькиным (Московский трансформаторный завод) под руководством доктора техн. наук, проф. Г. Н. Петрова. Первоначальная редакция проекта данного стандарта была опубликована в журнале «Электричество», № 2 за 1940 г.

**ГОСТ 3345-46. Кабели, провода и шнуры с резиновой изоляцией. Метод определения электрического сопротивления изоляции.** Утвержден 25 ноября 1946 г. со сроком введения с 1 апреля 1947 г.

В соответствии со стандартом определение электрического сопротивления изоляции кабелей, проводов и шнуров с резиновой изоляцией должно производиться методом сравнения отклонений при постоянном токе напряжением 100—500 В. Определение сопротивления изоляции должно производиться при температуре  $20 \pm 10^{\circ}C$  и относительной влажности помещения, не превышающей 80%.

В стандарте приведены: требования к основным элементам испытательной установки; формула, по которой должно вычисляться сопротивление изоляции; указания по присоединению жил кабеля и металлической оболочки к источнику напряжения и указания о порядке измерения сопротивления изоляции. В приложении к стандарту дана принципиальная электрическая схема испытательной установки.

**ГОСТ 1508-47. Кабели электрические контрольные с резиновой изоляцией** (взамен ГОСТ В-1508-42). Утвержден 1 апреля 1947 г. со сроком введения с 1 октября 1947 г.

Стандарт распространяется на контрольные кабели с медными жилами с резиновой изоляцией, предназначенные для присоединения к электрическим приборам и аппаратам в электрических распределительных устройствах с номинальным напряжением до 500 В переменного тока или 1 000 В постоянного тока.

Стандартом предусмотрены кабели: в свинцовой оболочке (кабели марок КСРГ, КСРА, КСРБ, КСРБГ, КСРП; КСРПГ и КСРК); в оплетке, пропитанной противогнилостным составом (кабели марки КРО); в резиновой шланговой оболочке (кабели марки КРШ); в резиновой оболочке из совпрена (кабели марок КНРГ, КНРБГ, КНРПГ); в винилитовой оболочке (кабели марок КВРГ, КВРБГ, КВРПГ).

Стандарт устанавливает количество, сечение и конструкцию токопроводящих жил, радиальную толщину резиновой изоляции, требования к защитным покровам и к материалам, применяемым для изготовления кабеля, значения испытательного напряжения и строительную длину кабеля. В стандарте приведены также правила и методы испытания кабелей и требования к их маркировке и упаковке.

**ГОСТ 3441-46. Бумага изоляционная пропиточная** (взамен ОСТ НКЛес 8144/123). Утвержден 24 декабря 1946 г. со сроком введения с 1 апреля 1947 г.

Стандарт распространяется на изоляционную пропиточную бумагу, предназначенную для производства прессованной слоистой изоляции после пропитки ее синтетическими смолами.

Изоляционная пропиточная бумага должна выпускаться в рулонах шириной 1 000 и 1 500 мм  $\pm 20$  мм, толщиной  $0,12 \pm 0,01$  мм. Пробивная напряженность бумаги должна быть не менее  $5 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{мм}$ . Впитываемость воды по Клемму у бумаги в течение 5 мин в среднем по двум направлениям должна быть 25—40 мм.

Стандартом установлены: состав бумаги по волокну (100% сульфатной целлюлозы), вес  $1 \text{ м}^2$ , разрывной груз, потеря прочности по сопротивлению продавливанию (по Мюллеру), зольность, pH водной вытяжки и влажность бумаги. В стандарте приведены правила приемки и методы испытания бумаги, а также требования к ее намотке, упаковке, маркировке, хранению и транспортированию.

**ГОСТ 3553-47. Бумага телефонная** (взамен ОСТ НКЛес 6272/27). Утвержден 5 марта 1947 г. со сроком введения с 1 мая 1947 г.

Стандарт распространяется на телефонную бумагу марок КТК (красная), КТС (синяя), КТЗ (зеленая) и КТН (цвета натуральной целлюлозы), применяемую, главным образом, для изоляции жил телефонных кабелей. Телефонная бумага должна выпускаться в рулонах шириной  $500 \pm 10$  мм, толщиной  $0,05 \text{ мм} \pm 5\%$ .

Стандарт устанавливает состав бумаги по волокну (100% сульфатной небеленой целлюлозы), объемный вес, разрывной груз, удлинение, сопротивление излому и скручиванию, pH водной вытяжки, влажность и зольность бумаги. В стандарте приведены правила приемки и методы

испытаний бумаги, а также требования к ее намотке, упаковке, маркировке, хранению и транспортированию.

**ГОСТ 1503-46. Свечи зажигательные искровые для авиационных поршневых двигателей** (взамен ГОСТ В-1503-42). Утвержден 31 декабря 1946 г. со сроком введения с 1 июля 1947 г.

Стандарт распространяется на разборные и неразборные искровые зажигательные свечи со слюдяной, керамической и смешанной изоляцией, служащие для зажигания горючей смеси в цилиндрах авиационных поршневых двигателей при помощи искрового разряда между центральным и боковыми электродами свечи. Свечи изготавливаются экранированными и неэкранированными, с демпфирующими сопротивлениями и без них.

Стандартом установлены габаритные и установочные размеры свечей, переходное электрическое сопротивление в резьбовых соединениях, требования к герметичности, электрической и механической прочности свечей.

В стандарте приведены правила приемки и методы испытания свечей, а также требования к их маркировке и упаковке. По сравнению с ранее действующим ГОСТ В-1503-42 в новом стандарте повышены требования к герметичности и введены требования к механической прочности свечей.

**ГОСТ 3528-47 по 3537-47. Арматура контактной сети для трамваев и троллейбусов.** Утверждены 8 февраля 1947 г. со сроком введения с 1 июля 1947 г.

Стандарты распространяются на подвесные, соединительные и питающие зажимы, подвесы, натяжные закрытые муфты, орешковые и пружинные изоляторы контактной сети трамваев и троллейбусов.

Стандартами установлены сопрягаемые размеры арматуры, материалы, из которых она должна изготавливаться, механическая прочность и некоторые другие требования.

Разработке стандартов предшествовала большая научно-исследовательская работа, проделанная Министерством коммунального хозяйства РСФСР. Рассмотрены были около 100 конструкций различной арматуры иностранного и советского производства и включены в стандарты конструкции, наилучшие зарекомендовавшие себя в эксплуатации.

*Инж. У. М. ЛИТВАКОВ*





## В Ленинградском электротехническом институте им. Ульянова (Ленина)

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ 30-ЛЕТИЮ СОВЕТСКОЙ ВЛАСТИ

В мае 1947 г. в Ленинградском электротехническом институте им. Ульянова (Ленина) состоялась научно-техническая конференция, в которой приняли участие: профессора, научные работники и студенты ЛЭТИ, а также представители министерств, промышленных предприятий и других организаций.

К наиболее важным вопросам, рассмотренным конференцией, следует отнести цикл докладов ряда кафедр ЛЭТИ: по разработке сверхмощного асинхронно-синхронного каскада (доц. Г. В. Одинцов, проф. В. Т. Касьянов, инж. Д. В. Башарин и др.); по корабельному электроприводу (доц. Б. И. Норневский, инж. Н. М. Хомяков, инж. С. В. Борщевский и др.); по созданию новых радиоламп для сверхвысоких частот (5 докладов лаборатории доц. Ю. А. Кацман); по вопросам телевидения (3 доклада кафедры телевидения с участием проф. Я. А. Рыфтина); по вопросам автоматики и элементов электрооборудования (доц. Л. И. Байда, А. А. Сименкович, проф. Д. В. Васильев, кандидат техн. наук Е. К. Мезин); по вопросам приборов гироскопии (доц. П. И. Сайдов, кандидат техн. наук В. С. Мочалин и др.).

Во вступительном слове при открытии конференции директор ЛЭТИ П. И. Скотников отметил, что научно-техническая конференция посвящена 30-летию советской власти и доклады на пленарных заседаниях будут иметь обзорный характер.

Доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич сделал на пленарных заседаниях два доклада. В докладе «Развитие института за 30 лет советской власти» проф. С. А. Ринкевич подчеркнул, что темпы развития института за 30 лет при советской власти были в 5—6 раз более интенсивными, чем в дореволюционный период (1886—1916 гг.) как в выпуске печатных трудов, организации лабораторий, так и в выпуске специалистов.

В докладе «История промышленного использования электрической энергии за 30 лет советской власти» проф. С. А. Ринкевич изложил краткую историю применения электроэнергии в промышленности, и обрисовал будущее электропривода и его автоматики, неразрывную связь электропривода с электровакуумной и высокочастотной техникой и энергетикой.

Доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий в докладе «Достижения изоляционной техники в СССР к 30-летию советской власти» дал классификацию изолирующих материалов, связав ее с областями применения изоляции, и показал значение современных керамических материалов, кремнийорганики и некоторых высокополимерных соединений в развитии новых областей радиотехники.

Кандидат техн. наук Б. П. Козырев в докладе «История развития электровакуумной техники за 30 лет советской власти» показал этапы развития техники вакуума, электронных и ионных приборов, значение вакуумной техники при решении новых задач физики и энергетике. В выступлении по этому докладу проф. Г. А. Кяндский, между прочим, отметил, что в ЛЭТИ электронная лампа была изготовлена в 1912—1913 гг. проф. В. И. Коваленковым совместно с сотрудниками лаборатории беспроводного телеграфа. Эта лампа хранится в Музее связи. Проф. Г. А. Кяндский указал также, что одна из первых рентгеновских трубок была изготовлена А. С. Поповым в 1895 г. и применена в Морском госпитале.

В секции электрооборудования и энергетики состоялись доклады: кандидата техн. наук Н. П. Ермолина «Короткое замыкание машин постоянного тока»; кандидата техн. наук И. С. Зарецкого «Момент вращения асинхронной машины при переходных режимах»; кандидата техн. наук Е. К. Мезина «Самовозбуждающаяся электромагнитная асинхронная муфта»; кандидата техн. наук Г. В. Одинцова «Современный электропривод мощных вентиляторов»; кандидата техн. наук Л. Н. Грузова «Итоги экспериментального и теоретического исследования асинхронно-синхронного каскада» (экспериментальная работа по исследованию статических и динамических режимов работы каскада была выполнена инж. Г. С. Мавромати, И. Т. Талыпинским и доц. Л. Н. Грузовым); инж. А. В. Башарина «К вопросу о стабилизации скорости асинхронно-синхронного каскада»; кандидата техн. наук Л. В. Карношина «К вопросу об автоматическом регулировании электроприводов мощных вентиляторов»; кандидата техн. наук Б. А. Архангельского «О регулировании гидравлических турбин»; доктора техн. наук, проф. В. Т. Касьянова «Пуск и регулирование скорости асинхронных двигателей изменением частоты»; кандидата техн. наук К. А. Кочергина «Процесс двухточечной сварки»; инж. А. Е. Слухоцкого «Применение индукционного нагрева для сварки стальных труб»; кандидата техн. наук Ю. Я. Юрова «Развитие классической теории контактов (упругий контакт); доктора техн. наук, проф. Д. В. Васильева «Основные характеристики современных сельсинов»; кандидата техн. наук В. В. Пасынкова «Керамические конденсаторы для мостов Шеринга»; А. Н. Дмиргиева «Новый метод измерения сопротивления жидких диэлектриков»; кандидата техн. наук В. Е. Манойлова «Исследование естественных заземлителей»; кандидата техн. наук К. В. Булгакова «Энергоэкономические характеристики теплоэлектрических станций»; доц. В. Н. Шевцова «Исследование влияния суточного регулирования, проводимого на русловых гидроэлектрических станциях, на режим параллельно работающих с ними тепловых электрических станций»; кандидата техн. наук Г. И. Гончарова «Метод классификации проекций»; кандидата техн. наук Л. Н. Рынина «Метод стереографических проекций»; ст. научн. сотр. А. А. Ожигова «Изыскание методов и приспособлений для пуска в ход дизелей передвижных электростанций при температуре корпуса двигателя и окружающего воздуха — 50°C»; кандидата техн. наук Б. И. Норневского, В. А. Скулябина, И. Р. Фрейдзона и инженеров С. В. Борщевского, Н. М. Хомякова, С. Б. Рукавишникова, Г. Л. Альтшуллера, А. С. Погодина по корабельному электроприводу.

В секции вакуумной техники и электростатической состоялись доклады: кандидата техн. наук Б. П. Козырева «Болометр из золота для приема модулированной радиации»; доктора техн. наук, проф. Н. Г. Болдырева «Современное состояние светотехники»; кандидата техн. наук Ю. А. Кацмана «Колебательные процессы в электронном потоке клистрона» и «Усилительный клистрон с малым уровнем шумов»; Е. П. Шушиной «Исследование одноконтурного генераторного клистрона»; В. П. Панова «Испытание электронных ламп в импульсном режиме»; доктора техн. наук, проф. С. Я. Соколова «Ультразвуковые колебания и их применение»; кандидата техн. наук А. Г. Грамакова «К методике изучения харак-

тера почвенного газообмена»; М. А. Березкина «Определение термических коэффициентов неметаллических тел по методу регулярного охлаждения цилиндра»; кандидата техн. наук В. М. Орлова «Физика газосветного разряда»; И. А. Войцеховского «Влияние температуры на расстояние между ядрами атомов двухатомных молекул»; С. И. Левикова «Тонкие металлические пластинки».

В секции радиотехники состоялись доклады: доктора техн. наук, проф. В. И. Сифорова «Прохождение импульсов через многоконтурные резонансные системы»; кандидата техн. наук Е. И. Манаева «О необходимой ширине полосы при приеме частотно-модулированных сигналов»; доктора техн. наук, проф. С. И. Панфилова «О расчете линейных электрических цепей со сосредоточенными постоянными способом непрерывно-неразрывной функции»; доктора техн. наук, проф. Г. А. Кьяндского «Пьезотранзитронный генератор» (в этом докладе описано изобретение автора); проф. А. Я. Рыфтина «Новый метод телевизионных передач»; кандидата техн. наук О. Б. Лурье «Новая оптико-механическая телевизионная система»; Д. Г. Тананайко «Некоторые вопросы цветного телевидения»; кандидата техн. наук В. А. Гурова «Радиолокационное управление срабатывающими устройствами по опыту войны» (по материалам иностранных журналов); П. Г. Евтеевой «Колебательные системы типа Батерфляй на УКВ»; кандидата техн. наук Ф. Е. Евтеева «Исследование анодно-экранной модуляции генератора на пентоде»; инж. В. А. Жукова «Конструкция и технология намоток Универсаль и Крейцшпуль».

В секции приборостроения и телемеханики состоялись доклады: кандидата техн. наук А. В. Фремке «Методы анализа переходных процессов в телеизмерительных системах»; кандидата техн. наук Н. Н. Разумовского «Энергия постоянного магнита»; кандидата техн. наук Л. И. Байда «Исследование пути развития электронных усилителей постоянного тока в системе автоматики»; кандидата техн. наук Р. И. Юргенсона «Новейшие проблемы в области телеуправления»; кандидата техн. наук В. С. Мочалина «Гирошироткомпас»; кандидата техн. наук А. Н. Лебедева «Математическая теория квадратного переключателя»; Б. И. Арановича «Использование аппарата алгебры-логики для анализа и синтеза релейно-контактных схем»; кандидата физико-матем. наук Г. И. Егудина «Об одной задаче теории вероятностей, имеющей применение в статическом контроле» и другие доклады.

*Доктор техн. наук С. А. РИНКЕВИЧ*

*Кандидат техн. наук В. В. ПАСЫНКОВ*



## Работа Всесоюзного бюро электрической изоляции в 1946—1947 гг.

Всесоюзное бюро электрической изоляции за истекшие 2 года провело несколько совещаний с обсуждением научно-технических вопросов и вопросов организации электроизоляционной промышленности; выделенные Бюро бригады выполнили ряд научно-исследовательских и редакционно-издательских работ.

В течение 1946 г. было проведено четыре расширенных пленума Бюро: XXVIII пленум в Москве по вопросам нагревостойкой изоляции, XXIX пленум в Москве по новым специальным видам керамических диэлектриков, XXX пленум в Ленинграде (Всесоюзная научно-техническая сессия по электрической изоляции), посвященный вопросам теории и практического использования диэлектриков, и XXXI пленум в Москве по вопросам изоляции электрических машин и различным видам слюдяной изоляции.

В работе XXIX пленума приняло участие свыше 90 работников предприятий и научных организаций Москвы, Ленинграда, Горького и Новосибирска. Первым на пленуме был поставлен доклад члена-корр. Академии наук СССР Б. М. Вула «Керамические сегнетоэлектрики» об открытых автором материалах, имеющих необычайно высокую (порядка нескольких тысяч) диэлектрическую проницаемость — титанатах некоторых металлов. Теоретические вопросы были рассмотрены также в докладах доктора физико-матем. наук Г. И. Сканава «О высокой диэлектрической проницаемости некоторых кристаллов» и проф. Л. М. Блюмена «Роль физико-химической природы жидкой фазы в образовании керамического черепка». Ряд вопросов теории керамических конденсаторов их конструктивного оформления был изложен в докладе доктора техн. наук, проф. Н. П. Богородицкого и инж. И. Д. Фридберга «Конструирование и расчет мощных высокочастотных конденсаторов», напечатанном в журнале «Электричество» (№ 11, 1946, стр. 50). Достижения союзной техники в области производственных разработок были отражены в докладах кандидата техн. наук Х. С. Валеева и инж. Т. В. Некрасовой «Новые мощные керамические конденсаторы», доктора физико-матем. наук Г. И. Сканава «Малогабаритные керамические конденсаторы» и инж. С. Н. Грачева «Высокочастотная установочная керамика». Вопросы, связанные с обеспечением производства специальной керамики в Союзе сырьем, были изложены кандидатом техн. наук И. Д. Финкельштейном.

Информация о XXVIII, XXX и XXXI пленумах и со-

держание некоторых докладов на этих пленумах уже помещались в журнале «Электричество» (№№ 9, 10 и 12, 1946; №№ 1, 6 и 8, 1947).

В течение 1947 г. было проведено два расширенных пленума Бюро, XXXII пленум (Всесоюзная научно-техническая сессия по вопросам эксплуатации высоковольтной изоляции) работал в Ростове на-Дону в апреле 1947 г. при участии 108 делегатов из 35 городов. Было обсуждено 25 докладов и сообщений, указанных в информации о пленуме (Электричество, № 8, 1947). Тезисы докладов и резолюции были выпущены отдельными брошюрами; труды пленума находятся в печати.

XXXIII пленум Бюро — по вопросам теории диэлектриков — состоялся в Москве в мае 1947 г. Доклады на этом пленуме: «Электронные процессы в неметаллических кристаллах» (доктор физико-матем. наук, проф. Ф. Ф. Волькенштейн) и «Газы с высокой диэлектрической прочностью» (доктор физико-матем. наук, проф. Б. М. Гохберг).

Помимо пленумов на отдельных совещаниях Бюро был заслушан также ряд докладов. В числе них — сообщения о результатах оригинальных научно-исследовательских работ советских ученых (доклад заведующего кафедрой электроматериаловедения Московского энергетического института им. Молотова, доктора техн. наук, проф. Н. Г. Дроздова «Статическое электричество в промышленности», кандидата техн. наук Е. К. Лашева «Влияние минеральных и воздушных включений на электрические свойства слюды» и др.). Весьма актуальные вопросы были рассмотрены в докладах по технике электрической изоляции в кабельном производстве (доклады доктора техн. наук, проф. С. М. Брагина «Современные высоковольтные кабели», проф. В. А. Привезенцева «Современные достижения и перспективы в технике производства обмоточных проводов» и «Пленочная изоляция обмоточных проводов», доктора техн. наук, проф. С. С. Городецкого «Высоковольтный силовой кабель постоянного тока»). Были поставлены также доклады кандидата техн. наук А. В. Нетушила и инж. Л. С. Левина по высокочастотному нагреву диэлектриков, доклады о состоянии иностранной техники электрической изоляции по материалам зарубежных командировок (доктора техн. наук, проф. Н. В. Александрова, инж. А. А. Пешехонова, кандидата техн. наук Б. М. Тареева, инж. С. А. Яманова) и т. д.

Всего в 1946 г. было обсуждено 55, а в 1947 г. — 40 научно-технических докладов. Общее число докладов за время работы Бюро достигло 559.

При Бюро организован комитет по эксплуатации электрической изоляции, задачей которого является разработка вопросов профилактических испытаний высоковольтной изоляции, вопросов эксплуатации, ремонта и пр. Председателем комитета и заместителем председателя Бюро избран инж. М. И. Рапопорт.

При Бюро создан также организационный комитет (во главе с членом-корр. Академии наук СССР Б. М. Вулом) по созыву в начале 1948 г. четвертой всесоюзной конференции по электрической изоляции.

В течение 1946 и 1947 гг. бригады Бюро работали над рядом научно-исследовательских тем; результаты отдельных работ уже использованы в промышленности. Бюро выполнило работу по составлению «Справочника по электрической изоляции», представляющего коллективный труд 28 авторов (под редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева); объем справочника равен 45 печатным листам, выход его в свет ожидается в начале 1948 г. Подготавливается к печати серия пособий по минимуму для отдельных специальностей электроизоляционной техники.

*Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ  
Ученый секретарь Всесоюзного бюро  
электрической изоляции*



## Переход на новые электрические, магнитные и световые единицы

В соответствии с решением Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР от 14 ноября 1947 г., в 1948 г. будет осуществлен переход на электрические и магнитные единицы абсолютной электромагнитной системы MKS EW (взамен действующих в настоящее время международных электрических и магнитных единиц) и на новые световые единицы, основанные на эталоне в форме полного излучателя (абсолютно черное тело).

Переход на новые единицы, потребовавший большой

подготовительной работы со стороны метрологических учреждений, не внесет каких-либо затруднений в работу промышленных предприятий и хозяйственных органов. Порядок введения упомянутых единиц и мероприятия по осуществлению указанного перехода разрабатываются Комитетом по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР.

В настоящем номере журнала опубликованы относящиеся к данному вопросу статьи М. Ф. Маликова и П. Л. Калантарова (стр. 10 и 17).



### Владимир Петрович Иванов



16 октября 1947 г. после длительной тяжелой болезни в возрасте 51 года умер заведующий кафедрой электрических станций Ленинградского политехнического института им. Калинина Владимир Петрович Иванов. В. П. Иванов преподавал в ЛПИ свыше 25 лет. Он являлся широко известным специалистом в области проектирования, строительства и эксплуатации электрических станций, а также в вопросах общей энергетики. Под его руководством проходило проектирование и строительство

ряда электрических станций и сетей, в том числе тэц в Пскове, электростанций в городах: Ростове на-Дону, Краснодаре, Новосибирске, Кирове. Заведуя в ЛПИ с 1930 г. кафедрой электроснабжения промпредприятий, Владимир Петрович создал соответствующий курс. Им была подготовлена к печати монография «Вода и ее приготовление на электрических станциях».

Во всей своей деятельности Владимир Петрович тесно и притом непрерывно был связан с научно-исследовательскими, проектно-монтажными и строительными организациями энергетического хозяйства страны. С 1932 по 1938 гг. В. П. Иванов был начальником кафедры «Производство и распределение электрической энергии» Военной электротехнической академии им. Буденного. В последние годы он работал старшим научным сотрудником Ленинградской группы Энергетического института им. Кржижановского Академии наук СССР.

Владимир Петрович был активнейшим общественником. С 1931 г. до смерти он состоял депутатом Ленинградского городского совета депутатов трудящихся трех созывов. Владимир Петрович был председателем постоянно действующей топливно-энергетической комиссии Ленсовета и заместителем председателя научно-технического совета топливно-энергетического управления Ленгорисполкома. В течение ряда лет он был членом Обкома профсоюза работников высшей школы, членом президиума правления Всесоюзного научно-технического общества энергетиков (ВНИТОЭ).

За подготовку инженерно-технических кадров В. П. Иванов награжден правительством в 1946 г. орденом Трудового Красного Знамени, медалями «За оборону Ленинграда» и «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.». В 1943 г. В. П. Иванов был награжден значком «Отличника НКЭС».

Владимир Петрович с честью прошел свой путь советского гражданина и профессора. Все те, кто встречался с Владимиром Петровичем, и многочисленные воспитанные им инженеры-электрики сохраняют о нем самую светлую память.

**В. К. ПОПОВ**



## Монография по высокочастотному нагреву металлов

Г. И. БАБАТ. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ МЕТАЛЛОВ И ЕГО ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ. Государственное энергетическое издательство, 1946, 432 стр., тираж 4 000 экз., ц. 30 руб.

Последнее десятилетие ознаменовалось широким развитием высокочастотной техники и проникновением ее в самые различные технологические процессы. Если еще не так давно токи высокой частоты применялись преимущественно в радиосвязи, то в настоящее время мощность промышленных установок высокочастотного нагрева в несколько раз превышает общую мощность радиовещательных станций. Высокочастотный нагрев применяется при плавке, закалке, пайке и лужении металлов, при различного рода термообработке изделий, при сушке и разогреве диэлектриков и полупроводников, при дезинсекции семян, стерилизации продуктов питания и в ряде других областей.

В развитии высокочастотного нагрева немаловажная роль принадлежит советским ученым и изобретателям. Приоритет СССР в таких вопросах, как, например, высокочастотная сушка древесины и поверхностный нагрев металлов токами высокой частоты является неоспоримым.

Как это бывает во многих областях техники, развитие высокочастотного нагрева первое время было основано почти исключительно на эмпирических данных, а конструирование высокочастотных установок было в большей мере обязано технической интуиции, чем инженерному расчету.

Монография Г. И. Бабата «Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение» подводит итоги многолетней работы автора в области высокочастотного нагрева металлов и создает основу как для инженерного расчета электрических параметров установок для индукционного нагрева металлов, так и для анализа распределения электрического и теплового полей в нагреваемой детали. Сделанные в результате теоретических и экспериментальных исследований выводы автор увязывает с практикой расчета и конструирования нагревательных устройств и дает описание нашедших применение высокочастотных установок.

Вся книга разделена на 19 глав, которые могут быть объединены в три самостоятельные части: 1) Электрическое и тепловое поле в системе индуктор — нагреваемая деталь; 2) Высокочастотные генераторы для индукционного нагрева; 3) Практика высокочастотного нагрева металлов и его промышленное применение. Первая часть объединяет главы I—VIII, вторая часть — главы IX, X и XV, а третья часть — остальные 8 глав.

Наиболее фундаментальной частью монографии является первая часть.

В главе I, кратко останавливаясь на истории индукционного нагрева, автор отмечает роль работ советских лабораторий в развитии этого вопроса и их популярность в мировой научно-технической печати. Переходя в главе II к рассмотрению распространения электромагнитного поля в металле, автор связывает его с принципом Ферма, обосновывая, таким образом, стремление электрического тока так распределиться в массивном проводнике, чтобы активное сопротивление проводника равнялось его внутреннему индуктивному сопротивлению. К сожалению, высказанные автором очень интересные соображения о применимости методов вариационного исчисления для расчета распределения токов не иллюстрируются примерами. Все задачи о распределении токов в металле автором решены путем интегрирования уравнений Максвелла для различных конфигураций и материалов нагреваемых тел. Уравнения Максвелла и результаты их интегрирования записаны в системе CGS. Более целесообразно пользоваться

абсолютной практической системой единиц и рационализованной системой уравнений.

При подсчете мощности, выделяемой в проводнике, автор исходит из понятия «глубины проникновения поля»  $Z$ . Те же соотношения могли бы быть получены несколько проще с помощью вектора Пойнтинга — Умова.

Результаты расчетов приведены к практически удобной форме и на их основании в главе III делаются общие выводы о зависимости глубины проникновения поля и, следовательно, толщины активного нагревающего слоя, от кривизны поверхности металла, его магнитной проницаемости и частоты электрического тока.

Глава IV посвящена распределению настила электрического тока в проводниках, находящихся в неоднородных полях; в ней приводятся графики для подсчета распределения плотности тока при различной конфигурации индуктора. Для больших скоростей нагрева металла автор делает выводы о совпадении изотерм теплового поля в металле с линиями равной плотности тока (эквиденсами) электрического поля. Ряд примеров иллюстрирует это положение.

Большой практический интерес представляет глава V, в которой очень подробно рассматривается вопрос моделирования распределения настила тока в индукторе и детали с помощью электролитической ванны и приводятся результаты большой экспериментальной и расчетной работы, проведенной на заводе «Светлана» инженерами В. Л. Герусом и Н. Т. Гофманом.

В главе VI рассматриваются особенности индукционного нагрева стали и анализируется индукционный нагрев неомогенных сред; описывается явление «полосатого нагрева» и дается его физическое обоснование.

Распределению температурного поля в нагреваемой детали посвящается VII глава, где на основании аналогии между дифференциальными уравнениями электрического и теплового полей рассматривается явление температурного поверхностного эффекта. Сопоставление глубины проникновения электрического и теплового полей позволяет автору применить для расчета теплового поля полученные ранее результаты. Рассматривается перераспределение температур и токов при нагреве поверхности металла до точки Кюри.

Глава VIII посвящена выбору наивыгоднейших соотношений между размерами индуктора и детали для различных частот тока. Делаются выводы о выборе диапазона частот и емкости конденсаторной батареи, компенсирующей фазовый сдвиг в индукторе. Рассмотрение динамических усилий в индукционных нагревателях приводит к выводу об их ничтожном значении.

Касаясь энергетических соотношений при нагреве детали, автор указывает на подчиненность энергетическим соотношениям требованиям технологии, называя энергетику «служанкой технологии». Совершенно справедливо говоря о недопустимости больших температурных градиентов внутри нагреваемой детали, автор иллюстрирует это гипотетическим случаем, когда температура совершает скачкообразный спад. Хотелось бы параллельно иметь данные о предельно допустимых градиентах температуры, задаваемых технологией и лимитирующих снижение коэффициента избыточного тепла. Даже в самых сложных технологических процессах едва ли целесообразно уменьшать значение расхода электроэнергии.

Приведенного выше скупого перечня части вопросов, освещенных в первой части монографии, достаточно для представления об обширности изложенного материала.

Столь подробное освещение комплекса вопросов, связанных с электромагнитным полем индуктора, дается в литературе впервые, и эту часть книги можно считать особо ценной.

Во второй части монографии рассматриваются схемы и конструкции высокочастотных генераторов и промежуточных трансформаторов, связывающих собственно генератор с индуктором.

В главе XI приводятся общие сведения о высокочастотных генераторах и даются указания о целесообразности применения машинных и ламповых генераторов. Рассматриваются отдельные узлы схемы лампового генератора и производится выбор схем обратной связи (возбуждения генератора), анодного контура и питания лампового генератора. Дается краткая характеристика искровых генераторов.

Трансформатор, связывающий индуктор с генератором, рассмотрен в главе XI, в которой дается анализ геометрических размеров трансформатора и устанавливаются оптимальные соотношения этих размеров. Приводятся некоторые соображения о регулировании мощности, отдаваемой генератором. Конструктивное выполнение и компоновка высокочастотных установок рассматривается несколько позже (в главе XV). Более целесообразно было бы сгруппировать главы, относящиеся к высокочастотным генераторам, в одной части книги.

Сжатое описание основных элементов схем и конструкции генераторов высокой частоты, приведенное в главах IX, X и XV, дает общее представление об высокочастотных установках и содержит много практических указаний. Однако изложение нельзя считать достаточно полным. Такие вопросы, как расчет генератора, регулирование к. п. д. и отдаваемой мощности в процессе нагрева, особенности и область применения некоторых схем, явление двухволности и др. в этой части освещены недостаточно. Вопрос автоматического регулирования генератора, над которым ведутся работы как в СССР, так и за границей, не освещен вовсе.

Для обоснования нецелесообразности регулирования мощности, отдаваемой генератором, на стр. 226 автор приводит пример, в котором сопротивление индуктора  $R_i$  принято равным сопротивлению детали в холодном состоянии  $R_{a0}$ . Такое соотношение сопротивлений едва ли характерно и находится в резком противоречии как с данными, приведенными на стр. 49, так и с диаграммой баланса мощностей (рис. 275). Если для холодной детали принять  $R_i = R_{a0}$ , то к. п. д. индуктора при холодной детали равен 0,5, а при нагреве выше точки Кюри  $0,14 \div 0,25$ ; в реальных условиях средний к. п. д. индуктора, как указывает далее и автор (рис. 275 и 279), должен быть в пределах  $0,65 \div 0,8$ .

Серьезное сомнение вызывает справедливость рассуждений автора об устойчивости точек характеристики точного тока (стр. 236). Говоря о трех точках равновесия, получающихся от пересечения нелинейной вольтамперной характеристики линией сопротивления, автор утверждает, что наиболее устойчивой точкой является та, в которой ток имеет наибольшее значение, и называет это положение «принципом наибольшего тока». Последнее утверждение, приведенное без всякого доказательства, находится в противоречии с классическим представлением об устойчивости точки равновесия (см., например, А. А. Андронов и Э. С. Хайкин, «Теория колебаний»). Устойчивость точки равновесия определяется не абсолютным значением тока, а величиной динамического сопротивления в данной точке  $\left(\frac{dU}{di}\right)$ . При рассмотрении точек  $O$ ,  $M$  и  $N$  (рис. 157) наиболее устойчивой должна оказаться не точка  $N$ , а точка  $O$ ; так как только в этой точке динамическое сопротивление цепи положительно. В точках  $M$  и  $N$   $\frac{dU}{di} < 0$ , а следовательно, устойчивость их во всяком случае меньше, чем точки  $O$ .

Третья часть монографии рассматривает конструкции нагревательных индукторов (глава XI) и особенности

закалки стали (глава XII). Дается, правда, без достаточного экономического обоснования, сравнение высокочастотной закалки с прочими методами (соляные ванны, кислородно-ацетиленовые горелки и т. п.).

Практика поверхностной закалки различного рода деталей и применяемые для этой цели станки и приспособления, рассмотрены в главах XIII и XIV. Вопросы применения индукционного нагрева для механической обработки металлов, термообработки сварных швов, сварки и пайки металлов, в производстве электровакуумных приборов и др. рассмотрены в главах XVI, XVII и XVIII, где дается краткое описание соответствующих промышленных установок.

В последней — XIX — главе проводится сопоставление между высокочастотным нагревом металлов и диэлектриков и намечаются тенденции дальнейшего развития техники высокочастотного нагрева. Для всех видов высокочастотного нагрева автор устанавливает общие соотношения между мощностью установки, частотой тока и габаритами колебательного контура. Последняя глава носит неоднородный и нецелесообразный характер, затрагивая различные вопросы, начиная от выбора конденсаторов для колебательного контура и кончая компенсацией стоячих волн.

При первом знакомстве с книгой Г. И. Бабата обращает на себя внимание ее язык. Легкая живая речь, обилие образов и аналогий облегчают восприятие сложных вопросов и заинтересовывают читателя. Так, например, описание явления полосатого нагрева автор начинает следующим образом: «Начнется нагрев. Блестящая поверхность стали потемнеет. На ней промелькнут цвета победы. Затем начнется темное свечение и вдруг на общем фоне вишнево-красного свечения вспыхнут яркие оранжевые полосы».

Живое описание физических явлений перемежается со сложными математическими выкладками. Но и теорию автор преподносит так, что она доступна широкому кругу читателей, от техника до научного работника. Все громоздкие промежуточные выкладки автор опускает, оставляя читателя к соответствующему источнику, и приводит конечный результат, подробно его интерпретируя.

Попутно с изложением основного материала автор иногда делает отступления, касаясь общетеоретических вопросов, например, понятия сосредоточенной индуктивности, допустимости составления тех или иных эквивалентных схем, аналогии различных полей и т. п. Такое изложение облегчает восприятие материала.

Однако, в некоторых случаях чрезмерная легкость изложения приводит к неудачным оборотам речи, а иногда и к неточности в определениях. Так, например, говоря о повышении частоты, автор называет это «гиперболизацией выделения тепла», а ток высокой частоты именует «высококавалитизирующим видом электрической энергии» (стр. 14—15). Потенциал системы заряженных прутьев автор называет «комплексным потенциалом» (стр. 94), тогда как общепринято совершенно иное понимание этого термина, и т. п.

В математической части книги довольно много опечаток как в формулах, так и в ссылках на них. Например, на стр. 60 неправильная ссылка на формулу (III,15) вместо (III,10), а в формуле (III,15)  $\mu_a$  стоит в знаменателе вместо числителя. Эта опечатка имеет особенное значение, так как формула (III,15) далее называется *универсальной критерием* для суждения о к. п. д. Аналогичная опечатка имеет место и ниже на той же странице. На стр. 49, 251, 286 и фиг. 45 обращают на себя внимание опечатки в аналитических выражениях. Такие опечатки иногда могут затруднить чтение книги, особенно при отсуживании промежуточных выкладок.

Подводя итоги сказанному, можно сделать вывод, что, несмотря на некоторые недостатки, книга Г. И. Бабата является хорошо изложенным и глубоким по содержанию трудом, который может явиться пособием при расчете, конструировании и эксплуатации установок для индукционного нагрева металлов.

Кандидат техн. наук А. В. НЕТУШИЛ



## Силовые кабели со сжатым газом

М. Г. ГЕРЦЕНШТЕЙН. СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ СО СЖАТЫМ ГАЗОМ. Государственное энергетическое издательство, 1947, 143 стр., тираж 3.000 экз., ц. 10 руб.

Книга М. Г. Герценштейна представляет собой в основном результат обработки опубликованных в иностранной электротехнической литературе статей о кабелях со сжатым газом. Несомненно, что потребность в книге по данному вопросу имеется, так как внедрение кабелей этого типа в электрохозяйство СССР представляется актуальной задачей.

Материал книги расположен в следующем порядке: глава I. Физические основы работы кабелей со сжатым газом (10 стр.); глава II. Конструкция и технология (37 стр.); глава III. Материалы (22 стр.); глава IV. Испытание кабелей со сжатым газом, их электрические и тепловые характеристики (18 стр.); глава V. Муфты (11 стр.); глава VI. Прокладка (7 стр.); глава VII. Эксплуатация (9 стр.).

По существу изложения необходимо сделать ряд критических замечаний. Прежде всего следует отметить крайне неудачную попытку автора, очевидно по аналогии с масло- и газонаполненными кабелями, называть кабели с вязкой пропиткой «массонаполненными». Этот термин нельзя признать подходящим, ибо никакого «наполнения» массой нет, а есть пропитка кабеля вязким составом. Кроме того, нет никакой необходимости заменять установившееся у нас наименование «кабель с вязкой пропиткой» каким-либо другим термином. Так же неудачно овальная жила называется «эллиптической» (стр. 25, 29). Автор употребляет наименование «кабель с газовыми камерами» вместо установившегося у нас названия «кабель с газовыми подушками».

При изложении физических основ работы кабелей со сжатым газом следовало бы использовать в первую очередь работы русских физиков и инженеров, в особенности по пробоем газов, например работы Б. М. Вула и др. Изложение этого раздела далеко не безупречно. Так, например, на стр. 12 говорится: «если градиент напряжения превосходит некоторую величину, в газе начинается процесс ударной ионизации». Очевидно, что процесс ударной ионизации в газе может происходить при любых градиентах напряжения. Нужно было сказать, что «процесс ударной ионизации начинается быстро развиваться, что приводит...» и т. д.

Совершенно неожиданно на стр. 17 обсуждается «самый серьезный недостаток силового кабеля, сконструированного для работы под вакуумом», заключающийся в том, что нужно «иметь абсолютно надежные герметические оболочки». На самом деле основным препятствием к изготовлению «вакуумного» кабеля является то, что весь эффект упрочнения тонких газовых пленок пропадает при увеличении их толщины или при появлении какого-либо ионизирующего фактора, не говоря уж о трудности откачки газа из органической изоляции кабеля.

Неизвестно на чем основано утверждение автора (стр. 19), что при одинаковых толщине промежутков, приросте газа и давлении начальные градиенты ионизации не должны зависеть от наличия пропитывающего состава, влияющего на перераспределение напряжения между воздушными зазорами и твердым диэлектриком.

Последний абзац на стр. 20 содержит неудачные выражения («температура перегрева», «тепловая устойчивость

изоляции кабеля в отношении ее объема») и неверное утверждение о том, что перегрев на 45—50°С уже вызывает значительную необратимую деформацию свинцовой оболочки кабеля с вязкой пропиткой и приводит к аварии кабеля. Известно много случаев, когда кабели с вязкой пропиткой годами работали без аварий при перегреве свыше 50°С.

Неправильно утверждение (стр. 24) о том, что диэлектрическая проницаемость отдельных слоев бумаги отличается незначительно. В действительности, в зависимости от плотности (объемного веса) бумаги диэлектрическая проницаемость кабельной бумаги, пропитанной маслоканифолевым составом, может изменяться весьма заметно — в пределах от 3,2 до 4,0.

Глава II содержит описание всех основных конструкций кабелей со сжатым газом. Неясно изложены здесь основные понятия, связанные с мембранным действием и упрочнением свинцовой оболочки. На стр. 28 говорится: «чем тоньше свинцовая оболочка, тем меньше ее механическая прочность, тогда как в этом случае решающее влияние имеет не механическая прочность, а устойчивость структуры свинца при переменной механической нагрузке и повышенной температуре. С этой точки зрения утверждение автора о том, что свинцовые оболочки кабелей давления изготавливаются из чистого свинца, без каких-либо присадок, может ввести читателя в заблуждение, так как в настоящее время для оболочек, испытывающих мембранное действие, применяются только свинец с присадками меди и кальция или даже еще более сложные сплавы».

На стр. 36 говорится о немедленном выключении кабеля после возникновения утечки газа из него, так как «падение давления до атмосферного... легко может привести к пробое изоляции». Известно, что электрическая прочность бумажной пропитанной изоляции сильно возрастает с уменьшением длительности приложения напряжения и, очевидно, кабель выдержит удвоенное и даже утроенное рабочее напряжение при атмосферном давлении в течение нескольких часов.

На стр. 77 сказано «воск закупоривает промежутки, уменьшает их размеры». Как это может быть, если образование воска происходит в результате процесса конденсации, т. е. с уменьшением объема пропитывающего вещества, о чем несколькими строками ниже говорит и автор?

Очень мало уделено внимания температурной зависимости  $tg \delta$ . Не дано ни одного примера типовых кривых  $tg \delta = f(T^\circ)$  для основных конструкций кабеля. Ни слова не говорится о коэффициенте температурной зависимости  $tg \delta$  и его допустимых значениях.

В заключение следует подчеркнуть, что книга по вопросу о кабелях со сжатым газом, представляющая обзор литературы в данной области, могла бы быть значительно полезней, если бы автор, во-первых, учел и изложил отечественные работы, относящиеся к рассмотренной проблеме, а во-вторых, более критически разобрал привлеченные им иностранные работы.

Доктор техн. наук, проф. С. М. БРАГИН

## Старейший чехословацкий электротехнический журнал „Elektrotechnický obzor“

Старейшим и наиболее значительным электротехническим журналом Чехословакии является „Elektrotechnický obzor“ (сокращенно ЕО). Он является органом Чехословацкого электротехнического союза (Elektrotechnický Svaz Československý, сокращенно ЕСЧ) и в 1948 г. вступает в 37-й год своего существования. Кроме этого журнала, ЕСЧ выпускает журналы „Slaboproudý obzor“ и „Svarování“, а также ряд различных изданий. После освобождения Чехословакии от германской оккупации, с 1946 г., ЕСЧ начал издавать новый журнал „Elektrotechnik“, предназначенный для электротехников—практиков.

Журнал «ЕО» издается в Праге. Он выходит 2 раза в месяц номерами объемом около 4 авторских листов (не считая объявлений). Материалы журнала печатаются на чешском языке; основные статьи снабжаются аннотациями на русском и других языках.

Статьи в журнале написаны на высоком теоретическом уровне в расчете на квалифицированного читателя и многие из них представляют значительный интерес.

Первый номер ЕО за 1947 г. открылся статьей, дающей обзор деятельности ЕСЧ за истекший 1946 год. В течение 1946 г. союз развил значительную активность в области стандартизации, научно-исследовательских и издательских работ. Количество членов союза возросло, и уже на 30% превышает довоенную численность союза. В сентябре 1946 г. в гор. Брно состоялся очередной съезд союза, на котором было заслушано и обсуждено 42 доклада.

В настоящее время союз принимает живое участие в работе по восстановлению народного хозяйства Чехословакии в соответствии с законом от 25 октября 1946 г. о двухлетнем плане развития народного хозяйства страны. Этот план в части электрификации страны излагается в статье Яр. Иблера в том же номере журнала. Согласно закону о двухлетнем плане выработка электроэнергии всеми электростанциями Чехословакии за 1947 г. составляет 6,9 млрд. kWh, по плану 1948 г. предусмотрено 7,4 млрд. kWh; последняя цифра на 40% превышает выработку электроэнергии в стране за 1946 г. и на 80% — выработку за 1937 (довоенный) год.

Из содержания других номеров также могут быть отмечены некоторые наиболее значительные статьи. Статья А. Блага «Катодный высоковольтный осциллограф чехословацкого производства» (№ 3—4, стр. 51) дает пример описания сложной электротехнической аппаратуры, разработанной и внедренной в производство чехословацкой промышленностью. В статье Блага указываются конструктив-

ные особенности нового осциллографа и приводятся результаты его испытания.

Статья А. Браблыца «К теории диэлектрика» (№ 9, стр. 157) посвящена теоретическим вопросам поляризации и диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах. Автором в результате его экспериментов и анализа литературных материалов разработана «резонансная» теория диэлектриков.

Статья Яр. Пахнера «Усовершенствованная разрядная трубка для ядерных реакций» (№ 14, стр. 266) содержит описание разработанной автором новой разрядной трубки с двухступенчатым ускорением—предварительное ускорение от 100 до 300 kV и главное ускорение при напряжении в несколько млн. V. В статье приводится принцип действия трубки, дается ее энергетический расчет и указываются конструктивные усовершенствования.

Две статьи В. Геллера (№ 6, стр. 89 и № 15, стр. 277) посвящены вопросам магнитного поля в электрических машинах (влияние насыщения железа на потоки рассеяния и влияние пазов на магнитное поле асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором).

В № 20 (стр. 361) помещена статья С. Матена «К экспериментальному исследованию турбогенератора в синхронном, асинхронном и переходном режимах работы». В статье приводятся некоторые результаты испытаний генераторов при работе их на электростанциях параллельно с системой. Основным прибором, использованным при этих испытаниях, являлся электронный стробоскоп, который позволял замерять все виды скольжения ротора генератора относительно вращающегося поля статора. Теория и принципы применения стробоскопа также рассмотрены в статье.

В журнале регулярно ведется отдел хроники. Уделяется достаточное внимание реферированию статей из различных иностранных журналов; реферировуются статьи электротехнических журналов СССР. В каждом номере журнала приводится перечень чехословацких и иностранных новых книг; правда в отношении новых советских книг эти перечни носят довольно случайный характер и часто указываются уже давно вышедшие книги, а работы, вышедшие в последнее время, отсутствуют. Развернутые рецензии на вновь выходящие книги, дающие их оценку редакцией журнала, отсутствуют.

В целом журнал отражает высокий уровень развития чехословацкой научной электротехнической мысли.

Кандидат техн. наук **Б. М. ТАРЕЕВ**  
и инж. **С. П. ИНОЗЕМЦЕВ**





# ОБ ОФОРМЛЕНИИ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ АВТОРАМИ В ЖУРНАЛ „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

1. Материал, предназначенный для опубликования в журнале, должен представляться отпечатанным на машинке через два интервала (первый экземпляр) с одной стороны листа стандартного размера, имеющего с левой стороны поля шириной в 3—5 см. Текст должен быть отчетливым, без помарок и вставок. В отдельных случаях, по согласованию с редакцией, материал может представляться в форме безупречно четкой рукописи.

Иллюстрационный материал вместе с перечнем, содержащим все пояснения к рисункам, должен быть приложен отдельно. Каждый рисунок должен быть пронумерован (пример: Рис. 1 и т. д.) и иметь соответствующую пояснительную подпись.

2. Средний размер статьи может составлять 0,5—1 авт. лист (10—20 стр. текста на машинке); в необходимых случаях размер статьи может быть увеличен. Автореферат (краткое содержание научно-исследовательской работы) не должен, как правило, превышать 5—6 стр. на машинке.

3. К статье должна прилагаться аннотация (краткое изложение основных положений и выводов статьи) размером до 500 печатных знаков.

4. Статьи и авторефераты, сообщающие о результатах работ, проведенных авторами по заданию организаций, представляются вместе с письменным разрешением этих организаций на опубликование.

5. Представляемый автором оригинал должен быть тщательно проверен (особое внимание следует обратить на формулы и чертежи) и подписан, с указанием автором даты, своего полного почтового адреса и места работы.

6. Разделы (главы) статей и авторефератов должны выделяться особыми подзаголовками; соподчинение внутренних подразделов должно быть четко показано; в необходимых случаях желательно выделять некоторые места текста *курсивом* или *разрядкой*. Обобщающие работу выводы помещаются в конце статьи.

7. Вспомогательные математические выкладки и промежуточные преобразования формул, а также примеры расчетов выносятся обязательно в специальные приложения.

8. Обозначения единиц измерения должны соответствовать союзным стандартам (Электричество, № 1—2, 1945).

9. Формулы помещаются в отдельной строке, а не в строке текста. Формулы и обозначения показателей степени и индексов должны быть вписаны от руки чернилами ясно и отчетливо. Особенно ясно должны различаться сходные по начертанию заглавные и строчные буквы (С и с, К и к, О и о, S и s, U и u, V и v и т. д.) и буквы, трудно отличимые в рукописном изображении: e и l, i и j, и q, n и u, V и U и др., а также  $\chi$  (греческая) и  $x$ ,  $\alpha$  и  $a$  (греческая).

Прописные (заглавные) буквы рекомендуются подчеркивать карандашом двумя черточками снизу, (например, О), а строчные—сверху. 0 (ноль) не подчеркивать. Греческие буквы заключать в кружок карандашом.

10. Над символами комплексных величин следует ставить точки (например  $I^{\cdot}$ ), над сопряженными комплексами  $\wedge$  (например  $\hat{I}$ ), над векторами черту ( $\vec{H}$ ).

11. При перечислении предпочтительно пользоваться цифрами и во вторую очередь буквами русского алфавита).

12. Таблицы должны снабжаться заголовками и порядковыми номерами.

13. Сноски нумеруются (звездочек не применять) в порядке их последовательности в тексте.

14. Сокращения слов не допускаются, за исключением общепринятых известных сокращений: ВЭИ, МЭИ, гЭС, к. п. д., э. д. с. и т. п.

15. Чертежи и графики вычерчиваются черной тушью на белой бумаге стандартного размера или на кальке. Графики могут быть выполнены на миллиметровой бумаге. Графики, предназначенные для расчетов, должны представляться на кальке. Для всех графиков совершенно обязательно нанесение сетки и значения делений. Обозначения величин должны быть указаны над осью абсцисс и с правой стороны оси ординат, а единицы измерения—под осью абсцисс и с левой стороны оси ординат. Стрелки по концам осей не ставить.

16. При заимствовании рисунков из опубликованных работ надлежит указывать литературный источник.

17. Цитируемые или рекомендуемые литературные источники должны быть приведены в конце статьи в виде библиографического указателя (Литература). Ссылки на источник в тексте сопровождаются взятыми в квадратные скобки буквой Л и порядковым номером источника в библиографическом указателе статьи, например: [Л. 3], [Л. 5]; ссылку на несколько источников указывать следующим образом: [Л. 1—4].

18. Библиографический указатель (литература) должен составляться по следующей форме: а) для журналов: инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), название журнала, часть журнала, том, номер, год; б) для книг: инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), заглавие книги (в оригинале), том, издательство, место издания, количество страниц, год.

19. В ссылках на журнальные статьи слово «журнал» не пишется, страницы указываются только в случае необходимости. При обозначении года слово «год» опускается.

20. С другими особенностями оформления представляемых материалов можно ознакомиться при просмотре номеров журнала «Электричество».





# ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Продолжается подписка на 1948 год  
НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР И МИНИСТЕРСТВА  
ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

Основан в 1880 году Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области исследования и применения электричества и освещает основные теоретические и практические проблемы, связанные с развитием всех отраслей электротехники и электрификации СССР

### ТЕМАТИЧЕСКИЕ ОТДЕЛЫ ЖУРНАЛА

Физические и общетеоретические вопросы электричества и электротехники  
Общие вопросы электроэнергетики  
Электрические системы, станции, сети и передача электроэнергии на дальние расстояния  
Электрические машины и трансформаторы

Электропривод и электрификация отраслей промышленности  
Электрификация транспорта  
Электрификация сельского хозяйства  
Техника высоких напряжений (высоковольтная аппаратура и грозозащита)

Ионно-электронные преобразователи  
Радиотехника  
Электросвязь по проводам  
Автоматика, телемеханика, техника релейной защиты

Кабельная техника  
Светотехника  
Электротермия и электросварка

Электрические измерения и приборы  
Электрические материалы  
Электротехнические стандарты, правила, нормы, терминология

История науки об электричестве и история электротехники

КРОМЕ ТОГО, В ЖУРНАЛЕ ИМЕЮТСЯ ОТДЕЛЫ:

Из научно-исследовательских работ (авторефераты); Дискуссии; Рефераты (по иностранным техническим журналам); Хроника; Библиография.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ НА ПОЧТЕ И В ОТДЕЛЕНИЯХ  
«СОЮЗПЕЧАТИ»

12

номеров в год

по 12 печ.

листов

Подписная  
цена на год

96

рублей