

21.3  
3-46.  
1938



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

№ 3

1938

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ГОД ИЗДАНИЯ 59-й

3  
1938  
МАРТ

Журнал НАРКОМАТОВ ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ И АКАДЕМИИ НАУК СССР.  
Адрес редакции: Москва. Бол. Калужская, дом 67. Энергетический ин-т, 1 этаж, ком. 144, тел. В 5-32-79.  
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648

## Если враг не сдается,— его уничтожают

Каждый советский патриот, читая материалы судебного процесса над Бухариным, Рыковым, Кудой и др., с гневом и возмущением узнавал о подлейших злодеяниях антисоветского «правотроцкистского блока», о чудовищных преступлениях троцкистско-бухаринско-рыковской своры изменников фашизма перед родиной всех трудящихся — СССР.

Когда государственный обвинитель товарищ Вышинский в своей речи на процессе говорил:

«Вся наша страна, от малого до старого, ждет одного: изменников и шпионов, продавших врагу нашу родину, расстрелять, как потных псов!»

Требуется наш народ одного: раздавите проклятую гадину! — устами Прокурора Союза ССР говорила вся советская страна.

Справедливый приговор Военной Коллегии Верховного Суда над этой бандой презренных говорщиков, вредителей, шпионов, диверсантов, изменников и убийц встречен всем советским народом с глубоким удовлетворением. На грязных изменников обрушился меч пролетарской диктатуры.

Весь народ выражает огромную благодарность главной советской разведке во главе со сталинским наркомом товарищем Н. И. Ежовым, разгромившей вражеские гнезда и железной рукой выловившей гнусных предателей и бандитов.

Как радостно сознавать, что воздух нашей замечательной родины очищен от фашистского вонючка.

Как радостно чувствовать могучую силу, с которой страна социализма защищает себя от врагов и с которой она наносит сокрушительные удары мировому фашизму.

Вечному проклятию предает наш народ имена троцкистско-бухаринско-рыковских зыродков, которые добивались порабощения трудящихся, реставрации капитализма, расчленения социалистической родины, свержения Советской власти.

Вечному проклятию предает наш народ их, разрушавших своим вредительством промышленность, сельское хозяйство, финансы, железные

дороги, электрические станции, продававших секретные государственные сведения иностранным разведкам, поджигавших войну, осуществивших террористические акты против С. М. Кирова, В. Р. Менжинского, В. В. Куйбышева, А. М. Горького и умерщвление М. А. Пешкова.

Больно и тягостно, что от руки фашистских мерзавцев погибли родные советской стране прекрасные люди.

Фашистские гады-отравители успели нанести значительный ущерб здоровью Н. И. Ежова, они организовали, но, к нашему счастью, не успели осуществить ряд террористических актов против руководителей партии и советского правительства.

Цепь чудовищных преступлений этих гадов тянулась с давних времен. Одни из них, как Зеленский, Иванов и Зубарев, еще до Октябрьской революции являлись прямыми слугами царизма, агентами царской охранки и провокаторами, другие, как Бухарин, тут же после Октября в период Бреста организовали совместно с Троцким и «левыми» эсерами преступный заговор против Советской власти и готовили убийство В. И. Ленина, И. В. Сталина и Я. М. Свердлова.

Тысячу раз был прав великий русский писатель М. Горький, написавший о врагах народа:

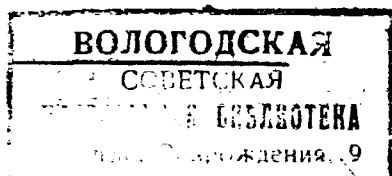
«Если враг не сдается,— его уничтожают».

Беспощадным уничтожением отвечаем мы на коварные происки врагов народа.

Запоминающимися надолго словами закончил свою речь товарищ Вышинский:

«Пройдет время. Могилы ненавистных изменников зарастут бурьяном и чертополохом, покрытые вечным презрением честных советских людей, всего советского народа.

А над нами, над нашей счастливой страной, попрежнему ясно и радостно будет сверкать своими светлыми лучами наше солнце. Мы, наш народ, будем попрежнему шагать по очищенной от последней нечисти и мерзости прошлого дороге, во главе с нашим любимым вождем и учителем — великим Сталиным — вперед и вперед, к коммунизму!»



## По-большевистски поднять культуру электрохозяйства

**БОЕВАЯ** программа работы тяжелой промышленности в 1938 г., развернутая в приказе сталинского наркома тов. Л. М. Кагановича от 21 января с. г., включает в себя наряду с конкретными заданиями по всем отраслям также и задания по электростанциям:

«а) Обеспечить по электростанциям Главэнерго в 1938 году — удельный расход топлива на выработанный киловаттчас не свыше 0,585 кг и 197,0 кг (условного топлива) на 1 мегакалорию; расход электроэнергии на собственные нужды по производству электроэнергии — не свыше 5,8 проц., по производству тепла — 17,8 квтч/мгк; снижение потерь в сетях электроэнергии — до 8,6 проц. и теплоэнергии — до 3,5 проц.

б) Провести работы по грозовой и релейной защите в основном в первой половине года до наступления грозового периода.

в) Обеспечить окончание ремонта электростанций до начала осенне-зимнего максимума 1938 года.

г) Обеспечить выполнение задания по снижению себестоимости электроэнергии в 1938 году на 3,7 проц.».

Не случайно задания по работе электростанций в приказе наркома выдвинуты на первый план. От работы электростанций зависит успех выполнения плана всей промышленности.

Для электростанций, как и для всей промышленности в целом, железным законом должно быть безусловное выполнение не только количественных, но и качественных показателей плана, поднятие всей культуры производства.

Электростанции НКТП должны выработать в 1938 г. 34,0 млрд. kWh, в том числе районные электростанции Главэнерго и Главгидроэнерго — 29,0 млрд. kWh энергии.

Между тем среди некоторой части работников электростанций (и в Главэнерго) распространено мнение о том, что выполнение этих количественных показателей — дело уже обеспеченное и не нуждается в особо настойчивых и упорных усилиях.

Это — глубокое заблуждение.

Этим работникам нужно напомнить, что электростанции Главэнерго выполнили план 1937 г. лишь на 89,4% и недодали стране 3 млрд. kWh.

Наши советские электростанции и электросети вооружены первоклассной техникой. Партия и правительство неустанно заботятся о росте и укреплении электроэнергетической базы страны, основы которой были заложены блестящей реализацией ленинско-сталинского плана ГОЭЛРО.

Отряд работников наших электростанций и электросетей насчитывает немало великолепных мастеров своего дела, лучших стахановцев. Можно указать несколько электростанций, показавших в 1937 г. образцы почти безаварийной и высокоэкономичной работы: среди них Шатурская им. Ленина, Каширская им. Л. М. Кагановича, станция им. Классона, Дзорогэс и др.

Однако общая культура организации эксплуатации электрохозяйства и использования средств новейшей и «старой» техники (из которой нужно

еще научиться выжимать максимум возможно довольно еще низки.

Достаточно обратиться к такому синтетическому показателю культуры эксплуатации электрохозяйства, каким должна быть безаварийная работа. Общий итог деятельности электростанций Главэнерго в 1937 г. (а они должны быть первыми в стране), характеризуемый этим показателем, крайне неудовлетворителен. За 1937 количество аварий в системе Главэнерго, по сравнению с 1936 г. не снизилось. Вместе с тем резко выросло по сравнению с 1936 г. количество энергии, недоданной из-за аварий, что нанесло ущерб народному хозяйству, оцениваемый миллионами рублей, хотя убытки в рублях еще не дают полного представления о размерах этого ущерба.

Подавляющее большинство всех аварий произошло по причинам некачественной, рыхливой работы обслуживающего персонала в том числе и руководящего технического персонала.

Не менее 10% общего количества аварий произошло, в частности, в связи с грозовыми перенапряжениями. И тут среди некоторой части работников электрохозяйства (и в Главэнерго) имеет хождение успокоительное мнение о том, что количество грозовых аварий в электросистемах ежегодно и неуклонно снижается. А между тем можно привести немало примеров серьезных нарушений работы электросистем из-за грозовых аварий в 1937 г.

Большую пользу (вместо ненужного успокоения на этом участке принес бы живой обмен опытом между электросистемами о мерах борьбы с авариями от перенапряжений и, в особенности, грозовых перенапряжений. В этом отношении представляет определенную ценность печатаясь в настоящем номере «Электричества» статья М. М. Акодис, написанная на базе работ высоковольтной лаборатории Донэнерго, где за последнее время были проведены эффективные мероприятия по борьбе с грозовыми авариями.

Значительный интерес представляют проведенные в течение 1936 и 1937 гг. (в ВЭИ и Академии наук СССР) под руководством д-ра технических наук И. С. Стекольниковой работы по изучению молнии и грозовых разрядов как путем измерений в полевой лаборатории, так и путем записей ферромагнитными регистраторами на линиях электропередач<sup>2</sup>.

Следует пожелать, чтобы эти исследования были еще более целеустремленными в направлении разработки мероприятий по созданию групп упорных линий электропередач и защиты сооружений от молнии.

Печатаемое также в настоящем номере журнальное сообщение д-ра И. С. Стекольниковой и инж. А. Белякова о факторах, влияющих на образование

<sup>1</sup> Такие настроения отразил, например, инж. В. В. Зыский, ведающий вопросами защиты от перенапряжений в своем выступлении на активе Главэнерго 9 февраля.

<sup>2</sup> См. статью И. С. Стекольниковой и Х. С. Леева об этом в № 1 «Электричества», 1938.

искрового разряда, направляет внимание на принципиально новые пути конструирования молниевыводов, какими при определенных условиях могут быть, например, «невидимые» потоки нагретого газа. Это явление нуждается, конечно, в дальнейшем изучении.

Немаловажной причиной больших аварий в электросистемах за последние годы является загрязнение изоляторов угольной пылью от работающих электростанций или других промышленных предприятий, что снижает импульсную прочность изоляторов. Профилактические мероприятия по борьбе с загрязнением изоляторов должны входить составной частью в элементарную культуру эксплуатации электрохозяйства. Научно-техническому анализу вопроса об импульсной прочности изоляторов, покрытых слоем влажных загрязнений, посвящена помещаемая ниже статья инж. В. К. Кожухова.

Одним из важнейших качественных показателей работы электрохозяйства является борьба за экономию электроэнергии. Постановление Совнаркома Союза ССР от 16 октября 1936 г. об экономии электроэнергии и о выработке норм расхода в различных отраслях промышленности до сих пор в полной мере не реализовано. Экономический Совет при Совнаркоме Союза ССР в начале 1938 г. в своем постановлении об упорядочении электроснабжения Москвы и Ленинграда вновь поставил во весь рост задачу экономии электроэнергии. Приказ тов. Л. М. Кагановича, который мы цитировали выше, требует в первую очередь от самих электростанций наведения жесткой экономии в расходе электроэнергии на собственные нужды и снижения потерь в сетях. В заданиях по другим отраслям тяжелой промышленности также указана необходимость добиться ликвидации перерасхода электроэнергии.

Всем работникам электрохозяйства должно быть ясно огромное хозяйственно-политическое значение экономии электроэнергии.

Однако насчитывается еще много предприятий, где эта задача совсем не усвоена, где к экономии электроэнергии относятся преступно небрежно.

«Правда» в передовой статье от 5 февраля 1938 г. привела целый список таких заводов и в этом списке такие электропредприятия, как Электрокомбинат им. Куйбышева, завод «Динамо» и др.

Печатаю ниже статью инж. С. Ф. Шершова о рационализации потребления электроэнергии в электротермических цехах, мы продолжаем начатую в № 1, 1938 г., серию статей по вопросам экономии электроэнергии.

В своей статье инж. С. Ф. Шершов совершенно конкретно указывает на простейшие мероприятия по эксплуатации электротермических печей, которые в сумме могут дать большую (в несколько десятков процентов) экономию электроэнергии. Автор правильно подчеркивает значение совместной работы энергетиков и технологов заводов и пишет, что:

«Успешная борьба за снижение удельных расходов электроэнергии возможна только при условии самого тесного контакта в работе между нами, обоюдной заинтересованности в дальнейшем развитии и улучшении нашего социалистического производства. Рационализаторские предложения должны подвергаться экспериментальной проверке в производственных условиях с целью выявления не только энергетической эффективности, но и влияния на качество продукции».

Пусть энергетики и технологи таких заводов, как московский завод «Шарикоподшипник» им. Л. М. Кагановича и автомобильный им. Сталина (ЗИС) и других, где электротермические процессы обработки стальных изделий занимают значительное место в энергобалансе предприятия,— обратят на предложения инж. С. Ф. Шершова серьезное внимание, какого эти предложения заслуживают.

Приказ тов. Л. М. Кагановича о производственном плане тяжелой промышленности на 1938 г. помогает работникам промышленности, и в частности рабочим, инженерам и научным работникам электрохозяйства и электропромышленности, в овладении большевизмом и поднятии культуры производства.

«Работники тяжелой промышленности,— говорится в приказе,— должны на основе большевистской самокритики вскрывать недостатки, ликвидируя последствия подлого вредительства, развывая настоящий сталинский пафос освоения предприятий и обеспечить выполнение и перевыполнение производственного плана 1938 года».

Происходившее 14—20 марта с. г. в Москве под непосредственным руководством тов. Л. М. Кагановича Всесоюзное совещание работников энергетики по-большевистски разобрало недостатки работы электростанций и электросетей и наметило конкретную программу действий, которая положена в основу специального приказа НКТП.

В своем обращении ко всем работникам электростанций, электросетей и энергосистем Всесоюзное совещание пишет:

«Великие идеи Ленина — Сталина претворены в жизнь, наша родина превратилась на базе электрификации в мощную индустриальную страну.

В 1938 г. Партией и Правительством намечен дальнейший огромный рост мощности электростанций и создание резервов.

Вперед за дальнейший расцвет социалистической электрификации под знаменем партии Ленина — Сталина!»

Величайший политический подъем, проявленный трудящимися массами при выборах в Верховный Совет Союза ССР, новая волна политического подъема в связи с предстоящими выборами в Верховные Советы РСФСР и других Союзных республик вдохновляет работников электрохозяйства и электропромышленности на борьбу за количественные и качественные показатели плана 1938 г., за подлинную культуру производства.

### Магнитное поле Арктики<sup>1</sup>

Евгений Федоров

Ледокол „Ермак“, 15 марта

ИЗВЕСТНО, какое большое внимание уделяли компасам наши летчики, прокладываявшие воздушный путь через Северный Ледовитый океан в Америку. В Арктике особенно важно иметь точные приборы, безошибочно указывающие курс самолету. Летчики запасались солнечными компасами, пользовались радиомаяками, летали по радиокомпасам. В этих местах нельзя доверять обычно надежному магнитному компасу.

Стрелка магнитного компаса лишь в немногих местах на земном шаре указывает точно на север. Обычно она отклонена от севера к востоку или западу на некоторый угол. Этот угол называется магнитным склонением — восточным или западным. Естественно, что прежде, чем пользоваться компасом, нужно знать, каково в данном месте магнитное склонение. За ответом на этот вопрос летчик или штурман воздушного корабля обращается к магнитным картам.

Карты составляются на основании определений магнитных склонений. Эти определения специально делаются на различных участках поверхности земного шара. Так как ни одна экспедиция до нас магнитных определений в районе полюса не делала, то надежной магнитной карты для Центральной Арктики невозможно было составить.

Это первая причина, затруднившая пользование магнитным компасом при полете через полярные области. Вторая неприятность заключается в том, что чем ближе к магнитному полюсу, тем круче направлена к земной поверхности магнитная сила и тем слабее делается ее горизонтальная составляющая — та самая, которая ориентирует компасную стрелку в определенном направлении. Есть и третья неприятность: в Арктике часто бывают магнитные бури, во время которых магнитная сила меняет свою величину и направление, в результате чего стрелка компаса ходит из стороны в сторону на несколько градусов.

Эти трудности преодолимы. Слабость горизонтальной составляющей можно компенсировать устройством более чувствительного компаса и тщательным устранением влияний, которые оказывают на компас имеющиеся на воздушном корабле железные и стальные предметы. За магнитными бурями следят полярные обсерватории и всегда могут своевременно оповещать о них летчиков.

Можно составить теперь и надежную магнитную карту Центральной Арктики. Полученные дрейфующей станцией данные положили хорошее начало.

Для того чтобы составить магнитную карту,

нам нужно было во время дрейфа станции «Северный полюс» производить магнитные измерения через каждые 30—40 миль. Если бы магнитное поле было неизменным, то каждый раз было бы достаточно делать одно измерение. Но мы всегда могли наткнуться на магнитную бурю, получить искаженную величину, и поэтому одиночных наблюдений было недостаточно. Сделав наблюдение, я бежал в ледяную «магнитную обсерваторию» и там в течение многих часов следил за колебаниями магнитного поля с помощью особых приборов — магнитных вариометров.

Магнитный теодолит, которым производились основные измерения, нужно было держать в стороне от лагеря, чтобы на его показания не влияли лопаты, пещни, револьверы, ружья и прочие металлические предметы, имевшиеся у нас. Для теодолита была выстроена из снега маленькая хижина, похожая на муравьиную кучу.

Между этой хижинкой и ледяным домиком, где были вариометры, надо было быстро перебежать по нескольку раз в начале и конце суточной серии наблюдений.

Около 84° с. ш. примерно в середине ноября работу с вариометрами пришлось прекратить. Наше ледяное поле стало довольно быстро передвигаться — это сбивало установку вариометров. Тогда мы стали чаще практиковать наблюдения с теодолитом, чтобы иметь возможность впоследствии исключить те пункты, которые придется на период магнитной бури.

Мы измеряли склонение, наклонение (угол, показывающий, насколько круто магнитная сила направлена к земной поверхности) и величину горизонтальной составляющей. Что же получилось в результате этих измерений?

Некоторые ученые составляли магнитные карты Арктики на основании теоретических предположений о распределении земного магнетизма. Это можно сделать, если допустить, что в районе полюса нет значительных аномалий. Считалось, например, что на полюсе угол между направлением гринвичского и магнитного меридианов имеет величину от 50 до 60°. В действительности же этот угол оказался равным 41°.

Нами установлено, что стрелка магнитного компаса в районе Северного полюса направлена под углом в 41° к меридиану Гринвича в сторону Америки. Чем южнее мы спускались, тем ближе сходились результаты наших магнитных измерений с теоретически предполагавшимися величинами. Приблизительно с 84-й параллели магнитными картами, составленными на основании теоретических предположений, можно уже пользоваться для практических надобностей. На пути дрейфа не обнаружилось существенных аномалий: во

<sup>1</sup> «Правда» № 74 (7399) от 16 марта 1938 г.

магнитные величины изменялись постепенно и плавно.

Записи колебаний магнитного поля будут использованы не только для уточнения сделанных нами измерений магнитного склонения, наклонения и горизонтальной составляющей в Центральной Арктике. Сами по себе эти колебания — магнитные варианты — также интересны. Когда мы сравним их с записями береговых магнитных обсерваторий за то же самое время, то получим возможность судить о том, какова разница в протекании вариации близ полюса и на берегах Ледовитого океана. Повидимому, магнитное поле у полюса ведет себя спокойнее.

Перед отъездом наши магнитные приборы были сравнены со стандартными приборами Слуцкой магнитной обсерватории под Ленинградом. Сейчас мы снова сделаем такое же сравнение, опре-

делим, какие изменения произошли в наших приборах за время путешествия, чтобы внести соответствующие поправки при окончательной обработке результатов.

Наши измерения дают своего рода «разрез» магнитного поля Арктики от Северного полюса до 75° с. ш.

Это позволит не только составить магнитную карту для района дрейфа, но даст возможность вычислить наиболее отвечающую действительности подобную же карту всей Центральной Арктики.

Иначе говоря, наши наблюдения позволят судить о распределении земного магнетизма по всей Центральной Арктике, а это в значительной степени облегчит полеты через Северный Ледовитый океан.

## ВОПРОСЫ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### Рационализация потребления энергии в электротермических процессах

С. Ф. Шершов

Московский энергетический институт  
им. Молотова

В СТАТЬЕ на основе материалов испытания<sup>1</sup> электротермических печей, находящихся в заводской эксплуатации, сделана попытка наметить пути рационализации потребления электроэнергии в процессах отжига и закалки. Характеристика работы обследованных электротермических печей системы Гумберт (E. Humbert) представляет к тому же и самостоятельный интерес ввиду отсутствия в литературе соответствующих данных.

**Устройство печей.** Электрическая садочная печь сопротивления типа Humbert для отжига тальных поковок состоит из цилиндрического железного кожуха, который выложен внутри фасонным огнеупорным кирпичом с укрепленной на нем нагревательным сопротивлением нихромовой ленты. Верхнее сечение печи, через которое при помощи мостового крана производятся операции по разгрузке-загрузке, закрывается или двумя железными крышками или одной с кирпичной футеровкой.

Для уменьшения тепловых потерь и подсоса

воздуха в зазоре между крышкой и кожухом печи устроен круговой песочный затвор. Подобный затвор имеется также сверху крышки печи, где проходит через крышку штанговый пирометр с огнеупорной пробкой. Сама печь находится в специальной ячейке, защищающей ее от излишних тепловых потерь.

Печь делится на 3 пояса, каждый из которых имеет 2 нагревательных элемента сопротивления, расположенных параллельно по внутренней боковой поверхности обогреваемого пространства печи.

Схема соединения нагревательных элементов печи позволяет позонно регулировать температуру рабочего пространства, что осуществляется двумя — верхним и нижним — терморегуляторами. Попутно следует отметить, что наличие в одном поясе двух разноименных фаз может служить причиной коротких замыканий.

Температура нагрева поковок измеряется термомпарами, соединенными с регистрирующим прибором, записывающим температуру в виде кривой. В зависимости от температуры рабочего пространства печи производится автоматическое дозирование электроэнергии. Печь загружается

<sup>1</sup> Испытания проводились автором совместно со студентами-дипломниками МЭИ им. Молотова тт. Фарафоновой и Ивановым.

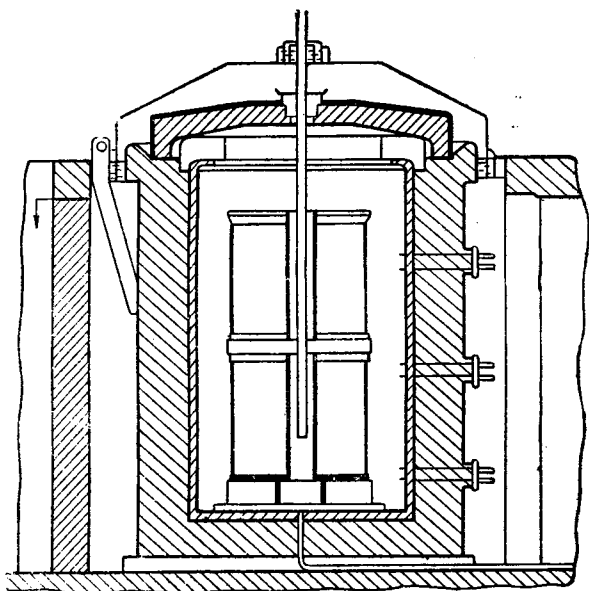


Рис. 1. Электрическая печь сопротивления для отжига системы Humbert

(рис. 1) двумя устанавливаемыми вертикально один на другой цилиндрическими горшками с поковками для отжига.

Верхний горшок обычно загружается на 200—250 kg больше нижнего ввиду более благоприятных для него условий нагрева. Он закрывается железной футерованной крышкой для предупреждения быстрого остывания отоженных изделий при переносе их из печи в охлаждающий колодец.

Садки в зависимости от диаметра загружаемых поковок отличаются по весу. Чем больше диаметр поковок, тем меньше общий вес садки.

Мощность печи — 130 kW. Печь снабжена измерительной аппаратурой: вольтметром, ампер-

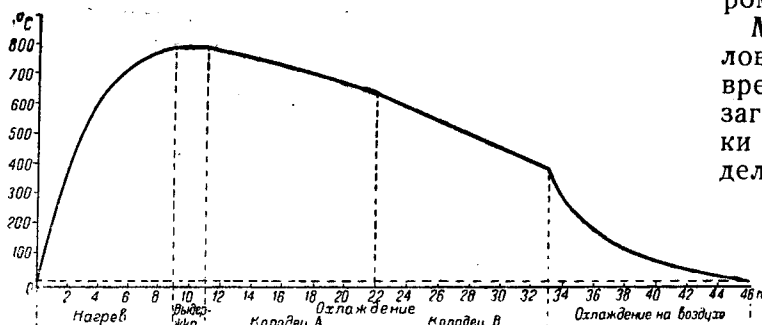


Рис. 2. Диаграмма отжига поковок

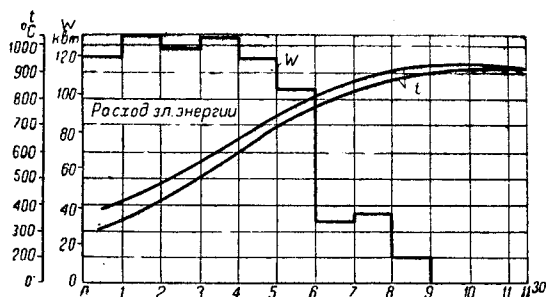


Рис. 2а. График расхода электроэнергии и температурные графики нагрева поковок верхнего и нижнего горшков отжигательной печи. Вес садки 2,682 t

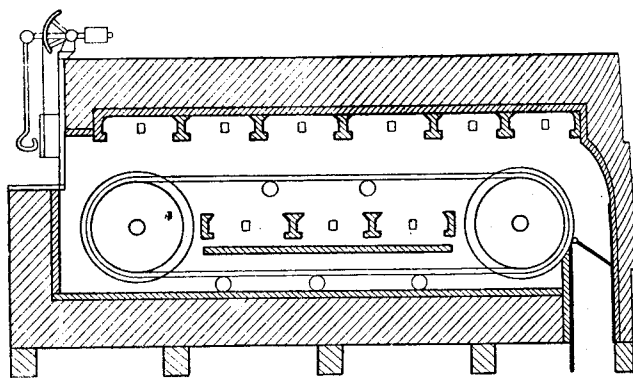


Рис. 3. Электрическая конвейерная печь для заковки металла Humbert

метрами и трехфазным счетчиком электрической энергии.

Диаграмма отжига поковок изображена на рис. 2.

На рис. 2а дан график расхода электроэнергии и температурные кривые нагрева поковок верхнего и нижнего горшков отжигательной печи.

Закалка стальных поковок производится в электрических конвейерных печах Humbert (рис. 3). При помощи вариаторов скорость движения конвейера может меняться в широких пределах (до 24 скоростей).

Печь, будучи отрегулирована на определенный режим, в зависимости от типа поковок работает вполне автоматически, и роль обслуживающего ее рабочего сводится, главным образом, к подкладыванию поковок на конвейер и общему наблюдению за печью.

Поковки находятся в печи от 10 до 70 min. Печь однофазная. Мощность ее 120 kW, напряжение — 125 V. Нагревательные секции печи — нильромовые.

**Методы составления теплового баланса.** Тепловой баланс отжигательной печи охватывает по времени период одной садки, считая от момента загрузки в печь горшков с поковками до выгрузки их. Чтобы определить средние значения отдельных элементов теплового баланса, необходимо провести наблюдение за рядом садок в эксплуатационных условиях. Обобщение результатов испытаний возможно только при условии, если печь работала в неизменных условиях эксплуатации (состояние теплоизоляции, производительность, нормальный температурный режим и пр.).

Общий расход энергии определялся по показаниям счетчика. Отдельные элементы теплового баланса вычислялись по приводимым ниже формулам.

Полезный расход тепла на нагрев изделий:

$$Q_1' = G (J_2' - J_1') \frac{1}{860} \text{ kWh},$$

где  $G$  — вес поковок в kg;

$J_2'$  и  $J_1'$  — теплосодержание одного килограмма металла (в нашем случае стали), соответственно, при конечной температуре нагрева металла и при начальной температуре, практически при температуре цеха.



Расход тепла на нагрев железной тары определяется по формуле (1). Расход тепла на футерованную часть крышки из шамотного кирпича

$$Q_1'' = G_{\phi} C_{\phi} (t_2 - t_1) \frac{1}{860} \text{ kWh}, \quad (2)$$

где  $G_{\phi}$  — вес футерованной части крышки в kg;  
 $C_{\phi}$  — средняя удельная теплоемкость шамот-

ного кирпича в  $\frac{\text{Cal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$ ;

$t_2$  и  $t_1$  — соответственно, конечная и начальная температуры футеровки.

Потери через стенки печи в час:

$$Q_2 = \frac{2\pi l (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{860 \sum \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}} \text{ kWh}. \quad (3)$$

Здесь  $\vartheta_2$  и  $\vartheta_1$  — соответственно, температуры внутренней и наружной стенок печи;

$l$  — высота печи в м;

$d_{n+1}$  и  $d_n$  — наружный и внутренний диаметры слоев изоляции в м;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности

в  $\frac{\text{Cal}}{\text{mh}^{\circ}\text{C}}$ .

Потери тепла в час через под печи учитываются по формуле для плоской стенки:

$$Q_3 = \frac{F(\vartheta_2 - \vartheta_1)}{860 \sum \frac{S_n}{\lambda_n}} \text{ kWh}. \quad (4)$$

$F$  — средняя площадь пода по наружному и внутреннему обмеру в  $\text{m}^2$ ;

$S_n$  — толщина соответствующего слоя изоляции в м.

Потери энергии через крышку печи:

$$Q_4 = F a_{\text{сум}} (\vartheta_1 - t_1) \frac{1}{860} \text{ kWh}, \quad (5)$$

где  $F$  — площадь крышки в  $\text{m}^2$ ;

$a_c$  — суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием в  $\frac{\text{Cal}}{\text{m}^2 \text{h}^{\circ}\text{C}}$ .

В свою очередь коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции определяется по Нуссельту:

$$a_c = A \sqrt[4]{\vartheta_1 - t_1}. \quad (6)$$

Коэффициент  $A$  для соответствующей части поверхности крышки — горизонтальной, вертикальной, наклонной — колеблется в пределах 2,2—2,8.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием

$$a_{\lambda} = \frac{C \left[ \left( \frac{\vartheta_1 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_1 - t_1}, \quad (7)$$

в которой:

$\vartheta_1 - t_1$  — разность температур наружной поверхности крышки и цеха в  $^{\circ}\text{C}$ .

Продолжительность операции по разгрузке-загрузке садки занимает обычно 7—10 min. В это время через раскрытый верх печи теряется лучеиспусканием:

$$Q_5 = FC \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \frac{\tau}{60 \cdot 860} \text{ kWh}, \quad (8)$$

где  $F$  — площадь разгрузочно-погрузочного отверстия в  $\text{m}^2$ ;

$T_n$  — температура печи в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_a$  — температура воздуха цеха;

$C$  — коэффициент лучеиспускания в  $\frac{\text{Cal}}{\text{m}^2 \text{h}^{\circ}\text{C}}$ ;

$\tau$  — продолжительность открытия в min.

Еще 15% от потерь лучеиспусканием отводится путем конвекции.

Снятая крышка также теряет конвекцией и лучеиспусканием около 30% от потерь лучеиспусканием, определенных по формуле (8).

Наконец, тепло, рассеиваемое за время операции разгрузки-погрузки боковыми стенками и подом печи, можно вычислить по формулам (3) и (4).

Измерения и расчеты показали, что размер потерь в кабелях составляет 1,6% всего расходуемого тепла. Эта величина и принята нами для всех тепловых балансов.

Непрерывная работа конвейера закалочной печи, различная скорость движения ленты не позволяют строить тепловой баланс этой печи по законченному технологическому циклу. Поэтому приходится оперировать часовыми тепловыми балансами.

Расходная часть теплового баланса складывается из следующих элементов: 1) тепло на нагрев изделий, определяемое по формуле (1); 2) потери тепла стенками печи — формула (4); 3) потери тепла поверхностью дверцы, металлическими вводами нагревательных секций, неизолированными соединительными шинами нагревательных секций, поверхностью роликов конвейера и вводами термопар определяются по формуле (5); 4) потери тепла с охлаждающей водой барабанов конвейера и коробки спуска

$$Q_{\text{зас}} = \frac{G(t_{yx} - t_{ax})}{860} \text{ kWh}, \quad (9)$$

(где  $G$  — количество охлаждающей воды в  $\text{kg/h}$ ;  $t_{yx}$  и  $t_{ax}$  — соответственно температуры уходящей и входящей воды); 5) потери тепла шамотными вводами в печь

$$Q_{\text{зас}} = \frac{F_{\lambda} \lambda_{\text{ш}} (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{S_{\lambda} \cdot 860} \text{ kWh}; \quad (10)$$

6) потери тепла через неплотности печи, определяемые опытом холостого хода при обычной работе с изолированием всех отверстий; 7) потери тепла в кабелях.

**Анализ тепловых балансов и рационализаторские мероприятия.** Применение в технических расчетах расходной части баланса ряда осередненных экспериментальных данных (коэффициенты теплопроводности, теплоотдачи, излучения, теплоемкости и др.) влечет за собой расхождение между расчетом и показаниями приборов обычно в  $\pm 10$ —15%.

При наших опытах эта ошибка находилась в пределах  $\pm (5,2$ — $6,5\%)$  для отжигательных печей и  $\pm (1,6$ — $5,1\%)$  для закалочных.

В табл. 1 приведены основные технические данные отжигательных и закалочных печей, определенные как средние из трех испытаний.



Таблица 1

№ п/п	Технические данные	Отжигательные печи			Закалочные печи	
		утепленная с двойной крышкой	неутепленная с двойной крышкой	утепленная с футерованной крышкой	А*	Б**
1	Продолжительность садки, h . . . . .	10,5	11,75	11,6	1,0	1,0
2	Вес садки, kg . . . . .	2213	2479	2321	164	286,4
3	Вес тары, kg . . . . .	895	895	895	—	—
4	Температура рабочего пространства печи, °C . . . . .	830	830	830	845	845
5	Начальная температура металла, °C . . . . .	18,0	29,0	23,0	36,0	37,0
6	Расход электроэнергии kWh . . . . .	752	758	705	69,4	103,1
7	Мощность печи, kW . . . . .	130	130	130	120	120
8	Удельный расход энергии брутто kWh/t . . . . .	242	224	220	—	—
9	То же нетто kWh/t . . . . .	341	304	304	421	364
10	К. п. д. печи брутто, % . . . . .	65,8	69,6	71,6	—	—
11	То же нетто, % . . . . .	46,5	50,5	51,3	39,1	43,8

\* Для крупных изделий.

\*\* Для мелких изделий — печь союзного производства.

В табл. 2 даны тепловые балансы (в процентах) отжигательных и закалочных печей.

В табл. 3 даны средние потери тепла за час через стены, под и крышку в исследуемых электротермических печах (в kWh).

Значительная разница в потерях тепла через стенки у отжигательных и закалочных печей объясняется: а) различной площадью внешних поверхностей; б) различной толщиной слоев изоляции; в) различным материалом и качеством изоляции.

Графическое изображение тепловых балансов отжигательной и закалочной печей дано на рис. 4 и 5.

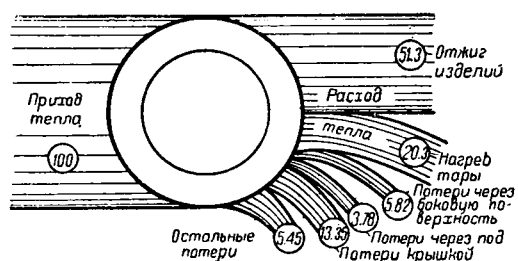


Рис. 4. Тепловой баланс (в процентах) утепленной печи отжига с одинарной футерованной крышкой

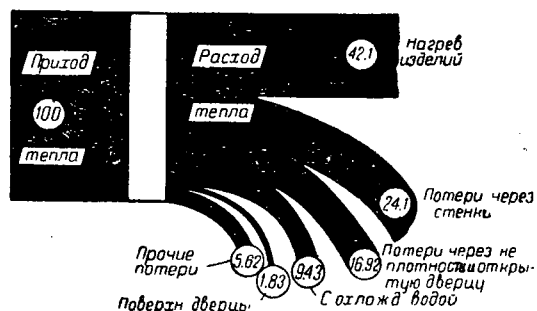


Рис. 5. Тепловой баланс (в процентах) электрической конвейерной печи для закалки

Таблица 2

№ п/п	Элементы баланса	Тепловые балансы				
		отжигательные печи			закалочные печи	
		утепленная с двойными крышками	неутепленная с двойными крышками	утепленная с одинарной крышкой	А	Б
1	Нагрев изделий . . . . .	46,5	50,5	51,3	39,0	45,1
2	Нагрев тары . . . . .	19,3	19,1	20,3	—	—
3	Потери: боковой и горизонтальной поверхности . . . . .	5,05	7,40	5,82	26,3	21,2
4	пода печи . . . . .	3,18	3,53	3,78	—	—
5	крышки печи . . . . .	18,7	20,7	13,35	—	—
6	через раскрытый верх печи лучеиспусканием . . . . .	0,92	0,92	0,91	—	—
7	конвекцией . . . . .	0,14	0,13	0,13	—	—
8	лучеиспусканием и конвекцией снятой крышкой в момент разгрузки-загрузки боковой поверхностью печи в момент разгрузки-загрузки . . . . .	0,06	0,12	0,06	—	—
10	то же, подом печи . . . . .	0,07	0,05	0,07	—	—
11	поверхностью дверцы . . . . .	—	—	—	2,28	1,83
12	неплотности и открытие дверцы печи . . . . .	—	—	—	16,0	17,5
13	металлическими вводами нагревательных секций . . . . .	—	—	—	0,96	0,7
14	неизолированными соединительными шинами нагревательных секций . . . . .	—	—	—	0,55	0,6
15	поверхностью роликов конвейера . . . . .	—	—	—	0,42	0,5
16	огнеупорными шамотными вводами . . . . .	—	—	—	1,02	0,7
17	охлаждающей водой . . . . .	—	—	—	11,0	7,5
18	в кабелях . . . . .	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5
19	Невязка балансов . . . . .	+4,2	-4,31	+2,42	+0,97	+1,5
20	Всего расход . . . . .	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Таблица 3

	Отжигательные печи			Закалочные печи	
	утепленная с двойной крышкой	неутепленная с двойной крышкой	утепленная с футерованной крышкой	А	Б
Стенки	3,58	4,77	3,58	18,3	22,6
под крышку	2,28	2,28	2,28		
	13,35	13,35	8,14	1,58*	1,44*

\* Потери тепла через поверхность дверцы.

Как видно из тепловых балансов в отжигательных садочных печах имеется условно полезный расход тепла на нагрев тары в размере — 19,1–20,3%.

Облегчение веса горшков (переход на горшки из жароупорной стали) дало бы крупную экономию энергии и позволило бы сократить продолжительность отжига. Даже простой пере-

юд от литых железных горшков к клепаным уменьшает вес тары на 100 kg, что приводит к экономии 12,5 kWh/t поковок.

Как указывает, например, Nathusius<sup>2</sup>, отказ многих американских автомобильных предприятий от применения ящиков в нагревательных печах, применявшихся для предохранения металла от угара, дал, помимо экономии на стоимости жароупорных ящиков, сокращение расхода энергии с 330—360 до 235—265 kWh/t.

Крупнейшая статья тепловых потерь в отжигательных шахтных печах — это потери через крышку, составляющие 18,7—20,7% общего расхода при двойных крышках. Эти потери можно снизить, изменив конструкции крышек. Например, применение одинарных крышек с футеровкой вместо двойных без футеровки дает снижение расхода в 60—65 kWh за садку.

Средние часовые потери через футерованную крышку (табл. 3) оказались ниже на 5,24 kWh. Эксперимент также показал более благоприятную картину распределения температур в случае крышки с футеровкой (табл. 4).

Таблица 4

Тип крышки	Сектор (см. рис. 6)	Горизон- тальная поверх- ность*	Наклонная поверх- ность				Верти- кальная поверх- ность		
			место замера						
		1	2	3	4	5	6	7	8
Двойная без футеровки	I	176	156	154	140	121	116	112	126
	II	150	148	148	126	117	114	114	118
	III	178	152	150	132	122	104	116	110
Одинарная с футеровкой	I	217	92	—	62	—	52	99	133
	II	221	100	—	60	—	47	91	130
	III	198	109	—	54	—	52	103	150

\* Более высокие температуры в точках I горизонтальной поверхности одинарной крышки с футеровкой объясняются исправностью тепловой изоляции (выпадение кирпичей).

Одна крышка удобнее также в эксплуатации при операции разгрузки-загрузки.

Особо должен быть изучен вопрос о подсосе воздуха через песочный затвор при футерованной крышке.

Футерованная крышка позволяет сделать двойной затвор (наваркой углового железа). Регулярное заполнение этого затвора просеянным песком практически сведет подсос воздуха к нулю. Утепление печей — засыпка воздушного кольцевого пространства между стенкой и кожухом футеровкой — дает часовое снижение тепловых потерь в тепловом балансе отжигательных печей с 7,4 до 5,05% или снижение на 119 kWh.

В закалочных печах наибольший процент тепловых потерь приходится на стенки печи (19—26,2%), что обусловлено невысоким качеством изоляционного материала. При замене применяемой теперь трепельной изоляции кизель-

гуром, имеющим меньший коэффициент теплопроводности ( $\lambda = 0,103 \frac{\text{Cal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}$  при 300°), можно ожидать уменьшения потребной мощности на 8 kW.

Умелый выбор изоляционных материалов для термических печей дает значительную экономию электроэнергии. Так, при исследовании Оргэнерго<sup>3</sup> на заводе «Серп и молот» в отжигательной электропечи шамотовый кирпич был заменен диатомовым (объемный вес 520—560 kg/m<sup>3</sup>, временное сопротивление сжатию около ~6kg/cm<sup>2</sup>), а вместо трепела была взята шлако-вата. Это мероприятие дало облегчение веса обмуровки и изоляции с 7843 до 2955 kg, сократило время нагрева с 4 до 3,5h и уменьшило в среднем за 13 отжигов расход энергии на 26% (с 378 до 280 kWh для садки в 750 kg).

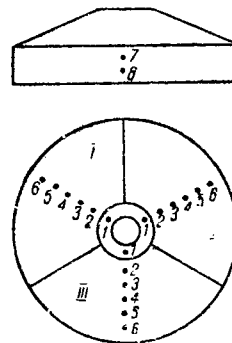


Рис. 6. Крышка отжигательной печи. Точки замера температур

По свидетельству Е. Senfter<sup>4</sup>

в обыкновенных отжигательных печах с 20-часовой продолжительностью отжига и рабочей температурой 700—900° при переходе от шамотового кирпича к легкому изоляционному потери тепла через стены могут быть снижены на 50%.

При нормальном технологическом режиме металл выдерживается в отжигательной печи около 2h. Однако в условиях эксплуатации период выдержки всегда бывает значительно больше предусмотренного (из-за задержки крана, небрежности обслуживающего персонала и пр.). Например, при испытаниях утепленной печи с футерованной крышкой одна садка была задержана сверх 2h выдержки на 45 min, вторая на 24, третья на 1h 41 min. При испытаниях утепленной печи с двойными крышками только одна садка выдерживалась точно 2h.

Таким образом полученная при испытаниях продолжительность садок является завышенной и не вызывается потребностями технологического режима. Одно уже улучшение условий эксплуатации позволяет сократить среднюю длительность садки. Это подтверждается еще и тем фактом, что 30% садок из 69 (взяты на выборку данные по двум печам) имели общую продолжительность садки в пределах 8,5—9,75h, а остальные в пределах 9,75—13,75h.

Процесс сокращения продолжительности садок особенно замечен с 1934 г. Тогда по материалам специальных испытаний Оргэнерго средняя продолжительность садок составляла 13,5—14,0h.

Согласно данным испытаний, удельный расход энергии обоих однотипных закалочных печей неодинаков (0,421 и 0,364 kWh/kg), что объясняется различной производительностью их. Печь Б пропустила за 1 h 1210 изделий весом 0,236 kg каждое, печь А только 62 шт. при весе одного изделия 2,64 kg. Естественно, прогрев и выдержка мелких изделий занимают значительно меньше времени,

<sup>3</sup> См. «Бюллетень Оргэнерго» № 3, 1936.

<sup>4</sup> Archiv für das Eisenhüttenwesen № 11, 1935.

чем крупных, и потому скорость движения ленты конвейера печи Б больше, чем у печи А.

Опытами ЦНИИМАШ в заводских условиях доказано, что рациональным выбором скорости движения ленты конвейера в зависимости от типа изделий и температуры третьей зоны можно добиться оптимального режима работы печи. Например, при нагреве изделий определенного типа удалось подбором оптимальной скорости повысить производительность печи в 1,53 раза и сократить расход энергии с 326 до 290 kWh/t.

Полное решение вопроса о максимально допустимых и возможных скоростях нагрева изделий связано с изучением структуры металла; резкий нагрев и охлаждение вызывают в теле изделия напряжения.

Как известно, чем выше производительность печи, тем экономичнее процесс закалки и тем выше к. п. д. печи. Существующая мощность закалочной конвейерной печи Humbert позволяет увеличить среднечасовую производительность до 400—410 kg/h против фактической максимальной 340 kg/h. Для повышения производительности этих печей необходимо: а) специализировать каждую печь по определенным типам изделий; б) повысить температуру первой зоны, где наблюдается значительное понижение температуры за счет подсосов холодного воздуха через дверцы; в) иметь в виду, что закалка крупных изделий от 2,5 kg и выше в печах данных геометрических размеров неэкономична.

Для увеличения производительности отжига печей необходимо уменьшить продолжительность отжига или увеличить вес садки. Сокращение длительности отжига возможно, в первую очередь, за счет повышения температуры рабочего пространства печи до 850°.

Качество отожженной продукции в основном определяется скоростью и степенью нагрева, продолжительностью выдержки при высокой температуре и скоростью охлаждения. Скорость нагрева может быть тем выше, чем меньше в стали легирующих элементов, чем однороднее изделие в отношении макро- и микроструктуры, чем проще форма и чем меньше толщина изделия. С другой стороны, скорость нагрева лимитируется мощностью печи, т. е. энергией, генерируемой в единицу времени и временем прогрева горшка с поковками по толщине.

Мощность печи задана. Количество же тепла, передаваемого в единицу времени по толщине горшка, зависит от величины температурного перепада от поверхности горшка к центру его.

Опыты заводской лаборатории показали, что при повышении температуры рабочего пространства печи от 820 до 850° с садкой в 2540 kg продолжительность отжига снизилась с 13,3 до 11,5 h при одной и той же длительности выдержки (3 h). Последующие исследования качества металла, отожженного при температуре нагрева печи до 850°, и выдержке при 800° показали нормальную микроструктуру и твердость.

С повышением содержания в стали углерода температура отжига снижается. При нагреве стали, содержащей 0,9% углерода, новое зерно начинает образовываться после критической точки  $A_{c1}$  (770—780°). До 850° процесс образования протек

ает медленно, по достижении этой температуры он сильно ускоряется.

Таким образом повышение температуры рабочего пространства печи связано с изменением структуры металла, и окончательный ответ может быть дан только после тщательного и всестороннего лабораторного изучения качества поковки, отожженных при повышенной температуре.

Производительность печи можно повысить, увеличив емкость горшков и улучшив укладку поковки. Правда, увеличение веса садки приведет к некоторому увеличению продолжительности отжига, но все же удельный расход энергии заметно снизится. Снижение удельного расхода можно определить расчетно.

Расход энергии на садку

$$W = a_0 \tau_{отж} + a_1 G + a_2, \quad (1)$$

где  $a_0$  — среднечасовой расход на покрытие суммарных потерь тепла печью, определяемый по данным испытаний;

$\tau$  — продолжительность отжига в часах, зависящая от веса садки;

$a_1$  — полезный расход на отжиг 1 тонны поковки, определяемый по формуле (1);

$G$  — вес садки в т;

$a_2$  — расход электроэнергии kWh на нагрев тары, определяемый по формулам (1) и (2).

Данные эксплуатации показывают, что в одной и той же печи и при почти одинаковом весе садки продолжительность отжига резко колеблется (табл. 5).

Подобные колебания можно объяснить различным числом и взаимным расположением отжигаемых изделий в горшках, что изменяет условия теплообмена; недочетами наблюдения за ходом технологического процесса и способом включения печи; перерывами в питании.

Повидимому, при тщательном наблюдении за работой печи можно заметно сократить продолжительность отжига.

Приблизительно продолжительность отжига в часах можно определить по формуле:

$$\tau = \frac{GC(t_2 - t_1)}{\alpha F(t_0 - t_2)},$$

где  $C$  — средняя теплоемкость металла в  $\frac{\text{Cal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$ ;  $t_1, t_2$  — начальная и конечная температура металла в °C;

$t_0$  — температура рабочего пространства печи в °C;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи в  $\frac{\text{Cal}}{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}}$ ;

$F$  — активная поверхность горшков в  $\text{m}^2$ .

При наших испытаниях процент отклонения продолжительности садки от определенной по формуле (12) лежал в пределах  $\pm(6-8\%)$ , для ориентировочного расчета можно считать вполне допустимым.

Таблица 5

Вес садки, kg	Продолжительность отжига, h
2254	8,5
2261	10,75
2243	9,75
2290	11,0
2234	11,5

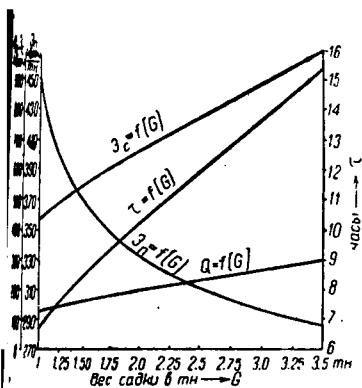


Рис. 7. Теоретический график снижения удельных расходов электроэнергии в зависимости от веса садки и длительности отжига

На рис. 7 по формулам (11), (12) построены кривые удельного расхода энергии  $\mathcal{E}_n$ , общего расхода  $\mathcal{E}$ , суммарных потерь тепла за садку  $Q$  и производительности отжига  $\tau$  в зависимости от веса садки  $G$ .

Построение произведено для утепленной печи с одинарной крышкой и температуры  $t = 20^\circ$ .

Из рисунка видно, что увеличение веса садки с 1 до 3 т снижает удельный расход с 332 до 86 кВт/т. Можно полагать, что продолжительность отжига, определенная по формуле (12), увеличена приблизительно на 8%, поэтому следует ожидать понижение удельного расхода до 88 кВт/т.

Повышение веса садки может быть иногда достигнуто увеличением габаритов тары. В процессе нашего исследования было предложено увеличить высоту горшка на 10 см (что вполне осуществимо по габаритам печи). При этом вес тары возрастает на 68 kg, вес поковок на 280 kg, а удельный расход сокращается на 11 кВт/т. Такое увеличение веса садки не может существенно изменить режим нагрева поковок, не требует никаких конструктивных изменений печи и при массовом производстве дает крупную экономию энергии.

Для окончательного решения это предложение нуждается в тщательной проверке в производственных условиях с обязательным последующим контролем качества поковок.

Стахановское движение со всей остротой поставило вопрос об изменении технологического режима термических цехов с целью увеличения производительности их. В этом отношении заслуживает внимания опыт нового метода нагрева в закалочных нефтяных печах Харьковского тракторного завода по «перевернутой кривой». По новому технологическому режиму температура зоны подогрева повышена до  $900^\circ$ .

Проверка нового процесса нагрева с коленчатыми валами показала, что высокая температура только содействует быстрому прогреву деталей и ни в какой мере не вызывает коробления или безуглероживания поверхности, не сказывается на структуре и механических свойствах.

Нагрев валов по «перевернутой кривой» повысил производительность печей с 125 до 231 вала в смену. Экономия мазута выразилась в 0,9 kg в вал.

Журнал «Автотракторное дело»<sup>5</sup> приводит данные о росте производительности термических нефтяных печей (с толкателем типа Роквелла) за

счет ряда рационализаторских мероприятий на автомобильном заводе им. Сталина. О размерах роста производительности отдельных термических печей дает представление табл. 6.

Таблица 6

Термическая операция	Увеличение производительности печей в % за счет:			
	сокращения длительности нагрева и выдержки	сокращения длины башмаков	специализации печей	1) повышения температуры нормализационной печи на $50^\circ$ (до $950^\circ\text{C}$ ); 2) увеличения загрузки на поддон с 210 до 240 kg; 3) сокращения интервала толкания с 24 до 16–18 min
Нормализация	33–50	33	140	60–90
Закалка . . .	12–25	25	222	—
Отпуск . . .	12–25	25	222	43–71

После остановки печи для ремонта необходим длительный промежуток времени, измеряемый десятками часов, для понижения температуры стенки настолько, чтобы иметь возможность ремонтному персоналу начать ремонт внутри печи.

Подсчет по методу Гребера и Эрка («Основы учения о теплообмене») показывает, что при естественном охлаждении для снижения температуры внутри печи с  $121$  до  $67^\circ$  требуется 60 h. Печь в течение года останавливается на ремонт не менее 24 раз (1 капитальный, 3 средних и 20 текущих ремонтов), отсюда ясны размеры снижения длительности работы печи из-за остановов на ремонт.

Принудительное охлаждение печи вентилятором (мотор 1,75 kW) позволяет сократить время процесса охлаждения на 40 h. Дополнительный расход на принудительное охлаждение составляет около 0,5 кВт/т, но годовая производительность печи увеличивается на 13,6%.

Всаженная из печи садка последовательно поступает в закрытые колодцы А и В для охлаждения. В колодце А садка охлаждается медленно, со скоростью не более  $10^\circ/\text{h}$  до температуры около  $650^\circ$ .

Результаты отжига зависят от скорости охлаждения. Быстрое охлаждение дает мелкое зерно, что связано с возникновением напряжений в металле. Наоборот, замедленное охлаждение дает более крупное зерно, но мягкий и ненапряженный металл. Охлаждение от температуры ниже  $650^\circ$ , производимое во втором колодце В, не влияет уже на размеры зерна и, следовательно, скорость охлаждения в колодце В может быть увеличена. Более быстрое охлаждение во втором охлаждающем колодце В принципиально позволяет использовать тепло охлаждаемой садки для предварительного подогрева садки с холодными поковками.

Самые осторожные расчеты показывают, что холодная садка может быть нагрета в колодце В не менее чем на  $150^\circ$ . В переводе на электроэнергию это составит:

$$W = \frac{G \Delta t}{860 \cdot \eta_{\text{мп}} \cdot \eta_{\text{каб}} \cdot \eta_{\text{печи}}} = \frac{3160 \cdot 0,115 \cdot 150}{860 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,5} \approx 130 \text{ кВт}$$

на садку, или 54,0 кВт/т продукции.

Предварительный подогрев садки сокращает про-

<sup>5</sup> «Автотракторное дело» № 8, 1936.

должительность отжига, что в свою очередь увеличивает производительность печи и к. п. д. ее.

Использование тепла горячей садки можно конструктивно разрешить надстройкой верхних колопаков к колодцам В или углублением их (если позволит уровень грунтовых вод). Горшки нужно ставить вертикально один на один: 2 горячих и на них 2 холодных. Для улучшения условий предварительного подогрева в колодце В можно поставить вентилятор. Об успешном использовании на одном из заводов за границей тепла горячей садки для подогрева холодной говорится в статье А. Шумахера (см. А. S. Schumacher, Elektrizitätswirtschaft № 12, 19 3). После отжига в шахтной электрической 60-kW печи конструкции ВВС Грюневальд горячая садка нагревает холодную садку в колодце примерно до 200°. По заявлению автора печи работают безукоризненно.

При проектировании новых электротермических цехов предварительный подогрев должен, по нашему мнению, как правило, предусматриваться проектом.

Благодаря большому числу вводов закалочная цепь имеет много неплотностей. Как правило, шамотные пробки у вводов из-за деформации при высоких температурах выходят из своих гнезд, образуя зазоры, что благоприятствует подосу холодного воздуха. Значительное число неплотностей влечет крупные тепловые потери.

Как показало испытание холостого хода, *простейшие мероприятия* в виде забивки неплотностей асбестом и тщательное наблюдение за состоянием тепловой изоляции печи *позволяют уменьшить часовой расход на 3,5—4,0 kWh*.

Прерывная работа в больших электротермических цехах сопряжена с крупными тепловыми потерями. Специально проведенное наблюдение охлаждения и разогрева закалочной печи выявило следующую картину.

Обычно печь в выходной день охлаждается в течение 18 h. За 5—6 h до начала работы проводится разогрев ее до рабочей температуры. Средняя температура внутри печи понижается за время перерыва с 855 до 445°. Сопряженная с этим потеря тепла составляет 366,5 kWh.

Разогрев производится в течение 5 h до температуры внутри печи в 831°, после чего печь включается для работы. На разогрев расходуется около 133,2 kWh. Таким образом по условиям эксплуатации печь включается в работу еще при неустановившемся тепловом равновесии.

Если охлаждение печи производить при закрытой дверце, то расход на разогрев сокращается на 60 kWh.

В табл. 7 дана сводка возможных рационализаторских мероприятий по термическим печам и ожидаемый техно-экономический эффект применительно к условиям работы обследованного завода.

*Наибольшей экономии энергии можно ожидать от предварительного подогрева изделий для отжига (54,0 kWh/t).*

Поэтому на экспериментальную проверку этого предложения должно быть обращено внимание в первую очередь.

Из всех рационализаторских мероприятий по

Таблица

№ п/п	Характер мероприятия	Снижение удельного расхода kWh/t	Увеличение производительности %
По цеху отжига			
1	Предварительный подогрев изделий для отжига . . . .	54	4,5
2	Уменьшение веса тары . . . .	12,5	
3	Утепление (засыпка инфузоровой землей) . . . . .	15,3	
4	Замена двойных крышек одинарными . . . . .	26,0	
5	Увеличение емкости горшков . . . . .	11,0	
6	Принудительное охлаждение печи . . . . .	Увеличение на 0,52	13,5
7	Сокращение длительности отжига на 1 h . . . . .	6,9	8,7
По цеху закалки			
8	Переход на непрерывную работу . . . . .	18,2	22,5
9	Заизолирование неплотностей и открытие дверцы печи . . . . .	32,0	
10	Улучшение изоляции . . . .	35,6	
11	Охлаждение печи с закрытой дверкой . . . . .	2,2	

цеху отжига к числу первоочередных нужно отнести: замену железных крышек футерованными, увеличение загрузки печей, уменьшение веса тары и общее улучшение условий эксплуатации, что должно дать по самым осторожным расчетам экономию энергии не менее 50—60 kWh/t продукции, или 17—20%.

*По цеху закалки одно только улучшение условий эксплуатации (в частности, заизолирование видимых неплотностей) может дать не менее 8% экономии энергии на 1 t продукции.* Специализация печей по типам обрабатываемых деталей и оптимальные технологические режимы могут увеличить размер экономии энергии до 13—15%.

Полные масштабы снижения удельных расходов электроэнергии по цеху отжига составляют (при условии использования тепла горячих горшков) 35—40%, а по цеху закалки (при условии непрерывной работы) 20—25%. Здесь следует особенно подчеркнуть значение совместной работы энергетиков и технологов заводов.

Успешная борьба за снижение удельных расходов электроэнергии возможна только при условии самого тесного контакта в работе между ними, обоюдной заинтересованности в дальнейшем развитии и улучшении нашего социалистического производства. Рационализаторские предложения должны подвергаться экспериментальной проверке в производственных условиях с целью выявления не только энергетической эффективности, но и влияния на качество продукции.

Борьба с тепловыми потерями и экономия энергии являются одним из существенных показателей стахановских методов работы на электротановках вообще и в термических цехах в частности.

## Защита подстанций разрядниками

М. М. Аюдис

Высоковольтная лаборатория Донэнерго

НИЖЕ РАССМОТРЕНЫ различные схемы защиты от грозовых аварий 38 и 115-kV подстанций, от которых отходят линии на деревянных опорах, незащищенные по всей длине тросом, подвергнуты критической оценке применяемые этой защиты типы аппаратуры.

На рис. 1 изображена американская схема защиты таких подстанций от грозовых перенапряжений. 1—2 km подход линии надежно защищается тросом 2 (иногда молниеотводами), на подстанции устанавливается вентильный разрядник 5 и координирующий промежуток 4.

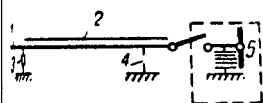


Рис. 1.

1 — линия; 2 — трос; 3 — линейный трубчатый разрядник; 4 — координирующий промежуток; 5 — вентильный разрядник

Координирующий промежуток необходимо устанавливать на каждом фидере, так как в противном случае возможны перекрытия изоляции линейных соединителей, втулок масляника, проходных и других изоляторов, если линия остается выключенной во время грозы.

В начале подхода со стороны линии имеется линейный трубчатый разрядник 3. Сама подстанция также защищается от непосредственных повреждений молнии тросами или молниеотводами.

Как известно, разрядное напряжение координирующего промежутка должно быть значительно ниже, чем изоляции. Принимаемая обычно степень градации в 25%, повидимому, достаточна для установок 35 kV и выше, имеющих нормально изоляцию и защищенных по схеме рис. 1.

Действие напряжения на изоляцию не прекращается сразу после перекрытия координирующего промежутка из-за наличия волнового сопротивления заземляющего спуска, переходного сопротивления заземления и некоторого расстояния между местом установки изоляции и координирующего промежутка. Кроме того, в некоторых точках подстанции, благодаря отражению волны, напряжение может быть выше, чем в точке установки координирующего промежутка.

Поэтому для 35-kV установок со значительно ослабленной изоляцией снижение в 25% недостаточно, так как разность напряжения, обусловленная указанным обстоятельством, остается почти неизменной, а разрядное напряжение изоляции значительно уменьшилось, следовательно, и 25% от этой величины во столько же раз меньше.

Несколько иное положение с выбором степени градации между разрядником и координирующим промежутком. После перекрытия искрового промежутка вентильного разрядника напряжение на нем уменьшается незначительно, следовательно, действие этого напряжения на координирующий промежуток продолжается.

При установке разрядника на шинах расстояние от координирующего промежутка, устанавливаемого на вводах, достигает 50 м и больше для 35-kV подстанций, а для 110-kV даже 100 м. Поэтому напряжение на координирующем промежутке может возрасти до значительной величины, прежде чем вернется отраженная от разрядника волна. Если еще учесть падение напряжения в переходном сопротивлении заземления разрядника и волновом сопротивлении заземляющего спуска и разброс в разрядных напряжениях координирующих промежутков<sup>1</sup>, получим, повидимому, что ступень градации в 25% между напряжением на разряднике и разрядным напряжением координирующего промежутка недостаточна. Эта ступень может удовлетворить лишь при установке разрядника на каждом фидере, в непосредственной близости от координирующего промежутка.

Временными руководящими указаниями по защите от перенапряжений электрических установок в схеме концевой подстанции<sup>2</sup> максимальным напряжением, попадающим на подстанцию, принят ток через разрядник в 1000 А. Уравнение, связывающее напряжение, приходящееся на концевую подстанцию и ток разрядника:

$$U = \frac{U_p + I\omega}{2}.$$

При  $\omega = 400 \Omega$  дает 260—280 kV для 38-kV подстанции и порядка 400—500 kV для 110-kV (подробно характеристики разрядников приведены ниже).

Совершенно очевидно, что на подстанцию могут попадать значительно большие напряжения (см. ниже).

В табл. 1 приведены<sup>3</sup> характеристики разрядников фирмы Вестингауз. Нами приписана к ней нижняя строка для применяемого у нас номинального напряжения 38,5 kV. Она получена увеличением на 10% напряжения для принятого в Америке класса 34,5 kV (37 kV максимально допустимого вместо 40,5 в наших установках). Полученные характеристики разрядников для 38 kV почти не отличаются от характеристик американских 46-kV разрядников для сетей с заземленной нейтралью, в которых максимально допустимое напряжение по отношению к земле равно 40 kV.

Как видно из таблицы, по американским нормам минимальное разрядное напряжение изоляции 38-kV подстанции при волне  $+1,5/40$  должно быть не менее 260—270 kV. Остаточное напряжение на разряднике достигает пробивного искрового промежутка при токе около 3000 А,

<sup>1</sup> Предполагается, что для разрядников даны наибольшие значения разрядных и остаточных напряжений.

<sup>2</sup> „Электрические станции“ № 11, 1936.

<sup>3</sup> Каталог „Westinghouse Surge protection“, 1936.

Таблица 1

Сравнения характеристик разрядников и импульсных разрядных напряжений координирующих промежутков для стандартной изоляции

Номинальное напряжение	Координирующий промежуток по стандарту, предложенному AIEE		Данные разрядников					
	размер	минимальное разрядное напряжение при волне 1,5/40 мсек, kV	максимально допустимое напряжение по отношению к земле, kV <sub>eff</sub>	пробивное напряжение** искрового промежутка разрядника, kV <sub>max</sub>	напряжение на разряднике в киловольтах, в зависимости от силы тока (А) через разрядник*			
					1500	3000	5000	10 000
6,9	4—1/8"	95	9	36	27	30	32	35
23	6—1/4"	138	20	70	59	66	70	77
			25	85	74	82	88	97
34,5	9—1/4"	180	30	100	89	98	105	116
			37	125	110	122	130	143
46	12—1/4"	230	40	135	119	131	140	155
			50	170	149	164	175	193
115	31—1/2"	525	97	330	288	319	340	375
			121	410	360	397	420	467
38	Прибл. 260 mm	200	41	Прибл. 138	121	134	—	—

\* Приведены средние значения, действительные величины могут отличаться на  $\pm 5\%$ .

\*\* Пробивные напряжения получены на волне, нарастающей до пробоя со скоростью  $100 \text{ kV} \mu \text{sec}$  на каждые  $11,5 \text{ kV}$  номинального напряжения разрядника.

что по приведенному выше уравнению соответствует напряжению приходящей волны около  $670 \text{ kV}$ , при этом напряжение на сопротивлении разрядника равно около  $138 \text{ kV}$ .

При указанных соотношениях между электрической прочностью изоляции и защитным действием разрядника подстанции вполне надежно защищены, и перекрытия координирующего промежутка достаточно редки при установке разрядника лишь на шинах подстанции. Установка разрядника на фидере необязательна при этих соотношениях. При ударах молнии в защищенный тросом участок линии с такой амплитудой, которая превышает защитный уровень линии и вызывает перекрытие с троса на провод, амплитуда приходящих волн может быть еще выше; весьма возможно, что и в этом случае изоляция подстанции будет защищена благодаря очень хорошему действию вентильного разрядника. Перекрытие координирующего промежутка в этом случае не столь существенно, так как линия все равно может отключиться. Впрочем, необходимо иметь в виду, что в большинстве случаев дуга будет устанавливаться в координирующем промежутке, а не на линии, так как промежуток, перекрываемый на линии, в несколько раз больше. Поэтому при установке, например, трубчатого разрядника вместо координирующего промежутка выключение линии могло бы не произойти даже и в этом случае. Однако попадание на подстанцию волн с такими высокими амплитудами при указанной схеме защиты будет происходить чрезвычайно редко, следовательно, перекрытия координирующего промежутка также редки.

Для разрядников фирмы GEC получают примерно те же соотношения, что и для разрядников Вестингауз.

Высокое разрядное напряжение изоляции, применяемой в Америке, и степень защитной способности американских вентильных разрядников позволили добиться надежной защиты подстанции от гроз вентильными разрядниками.

Иную картину мы имеем в наших сетях. Большинство выпускаемых нашими заводами типов изоляции не только не защищается координирующим промежутком в  $260 \text{ mm}$ , но даже рекомендуемым руководящими указаниями <sup>4</sup>  $200\text{-mm}$  промежутком. Значительное количество выпускаемых заводами изоляторов при времени запаздывания в  $2 \mu \text{sec}$  и более защищается лишь <sup>5</sup>  $140\text{-mm}$  промежутком при ступени градации в  $25\%$ .

Установкой разрядников на всех фидерах в посредственной близости от координирующего промежутка можно, повидимому, получить удовлетворительную защиту разрядниками типа  $200\text{--}220 \text{ mm}$  координирующих промежутков, имеющих минимальное разрядное напряжение  $160\text{--}170 \text{ kV}$ .

Меньшие промежутки защищать невозможно, так как их минимальное разрядное напряжение того же порядка, что и искрового промежутка разрядника. Впрочем, при установке разрядников табл. 1 на всех фидерах, а для подстанции с малым количеством фидеров — дополнительно комплекта на шинах, защита изоляции, выпускаемой нашими заводами, может быть произведена удовлетворительно, если вовсе не устанавливать координирующих промежутков (рис. 2).

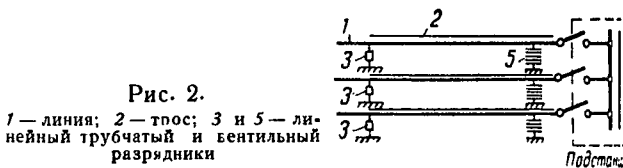


Рис. 2.

1 — линия; 2 — трос; 3 и 5 — линейный трубчатый и вентильный разрядники

Значительное количество изоляции как импортной (часто  $30\text{-kV}$  европейских фирм), так и отечественной на существующих  $38\text{-kV}$  подстанциях в СССР имеет <sup>6</sup> минимальное разрядное напряжение при импульсах менее  $160 \text{ kV}$ . Для защиты такой изоляции необходимо устанавливать координирующие промежутки <sup>7</sup> не более  $100\text{--}120 \text{ mm}$ . Совершенно очевидно, что подстанции с такой изоляцией нельзя удовлетворительно защищать даже такими высококачественными разрядниками, как выпускаемые фирмой Вестингауз. Столь малые величины координирующих промежутков не могут быть защищены от перекрытия разрядниками, приведенными в таблице. Точно же не может быть защищена изоляция подстанций и без координирующих промежутков.

<sup>4</sup> См. сноску 2.

<sup>5</sup> См. табл. 4 в статье А. В. Алмазова и В. К. Кожухова. «Электрические станции» № 7—8, 1937.

<sup>6</sup> См., например, статью инж. Д. И. Иванова и В. К. Кожухова. «Электрические станции» № 7, 1936.

<sup>7</sup> Большинство энергосистем в СССР применяло до сих пор на  $38\text{-kV}$  подстанциях  $100\text{--}110\text{-mm}$  координирующие промежутки, при этом грозовые повреждения подстанций изоляции все-таки имели место.



Таблица 2

Вольтамперные и вольтсекундные характеристики тиритовых разрядников завода «Электроаппарат»

Номинальное напряжение кВ	Состояние	Вольтсекундная характеристика		Вольтамперная характеристика напряжения на разряднике при токе (А)			
		минимальное импульсное разрядное напряжение	разрядное напряжение при 2 мсек				
				500	1000	1500	2000
а) Разрядники выпуска 1936 г., переделанные в 1937 г.							
110	Заземлена Изолирована	Не изменено при переделке	—	—	415	—	510
35			—	145	170	—	—
б) Разрядники модернизированные							
110	Заземлена Изолирована	320	400	260	330	375	—
35		145	160	120	140	160	—

В табл. 2 (а) приведены характеристики<sup>8</sup> разрядников выпуска 1936 г. после переделки их заводом. Как видно из таблицы, уже при токе 1000 А напряжение на 38-кВ разряднике достигает 170 кВ. На 115-кВ разряднике напряжение достигает 500 кВ при токе 2000 А. Существующие 38-кВ подстанции применяют координирующие промежутки 100—130 мм. Повидимому, такой промежуток будет весьма надежно предохранять разрядник от работы, но не наоборот. Необходимо отметить, что это единственный тип вентильного разрядника, которым были снабжены энергосистемы СССР к грозовому сезону 1937 г. Ориентировочные характеристики модернизированных разрядников также приведены в табл. 2 (б).

Учитывая, что даже при установке разрядников на всех фидерах напряжение на разряднике при токе 1500—2000 А и пробивное напряжение его искрового промежутка должны быть по крайней мере на 20—25% меньше, чем минимальные разрядные напряжения координирующего промежутка, получим, что эти разрядники смогут защитить лишь промежутки, удовлетворяющие американскому стандарту.

Без координирующих промежутков производимые разрядники и намечаемые к производству в ближайшем будущем, если не устанавливать подстанционные трубчатые разрядники, вероятно, позволят выполнить защиту подстанции при обязательной установке их на каждом фидере. При этом необходимо защищать диверторами опору, на которой установлен трубчатый разрядник в начале подхода и прилегающие к нему пролеты (см. далее), в противном случае на разрядник могут попасть волны в 600—700 кВ и более. Судить о работе разрядников в этом случае,

когда протекающий через них ток достигает 4000 А, в настоящее время не представляется возможным, так как характеристики их приводятся лишь для токов до 1000—1500 А.

Защита 110-кВ подстанций, повидимому, также сможет быть осуществлена намечаемыми к выпуску разрядниками лишь при условии установки их на каждом фидере без координирующих промежутков.

Подстанционные трубчатые разрядники могут защищать координирующие промежутки значительно меньшие, чем приводимые в табл. 1.

Отсутствие остаточных напряжений на клеммах трубчатых разрядников после перекрытия их искрового промежутка даст возможность ими не устанавливать простых координирующих промежутков, что весьма важно для подстанций с ослабленной (устаревшей) изоляцией, так как это позволяет уменьшить число ступеней градации. При защите трубчатыми разрядниками самостоятельно или совместно с тиритовыми можно ограничиться одной ступенью градации, при этом трубчатые разрядники должны обязательно устанавливаться на всех фидерах<sup>9</sup>.

Замена координирующих промежутков подстанционными трубчатыми разрядниками при защите по схеме рис. 1 позволяет уже удовлетворительно защищать изоляцию, выпускаемую нашими заводами.

**Защита трубчатыми разрядниками.** Производимые в настоящее время 38-кВ трубчатые разрядники по своим разрядным характеристикам, приблизительно, эквивалентны стандартным стержневым 120—140 мм координирующим промежуткам; 110-кВ разрядники эквивалентны промежуткам 450—500 мм. Подобными разрядниками можно защищать вполне удовлетворительно все типы 110-кВ и почти все типы 38-кВ изоляции существующих подстанций, но лишь при условии резкого ограничения амплитуды приходящих волн.

Вольтсекундные характеристики этих разрядников не столь пологи, чтобы надежно защищать подстанцию с резко ослабленной изоляцией при волнах, вызывающих разряд с малым временем запаздывания, что требует изменения схемы защиты подстанции.

Защита с установкой в конце участка под тросом одного комплекта линейных<sup>10</sup> трубчатых разрядников для подстанции с ослабленной изоляцией недостаточно надежна даже при установке на подстанции трубчатых разрядников, имеющих весьма низкое разрядное напряжение.

Некоторого улучшения защиты по схеме рис. 1 можно добиться, устанавливая за тросом подстанционный трубчатый разрядник вместо линейного, однако этого недостаточно.

<sup>9</sup> Это вполне допускается низкой стоимостью разрядников, составляющей 2—3% от стоимости тиритовых. В некоторых случаях установка этих разрядников дешевле координирующих промежутков.

<sup>10</sup> Линейными трубчатыми разрядниками в отличие от подстанционных называются разрядники, которые по своим защитным характеристикам могут защищать лишь линейную изоляцию, прочность которой значительно выше даже нормальной подстанционной. Выпускаемые у нас подстанционные разрядники имеют минимальные разрядные напряжения почти в два раза меньше, чем американские линейные.

<sup>8</sup> Таблица представлена заводом «Электроаппарат» в декабре 1936 г. в комиссию по подготовке стандарта на испытательные и разрядные напряжения для высоковольтной аппаратуры и трансформаторов.

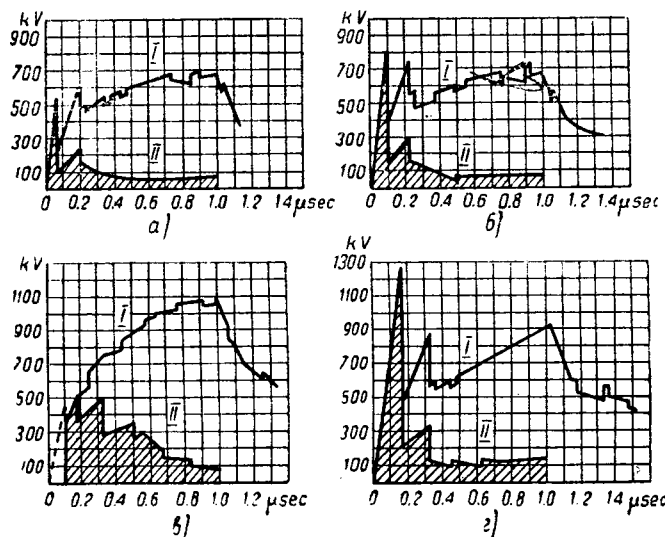


Рис. 3. Волны, пропускаемые разрядниками, установленными в начале линии

Очевидно, наиболее опасные волны будут пропущены на подстанцию разрядником, установленным в начале подхода, если прямой удар молнии в линию произойдет вблизи этого разрядника. Благодаря большой скорости нарастания напряжения амплитуда и, особенно, длина волны, проходящей под трос, зависят не только от разрядного напряжения разрядника, но и от величины волнового сопротивления заземляющего спуска и переходного сопротивления заземления.

На рис. 3, а показана волна, пропускаемая под трос 35-kV линии, при амплитуде входящей волны 8000 kV и фронте в 1 μsec. При расчете волновое сопротивление спуска принято равным 150 Ω, сопротивление заземления — 10, волновое сопротивление линии (3 провода) — 250, волновое сопротивление троса — 350 и волновое сопротивление канала молнии — 200 Ω. Как видно из кривой, после срабатывания разрядника напряжение продолжает нарастать, достигая 660—670 kV через 0,6—1 μsec.

Как видно из рис. 3, б при ударе молнии с динамическим потенциалом в 12 MV в опору, на которой установлен разрядник, напряжение может достигнуть 1050 kV.

В случае выполнения заземления только по двум ногам опоры волновое сопротивление спуска значительно возрастает, следовательно, увеличится напряжение, остающееся на разряднике, после его срабатывания. Увеличение переходного сопротивления заземления, плохой грунт, раздельное заземление фаз для ограничения тока, подчас необходимое при недостаточной разрывной мощности разрядников, — все это также приводит к увеличению остаточного напряжения на разряднике.

Исследование затухания искусственных волн, произведенное Харьковским электротехническим институтом (ХЭТИ) на одной из линий Донэнерго в 1935 г. <sup>11</sup> (без троса), показало, что при отри-

цательной волне, изображенной на рис. 4, затухание в продолжение первых 1—1,5 км весьма точно выражается формулой Фауста и Менжера при коэффициенте затухания  $k = 0,5 \cdot 10^{-3}$ . Подсчет по этой формуле показывает, что даже при наличии подстанционного трубчатого разрядника в начале защищенного тросом участка линии при ударе молнии в опору, на которой установлен разрядник, на подстанцию может прийти волна с амплитудой до 700 kV и более. Для большинства существующих подстанций такая волна окажется чрезмерной при тупиковом режиме. Установленный на вводе подстанционный трубчатый разрядник может в этом случае не защитить изоляции. Тиритовый разрядник, намеченный к выпуску в 1937—1938 г., также не защитит большинство типов изоляции существующих подстанций.

Необходимо учесть, что для защиты подстанций с ослабленной изоляцией тиритовые разрядники, подобные приведенным в табл. 2, вообще не могут быть применены из-за высоких разрядных напряжений их искровых промежутков. Минимальное разрядное напряжение искровых промежутков этих разрядников — 145—160 kV. Следовательно, даже при благоприятных вольтамперных характеристиках они могут защищать изоляцию, минимальное разрядное напряжение которой по крайней мере выше 180—200 kV. Существующие подстанции имеют значительное количество изоляции, для которой это напряжение равно 150—160 kV и даже меньше. Уменьшение разрядных напряжений искровых промежутков при применении тех же тиритовых дисков еще больше ухудшает вольтамперные характеристики разрядников.

Значительно лучшую защиту подстанций да-

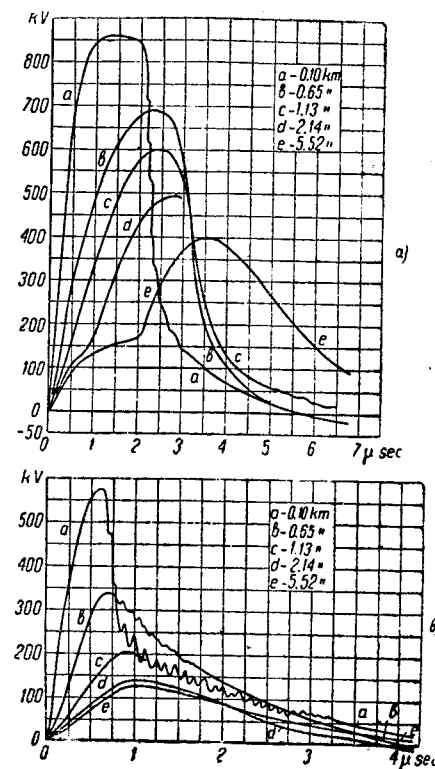


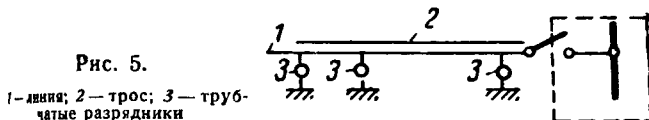
Рис. 4.

а) — деформация отрицательной волны, срезанной на искровом промежутке 750 мкм (исходная волна —  $1/4 \mu\text{sec}$  900 kV); б) — деформация отрицательной волны, срезанной на искровом промежутке 250 мкм (исходная волна —  $1/4 \mu\text{sec}$  900 kV)

<sup>11</sup> Отчет ХЭТИ по исследованиям с импульсным генератором в сетях Донэнерго инж. С. М. Фертик, инж. А. К. Потужный и статья этих авторов «Затухание волн высокого напряжения в 35-kV линии» «Электричество» № 1, 1938.

схема рис. 5. Согласно этой схеме в начале участка, защищенного тросом со стороны линии, на расстоянии 200—250 м от первого разрядника устанавливается второй. Амплитуда проходящей волны, не срезанной разрядниками, остается почти такой же, как и в схеме рис. 1. Максимальная величина и, особенно, длина проходящей срезанной волны, определяемая ударом молнии вблизи первого разрядника, значительно уменьшатся, так как волна, проходящая мимо первого разрядника, претерпевает вторичный срез, проходя мимо второго. Кривые <sup>12</sup> II рис. 3, а и 3, б дают напряжение волны, проходящей мимо второго разрядника для случаев, рассмотренных выше, для которых волна, проходящая мимо первого разрядника, определяется кривой I того же рисунка (при расчете затуханием волны между разрядниками пришлось пренебречь). Наличие второго разрядника снижает амплитуду волн и резко сокращает ее длину.

Значительное сокращение длины волны увеличивает в несколько раз ее затухание. На рис. 4, б показано затухание <sup>13</sup> отрицательной волны дли-



ной в 0,4—0,5 мс при движении ее по той же линии, что и волны, изображенной на рис. 4, а. Как видно, для этой волны затухание в несколько раз больше. На протяжении 1,13 км амплитуда волны уменьшается почти в 3 раза. Волны, полученные после среза на втором разряднике (кривые II, а и в рис. 3), значительно короче, изображенной на рис. 4, б, следовательно, затухание их будет происходить еще интенсивнее.

Необходимо отметить, что разрядные напряжения при столь малых временах запаздывания, какие получаются в этом случае, для разрядников в настоящее время не могут быть определены достаточно точно. Однако и при других временах запаздывания полученные соотношения между волнами, пропускаемыми на подстанцию, при установке одного и двух разрядников остаются такими же. Кривые, приведенные на рис. 3, в, построены для того же случая, что и 3, а, в предположении, что при действии той же волны время запаздывания, следовательно, и напряжение разряда в полтора раза больше. Как видно, соотношения сохраняются такими же, как и для случая, приведенного на рис. 3, а.

Вряд ли можно предполагать, что время запаздывания разрядника больше принятого при построении кривой рис. 3, в. Испытания показывают, что подстанционный трубчатый разрядник для 35 кВ имеет вольтамперную характеристику, близкую к характеристике искрового промежутка 130—150 мм. Согласно опытам характеристика разрядника мало зависит от полярности.

По данным J. C. Dowell and C. M. Foust<sup>14</sup> разрядное напряжение стержневого искрового промежутка в 150 мм при времени запаздывания в 0,1 мс и положительной полярности равно приблизительно 480 кВ, т. е. оно на 40% меньше того, которое принято нами для расчета кривой рис. 3, 2.

При установке в начале участка под тросом одного разрядника амплитуда проходящей на подстанцию волны увеличивается с увеличением амплитуды падающей волны, длина ее при малых временах запаздывания определяется длиной фронта падающей волны и мало зависит от ее амплитуды. При установке двух разрядников по схеме рис. 5 длина волны, проходящей мимо второго разрядника, определяется почти исключительно временем запаздывания разряда в разряднике, следовательно, с возрастанием амплитуды волны длина ее уменьшается. С уменьшением длины срезанной волны затухание ее возрастает, кроме того, очень короткая волна несколько деформируется при зарядке емкости подстанции. Все это приводит к тому, что при защите по схеме рис. 5 увеличение амплитуды волны, действующей на первый разрядник, не вызывает значительного увеличения амплитуды волны, проходящей на подстанцию, как это имеет место при защите по схеме рис. 1, в то же время уменьшает ее длину.

Высоковольтной лабораторией ХЭТИ на одной из 35-кВ линий Донэнерго была произведена экспериментальная проверка схемы защиты подстанции трубчатыми разрядниками с помощью передвижного импульсного генератора. Импульсный генератор устанавливался на расстоянии 1200 м от подстанции, в начале участка линии, защищенного тросом. Напряжение, приходящее на подстанцию, замерялось катодным осциллографом, установленным в конце линии (в тупике).

На рис. 6, а <sup>15</sup> показаны волны, пришедшие на

<sup>14</sup> GER № 3, 1937.

<sup>15</sup> «Электричество», № 12, 1937, инж. М. М. Аккодис. Трубчатые разрядники.

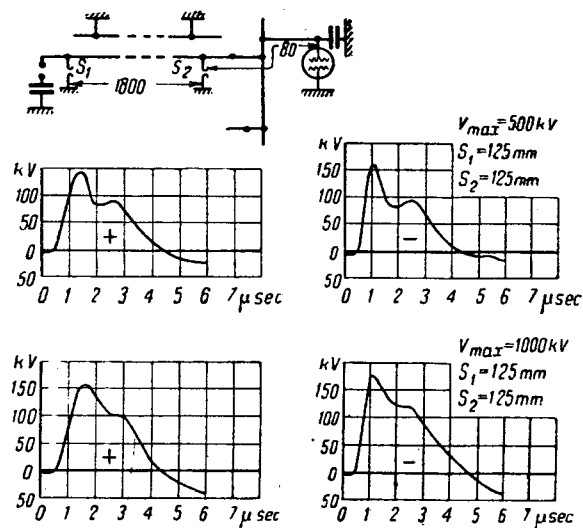


Рис. 6.

<sup>12</sup> Расчеты кривых рис. 3 производил инж. высоковольтной лаборатории Донэнерго И. М. Вальтер.

<sup>13</sup> Отчет ХЭТИ по исследованию импульсных молний в сетях Донэнерго.

а) — напряжение на трансформаторе пространственной модели тупиковой подстанции. Трансформатор на отпайке; б) — напряжение на трансформаторе пространственной модели тупиковой подстанции. Трансформатор на отпайке. Перекрывается в случае обеих полярностей.

тупиковую подстанцию при срезе волны  $1\frac{1}{2}$  мс с амплитудой 500 kV на 125-мтм координирующем промежутке, установленном на расстоянии 1200 м от подстанции. Координирующий промежуток на подстанции, также равный 125 мтм, даже не перекрывается, несмотря на увеличение амплитуды волны из-за отражения от конца линии. При волне в 1000 kV (б, рис. 6) напряжение на подстанции достигает величины, показанной на рис. 6, б. Перекрытие промежутка, установленного на подстанции, не происходило также и при волнах обеих полярностей амплитуды 1000 kV (рис. 6, б). Повышение напряжения на подстанции при этом крайне незначительно.

При уменьшении амплитуды напряжения импульсного генератора до величины, не вызывающей перекрытия искрового промежутка в начале подхода, напряжение волны, приходящей на подстанцию, может увеличиться.

Максимальная амплитуда длинной несрезанной волны, пропускаемой искровым промежутком в 125 мтм, равна 120 kV. При большой длине затухание ее будет незначительно, и напряжение на подстанции благодаря удвоению при отражении от конца линии будет около 240 kV. В этом случае искровой промежуток в 125 мтм, установленный на подстанции, будет работать.

Разрядное напряжение подстанционного трубчатого разрядника для 35-kV систем (его вольт-секундная характеристика) примерно такого же порядка, как и координирующего промежутка 125 мтм. Таким образом можно предполагать, что при защите по схеме рис. 5 волна в 8000 kV, будучи срезана разрядниками первым и вторым, не сможет даже перекрыть третий разрядник, установленный на тупиковой подстанции, по крайней мере если расстояние между вторым разрядником и подстанцией больше 1200 м.

При защите по схеме рис. 5 наибольшая амплитуда и наибольшая длина волны на подстанции получатся при воздействии на первый разрядник волн с амплитудой, близкой к минимальному импульсному напряжению, поэтому желательно сделать его как можно меньше. Для этой цели целесообразно применение емкости, шунтирующей внешний искровой промежуток, при прокладке дополнительного электрода внутри стенок разрядника<sup>15</sup>, позволяющее заметно снизить минимальное разрядное напряжение, несмотря на то, что при малых временах запаздывания снижение разрядного напряжения, достигаемое этими мероприятиями, меньше.

Защита 115-kV подстанций трубчатыми разрядниками может быть осуществлена еще более надежно, чем 35-kV. На рис. 3, а изображены волны, пропущенные первым и вторым разрядниками, установленными в начале подхода, при набегании волны с амплитудой 8000 kV. В этом случае волна, пропускаемая мимо второго разрядника, быстро затухнет до незначительной величины. Значительно большей величины может достигнуть амплитуда приходящей на подстанцию длинной не срезанной первым и вторым разрядниками волны. Однако и в этом случае защита получается весьма надежной благодаря большому запасу прочности 110-kV изоляции по сравнению с разрядником.

До сих пор мы рассматривали защиту по схеме рис. 5 тупиковых подстанций. Очевидно, что уже при наличии на подстанции двух фидеров напряжения, попадающие на нее будут значительно меньше. При наличии более двух фидеров на подстанцию практически вовсе не будут попадать волны перенапряжения.

Защита 35-kV тупиковых подстанций с ослабленной изоляцией еще несколько улучшится при наличии вентильного разрядника с пробивным напряжением его искровых промежутков не более 110—115 kV и времени запаздывания 1 мс, устанавливаемого на шинах подстанции дополнительно к схеме рис. 5. Вольтамперная характеристика такого разрядника существенного значения не имеет и может быть хуже, чем выпускаемые разрядники, так как на подстанцию приходят волны с ничтожной амплитудой. Достаточно, чтобы остаточное напряжение разрядника не превышало пробивного значения его искровых промежутков при токе в 150—200 А, что соответствует напряжению в 175—200 kV, для тупиковой подстанции без тиритового разрядника — величина, которая едва ли может быть достигнута при этой схеме защиты. Повидимому, изготовление такого разрядника вполне возможно, так как при равных качествах сопротивления вентильного разрядника ухудшение вольтамперной характеристики позволяет понизить пробивное напряжение его искровых промежутков. Такой разрядник можно будет применять только в том случае, если коэффициент импульса его искровых промежутков будет при этом равен или меньше единицы.

Очевидно, для достижения наибольшего затухания волны второй разрядник должен быть установлен как можно дальше от подстанции. После перекрытия первого разрядника провод и трос оказываются электрически соединенными, с этого момента по тросу и проводу движутся волны одинаковой амплитуды. Волна, движущаяся по тросу, дойдя до следующей опоры, преломится и уменьшит свою амплитуду, тем не менее<sup>16</sup> оставшееся на опоре напряжение снизит напряжение, действующее на второй разрядник, что увеличит запаздывание разряда в нем<sup>16</sup>.

Поэтому целесообразно устанавливать второй разрядник на третьей опоре от первого; здесь волна, идущая по тросу, вновь отразившись от опоры, падает до незначительной величины.

При этом необходимо иметь в виду, что в случае удара молнии в опору, на которой установлен второй разрядник, на подстанцию может пройти волна с очень большой амплитудой, опасная для оборудования. Поэтому опору, на которой установлен этот разрядник и прилегающий пролет линии, целесообразно защищать диверторами от прямых ударов. Еще лучше при такой установке разрядников защищать диверторами первые три пролета, чтобы исключить возможность удара молнии в опоры, на которых установлены оба разрядника, так как в этом случае

<sup>16</sup> Следует учесть, что время запаздывания разрядника должно получаться больше, чем у первого, так как крутизна фронта короткой волны, проходящей мимо первого разрядника, уменьшится по пути ко второму.

максимальная волна, которая может быть пропущена разрядниками, снизится до величины, определяемой кривой II рис. 3, а или 3, в, а не 3, б. Таким образом по схеме рис. 5 существующими разрядниками могут быть надежно защищены все типы изоляции, применяемой на шинах 110-kV подстанций и почти все типы 38-kV, что вполне подтверждается опытом эксплуатации этих разрядников в системе Донэнерго.

Данная схема защиты может работать удовлетворительно лишь в том случае, если линия на подстанции надежно защищена от прямых ударов молнии. При попадании прямого удара линии в токонесущие провода в непосредственной близости от подстанции оборудование ее может быть повреждено. Впрочем, и подстанции с высококачественной изоляцией не могут быть надежно защищены при прямых ударах вблизи оборудования, большинство типов вентильных разрядников сами могут разрушаться при мощных ударах молнии. Поэтому все существующие в настоящее время схемы предусматривают защиту

подстанции и прилегающих участков линии от прямых ударов. Так как защитный уровень подхода линии на деревянных опорах приблизительно равен 12 MV, в приведенных на рис. 3 кривых расчет производится в предположении, что амплитуда удара молнии не превышает этой величины<sup>17</sup>.

Следует отметить, что схема рис. 5 имеет еще одно преимущество. Благодаря малому расстоянию между первым и вторым разрядниками динамическая дуга вслед за импульсным перекрытием очень часто возникает в обоих разрядниках одновременно. Ток короткого замыкания при этом распределится между обоими разрядниками, тем самым уменьшится их износ, что весьма важно при фибре низкого качества. Возможность затягивания дуги на 1—2 полупериода при токах, близких к нижнему пределу для разрядника, существенной роли не играет, так как при малых токах износ фибры ничтожно мал.

<sup>17</sup> Существующие линии с расстояниями между фазами менее 3,5 м имеют меньший защитный уровень.

## Импульсные характеристики изоляторов, покрытых слоем загрязнений

В. К. Кожухов  
ВЭИ

ВЛИЯНИЕ поверхностного загрязнения изоляторов на разрядные характеристики при промышленной частоте установлено уже давно. Но считалось, что при кратковременных импульсных воздействиях нельзя ожидать заметного уменьшения разрядного напряжения. Однако эксплуатационным персоналом в отдельных случаях было отмечено, что загрязненные изоляторы при грозовых перенапряжениях чаще подвергаются перекрытиям, чем чистые. В связи с этим Научно-исследовательский институт НКПС поставил в 1936 г.<sup>1</sup> работу по испытанию изоляторов для контактной сети электрифицированных железных дорог. Частично она была посвящена исследованию влияния загрязнения на импульсные характеристики изоляторов.

Результаты этой работы довольно неожиданно показали, что сравнительно небольшое поверхностное загрязнение в сочетании с увлажнением дает значительное снижение характеристик изоляторов, в особенности в области наибольших напряжений разряда. Проверка этого положения путем подбора защищающих промежутков тоже показала заметное снижение импульсной прочности загрязненного изолятора.

Полученное снижение вольтсекундных характеристик оказалось настолько большим, что возникли сомнения в возможности целесообразного проведения координации изоляции в местах, где изоляторы подвержены загрязнению.

Так как большое число линий электропередач проходит по промышленным районам, то чрезвычайная важность трактуемого здесь вопроса ясна.

Принимая во внимание большую трудоемкость экспериментов по снятию вольтсекундных характеристик, число объектов было ограничено с тем, чтобы над каждым изолятором был проделан полный цикл испытаний в различных условиях загрязнений.

Были испытаны изоляторы типа ПНБ-6; ШД-11; ПНБ-35 и гирлянда из двух изоляторов П-4,5.

Наибольшее загрязнение изоляторов наблюдалось на Зуевской грэс — до 200 mg/cm<sup>2</sup>. Такая степень загрязненности встречается крайне редко и не может служить отправной точкой для исследований. Нами наблюдались загрязнения в обычных условиях, достигающие до 10 mg/cm<sup>2</sup>, и эта цифра в наших исследованиях была принята за максимальную. Наименьшее загрязнение было принято в 1 mg/cm<sup>2</sup>, так как при дальнейшем уменьшении слоя его очень трудно нанести на поверхность равномерно.

В качестве загрязнителя был применен топочный унос Зуевской грэс, представляющий довольно крупные частицы, главным образом, золы и несгоревшего угля. Этот вид покрытия имитировал загрязнение промышленного характера. Для имитации загрязнения поверхности изоляторов, работающих вблизи морских побережий, использовалась также поваренная соль.

Два изолятора ШД-11 и 2П-4,5 были испытаны с естественным загрязнением. Эти изоляторы были установлены на опытной линии ВЭИ (в про-

<sup>1</sup> В лаборатории высокого напряжения Московского энергетического института, выполнена инж. Л. И. Ивановым и В. Кожуховым.

мышленном районе): первый с 1932 г., а второй с 1930 г., и не находились под напряжением. Загрязнение их имеет особый характер: слой загрязнения равномерный, мелкозернистый, плотный, совершенно не смывается дождем и трудно соскабливается; гигроскопичность этого слоя велика с количественной стороны. Средняя загрязненность изоляторов ШД-11 была определена в  $1 \text{ mg/cm}^2$ , а на изоляторах П-4,5 —  $0,5 \text{ mg/cm}^2$ .

Как правило, изоляторы покрывались равномерным слоем загрязнения, и только один эксперимент с гирляндой 2П-4,5 производился при неравномерном загрязнении: верхняя часть тарелки этих изоляторов покрывалась слоем в  $3 \text{ mg/cm}^2$  (унос Зугрэс), а нижняя была оставлена чистой.

Поверхности изоляторов одновременно с высыпанием их пылью увлажнялись обрызгиванием из пульверизатора водой с проводимостью  $150—250 \frac{\mu \text{Scm}}{\text{cm}^2}$ .

Во время испытания изолятор по мере высыхания вновь обрызгивался водой.

Обработанные таким путем изоляторы при больших загрязнениях топочными уносами имели довольно малое поверхностное сопротивление. Так, сопротивление изолятора ШД-11 при загрязнении  $100 \text{ mg/cm}^2$ , измеренное на низком напряжении постоянного тока, было равно  $5000 \Omega$ , при загрязнении  $50 \text{ mg/cm}^2$  —  $25000 \Omega$  и при загрязнении  $10 \text{ mg/cm}^2$  —  $680 \cdot 10^3 \Omega$ .

Необходимо отметить, что удельное поверхностное сопротивление вдоль пути утечки далеко не постоянно: участки малого сопротивления чередуются с участками значительно большего сопротивления.

Поэтому цифры сопротивления, измеренные нами на низком напряжении, значительно больше, чем результирующее сопротивление во время прохождения импульса с напряжением, близким к разрядному, так как участки с большим сопротивлением, на которые ложится большее напряжение, легко перекрываются. Измерить сопротивление поверхностного слоя при большом напряжении довольно сложно, но приближенно оценить его можно по деформации хвоста волны, брошенной на изолятор. Так, длина волны при испытании изолятора ШД-11, загрязненного  $50 \text{ mg/cm}^2$ , изменяется в зависимости от напряжения согласно табл. 1.

Таблица 1

Напряжение kV	Длина волны $\mu \text{sec}$	Эквивалентное сопротивление утечки изоля- тора, $\Omega$
56	4	700
42	7	1800
28	12	3700

Получающееся искажение формы волны настолько велико, что при загрязнении  $50 \text{ mg/cm}^2$  и выше при используемом генераторе импульсов (разрядное сопротивление около  $15000 \Omega$ ) вообще невозможно произвести испытание. При загрязнении  $10 \text{ mg/cm}^2$  наблюдались меньшие искажения формы волны, во всяком случае длина волны не падала ниже  $30 \mu \text{sec}$ .

Следующие друг за другом разряды по поверхности изолятора при снятии вольтсекундных характеристики частично сбивали загрязнения и вносили ошибку в измерения. Так, повторная вольтсекундная кривая, снятая с изолятора без возобновления слоя, располагалась несколько выше первой кривой. Чтобы избежать этой ошибки в наиболее важном участке вольтсекундной кривой (при наибольших временах разряда), вольтсекундные кривые снимались, начиная с минимальных разрядных напряжений.

Так как изоляторы были увлажнены, то влияние влажности воздуха не учитывалось.

Частичные разряды на поверхности изоляторов появляются при напряжении, довольно близком к минимальному разрядному, и при больших загрязнениях выражаются в виде коротких беспорядочно располагающихся на всей загрязненной поверхности изолятора. Повидимому, эти искры замыкают собой те части поверхности, которые в силу местной неравномерности загрязнения или увлажнения имеют большее сопротивление. По мере повышения напряжения импульс все большая часть поверхности закорачивается искрой до тех пор, пока не произойдет разряда. Как указывалось выше, этот процесс развивается сравнительно долго, и так как по мере развития искр сопротивление поверхности уменьшается, то волна контура укорачивается. Поэтому форма среза не получается крутой, как в случае испытания сухого и чистого изолятора, а очень пологой. Иногда трудно даже разобрать, где находится разряд (согласно рекомендации конференции ЭНИА 1934 г.), так как осциллограмма разряда похожа на осциллограмму волны с большим коротким хвостом (рис. 1а). При больших амплитудах напряжения, падающего на изолятор, характер среза изменяется, становится круче, и переход на разряд все же протекает очень плавно. Частичные разряды в этом случае отмечаются на гребне импульса в виде небольших толчков напряжения (рис. 1б).

На рис. 2. приведена обобщенная кривая зависимости разрядного напряжения изолятора ПНВ при разных временах разряда от величины поверхностного загрязнения уносом Зугрэс.

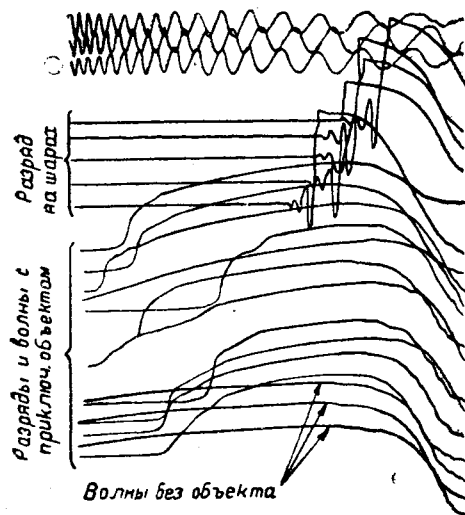


Рис. 1а



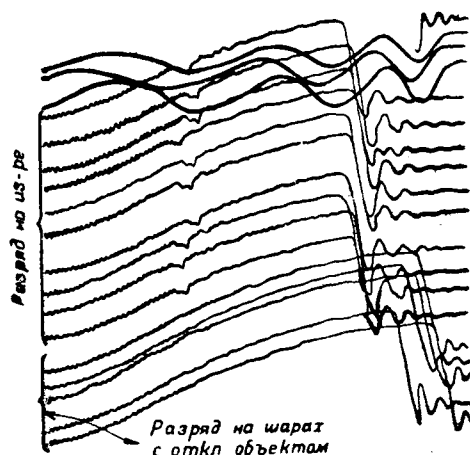


Рис. 1б

рис. 3 даны вольтсекундные характеристики этого же изолятора при загрязнении солью. Для сравнения разрядных характеристик, полученных при разных покрытиях, данные для наименьшего и 2-мsec разрядных напряжений сведены в табл. 2 и 3.

Обобщенные вольтсекундные характеристики изолятора ШД-11 при загрязнении зувевскими тросами приведены на рис. 4. Вольтсекундные характеристики изолятора с естественным загрязнением приведены на рис. 5. Для сравнения влияния различных видов загрязнений в табл. 4 и 5 приведены данные о наименьшем и 2-мsec разрядных напряжениях.

Разрядные характеристики изолятора с естественным загрязнением при положительной полярности соответствуют характеристикам изолятора, загрязненного зувевским уносом слоем в 2-3 mg/cm<sup>2</sup>, а при отрицательной полярности — около 1 mg/cm<sup>2</sup>. Различное влияние полярности импульса на разрядные напряжения при естественном и искусственном загрязнении нужно объяснять некоторой неравномерностью в слое естественного загрязне-

ния, тогда как искусственное загрязнение выполнялось равномерным слоем.

Таблица 2

Наименьшее разрядное напряжение изолятора ПНБ-6 при различных загрязнениях

Загрязнение mg/cm <sup>2</sup>	Унос Зугрэс					Соль		Знак
	10	5	3	2	1	Чистый, влажный	Чистый, сухой	
Разрядное напряжение								
Наименьшее, kV .	46	64	67	77	92	105	54	125
В % от чистого, сухого . . . .	37	51	53,5	61,5	73,5	85	43,2	46,5
В % от чистого, влажного . . . .	44	61	64	73,5	87,5	100	51,5	55
Наименьшее, kV .	40	69	77	88	102	101	52	103
В % от чистого, сухого . . . .	39	67	75	86	99	98	50,5	55,5
В % от чистого, влажного . . . .	39,5	68	76	87	101	100	51,5	56,5

Таблица 3

2-мsec разрядное напряжение изолятора ПНБ-6 при различных загрязнениях

Загрязнение mg/cm <sup>2</sup>	Унос Зугрэс					Соль		Знак
	10	5	3	2	1	Чистый, влажный	Чистый, сухой	
Разрядное напряжение								
2 мsec, kV . . . .	118	123	126	130	143	148	100	120
В % от чистого, сухого . . . .	79	82	84	86,5	95	99	67	80
В % от чистого, влажного . . . .	80	83	85	88	96,5	100	67,5	81
2 мsec, kV . . . .	122	131	140	145	148	156	105	137
В % от чистого, сухого . . . .	78	84	90	93	95	100	67	88
В % от чистого, влажного . . . .	78	84	90	93	95	100	67	88

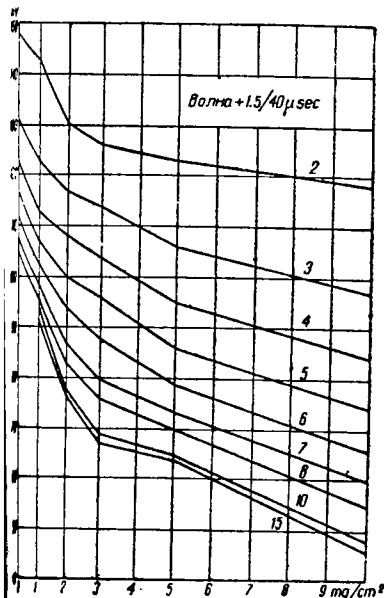


Рис. 2. Разрядное напряжение по загрязненной поверхности изолятора ПНБ-6 при различных временах разряда (цифры на кривых)

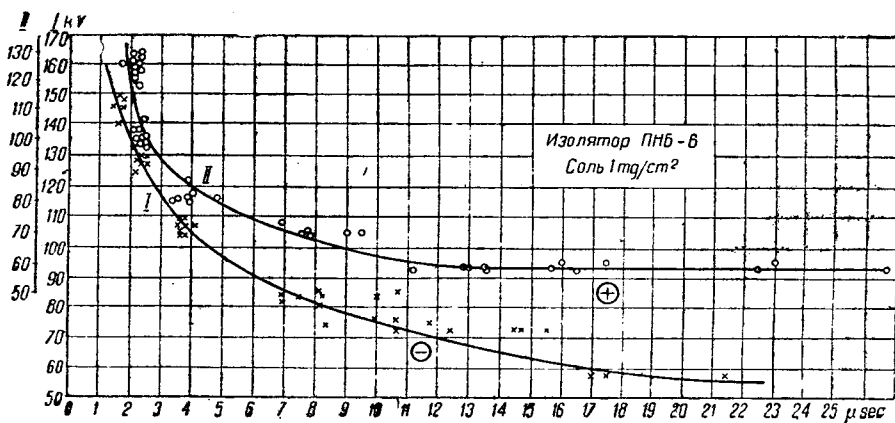


Рис. 3



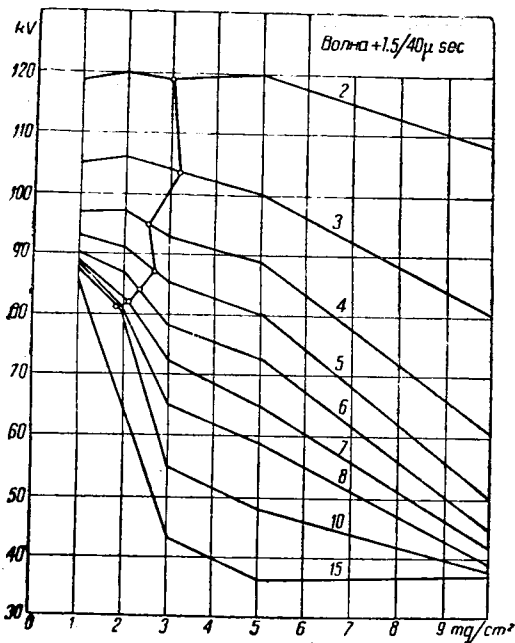


Рис. 4. Разрядное напряжение по загрязненной поверхности изолятора ШД-11 при различных временах разряда

Таблица 4

Наименьшее разрядное напряжение изолятора ШД-11 при различных загрязнениях

Загрязнение mg/cm <sup>2</sup>	Унос Зугрэс					Чистый, влажный Соль 1 mg/cm <sup>2</sup>	Сухой, чистый	Естеств. загрязн.	Знак
	10	5	3	2	1				
Наименьшее, kV . . . . .	37	36	42	80	86	85	57	90	Плюс
В % от чистого, сухого . . . . .	41	40	47	89	95	94	63	100	
В % от чистого, влажного . . . . .	43,5	42,5	49,5	94	101	100	67	106	
Наименьшее, kV . . . . .	43	42	50	79	105	117	60	130	Минус
В % от чистого, сухого . . . . .	33	32,5	38,5	61	81	90	46	100	
В % от чистого, влажного . . . . .	37	36	43	67,5	90	100	51	111	

Обобщенные вольтсекундные характеристики изолятора ПНБ-35, загрязненного уносом Зугрэс, приведены на рис. 6; характеристики изолятора, покрытого солью, даны на рис. 7.

В табл. 6 приведены наименьшие разрядные напряжения этого изолятора.

Изолятор ПНБ-35 в силу особенностей своей конструкции имеет большой разброс в отдельных точках вольтсекундной характеристики. Поэтому было бы правильнее давать не вольтсекундную кривую, а область, охватывающую все точки, полученные из измерений. Однако сравнение отдельных вольтсекундных областей было бы очень затруднительно. Поэтому исключительно для удобства сравнения нами приведены средние кривые, которые мы и сравниваем аналогично

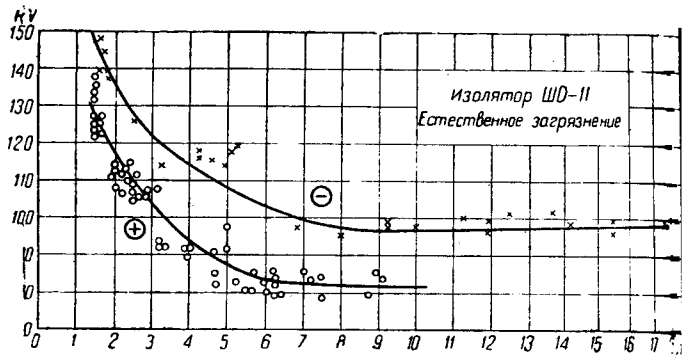


Рис. 5

Таблица 5  
2-м сек разрядное напряжение изолятора ШД-11 при различных загрязнениях

Загрязнение mg/cm <sup>2</sup>	Унос Зугрэс					Чистый, влажный Соль 1 mg/cm <sup>2</sup>	Сухой, чистый	Естеств. загрязн.
	10	5	3	2	1			
Разрядное напряжение								
2 м сек, kV . . . . .	108	120	119	120	119	—	110	120
В % от чистого, сухого . . . . .	90	100	99	100	99	—	92	100
2 м сек, kV . . . . .	101	109	114	127	134	136	106	153
В % от чистого, сухого . . . . .	66	71	75	83	88	89	69	100
В % от чистого, влажного . . . . .	74	80	84	93	98	100	78	113

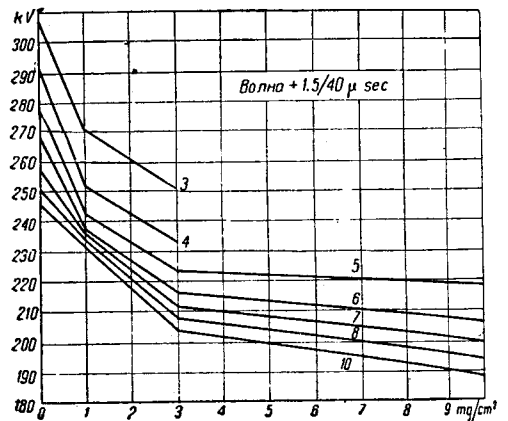


Рис. 6. Разрядное напряжение изолятора ПНБ-35 при загрязненной поверхности для различных времен разряда

вольтсекундным кривым. Естественно, что допущение вносит некоторую ошибку.

Вольтсекундные кривые гирлянды 2П-4,5, снятые с загрязнением топочным уносом Зугрэс, обобщены на рис. 8 и 9.

Характеристики изолятора загрязненного солью даны на рис. 10, а для гирлянды, снятой с одной линии ВЭИ, — на рис. 11. В табл. 7 собраны данные о наименьшем и 2-м сек разрядных напряжениях для этих изоляторов.

Наибольшее уменьшение разрядного напряжения наблюдается при загрязнении солью. Оно

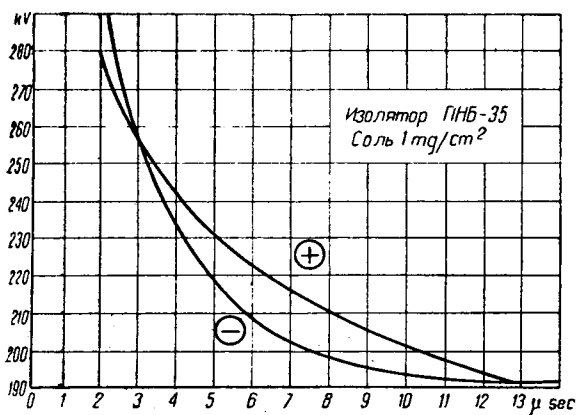


Рис. 7

Таблица 6  
Наименьшее разрядное напряжение изолятора ПНБ-35 при различных загрязнениях

Загрязнение mg/cm <sup>2</sup>	Унос Зугрэс			Соль 1 mg/cm <sup>2</sup>	Сухой, чистый	Знак
	10	3	1			
Разрядное напряжение						
Наименьшее, kV . . .	189,5	200,5	230,5	190	246	Плюс
В % от сухого, чистого . . . . .	77	81	93,5	77	100	
Наименьшее, kV . . .	153,5	191	216	192	251	Минус
В % от сухого, чистого . . . . .	61	76	86	77	100	

Таблица 7  
Наименьшее разрядное напряжение гирлянды из 2П-4,5 при различных загрязнениях

Загрязнение mg/cm <sup>2</sup>	Унос Зугрэс			Соль 1 mg/cm <sup>2</sup>	Сухой, чистый	Неравномерное	Естеств. загрязн.	Знак
	10	3	1					
Разрядное напряжение								
Наименьшее, kV . . . .	146	150	173	133	240	179	197	Плюс
В % от сухого, чистого	61	62,5	72	55	100	74,5	82	
Наименьшее, kV . . . .	113	117	166	133	265	190	175	Минус
В % от сухого, чистого	42,5	44	63	50	100	72	66	

важно то обстоятельство, что даже весьма небольшие загрязнения солью (1—2 mg/cm<sup>2</sup>) дают чрезвычайно большое снижение разрядных напряжений. Это снижение при наименьших разрядных напряжениях и загрязнении 1 mg/cm<sup>2</sup> достигает 46% от сухого чистого изолятора ПНБ-6 при положительной волне и изолятора ШД-11 при отрицательной полярности. Лучше всего ведет себя при соляном отложении изолятор ПНБ-35, который при обоих полярностях имеет наименьшее разрядное напряжение в 77% от сухого, чистого изолятора.

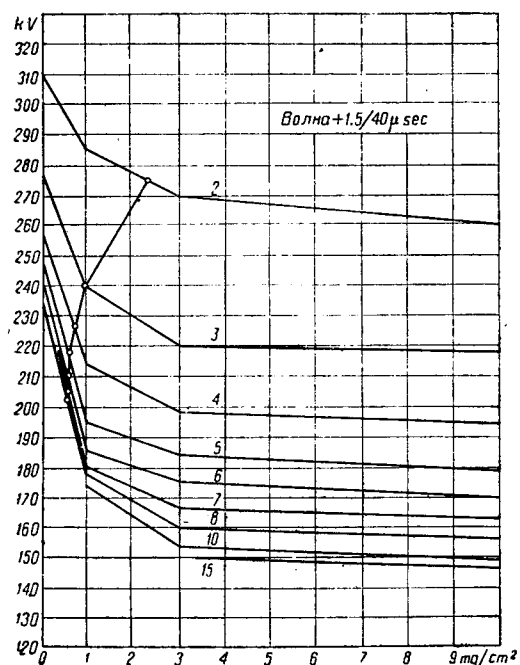


Рис. 8. Разрядное напряжение гирлянды 2П-4,5 при загрязненной поверхности для различных времен разряда

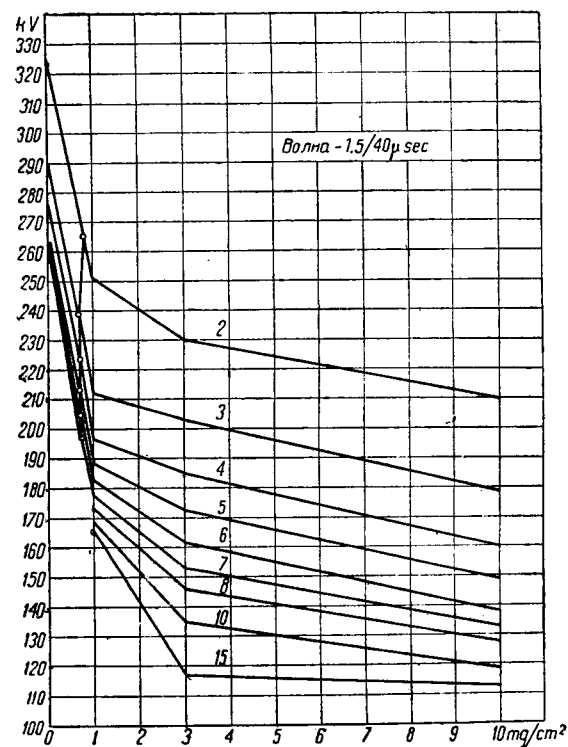


Рис. 9. Разрядное напряжение гирлянды 2П-4,5 при загрязненной поверхности для различных времен разряда

Покрывание поверхности изоляторов топочными уносами Зугрэс сказывается на разрядных характеристиках изоляторов значительно меньше. Если взять загрязнение 10 mg/cm<sup>2</sup>, в 10 раз большее, чем использованное при испытаниях с соляными отложениями, то самое малое значение минимального разрядного напряжения наблюдается у изолятора ШД-11 при отрицательной волне (33% от сухого, чистого изолятора) и у изолятора ПНБ-6

Таблица 8

2-м sec разрядное напряжение гирлянды из 2П-4,5 при различных загрязнениях

Загрязнение mg/cm <sup>2</sup>	Унос Зугрэс			Соль 1 mg/cm <sup>2</sup>	Сухой чистый	Неравномерное	Естеств. загрязн.	Знак
	10	3	1					
Разрядное напряжение								
2 м sec, kV . . . . .	260	270	285	240	310	270	270	Плюс
В % от сухого, чистого	84	87	92	77,5	100	87	87	
2 м sec, kV . . . . .	210	230	250	230	325	290	270	Минус
В % от сухого, чистого	64,5	71	77	71	100	89,5	83	

(37% при положительной и 39% при отрицательной полярности). Наиболее благоприятно в этих условиях поведение изолятора ПНБ-35 при положительной полярности, имеющего 99% разрядного напряжения сухого, чистого изолятора.

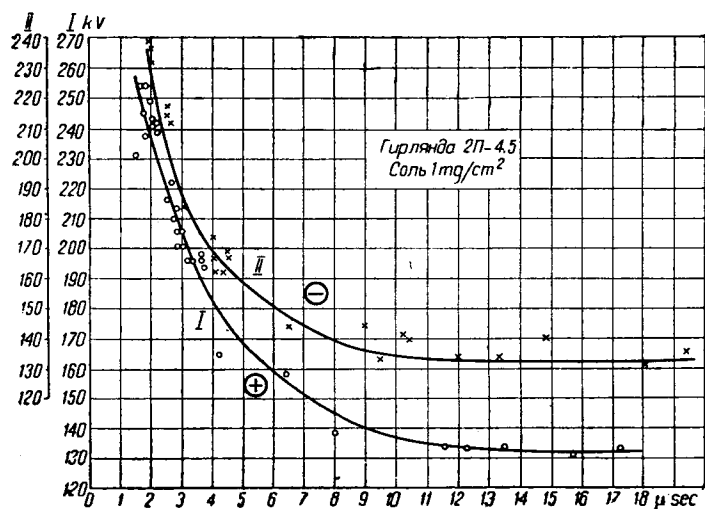


Рис. 10

При 2 мsec времени разряда влияние загрязнения значительно уменьшается даже и при таких суровых условиях, как загрязнение солью в 1 mg/cm<sup>2</sup> или топочными уносами Зугрэс в 10 mg/cm<sup>2</sup>.

Для соли самое малое напряжение при времени разряда 2 мsec наблюдается на изоляторе ШД-11 при отрицательной полярности (69% от сухого, чистого изолятора) и на гирлянде из 2П-4,5 (71% при отрицательной и 77,5% при положительной полярности). Остальные же изоляторы имеют 80–90% разрядного напряжения сухого, чистого изолятора.

При топочных уносах Зугрэс и загрязнении 10 mg/cm<sup>2</sup> самое малое разрядное напряжение (66%) при времени разряда 2 мsec наблюдается у изолятора ШД-11 при отрицательной полярности и у гирлянды из 2П-4,5 при отрицательной полярности (64,5%).

Снижение разрядных напряжений в таких условиях чрезвычайно велико. Нужно сказать, что,

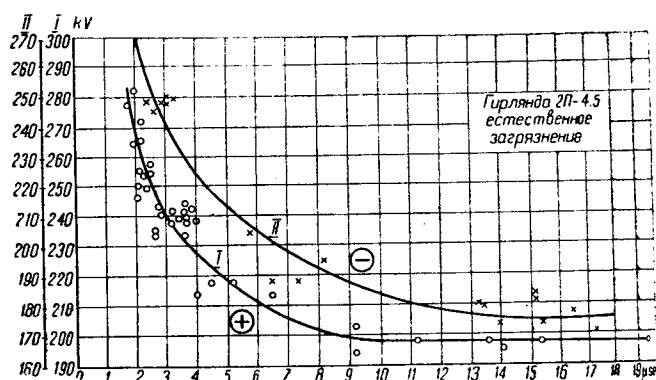


Рис. 11

если бы такие загрязнения (1 mg/cm<sup>2</sup> соли или 10 mg/cm<sup>2</sup> промышленных загрязнений) встречались часто, то положение с защитой линий и подстанций от атмосферных перенапряжений было бы катастрофическим. Однако следует отметить, что загрязнения порядка 1 mg/cm<sup>2</sup> часто встречаются в промышленных районах, особенно если за изоляторами не ведется тщательного наблюдения. Такие загрязнения очень мало сказываются на величине разрядных напряжений при рабочей частоте, однако значительно снижают импульсные характеристики изоляторов.

Самое малое разрядное напряжение при наибольшем времени разряда наблюдается при этом загрязнении у гирлянды из 2П-4,5 (63% при отрицательной и 72% при положительной полярности). Очень низкое наименьшее разрядное напряжение (73,5%) наблюдается также и у изоляторов ПНБ-6. В остальных случаях разрядное напряжение либо довольно близко совпадает с напряжением чистого изолятора (ПНБ-6—99%), либо меньше разрядного напряжения чистого изолятора на 5–19%.

При времени разряда в 2 мsec влияние загрязнения 1 mg/cm<sup>2</sup> значительно меньше. Только в одном случае, у гирлянды из 2П-4,5, при отрицательной полярности разрядное напряжение опускается до 77%. У остальных изоляторов разрядное напряжение составляет от 88 до 99%.

До сих пор для того, чтобы обеспечить защиту изолятора при помощи хотя бы стержневого промежутка, считалось достаточным иметь вольтсекундную характеристику изолятора на 25% ниже вольтсекундной характеристики разрядника. Если же считать загрязнение 1 mg/cm<sup>2</sup> допустимым, то необходимо к 25% добавить еще 10–15%. Так как в настоящее время подавляющее число изоляторов имеет предельные запасы разрядных напряжений, то повышение требований защиты в связи с возможным загрязнением заставит переконструировать очень большое количество изоляторов.

Другой выход (в частности, его можно использовать в существующих установках с защитой, рассчитанной по вольтсекундным характеристикам чистых и сухих изоляторов) заключается в регулярной очистке изоляторов. Период очистки должен быть довольно короток с тем, чтобы воспрепятствовать образованию на поверхности изолятора трудно очищаемой твердой корки.

# Влияние различных факторов на развитие искрового разряда

А. П. Беляков и И. С. Стекольников

ВЭИ

**В**ПРОС о влиянии на путь искрового разряда и молнии различных факторов важен с точки зрения практики грозозащиты. Отдельные неоднородности атмосферы обуславливают те или иные отклонения пути разряда, создавая зигзаги и разветвления. Выяснение причин этих отклонений способствует анализу и разработке новых видов защитных устройств и позволяет критически оценить существующие устройства.

В работе ВЭИ 1937 г. получили дальнейшее развитие начатые в 1936 г. исследования факторов, влияющих на путь разряда и на его электродинамическое поле, обуславливающих избирательность искрового разряда в воздухе вдали от земли.

Нам удалось более точно выяснить роль состояния среды, неоднородности ее строения в развитии искрового разряда и тем самым более полно выявить его избирательные свойства.

Здесь кратко описываются результаты проведенных весьма многочисленных исследований влияния следующих наиболее существенных факторов: 1) проводимости, влажности и эффекта вязкости; 2) температуры и давления; 3) объемно-динамическое поле разряда и, следовательно, его избирательные свойства зависят при всех прочих условиях от характеристики источника напряжения.

Определяющими показателями являются род напряжения, полярность источника, величина напряжения и превышение напряжения над пробивным значением, изменяемость напряжения по времени и мощность источника.

Нами констатировано влияние величины перенапряжения на форму пути разряда—увеличение перенапряжения вызывает укорочение пути разряда и выпрямление его траектории.

В реальных условиях грозовой разряд может развиваться в зависимости от электрических характеристик грозовой тучи при разных перенапряжениях. Поэтому форма и длина пути молнии может быть различной.

Более короткая траектория при всех прочих равных условиях будет у той молнии, которая развивается с большим перенапряжением.

Мюрендер, повторивший в Англии опыты И. С. Стекольникова по избирательной поражаемости земной поверхности, пришел тоже к выводу, что избирательность разряда возрастает с увеличением перенапряжения.

*Влияние проводимости, влажности и эффекта вязкости.* Проводимостью в атмосфере при наличии электрического поля может служить любое скопление ионизированных частиц как одного знака, так и разных знаков.

Формально с этой точки зрения любое тело, способное проводить электрический ток, является проводимостью. Однако при помещении такого

проводящего тела в воздух, в зону, охваченную процессами разряда, действие проводящего тела и ионизированного объема различны. Тело, в отличие от ионизированного объема, участвуя в механизме проведения токов разряда, не меняет своей конфигурации. Таким образом существует разница в понятии «проводящих объемов» и «проводящих тел».

Наличие в области развивающегося разряда неизменных поверхностей, на которых происходит «осаждение» объемных зарядов, вызывает специфические эффекты, как, например, известное барьерное действие. Наши опыты показали, что металлические шары, помещенные вблизи электрода, с которого развивается разряд, при некоторых условиях отталкивают разряд, тогда как при другом расположении или отличных условиях разряда они вызывают избирательное действие искры.

Можно было также установить факт влияния на избирательность разряда объектов определенной проводимости. Различные виды проводимости оказывают разное действие на развивающийся разряд.

Например, увеличение влажности воздуха вызывает упрочнение промежутка и изменение траектории разряда. Возрастание влажности, наличие дождевых капель в объеме воздуха, способствует очищению его, уменьшению подвижности ионов и в ряде случаев может привести к выравниванию распределения потенциала в среде развития разряда. Поэтому, несмотря на проводящие свойства влаги или капель дождя, несмотря на эффект увеличения градиентов у их поверхности, фактор упрочнения промежутка может иногда быть преобладающим.

Применительно к природе избирательности искрового разряда можно тоже сказать, что, когда влажность упрочняет воздух, развивающийся разряд не направится к объему воздуха с большим содержанием влажности, а будет его избегать.

В лабораторных условиях была осуществлена схема опыта, в которой разряд мог развиваться от верхнего игольчатого электрода к двум по обеим сторонам от него расположенным на плоскости стержням. Легко было получить эффект уменьшения поражаемости того из стержней, около которого подавался столб пара. Нельзя было также отметить избирательности разрядом струи пара, поступающей из-под заземленной сетки в промежутки игла—сетка (при отсутствии на заземленной сетке стержней).

Наличие в воздухе различных по размеру и проводимости включений (облака, всевозможные частицы пыли, дыма и пр.), а также объекты разной проводимости, находящиеся на поверхности земли и в земле, могут, помимо всего прочего, оказывать особое влияние на электродина-

мическое поле разряда благодаря эффекту емкости, которой перечисленные объекты обладают.

**Температура и давление.** При анализе природы избирательности искровым разрядом различных участков среды в процессе его прорастания приходится считаться с дифференциальной неоднородностью среды, т. е. со средой, не обладающей однородностью в отдельных ее участках. В таком разрезе исследования до сих пор не проводились.

Нами постановкой большого количества экспериментов выяснено, что пламя, какой бы оно ни было малой величины, или серия точечных огоньков избирательно поражаются развивающимся вблизи разрядом.

Необходимо было установить, является ли действительно температурный эффект преобладающим при действии пламени на разряд.

При замене пламени невидимой для глаза колонкой горячего газа избирательность разряда продолжала оставаться. Для ответа на вопрос о влиянии на путь развития разряда ионов горячего газа ионы были удалены. Оказалось, что струя горячего газа продолжала избирательно поражаться в той же степени, как и при наличии в струе газа большого количества ионов (рис. 1).

Интересно отметить, что действие газа здесь напоминает эффект стержневого молниеотвода.

Дальнейшими опытами было выяснено, что обычный воздух, нагретый до определенной температуры, влияет на избирательность искрового разряда. При недостаточно высокой температуре струи горячего воздуха избирательная поражаемость воздуха мало заметна. При направлении струи такого воздуха по линиям сгущения поля, т. е. по линиям наибольших градиентов (в неравномерном поле), влияние воздуха заметно усиливается.

На рис. 2 дана фотография распределения разрядов в случае, когда левый из двух симметрично расположенных стержней обдувался струей горячего воздуха. Температура у вершины левого стержня была примерно  $200^{\circ}$ . Число разрядов в левый стержень было 94, а в правый—6 (из 100 разрядов).

В обычных условиях, когда тот же стержень обдувался воздухом температуры  $15^{\circ}$ , распределение разрядов в тот и другой стержень было примерно поровну ( $n_1 = 47$  и  $n_2 = 53$ ).

Довольно отчетливо можно проследить влияние нагретого воздуха на избирательное свойство разряда и усиление этого влияния на опыте с горячим металлическим шаром, внесенным в поле развития разряда. Были взяты два шара. Каждый шар помещался на заземленный металлический стержень. Расстояние от верхнего электрода до первого шара было 218 мм, а до второго—225 мм. В обычных

условиях в первый шар направилось 70 рядов из 74 разрядов, во второй—4. Когда второй шар был горячий, то в первый направилось 26 из 72 разрядов, а во второй—46 рядов. Температура воздуха на расстоянии 51 от шара была  $160^{\circ}$ .

Если нагретый подобным образом шар поместить под металлическую сетку (убрав объекты с сетки), особой избирательности разрядом того участка поверхности сетки, под которой помещается горячий шар, не замечается. Этот факт указывает на усиливающее влияние нагретого воздуха по линии сгущения поля.

Введение струи горячего воздуха определенной температуры в межэлектродное пространство вызывает перераспределение градиентов. Это обстоятельство и предопределяет избирательное свойство разряда.

Обнаруженное нами значительное влияние нагретых слоев воздуха на процесс избирательного разряда имеет большое значение для практического сооружения грозозащиты. В качестве иллюстрации можно привести довольно показательные



Рис. 2

опыт потери защитного свойства двумя стержневыми молниеотводами при наличии выхода «земли» струи горячего газа (рис. 3).

В реальных условиях вполне вероятны различные температурные режимы в воздушной среде. Известен факт уменьшения температуры и плотности воздуха по высоте.

В лаборатории легко можно было получить зигзаги и форму пути разряда желаемой формы путем создания в среде развития разряда соответствующих неоднородных температурных условий, что в отличие от методов управления разрядом, применявшихся нами в 1936 г., дает новое средство управления разрядом невидимыми факторами.

Практический вывод из наших исследований в этой части сводится к тому, что при проектировании



Рис. 1

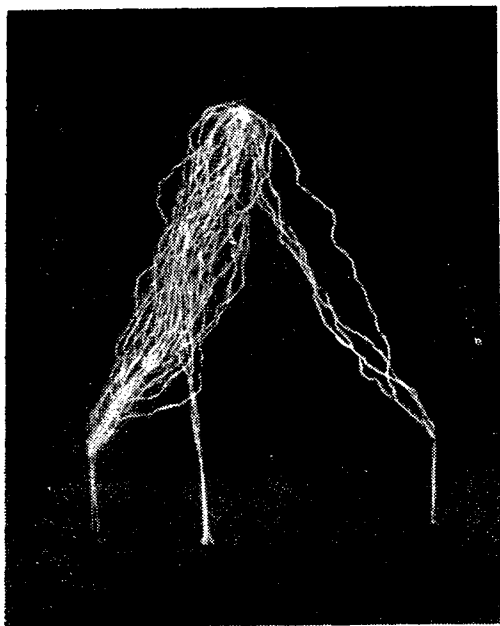


Рис. 3. Из 31 разряда от иглы (+), укрепленной в центре, в струю горячего газа и сетку попало три разряда. Высота иглы  $H = 372$  мм; высота стержней  $h_1 = h_2 = 80$  мм; расстояние между стержнями 290 мм. (При отсутствии струи горячего газа ни одного попадания.)

ровании гроозащитных устройств необходимо, помимо неоднородностей в проводимости различных включений (слоев) земли, учитывать возможные неоднородности нагрева воздуха над той местностью, где расположено защищаемое здание. Учету должны подлежать, например, места подъема масс более нагретого воздуха, горячего газа и т. п. Такой учет необходимо делать с целью выбора и установления рационального типа грозозащиты и расположения молниеотводов.

В определенной связи с температурой среды стоит фактор давления, обуславливающий соответствующую плотность среды. Исследованиями установлено, что развитие разряда в участках среды с разреженным воздухом происходит легче (в соответствии с законом Пашена).

Резюмируя описанные наблюдения, можно отметить, что температура и, отчасти, давление оказывают значительное влияние на траекторию развития разряда и его электродинамическое поле.

**Объемные заряды.** Для выяснения влияния на развитие искры ионизированных объемов в воздухе от постороннего источника создавались объемные заряды определенных знаков. Была также обследована в различных направлениях роль объемных зарядов на избирательность искрового разряда.

Многочисленные опыты с внесением струи заряженного воздуха в искровой промежуток показали, что в подобных условиях нельзя обнаружить свойство избирательности разрядом заряженного воздуха. Искровой разряд не устремляется к однозначно заряженной колонне воздуха. Установлено, что влияние объемных зарядов одного знака (в количестве примерно  $10^5$  ионов в  $\text{см}^3$ ) на путь искрового разряда незначительно.

К оценке избирательных свойств разряда можно

подойти еще другим путем, — выясняя влияние объемного заряда (в воздухе) одного знака на пробивную прочность промежутка. Оказывается, что если в промежуток ввести объемные заряды знака, одинакового со знаком источника напряжения, отмечается некоторое незначительное увеличение пробивной прочности промежутка. Когда знак введенных объемных зарядов был обратен, наблюдалось некоторое незначительное ослабление электрической прочности промежутка. В этих исследованиях применялся промежуток игла—плоскость с пробивным расстоянием порядка 200—300 мм.

Измерения не показали заметного изменения в величине максимального пробивного напряжения при наличии объемных зарядов и без них. Также нельзя было получить заметного изменения траектории разряда при подаче в промежуток струи заряженного воздуха. Условная экстраполяция этих фактов на масштаб молнии приводит к выводу, что определенное влияние на избирательность разряда объемных зарядов вероятно. В случае развития грозового разряда над примерно однородной по условиям проводимости землей, он с большей вероятностью изберет путь в воздухе в сторону скопления зарядов, обратных по знаку источнику напряжения. В таком виде можно говорить о влиянии объемных зарядов на путь разряда и, следовательно, на избирательные свойства разряда. Нужно только заметить, что эффект посторонних объемных зарядов на развитие разряда должен находиться в определенной количественной связи с обычными зарядами, образуемыми собственно разрядом. Исследования показывают, что число объемных зарядов, создаваемых самим разрядом, — значительно.

Далее, при анализе влияния отмеченных факторов на избирательную поражаемость нужно не забывать, что речь идет об идеализированных условиях, маловероятных в действительности. Объемные заряды у самой поверхности земли (чему придают особое значение некоторые исследователи), конечно, не могут служить фактором, определяющим наличие ионизированной колонны, на существование которой, особенно при грозе, влияет ряд атмосферных факторов. Наряду с выяснением роли объемных зарядов одного знака на электродинамическое поле разряда существенным является исследование воздействия на разряд одновременно находящихся в пространстве его развития зарядов обеих полярностей. Для этой цели была использована экранированная рентгеновская трубка на напряжение 25—30 кВ при токе накала 3,5 А и токе эмиссии около 5 мА. Пучок рентгеновских лучей подавался из отверстия для выхода лучей диаметром в 30 мм.

Ионизация при воздействии рентгеновских лучей происходит, в основном, под влиянием вторичного излучения. Несмотря на узкий пучок рентгеновских лучей, который нам удалось создать в лабораторных условиях, все же вторичное излучение охватывало заметный пространственный конус. Отсюда следует, что в подобных условиях нельзя ожидать выраженного влияния рентгеновских лучей на форму траектории искрового разряда.

При облучении промежутка рентгеновскими лучами отмечается незначительное снижение импульсной прочности промежутка игла—плоскость. Эффект ослабления прочности более заметен при разряде от источника положительной полярности и менее заметен при разряде от источника отрицательной полярности (влияние фотоэффекта). Любая ориентировка узкого пучка рентгеновских лучей в промежутке игла—плоскость не вызывает изменения траектории развития искрового разряда. В этом отношении получено полное подтверждение результатов преж-

них исследований, проведенных в лаборатории перенапряжений ВЭИ.

Отметим, что рассматриваемый здесь вопрос влияния объемных зарядов на путь разряда имеет существенный интерес с точки зрения улучшения молниевыводов. Возможно, что снабжение молниевыводов радиоактивными солями (как это предлагалось некоторыми авторами), дающими более мощные излучения, даст возможность увеличить эффект защиты. Окончательный анализ этого вопроса требует дополнительных исследований.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВЕ

### Статические заряды на ремнях трансмиссий

Н. Г. Дроздов и В. А. Смирнов

Московский энергетический институт им. Молотова

**ПРИ РАБОТЕ** трансмиссий наблюдается возникновение электростатических зарядов на ремнях. Такие заряды обладают часто весьма высокими потенциалами; если при этом значительна и плотность зарядов, то возможно образование мощных разрядов с ремней на окружающие заземленные части установок.

В некоторых производствах разряды с ремней влекут за собой порчу обрабатываемых материалов, но особенно большую опасность представляют они там, где наблюдается скопление пыли или легко воспламеняющихся паров и газов. В подобных условиях разряды могут вызвать пожары и взрывы, что и наблюдалось неоднократно в практике.

Обследование ремней и замеры, произведенные авторами на различных промышленных предприятиях с помощью электростатического вольтметра, а также и клидограммы показали, что потенциалы по отношению к земле доходят на некоторых ремнях до 30 кВ и выше, в то время как на других они достигают лишь десятков вольт. Это различие можно было, повидимому, объяснить разницей в нагрузке и скорости ремней.

Ввиду того, что в литературе почти нет опытных данных относительно статических зарядов на ремнях, было решено провести экспериментальное исследование для установления зависимости потенциалов статических зарядов на ремнях от скорости ремней и нагрузки, а также выяснить по возможности влияние влажности.

С этой целью в Московском энергетическом институте была осуществлена экспериментальная установка, на которой и проводились соответствующие испытания.

Установка состояла из шунтового двигателя и шунтового генератора, шкивы которых соеди-

нялись испытуемым ремнем (рис. 1). Измерения потенциалов на ремнях производились при помощи электростатического вольтметра. Одна клемма вольтметра заземлялась, а другая соединялась с щеткой, состоящей из группы тонких медных проводников (диаметр проводников 0,3 мм), зажатых между двумя металлическими пластинами.

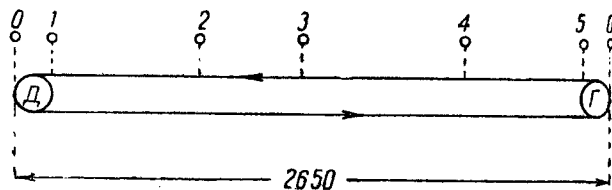


Рис. 1

Замеры потенциалов при снятии графиков их распределения по длине ремня производились всегда в указанных на рисунке точках (0, 1, 2, 3, 4 и 5). При других испытаниях — зависимость потенциала данной точки от скорости ремня и нагрузки — щетка занимала произвольное положение.

Для испытания был взят хлопчатобумажный ремень шириною в 95 мм.

Графики распределения потенциалов по длине ремня были сняты при постоянном числе оборотов генератора  $n = 1500$  об/мин, но при разных нагрузках ремня: при первом опыте ток в цепи двигателя был равен 5 А, при втором — ток в цепи двигателя соответствующей нагрузкой генератора был доведен до 10 А. Замеры производились на верхней наружной поверхности ремня.

Полученные графики (рис. 2) в общем сходны



с теми, которые снимались нами на заводах, однако они имеют и существенное отличие, а именно: потенциалы в точке  $O$  у генератора не равны нулю. Это объясняется тем, что шкив генератора был покрашен.

Сравнение полученных кривых говорит о довольно устойчивом характере распределения потенциалов по длине ремня и явно указывает на влияние нагрузки.

Для выяснения влияния нагрузки на потенциал  $\varphi$  в данном пункте ремня были сняты кривые  $\varphi = f(P_2)$ , где  $P_2$  — мощность генератора. Число оборотов генератора поддерживалось при опытах постоянным ( $n = 1200$ ), относительная влажность была  $h = 47\%$ .

Параллельно с определением потенциалов было сделано несколько замеров тока при помощи гальванометра, который включался вместо вольтметра.

Опыт показал (рис. 3) весьма сильное влияние

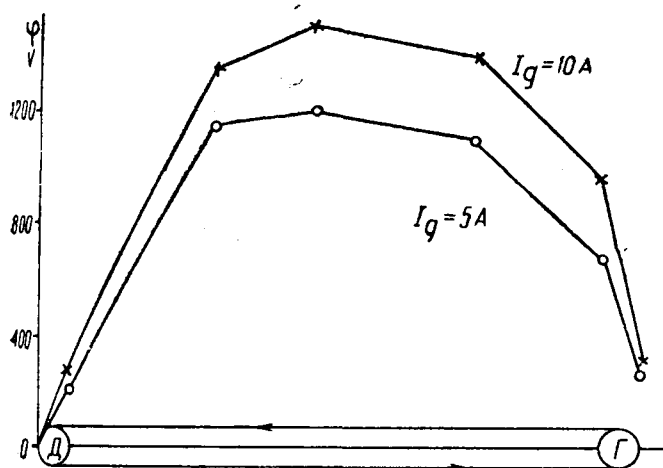


Рис. 2

нагрузки на величину потенциала, причем характерно, что скорость возрастания  $\varphi$  увеличивается с ростом нагрузки.

На рис. 4 приведены опытные кривые зависимости потенциала от скорости ремня. Опыт велся при холостом ходе генератора ( $h = 46\%$ ). Скорость сильно влияет на потенциал ремня, что связано с изменением его скольжения, подобно тому, как это имеет место и при изменениях нагрузки.

Эффект скорости был отмечен ранее другими исследователями<sup>1</sup>. Однако кривая, приведенная в указанной работе в отличие от данной на рис. 3, обращена выпуклостью вверх, следовательно, скорость нарастания  $\varphi$  постепенно уменьшается, тогда как у нас наблюдается обратное.

Проведенный повторно опыт подтвердил первоначально полученный характер зависимости. Отмеченное различие объясняется, повидимому, во-первых, тем, что указанная выше работа проводилась с кожаным ремнем, а во-вторых, там наблюдались потенциалы порядка десятков киловольт и, следовательно, возможно была значительная утечка и снижение потенциалов, а быть может происходило и коронирование ремня.

<sup>1</sup> Courroies de transmission comme générateurs de courant continu, RGE, XIX, p. 991.

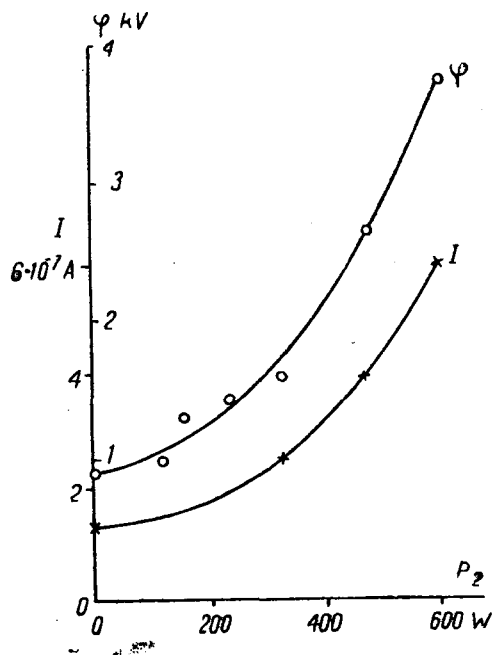


Рис. 3

Сопоставление рис. 3 и 4 обнаруживает, что токи не соответствуют потенциалам: например, току в  $2,5 \cdot 10^{-7}$  А соответствует на рис. 3 потенциал  $\varphi = 1600$  В, а на рис. 4  $\varphi = 980$  В. Для генерирования зарядов характерна та особенность, что расчет тока можно вести лишь на основании известного соотношения  $i = \frac{dQ}{dt}$ ; закон Ома для замкнутого проводящего контура, где имеется практически неограниченный запас свободных электрических зарядов, в данном случае неприменим. Сопоставляя случаи работы при  $P = 0$  и  $v \approx 9$  м/сек, находим:

по данным рис. 3:  $I = 1,3 \cdot 10^{-7}$  А;  $\varphi = 900$  В;

по данным рис. 4:  $I = 1 \cdot 10^{-7}$  А;  $\varphi = 520$  В.

Здесь при одинаковых условиях работы ремня

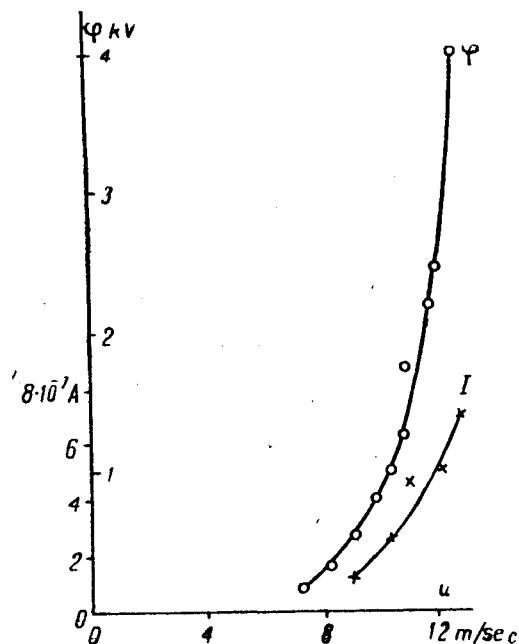


Рис. 4

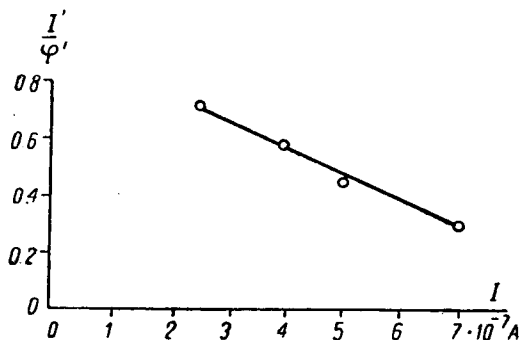


Рис. 5

потенциалы различны потому, что они замерены при различных положениях щетки на ремне. Токи в обоих случаях — с учетом эффекта утечки — практически одинаковы.

При изменениях нагрузки (рис. 3) ток вначале изменяется приблизительно пропорционально потенциалу, затем эта пропорциональность нарушается, — возрастание тока ускоряется. При изменениях скорости ток возрастает вначале быстрее, чем  $\varphi$ , но скорость возрастания тока постепенно уменьшается. Затем возрастание  $I$  становится более медленным, чем возрастание  $\varphi$ .

График рис. 5 показывает, что отношение  $\frac{I'}{\varphi'}$  для случая рис. 4 изменяется линейно:  $\varphi' = \frac{\varphi}{\varphi_0}$ , где  $\varphi_0 = 520 \text{ В}$ , а  $I' = \frac{I}{I_0}$ , где  $I_0 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ А}$ .

Сопоставляя кривые рис. 3 и 4, можно заключить, что при образовании зарядов важно не только трение ремня о шкив, обусловленное скольжением, но и усилие, передаваемое ремнем. Это объясняет наблюдавшееся нами иногда наличие весьма высоких потенциалов на ремнях заводских трансмиссий даже при небольших относительно скоростях ремней, — решающее значение в таких случаях имела, очевидно, нагрузка.

Для установления зависимости потенциалов от влажности окружающего ремень воздуха были проведены два испытания ремня: одно при влажности  $h = 46\%$  и другое при  $h = 69\%$ .

В обоих случаях ремень работал при  $n = 1240 \text{ об/мин}$  и  $P_2 = 280 \text{ Вт}$ .

Результаты этих испытаний представлены на рис. 6. Кривые  $I$  и  $I'$  соответствуют  $h = 46\%$ ,  $II$  и  $II'$  — работе при повышенной влажности.

Потенциалы измерялись на наружных поверхностях ремня.

Как видно из рисунка, повышение влажности приводит к весьма значительному снижению потенциалов, что подтверждается и проведенными ранее опытами<sup>2</sup>.

Увеличение влажности воздуха в помещениях

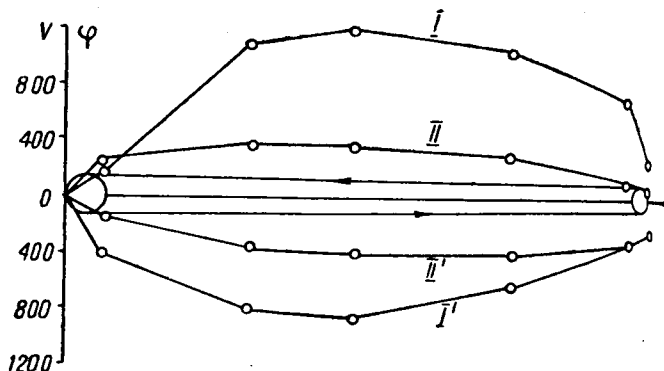


Рис. 6

для понижения потенциалов зарядов на ремнях является лишь профилактическим средством. Кроме того, это мероприятие далеко не всегда осуществимо в цехах фабрик и заводов.

Вышеизложенные наблюдения приводят к заключению, что потенциалы, ток, а следовательно, и мощность зарядов на ремнях весьма сильно зависят от скорости и нагрузки ремней.

Неизбежным следствием такого роста является усиление электрического поля около ремней, в результате чего могут возникать разряды значительной мощности. Это заключение указывает на необходимость устранения зарядов, не ограничиваясь профилактическими мероприятиями (увлажнение окружающего воздуха).

Проведенные нами на лабораторной установке эксперименты показали, что весьма хорошим средством для устранения зарядов на ремнях является смазывание их проводящим составом.

Очевидно, составными частями такой мази должны быть вещества, которые обеспечивали бы уменьшение скольжения ремня и достаточную поверхностную проводимость его, что являлось бы гарантией достаточно совершенного отвода зарядов с ремня через шкивы. Кроме того, в мазь должен быть включен ингредиент, предохраняющий ее от высыхания.

Указанным условиям в достаточной мере удовлетворяет смесь из канифоли, машинного (или трансформаторного) масла и сажи.

После покрытия ремня мазью его нужно протереть сажой.

Особое внимание необходимо обращать на состояние поверхности шкива: вскоре после обработки ремня шкивы должны быть очищены от прилипшей к ним мази. Покрытие ремней сажой следует периодически повторять 1—2 раза в месяц, попутно наблюдая за состоянием поверхности шкивов.

Вместо сажи может быть взят иной проводящий порошок, например графит. Весьма хорошие результаты дает также смазывание ремней смесью сажи (или графита) с глицерином.

При испытаниях обоих рекомендованных нами смазок было зафиксировано полное устранение зарядов.

<sup>2</sup> «Электричество» № 5, 1935. Н. Г. Дроздов, К вопросу о статических зарядах в цехах заводов.

## Расчет переходных электромагнитных процессов символическим методом<sup>1</sup>

Э. А. Меерович

Энергетический институт им. Кржижановского  
Академии наук СССР

### Задачи с одним независимым переменным

**1. Введение.** Расчет переходных процессов в цепях с сосредоточенными постоянными сводится к нахождению интегралов системы линейных ин-тер-дифференциальных уравнений, удовлетворяющих определенным начальным условиям. Если параметры цепи неизменны во времени, коэффициенты уравнения также постоянны.

Для решения этих уравнений уже давно начали применять так называемые операторные методы. Уже Лагранжем было введено символическое обозначение  $D, D^2$  взамен производных  $\frac{d}{dt}, \frac{d^2}{dt^2}$ ...

Этот способ обозначения был в дальнейшем развит Саqué (1864) и Boole (1865). К расчету процессов в электрических цепях начал применять операторный метод Хевисайд (1881 и позднее), работы которого в этом направлении достаточно известны. В дальнейшем эти работы получили значительное развитие в направлении того математического обоснования применяемых формул. Важное значение при этом имела работа Т. J. I'A. Bromwich (1914), показавшего, что решение задачи можно получить путем вычисления некоторого интеграла в комплексной плоскости вдоль замкнутого контура окружающего полюса подинтегральной функции. Этот интеграл Bromwich приводит к виду, который легко получается преобразованием интеграла Фурье, который рассматривал Makdonald (1902) и подобно исследовали Pincherle и Mellin.

Формулы операторного метода Хевисайда были тем же путем легко выведены и вместе с тем значительно обобщены, так как было найдено решение не только для случая системы, находящейся в начале переходного процесса в состоянии равновесия, но и для произвольных начальных условий.

Другое направление исследованию придал Carson. Он показал, что решение задачи удовлетворяет интегральному уравнению, в котором под знаком определенного интеграла стоит иско-мая функция, а вне его — операторное выраже-ние. Интегральное уравнение, к которому при-шел J. Carson, уже до того рассматривалось в ряде математических работ и известно как пре-образование Лапласа (Poincaré, Horn и в особен-ности Pincherle). P. Levy (1926) показал, что ин-тегральное уравнение, которое применил Carson, интеграл в комплексной плоскости, рассмотрен-

ный Bromwich, представляют собой взаимно до-полняющие друг друга части интеграла Фурье. Таким образом оба направления исследования сомкнулись.

В этот период в связи с упомянутыми работами сама сущность применяемого метода получила принципиальное изменение. В первоначальной ста-дии символические выражения, вводимые в рас-чет, означали действия или операции, которые необходимо произвести над рядом стоящими величинами. На новой стадии символические вы-ражения только представляют исследуемую фун-кцию в преобразованном с помощью преобразо-вания Лапласа виде. Все действия с функциями заменяются им соответствующими более просты-ми действиями с символическими выражениями. Только в окончательной стадии расчета совер-шается переход к самим исследуемым функциям. В соответствии с этим принципиальным измене-нием метод перестает быть по существу опера-торным и в дальнейшем обозначается как сим-волический метод. В таком новом виде этот метод применили в своих работах Doetsch и Bern-stein (1920), а в дальнейшем Van Der Pol (1929).

Приведенный обзор развития символического метода, конечно, не исчерпывает громадного числа работ, опубликованных по этому вопросу, он дан лишь для характеристики основного направления его развития.

Ниже рассматривается возможность радикально упростить вывод формул символического метода в связи с непосредственным применением преоб-разованного интеграла Фурье. Мы увидим в даль-нейшем, что такая интерпретация символического метода открывает перспективы значительным обобщениям и расширению пределов его приме-нения.

Изложение мы будем вести применительно к электромагнитным задачам. Однако, как это с очевидностью вытекает из самого характера проб-лемы, все выводы нетрудно распространить и на другие области расчета физических процессов.

В первой части будет рассмотрен наиболее простой случай — задача с одной независимой переменной. Это соответствует расчету процес-сов в цепях с сосредоточенными постоянными, при котором за независимое переменное прини-мается время  $t$ .

**2. Определения.** В дальнейшем принимается, если не оговорено, противное, — что все тракту-емые функции таковы, что условие абсолютной ин-тегрируемости удовлетворяется если не для самих функций  $f(t)$ , то по крайней мере для  $e^{-kt}f(t)$ , где  $k$  — некоторая действительная положитель-

<sup>1</sup> Настоящая работа была положена и обсуждена на засе-даниях кафедры теоретической электротехники Московского политехнического института связи (МЭИС), руководимой проф. И. А. Черданцевым.

ная величина, т. е. считаем, что  $\int_{-\infty}^{+\infty} |e^{-kt} f(t)| dt$  существует для любой рассматриваемой  $f(t)$ . Кроме того, будем считать, что любая рассматриваемая далее функция  $f(t)$  кусочно-гладкая и непрерывная в любом конечном интервале, а в точках разрыва имеет значение, равное среднему арифметическому предельных значений справа и слева:

$$f(t) = \frac{f(t+0) + f(t-0)}{2},$$

тогда  $e^{-kt} f(t)$  можно представить в таком виде:

$$\begin{aligned} e^{-kt} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-k\tau} f(\tau) e^{-j\omega(\tau-t)} d\tau = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega t} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) e^{-(k+j\omega)\tau} d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

или

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{(k+j\omega)t} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-(k+j\omega)\tau} f(\tau) d\tau = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{pt} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-p\tau} f(\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $k+j\omega$  обозначено через  $p$ . Произведя в (1.1) замену переменной, получим:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{k-j\infty}^{k+j\infty} e^{pt} dp \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-p\tau} f(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Введем дальше обозначение:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-p\tau} f(\tau) d\tau = F(p). \quad (3)$$

Таким образом  $F(p)$  представляет собой амплитуду гармоник при разложении некоторой функции  $f(t)$  в непрерывный спектр по комплексной частоте с помощью преобразованного интеграла Фурье. При подходящем выборе  $k$  существует однозначное соответствие между функциями  $F(p)$  и  $f(t)$  — для каждой заданной функции  $f(t)$  можно определить  $F(p)$ , и обратно.

Удобным является следующее обозначение, введенное Ван Дер Полем, именно, при наличии соотношения (3) связь между функцией  $f(t)$  и  $F(p)$  записывается так<sup>2</sup>:

$$f(t) \doteq F(p). \quad (3.1)$$

При заданной функции  $F(p)$  функция  $f(t)$  находится с помощью интеграла (2)

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{k-j\infty}^{k+j\infty} e^{pt} F(p) dp. \quad (2.1)$$

<sup>2</sup> Ван Дер Поль вводит это обозначение для соотношения:

$$F(p) = p \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt.$$

Эта формула принимается им и другими авторами за символическое выражение для функции  $f(t)$ .

Формула (2.1) представляет собой решение интегрального уравнения (3) и является, таким образом, другим выражением связи между функцией от  $t$  и функцией от  $p$ , связи, символически обозначаемой в виде (3.1). Идея символического метода сводится к тому, чтобы перевести решение задачи из области переменного  $t$  в область переменного  $p$ . Соотношения между символическими выражениями функции (3.1) при определенных операциях оказываются более простыми, чем отношения между самими функциями.

Нам для дальнейшего важно определить символическое выражение для единичной функции Хевисайда, имеющей следующий характер:

$$f(t) = 0 \text{ при } t < \tau_1;$$

$$f(t) = 1 \text{ при } t > \tau_1.$$

В  $\tau_1$  функция претерпевает скачок, равный единице.

Обозначим эту функцию через  $I(\tau_1)$ .

На основании (3) имеем:

$$I(\tau_1) \doteq \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-pt} I(\tau_1) dt = \frac{e^{-p\tau_1}}{p}.$$

Производная от функции  $I(\tau_1)$  равна нулю везде, кроме точки  $\tau_1$ , где она неограничена. Введя производной<sup>3</sup> от  $I(\tau_1)$  обозначение  $\delta(\tau_1)$ , определяем ее следующим свойством<sup>4</sup>:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \delta(\tau_1) dt = f(\tau_1);$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \delta^{(1)}(\tau_1) dt = -f^{(1)}(\tau_1);$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \delta^{(2)}(\tau_1) dt = f^{(2)}(\tau_1)$$

и т. д.

Функция аналогичная  $\delta(\tau_1)$  введена Кирхгофом. Она также применялась Хевисайдом и сравнительно недавно введена в квантовую механику Дираком.

На основании (5) и определения (3) мы получаем следующие символические выражения для функции  $\delta(\tau_1)$  и ее производных:

$$I^{(1)}(\tau_1) = \delta(\tau_1) \doteq e^{-p\tau_1};$$

$$I^{(2)}(\tau_1) = \delta^{(1)}(\tau_1) \doteq p e^{-p\tau_1};$$

$$I^{(3)}(\tau_1) = \delta^{(2)}(\tau_1) \doteq p^2 e^{-p\tau_1}.$$

.....

Получение символического выражения для производных от произвольной функции  $f(t)$  в интервалах, где она сама вместе со своими производными непрерывна и ограничена, может быть произведено путем простого дифференцирования под знаком интеграла в выражении (2).

При этом

$$f^{(n)}(t) \doteq p^n F(p).$$

<sup>3</sup> Операции дифференцирования различных порядков, производимые над функцией  $I(\tau_1)$ , могут быть определены ко формально — как действия, уничтожаемые интегрированием.

<sup>4</sup> В (5) принято, что функция  $f(t)$  непрерывна в  $\tau_1$ .

Рассмотрим вопрос о дифференцировании функции, обладающей в  $\tau_1$  точкой разрыва первого рода. Пусть скачок функции в  $\tau_1$  определяется выражением:

$$f(\tau_1 + 0) - f(\tau_1 - 0) = f(\tau_1).$$

Производные же этой функции в точке  $\tau_1$  справа и слева имеют одинаковые значения, т. е.  $f^{(n)}(\tau_1 + 0) - f^{(n)}(\tau_1 - 0) = 0$  для любого  $n$ .

Тогда разность  $\{f(t) - I(\tau_1)f_{\tau_1}\} = f(t)_{\text{cont}}$  представляет собой непрерывную функцию, для которой везде применимо соотношение (6). Производная любого порядка для разрывной функции запишется, очевидно, так:

$$f^{(n)}(t) = \{f(t) - I(\tau_1)f_{\tau_1}\}^{(n)} + \delta^{(n-1)}(\tau_1) \cdot f_{\tau_1}.$$

Обозначив  $\{f(t) - I(\tau_1)f_{\tau_1}\} \doteq F_{\text{cont}}(p)$ , получим на основании (5.1):

$$F(p) = F_{\text{cont}}(p) + f_{\tau_1} e^{-p\tau_1}$$

и далее получим, так же как и для непрерывной функции,

$$f^{(n)}(t) \doteq p^n F_{\text{cont}}(p) + p^n \frac{e^{-p\tau_1}}{p} = p^n F(p), \quad (6.1)$$

т. е. формула (6) применима также и для разрывной функции<sup>5</sup>. При этом мы можем заметить, что

$$F_{\text{cont}}(p) \doteq f_{\text{cont}}(t) \quad (6.2)$$

представляет символическое выражение для функции, у которой производные всех порядков слева и справа от  $\tau_1$  те же, что у функции  $f(t)$ . Иначе говоря, при необходимости исключить влияние скачка функции при  $t = \tau_1$  на производную, оставив последнюю на всем интервале  $\tau_1 < t < \tau_1$  неизменной, необходимо операцию дифференцирования проводить над  $f_{\text{cont}}(t)$  вместо  $f(t)$ .

Если в точке  $\tau_1$  обладает разрывом не только сама функция, но и некоторые из ее производных, то влияние этих разрывов на образование производных более высокого порядка можно учесть аналогичным путем. В дальнейшем нам понадобится учесть случаи, когда также интегралы функции претерпевают разрыв в  $\tau_1$ .

Если обозначить кратное интегрирование отрицательным индексом, то самым общим образом можно записать:

$$f^{(n)}(t) = \left\{ \dots \left\{ \left\{ f^{(-k)}(t) - f_{\tau_1}^{(-k)} I(\tau_1) \right\}^{(1)} - f_{\tau_1}^{(-k+1)} I(\tau_1) \right\}^{(1)} \dots \right\}^{(1)} - f_{\tau_1}^{(0)} I(\tau_1) \right\}^{(1)} \dots - f_{\tau_1}^{(n-1)} I(\tau_1) \right\}^{(1)} + \sum_{m=n-k}^{m=n-1} f_{\tau_1}^{(m)} I^{(n-m)}(\tau_1). \quad (6.3)$$

Здесь  $f_{\tau_1}^{(m)}$  означает величину скачка производной соответствующего порядка в  $\tau_1$ .

В фигурных скобках дифференцирование производится над непрерывными функциями. Влияние дифференцирования в точках разрывов учтено во втором члене, где под знаком суммы стоят функции  $\delta(\tau_1)$  различных порядков.

Заметим, что формула (6) верна и для этого общего случая.

<sup>5</sup> В распространенных в настоящее время выводах символического метода формула (6) принимается только для функций непрерывных при  $t = \tau_1$ ; как мы видим, у нас это ограничение отпадает.

Далее мы имеем обычный результат — символическое выражение для интеграла от функции определяется делением символического выражения функции на  $p$  в степени, соответствующей кратности интегрирования.

Мы не будем рассматривать вывод этой и других формул символического метода, которые легко получить и в которых результат мало отличается от известных формул символического исчисления, полученных на основе соотношения, приведенного в сноске 2.

3. Расчет в случае заданных начальных условий. Наиболее простым образом удастся применить формулы символического метода, когда расчет электромагнитного процесса сводится к решению интегро-дифференциального уравнения с одним неизвестным. Пусть задано, что процесс в цепи определяется дифференциальным уравнением такого вида:

$$a_n i^{(n)}(t) + a_{(n-1)} i^{(n-1)}(t) + \dots + a_0 i(t) + \dots a_{-k} i^{(-k)}(t) = u(t). \quad (7)$$

Здесь  $u(t)$  — напряжение, приложенное в момент  $t = \tau_1$ ;  $i$  — ток в одной из ветвей цепи. Через  $i^{(-n)}(t)$  обозначен  $n$ -кратный интеграл от  $i(t)$ ;  $a_i$  — коэффициент, зависящий от параметров цепи. Если  $u(t)$  — ограниченная функция от  $t$ , заданная на интервале  $\tau_1 \leq t \leq \infty$ , то  $i$  представляет собой непрерывную в этом интервале вместе со своими  $n-1$  производными функцию. Вообще говоря, уравнение должно удовлетворяться только для времени  $t \geq \tau_1$ .

Чтобы иметь возможность применить формулу (1.2), представить в виде интеграла Фурье, продолжим функции  $u$  и  $i$  влево так, чтобы уравнение (7) удовлетворялось и для  $t < \tau_1$ .

Наиболее простой способ продолжения заключается в выборе

$$\left. \begin{aligned} u &= 0 \\ i &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ для } t < \tau_1 \quad (7.1)$$

Значение образованной таким образом функции  $i(t)$  и ее  $n-1$  производных в точке  $\tau_1$  справа задано начальными условиями физической задачи. Значение тех же величин в точке  $\tau_1$  слева равно нулю. Применяя в дальнейшем представление

с помощью интеграла Фурье функции  $u(t)$  и функции  $i(t)$  с ее производными, мы тем самым придаем им в точке  $\tau_1$  значение, равное среднему арифметическому значению справа и слева.

При таком условии дифференциальное уравнение будет удовлетворено также и в точке  $\tau_1$ .

Однако это условие удовлетворится, только если в выражение производных не войдет бесконечно большое слагаемое, обусловленное дифференцированием в точке разрыва.

Воспользовавшись соображениями, аналогичными приведенным в связи с формулой (6.3), перепишем уравнение (7) в следующем виде:

$$a_n \left\{ i^{(n)} - \sum_{m=-k}^{m=n-1} i_{\tau_1}^{(m)} I^{(n-m)}(\tau_1) \right\} + a_{(n-1)} \left\{ i^{(n-1)}(t) - \sum_{m=-k}^{n-2} i_{\tau_1}^{(m)} I^{(n-1-m)}(\tau_1) \right\} + \dots + a_0 \left\{ i(t) - \sum_{m=-k}^{-1} i_{\tau_1}^{(m)} I^{(-m)}(\tau_1) \right\} + \dots + a_{-k} i^{(-k)}(t) = u(t). \quad (1)$$

Здесь  $i_{\tau_1}^{(m)}$  — значение  $m$ -й производной от  $i(t)$  в момент  $(\tau_1 + 0)$  определяется из начальных условий.

Уравнение (7.2) при учете (7.1) удовлетворяется для всего интервала времени от  $-\infty < t < +\infty$ , включая точку  $\tau_1$ .

Вычитаемые величины в фигурных скобках представляют собой  $\delta$ -функции различных порядков, и отличаются от нуля только в точке  $\tau_1$ . Производя вычитание, мы устраним влияние разрывов всех производных предыдущих порядков на последующие. Каждой фигурной скобке в точке  $\tau_1$  придаем значение, равное среднему арифметическому от своего значения справа и слева.

Для всех слагаемых выражения (7.2) применим преобразование (2), при этом учтем (5.1) и (6.1).

Собирая члены под общим знаком интеграла, получаем:

Здесь квадратные скобки символизируют обстоятельство, что в стоящих внутри них выражениях должны быть отброшены все члены, которых в виде сомножителя входит  $p$  в степени, меньшей нуля.

Выражение (7.5) представляет символическое решение дифференциального уравнения (7) с учетом заданных условий для искомой функции, ее производных и интегралов в момент  $\tau$  (значения при  $t=\tau_1$  справа). При этом предположено, что функция продолжена влево по (7.1). Скачок интегралов при  $t=\tau_1$  вызывает появление в (7.2) слагаемых вида функции  $\delta(\tau_1)$  и ее производных.

Для перехода от символического выражения к самой функции, удобно эти слагаемые выкинуть. Легко заметить, что их появление определяется первыми  $k$  членами в фигурных скобках.

Преобразование этих членов производим следующим образом:

$$\frac{1}{2\pi j} \int_{k-j\infty}^{k+j\infty} e^{pt} \left[ \{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 + \dots + a_{-k} p^{-k}\} I(p) - a_n \sum_{m=-k}^{m=n-1} i_{\tau_1}^{(m)} p^{n-m} \times \right. \\ \left. \times \frac{e^{-p\tau_1}}{p} - \dots - a_0 \frac{e^{-p\tau_1}}{p} - \sum_{m=-k}^{m=-1} i_{\tau_1}^{(m)} p^{-m} - \dots - a_{-k+1} \frac{e^{-p\tau_1}}{p} i_{\tau_1}^{(-k)} p - U(p) \right] dp. \quad (7.3)$$

$I(p)$  и  $U(p)$  — символические выражения для тока и напряжения. Выражение (7.3) дает в символической форме соотношение (7.2).

Для того чтобы (7.3) удовлетворялось, необходимо, чтобы квадратная скобка тождественно равнялась нулю, откуда после небольших перегруппировок получаем:

$$\frac{\left[ \frac{Z(p)}{p^{-r}} \right]}{Z(p)} = \frac{[Z(p) p^r]}{Z(p)} - p^r + p^r = \\ = \frac{[Z(p) p^r] - Z(p) p^r}{Z(p)} + p^r = - \frac{\{Z(p) p^r\}}{Z(p)} + p^r. \quad (7.4)$$

$$I(p) = \frac{U(p)}{Z(p)} + \frac{e^{-p\tau_1}}{Z(p)} \left\{ i_{\tau_1}^{(-k)} (a_n p^{n+k-1} + a_{n-1} p^{n+k-2} + \dots + a_0 p^{k-1} + \dots + a_{-k+1}) + \right. \\ \left. + i_{\tau_1}^{(-k+1)} (a_n p^{n+k-2} + a_{n-1} p^{n+k-3} + \dots + a_0 p^{k-2} + \dots + a_{-k+2}) + \dots + \right. \\ \left. + i_{\tau_1}^{(0)} (a_n p^{n-1} + a_{n-1} p^{n-2} + \dots + a_1) + \dots + i_{\tau_1}^{(n-1)} a_n \right\}. \quad (7.4)$$

Через  $Z(p)$  здесь обозначено выражение в фигурных скобках в (7.3).

Переписывая (7.4) в форме, предложенной Ван Дер Полем<sup>6</sup> и удобной для запоминания, получаем:

$$I(p) = \frac{U(p)}{Z(p)} + \frac{e^{-p\tau_1}}{Z(p)} \left\{ i_{\tau_1}^{(-k)} \left[ \frac{Z(p)}{p^{-k+1}} \right] + \right. \\ \left. + i_{\tau_1}^{(-k+1)} \left[ \frac{Z(p)}{p^{-k+2}} \right] + \dots + i_{\tau_1}^{(0)} \left[ \frac{Z(p)}{p} \right] + \right. \\ \left. + i_{\tau_1}^{(1)} \left[ \frac{Z(p)}{p^2} \right] + \dots + i_{\tau_1}^{(n-1)} \left[ \frac{Z(p)}{p^n} \right] \right\}. \quad (7.5)$$

Фигурная скобка указывает, что в заключенном в ней выражении отбрасываются все члены, держащие  $p$  в степени выше минус единицы.

Второе слагаемое в правой части (7.6) представляет символическое выражение для функции  $\delta^{(r)}(0)$ .

Преобразование, аналогичное (7.6), осуществляют при расчетах для первых  $k$  членов выражения (7.5) со значениями  $r$  от  $(k-1)$  до нуля.

Подстановка (7.5), после преобразований, приведенных в соответствии с (7.6), в интеграл (2) приводит к полному решению задачи.

Способы вычисления интеграла (2.1) многократно исследованы, поэтому мы на них подробно останавливаться не будем. Укажем только результат в наиболее простом и вместе с тем

<sup>6</sup> Ван Дер Поль рассматривал дифференциальное уравнение. Здесь же решение дано для интегро-дифференциального уравнения, поэтому в решение входят начальные условия для интегралов.





# Упрощенный метод вычисления токов к. з. и кривые фиктивного времени при автоматическом регулировании напряжения

Б. И. Розенберг и М. В. Костенко

Ленинград, Теплоэлектропроект

**СУЩЕСТВУЮЩИЕ** методы. В настоящее время в литературе опубликованы только два метода вычисления тока к. з., позволяющие учесть наличие автоматических регуляторов напряжения — метод переходных э. д. с. Вагнера и Райта [1] и метод step by step, предложенный Н. Н. Щедриным [2].

Метод переходных э. д. с., достаточно полно учитывая большое количество факторов, влияющих на ток к. з. в сложных сетях, требует вместе с тем чрезвычайно большого количества вычислений. Так, если его последовательно разобран под углом зрения трудоемкости, то можно видеть, что в тех случаях, когда автоматические регуляторы напряжения отсутствуют, путь вычисления тока к. з. в любой момент времени таков:

1. Вычисляются экстремальные, начальное  $E'$  и установившееся  $E_\infty$ , значения э. д. с. за переходным реактансом (переходных э. д. с.) для каждого из генераторов по формулам:

$$E'_m = \sqrt{(U_m \cos \varphi)^2 + (U_m \sin \varphi + I_m X'_{dm})^2}; \quad (1)$$

$$E'_{\infty m} = E_{dm} - (X_{dm} - X'_{dm}) I_{\infty m}, \quad (2)$$

где  $U_m$  и  $I_m$  — напряжение и ток до момента к. з. некоторого генератора  $m$ ;

$I_{\infty m}$  — значение тока, посылаемого этим генератором, полученное из расчетной схемы для установившегося режима;

$E_{dm}$  и  $X_{dm}$  — синхронные расчетные э. д. с. и реактанс этого генератора;

$X'_{dm}$  — переходный реактанс этого генератора.

2. Вычисляются постоянные времени затухания с учетом внешней сети

$$T'_{dm} = T_{om} \frac{X'_{dm} + X_{вн\ m}}{X_{dm} + X_{вн\ m}}, \quad (3)$$

где  $T_{om}$  — постоянная времени обмотки возбуждения генератора  $m$  при разомкнутой обмотке его статора;

$X_{вн\ m}$  — сопротивление внешней сети относительно генератора  $m$ . При этом все генераторы, кроме  $m$ , заменяются своими расчетными синхронными сопротивлениями и объединяются с местом к. з.

3. По вычисленным экстремальным значениям переходной э. д. с. и постоянной времени строится экспоненциальная кривая затухания  $E'_t = f(t)$  для каждого генератора (рис. 1) по формуле:

$$E'_t = E'_{\infty} + (E' - E'_{\infty}) e^{-\frac{t}{T'_{dm}}}. \quad (4)$$

4. Вычисляют ток к. з. в любой момент времени, для чего собирается расчетная схема, в ко-

торой генераторы заменены переходными сопротивлениями и переходными э. д. с., снятыми для этого момента с кривых  $E'_t = f(t)$ .

Таким образом даже при отсутствии регуляторов напряжения для построения кривой затухания тока к. з. этот метод оказывается весьма трудоемким.

При пользовании расчетным столом приходится пересоставлять схему минимум  $n$  раз, где  $n$  — число генераторов системы, а затем, пользуясь методом наложения, вычислить  $I_{\infty m}$  и  $X_{вн\ m}$  каждого генератора  $m$ , построить кривые затухания переходных э. д. с. генераторов и только после этого можно приступить к определению переходных токов к. з. Но при этом, так как удаленность генераторов от места к. з. и параметры их, вообще говоря, различны, различны также и э. д. с. Поэтому опять приходится обращаться к методу наложения и, пересоставив расчетную схему,  $n$  раз, получить токи во всех ветвях от единичного напряжения на каждом генераторе отдельно (остальные генераторы при этом объединяются с местом к. з.). После этого, суммируя токи от единичных напряжений, умноженные на соответствующие э. д. с., уже можно по точкам построить кривую затухания переходного тока к. з.

Если воспользоваться расчетным столом не представляется возможным, то трудоемкость этого метода значительно увеличивается из-за большого количества аналитических вычислений неизбежных при этих операциях.

При наличии в системе автоматических регуляторов, построение кривой затухания переходной э. д. с. еще больше усложняется. При к. з. и сопутствующей ему посадке напряжения в клеммах генератора  $m$  (рис. 2) приходит в действие механизм  $b$ , замыкающий контакт  $a$  в цепь возбуждения возбудителя, шунтирующий регуляторный реостат. При этом возрастает ток во-

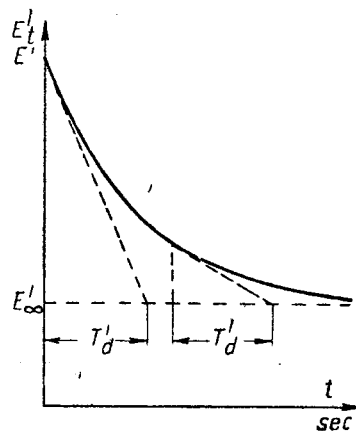


Рис. 1

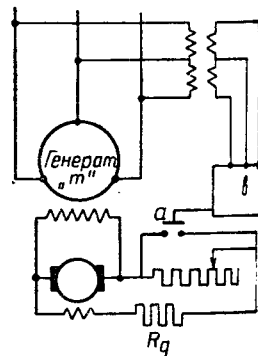


Рис. 2

буждения возбудителя, напряжение на его зажимах и ток возбуждения генератора.

Поэтому и установившееся значение  $E'_t$  изменится с течением времени от своего значения без регулятора  $E'_\infty$  до значения, соответствующего „потолочному“ возбуждению (или номинальному напряжению на зажимах генератора, если регулятору удастся установить таковое).

Методика вычисления  $E'_{\infty p}$  аналогична таковой для  $E'_\infty$ . Но здесь вопрос еще осложняется неопределенностью для сложной сети работы возбудителей; возбудители некоторых достаточно удаленных от места к. з. машин оказываются в состоянии установить на зажимах этих машин, спустя некоторое время после начала к. з., нормальное напряжение. Однако решить этот вопрос, вообще говоря, можно только методом последовательного приближения [2].

Если предположить, что экстраток цепи возбуждения генератора не влияет на напряжение возбудителя, то можно получить кривую нарастания  $E'_{\infty t} = f(t)$ . При этих допущениях она будет подобна кривой нарастания напряжения на клеммах возбудителя, которая может быть получена по опытным данным или построена по данным возбудителя методом последовательных интервалов.

После того как получены  $E'_d$ ,  $T'_d$  и  $E'_{\infty t} = f(t)$ , можно построить по методу Вэгнера кривую  $E'_t = f(t)$  для переходной э. д. с. каждой машины (рис. 3).

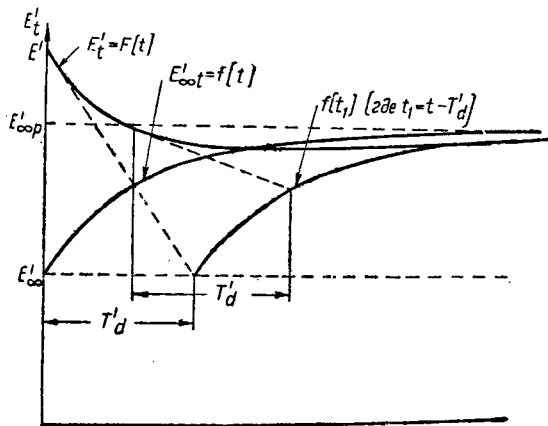


Рис. 3. Графическое построение кривой затухания переходной э. д. с. с учетом регуляторов по Вэгнеру

Кривая затухания тока к. з.  $I_{At} = f_1(t)$  может быть получена по точкам, вычисленным по расчетной схеме, в которой генераторы заменены переходными сопротивлениями и э. д. с.  $E'_t$ , взятыми с построенных согласно рис. 3 кривых.

Налагая на  $I'_{At}$  свободную сверхпереходную составляющую  $\Delta I'_{At} = f_2(t)$ , вычисленную без учета регуляторов, и суммируя в квадратуре ее с вычисленной отдельно апериодической составляющей  $I_{dt} = f_3(t)$ , получим, наконец, кривую затухания полного тока к. з.  $I_t = f(t)$ .

Для вычисления термического эффекта при некоторой выдержке времени  $t$  надо еще квадрати-

ровать и планиметрировать полученную кривую  $I_t^2 = f^2(t)$  в пределах от 0 до  $t$ .

Метод этот, как видно из вышеизложенного, достаточно полно учитывает индивидуальные особенности схемы и обычно дает весьма правильные результаты. Однако его чрезвычайная трудоемкость и необходимость строить кривую затухания тока к. з. каждый раз по точкам делает его во многих случаях мало пригодным для технических расчетов.

Метод step by step, предложенный Щедриным, еще более точно учитывает все индивидуальные параметры машин и конфигурации схем. Но кривая изменения тока  $I_{At} = f(t)$  в нем получается как кривая, найденная методом последовательных интервалов. Это обстоятельство делает его в большинстве случаев не менее трудоемким, чем метод переходных э. д. с.

Поэтому методы step by step и переходных э. д. с. могут найти себе применение, как весьма точные для анализа аварии в существующей системе, в которой параметры машин и сети неизменны и известны. Для проектных же организаций, когда приходится иметь дело с рядом вариантов схемы и места к. з., они уже становятся практически непригодными в силу своей трудоемкости.

В мировой практике при отсутствии автоматических регуляторов напряжения нашли себе широкое применение различные упрощенные методы расчета, менее полно учитывающие отдельные факторы, но зато в значительной степени облегчающие вычисления. Однако все эти упрощенные методы до сих пор не были развиты на случай, когда машины снабжены автоматическими регуляторами напряжения. В то же время отношение установившегося тока в месте к. з. с учетом регуляторов к таковому без регуляторов достигает

иногда  $\frac{I'_{\infty p}}{I'_{\infty}} \approx 1,5$ . Поэтому учет регуляторов,

широко распространенных на практике, при достаточно большой выдержке времени может привести к преуменьшению вычисленного термического эффекта в  $1,5^2 = 2,25$  раза против истинного. Преуменьшение же в 1,5—1,6 раза (на 20—30% в сечении провода) оказывается обычным. Такие погрешности, да еще в сторону преуменьшения, очевидно, недопустимы. Таким образом возникает задача о расширении одного из существующих упрощенных методов расчета тока к. з. на системы, имеющие автоматическое регулирование напряжения. Данная работа решает этот вопрос для места к. з. в отношении метода трех точек ( $I''$ ,  $I'$  и  $I_\infty$ ).

**Принципы построения кривых спада тока к. з.** Предложенный Ленинградской комиссией по разработке руководящих указаний для вычисления токов к. з. метод трех точек может быть в несколько модифицированном виде применен для построения кривых  $I_{At} = f(t)$  с учетом регуляторов.

В настоящей работе показана возможность такого развития метода трех точек только для расчетов токов к. з., предназначенных для выбора высоковольтной аппаратуры и токоведущих частей.

Так как выбор аппаратуры должен производиться для наиболее тяжелых условий, то предпосылками, принятыми при дальнейших построениях, являются: 1) полное возбуждение машин в момент, предшествовавший к. з.; 2) наличие автоматических регуляторов напряжения на всех машинах.

Первая предпосылка является обычной при выборе высоковольтной аппаратуры, вторая — оправдывается тем, что автоматический регулятор напряжения является аппаратом, который может быть установлен в любое время, и, следовательно, если он даже на некоторых машинах и не стоит, нет гарантии, что он не будет установлен в дальнейшем.

При наличии указанных предпосылок выяснилась возможность определить величину тока  $I_{At}$  как функцию трех параметров —  $I''$ ,  $I'$  и  $I_{\infty p}$ , где  $I''$  — начальное действующее значение сверхпереходного тока;  $I'$  — то же переходного тока;  $I_{\infty p}$  — установившийся ток к. з. с учетом регуляторов.

$I_{At}$  определяется уравнением:

$$I_{At} = (I'' - I') \sigma_t'' + I_{\infty p} \alpha_t', \quad (5)$$

где  $\sigma_t''$  и  $\alpha_t'$  — коэффициенты затухания, определяемые по кривым рис. 10, данного ниже.

При построении этих кривых принят ряд допущений, аналогичных принятым при построении кривых метода трех точек.

Дополнительным допущением, связанным только с учетом регуляторов, является выбор некоторой средней кривой нарастания напряжения на возбuditеле при работе регулятора.

Ниже приводится краткий анализ этих допущений в условиях работы машин с автоматическим регулированием напряжения.

**Нахождение тока  $I_{At}$  вне зависимости от конфигурации сети.** При одних и тех же экстремальных значениях тока к. з. характер затухания переходного процесса, вообще говоря, зависит от расположения генераторов и места к. з. в системе.

Однако могут быть найдены некоторые предельные схемы, дающие предельные положения кривой затухания тока при заданных экстремальных значениях тока к. з.

Характер кривой затухания тока определяется в основном экстремальными значениями  $I'$  и  $I_{\infty p}$ .

Зависимость их отношения от  $X_{вн}$   $\left[ \beta_p' = \frac{I'}{I_{\infty p}} = f(X_{вн}) \right]$  для элементарной схемы представлена на рис. 4 (кривая 1).

Точка  $(\beta_p'_{max}; X_{вн}=0)$  этой кривой соответствует к. з. на зажимах машины. Точка  $(\beta_p'_{min}; X_{вн}=X_{кр})$  соответствует к. з. за таким по терминологии Н. Н. Щедрина [2] критическим внешним сопротивлением  $X_{кр}$ , при котором регулятор достигает своего «потолочного» напряжения, но одновременно с этим остаточное напряжение на зажимах машины достигает своего нормального значения.

Точка  $(\beta_p' = 1; X_{вн} = X_n + X_{внA})$  соответствует бесконечной удаленности места к. з. (затухание отсутствует).

Между этими точками функция  $\beta_p' = f(X_{вн})$  изменяется монотонно.

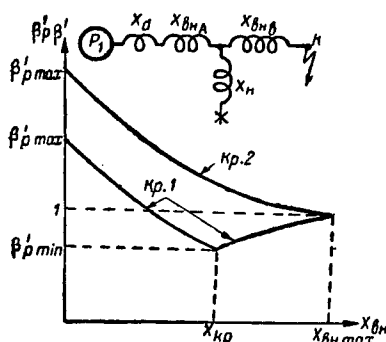


Рис. 4. Кривая 1 — зависимость

$$\beta_p' = \frac{I'}{I_{\infty p}} = f(X_{вн});$$

$$2 - \beta_p' = \frac{I'}{I_{\infty}} = f_1(X_{вн}),$$

где

$$X_{вн} = X_{внA} + \frac{X_n X_{внB}}{X_n + X_{внB}}.$$

Для сравнения на том же рис. 4 приведена кривая 2, соответствующая машине без регулятора напряжения. Она имеет две характерных точки:  $\beta_p'_{max}$ ;  $X_{вн} = 0$  и  $\beta_p' = 1$ ;  $X_{вн} = X_n + X_{внA}$ . Поэтому при отсутствии регуляторов напряжения для заданного отношения  $\beta_p'$  возможны только две предельных схемы: 1) полная симметрия, рис. 5, а; 2) максимальная асимметрия, рис. 5, б, полученная из сочетания схем, соответствующих  $\beta_p'_{max}$  и  $\beta_p' = 1,0$ . Кривые затухания тока к. з. в месте к. з. для всех остальных схем будут занимать промежуточное положение между кривыми затухания схем рис. 5. Это объясняется тем, что при полной симметрии схемы ток к. з. затухает наиболее медленно, а при максимальной асимметрии он затухает наиболее быстро (по закону к. з. на зажимах машины).

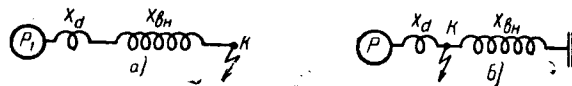


Рис. 5.

а — полная симметрия схемы; б — максимальная асимметрия (шилы ∞ мощности)

В случае, если машины снабжены регуляторами напряжения, так как зависимость  $\beta_p' = f(X_{вн})$  имеет три характерных точки, возможны следующие предельные схемы (рис. 6): а) симметрия с потолочным возбуждением; б) симметрия с номинальным напряжением; в) асимметрия с сетью (комбинация из  $\beta_p'_{max}$  и  $\beta_p' = 1,0$ ); г) асимметрия с сетью (комбинация из  $\beta_p'_{min}$  и  $\beta_p' = 1,0$ ); д) максимальная асимметрия (комбинация из  $\beta_p'_{max}$  и  $\beta_p'_{min}$ ).

Если точка к. з. рассекает схему на лучи, переход от одной из этих схем к другой при заданном  $\beta_p'$  происходит монотонно за счет перераспределения мощностей, составляющих схему лучей. Поэтому кривые затухания всех промежуточных

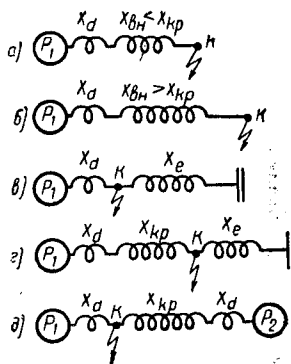


Рис. 6.]

а — симметрия с потолочным возбуждением; б — симметрия с номинальным напряжением; в — асимметрия с сетью (из  $\beta_p'_{max}$  и  $\beta_p' = 1$ ); г — асимметрия с сетью (из  $\beta_p'_{min}$  и  $\beta_p' = 1$ ); д — максимальная асимметрия (из  $\beta_p'_{max}$  и  $\beta_p'_{min}$ )

схем должны лежать между таковыми для соответствующей пары предельных схем рис. 6.

Таким образом для двух генераторов схемы, приведенные на рис. 6, исчерпывают все предельные случаи (пока при условии, что точка к. з. рассекает схему на лучи). В случае схемы, состоящей из трех и более лучей, применяя указанные рассуждения последовательно к парам лучей, можно обобщить это положение и для любого числа их.

Случаи, если точка к. з. не рассекает схему на лучи (рис. 7), по характеру затухания приближаются по мере роста  $X_y$  (реактивности от узла

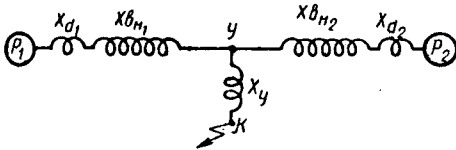


Рис. 7

к месту к. з.) к симметричной схеме. Но так как внешняя относительно машины реактивность сети будет все же меньше, чем для симметричной схемы, при том же  $\beta'_p$ , то меньше будет  $T'_d$ . Следовательно, ток к. з. для таких схем будет затухать медленнее, чем в соответствующей рассеченной схеме, и быстрее, чем в симметричной схеме.

Таким образом схемы рис. 6 практически являются предельными среди всех возможных, при заданном потолке возбуждения, схем, и метод трех точек можно обобщить на системы с регуляторами напряжения следующим путем: 1) построить кривые затухания тока к. з. для предельных схем при разных экстремальных его значениях; 2) построить по ним средние кривые для этих значений тока к. з.

Погрешности от установления общего закона затухания тока, не зависящего от схемы, будут, таким образом, сведены к минимуму, и задача

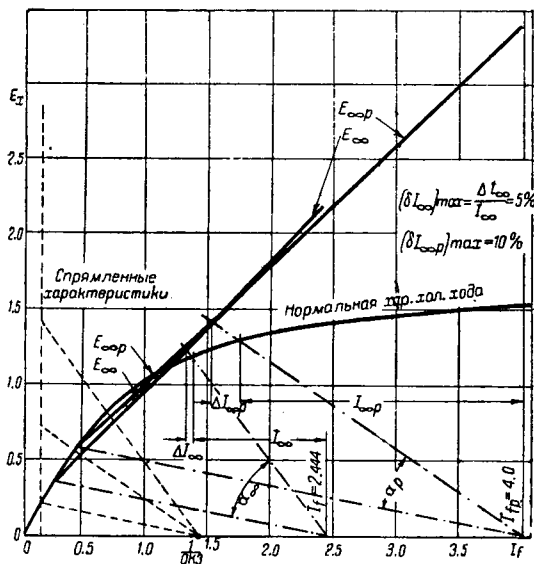


Рис. 8. Предельные положения луча Рюденберга для установившегося тока к. з. с учетом и без учета регуляторов. Расчетная э. д. с.  $E_\infty = 0,8 I_f + 0,2$ . Зоны положения луча Рюденберга с учетом регуляторов —  $\alpha_p$ ; без учета —  $\alpha_\infty$

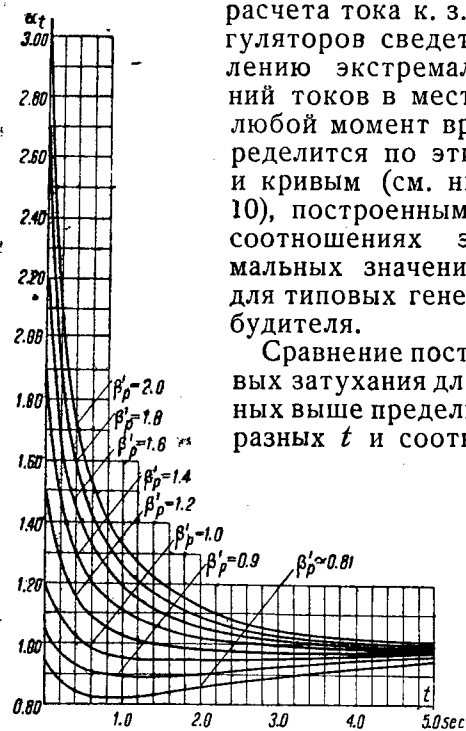


Рис. 9. Метод ( $I'$ ,  $I_\infty$ ). Кривые затухания  $\alpha_t = f(t)$  для разных  $\beta'_p = \frac{I'}{I_\infty}$

$I'$  и  $I_\infty$  показало, что погрешность в токе от этого допущения для параметров типовых генератора и возбудителя достигает максимума при  $\beta'_p = 1,0$  и  $t = 1,5$  sec и не превосходит  $\pm 6\%$ .

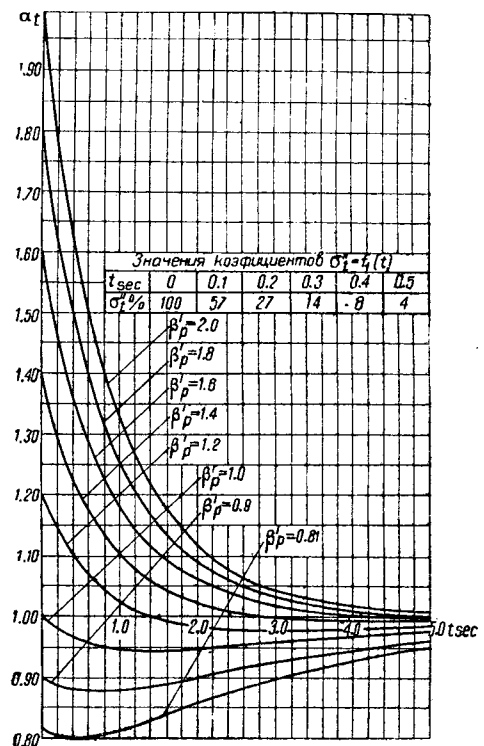


Рис. 10. Метод  $I''$ ,  $I'$ ,  $I_\infty$ . Кривые затухания  $\alpha_t = f(t)$  для разных  $\beta'_p = \frac{I'}{I_\infty}$

**Нахождение тока  $I_{At}$  вне зависимости от индивидуальных параметров генераторов и возбудителей.** Влияние индивидуальных параметров генераторов на экстремальные значения тока к. з. учитывается автоматически при вычислении этих токов.

Поэтому остается неучтенным только влияние отличных от принятых как типовые индивидуальных параметров на характер процесса затухания тока к. з. между экстремальными его значениями. К числу их относится прежде всего  $T_0$ , так как влияние остальных невелико. При отсутствии регуляторов погрешность от этого не выходит за пределы  $-11\%$  и  $+15\%$ . При наличии их указанная погрешность будет еще меньше вследствие уменьшения переходной составляющей тока к. з. по отношению к установившемуся току (с учетом регуляторов).

Индивидуальные параметры возбудителя при вычислении  $I_{\infty p}$  также учитываются полностью. Неучтенными остаются отличия индивидуальных кривых нарастания напряжения от кривой, принятой в качестве типовой. Анализ возможных погрешностей от этого для нормальной серии машин показал, что соответствующим подбором средней кривой можно добиться сравнительно небольших погрешностей.

**Нахождение тока  $I_{At}$  вне зависимости от места расположения нагрузки.** Приводимые ниже кривые построены в предположении, что нагрузка приключена к зажимам генератора и по мощности соответствует номинальной мощности генератора. Анализ показал, что расположение нагрузки при заданном соотношении экстремальных значений тока к. з., определенных в соответствии с правильным расположением и величиной нагрузки, практически не влияет на процесс затухания тока в месте к. з.

**Нахождение тока  $I_{At}$  при несимметричных к. з.** Лимитирующим фактором при к. з. для устойчивости параллельной работы генераторов, а также устойчивости работы моторов, является не суммарное остаточное напряжение, а его составляющая прямой последовательности. Поэтому надо считать правильным, чтобы устройство, управляющее работой регулятора, либо питалось от фильтра напряжения прямой последовательности, либо само являлось бы таким фильтром.

Для регуляторов типа Тириля это означает несомненную необходимость установки фильтра прямой последовательности, для регулятора ХЭМЗ, имеющего моментный мотор, до известной степени сглаживающий влияние несимметрии напряжений, необходимо проанализировать указанный вопрос, однако установка фильтра и здесь представляется все же целесообразной.

При соблюдении условия о том, что регулятор реагирует на изменение напряжения прямой последовательности, построенные кривые вполне справедливы и для несимметричных к. з.

**Спрямление характеристики холостого хода при вычислении  $I_{\infty p}$  и  $I_{\infty}$ .** Для оценки и сравнения погрешностей от спрямления характеристики холостого хода выполнено построение Рюдена-берга для предельных случаев (рис. 8).

Максимальная погрешность в определении  $I_{\infty}$  получается при бесконечно удаленной точке к. з.

и, если полная нагрузка приключена к зажимам генератора ( $X_{\text{вн}} = X_n = 1,2$ ), она не превосходит  $+5\%$ .

При определении возможной погрешности от спрямления характеристики холостого хода в величине  $I_{\infty p}$  надо принимать во внимание, что, начиная с некоторого достаточно большого внешнего сопротивления, на зажимах генератора устанавливается нормальное напряжение, и установившийся ток  $I_{\infty p}$  при этом определится в виде  $I_{\infty p} = \frac{1}{X_{\text{вн}}}$ .

Поэтому максимальная погрешность в определении  $I_{\infty p}$  получается в случае, если  $X_{\text{вн}} = X_n$  (рис. 4) и не превосходит  $10\%$  в сторону завышения для типового генератора.

**Методика и результаты построения кривых затухания токов к. з.** В результате анализа, приведенного вкратце выше, видно, что хотя изложенный метод и не дает полного учета всех факторов, влияющих на процесс затухания, однако для места к. з. в расчетах проектного характера и других, в которых опубликованные методы становятся непригодными в силу своей трудоемкости, предлагаемый метод дает приемлемую для практики точность.

Кроме того, практически ту же точность, что и метод трех точек, дает также и метод двух точек ( $I'$ ,  $I_{\infty p}$ ), который, в частности, значительно упрощает построение и пользование кривыми фиктивного времени, так как тогда они могут быть построены в функции времени и только одного параметра ( $\beta'_p = \frac{I'}{I_{\infty p}}$ ), а для  $I''$  при этом принимается некоторое среднее значение. Для метода трех точек периодическая составляющая тока к. з. в любой момент времени выражается в виде:

$$I_{At} = (I'' - I') \sigma_t'' + I_{\infty p} \alpha_t'.$$

Для метода ( $I'$ ,  $I_{\infty p}$ )

$$I_{At} = I_{\infty p} \alpha_t,$$

где  $\sigma_t''$  — коэффициенты затухания свободной сверхпереходной составляющей, практически совпадающие с таковыми без регуляторов (так как влияние регуляторов на сверхпереходную составляющую не учитывается);

$\alpha_t'$  и  $\alpha_t$  — коэффициенты затухания соответствующих переходного тока и периодической составляющей полного тока к. з., зависящих от времени и параметра

$$\beta'_p = \frac{I'}{I_{\infty p}}.$$

**Математическое выражение графического построения Вагнера.** Пусть даны  $E'$ ,  $E_{\infty}$ ,  $E'_{\infty p}$  и кривая  $E'_{\infty t} = f(t)$ . Из рис. 3 видно непосредственно, что

$$F'(t) = \frac{F(t) - f(t_1 + T')}{T'},$$

где  $t_1 = t - T'$ , или

$$F'(t) + \frac{1}{T'} F(t) - \frac{1}{T'} f(t) = 0.$$

Подстановкой  $F(t) = UV$  и интегрированием получившегося уравнения нетрудно получить

$$F(t) = \frac{1}{T'} e^{-\frac{t}{T'}} \int_0^t e^{\frac{t'}{T'}} f(t') dt' + ce^{-\frac{t}{T'}}. \quad (7)$$

Постоянная интегрирования  $c$  определяется из условия, что при  $t=0$ ,  $F(0) = E'$

$$c = F(0) - \frac{1}{T'} \left\{ \int_0^t e^{\frac{t'}{T'}} f(t') dt' \right\}_{t=0}. \quad (8)$$

Подстановка (8) в (7) дает выражение для кривой затухания переходного тока (или э. д. с.):

$$F(t) = F(0) e^{-\frac{t}{T'}} + \frac{e^{-\frac{t}{T'}}}{T'} \int_0^t e^{\frac{t'}{T'}} f(t') dt'. \quad (9)$$

**Параметры, принятые при построении кривых.** Построение кривых выполнено для типового турбогенератора с нагрузкой, приключенной к зажимам генератора и по мощности равной номинальной мощности его.

Потолочное напряжение на зажимах возбудителя, отнесенное к напряжению на них при холостом ходе генератора, принято  $U_{fp} = 4,0$ . Напряжение при номинальной нагрузке генератора в тех же единицах обозначено  $U_f$ . В качестве кривой нарастания напряжения на зажимах возбудителя принята экспоненциальная функция (независимо от достижения потолка) с начальным значением  $U_f$  и с таким конечным значением  $U_{fp}$ , при котором достигается потолок или обеспечивается нормальное напряжение на зажимах генератора.

Таким образом кривая нарастания напряжения

$$U_{ft} = U_{fp} - (U_{fp} - U_f) e^{-\frac{t}{T_v}}. \quad (10)$$

Постоянная времени кривой нарастания напряжения принята  $T_v = 0,64$ .

Сверхпереходный реактанс турбогенератора прямой последовательности  $X_d'' = 0,12$ . Переходный —  $X_d' = 0,2$ . Отношение тока к. з. на зажимах генератора при возбуждении холостого хода к номинальному току  $окз = 0,7$ . Режим работы, предшествующий моменту к. з., —  $U_* = 1,0$ ;  $I_* = 1,0$ ;  $\cos \varphi = 0,8$ . Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора  $T_0 = 7$  sec. Постоянная времени затухания свободной сверхпереходной составляющей для метода ( $I'$ ,  $I_{\infty p}$ ) принята приближенно

$$T'' = \frac{1}{8} T'.$$

Начальные значения э. д. с. сверхпереходного и переходного режимов вычислены по формулам:

$$E_d'' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I X_d'')^2} = 1,075, \quad (11)$$

$$E_d' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I X_d')^2} = 1,13. \quad (12)$$

Возбуждение машины, соответствующее моменту к. з., определено из соотношения:

$$U_f = I_f = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + \left( U \sin \varphi + \frac{1,24}{окз} I \right)^2} = 2,444. \quad (13)$$

Значение расчетной синхронной э. д. с. установившегося режима вычислено по формуле:

$$E_d = 0,8 I_f + 0,2 = 2,16. \quad (14)$$

То же, но при потолочном возбуждении  $U_{fp} = 4,0$ ,

$$E_{dp} = 0,8 I_f + 0,2 = 3,4. \quad (15)$$

Синхронный расчетный реактанс установившегося режима

$$X_d = \frac{E_d}{окз \cdot I_f} = 1,26. \quad (16)$$

То же, но при потолочном возбуждении

$$X_{dp} = \frac{E_{dp}}{окз \cdot I_{fp}} = 1,215. \quad (17)$$

Параметры нагрузки приняты следующие: реактанс и э. д. с., соответствующие переходному и установившемуся режимам тока к. з.  $X_n = 1,2$ ;  $E_n = 0$ . При сверхпереходном режиме, аналогично принятому при построении кривых без регуляторов, нагрузка предполагается отсеченной. Постоянные времени вычислены в предположении, что вся нагрузка приключена к зажимам генератора.

Для упрощения вычислений типовой турбогенератор объединен с нагрузкой в эквивалентный генератор, параметры которого таковы: сверхпереходный режим  $X'' = 0,12$ ,  $E'' = 1,075$ ; переходный —  $X' = 0,171$ ,  $E' = 0,97$ ; установившийся режим при потолочном возбуждении  $X_p = 0,603$ ;  $E_p = 1,69$ . Постоянная времени обмотки возбуждения эквивалентного генератора при разомкнутой обмотке его статора

$$T_s = T_0 \frac{X_d' + X_n}{X_d + X_n} = 4,05 \text{ sec}. \quad (18)$$

**Элементарная схема.** Из уравнения (10) следует, что при принятых допущениях

$$I'_{\infty t} = I_{\infty p} - (I_{\infty p} - I_{\infty}) e^{-\frac{t}{T_v}}. \quad (19)$$

Подстановка (19) в (9) при  $I'_{At} = F(t)$  дает:

$$I'_{At} = I' e^{-\frac{t}{T'}} + \frac{e^{-\frac{t}{T'}}}{T'} \int_0^t e^{\frac{t'}{T'}} [I_{\infty p} - (I_{\infty p} - I_{\infty}) e^{-\frac{t'}{T_v}}] dt'.$$

Выполняя необходимые действия и принимая во внимание, что  $I_{At} = I'_{At} + (I'' - I') e^{-\frac{t}{T''}}$ , нетрудно получить выражение для кривой затухания периодической составляющей полного тока к. з.  $i_t$  и кривой переходного тока  $i'_t$  в виде:

$$\left. \begin{aligned} i_t &= 1 + i'' e^{-\frac{t}{T''}} + i_v e^{-\frac{t}{T_v}} + i' e^{-\frac{t}{T'}}; \\ i'_t &= 1 + i_v e^{-\frac{t}{T_v}} + i' e^{-\frac{t}{T'}}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где

$$\left. \begin{aligned} i_t &= \frac{I_{At}}{I_{\infty p}}; & i'_t &= \frac{I'_{At}}{I_{\infty p}}; & i'' &= \frac{I'' - I'}{I_{\infty p}}; \\ i_v &= \frac{(I_{\infty p} - I_{\infty}) T_v}{I_{\infty p} (T' - T_v)}; & i' &= \frac{I' - I_{\infty p}}{I_{\infty p}} - i_v. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

**Кривые затухания для предельных схем.** Если возбудитель достигает потолка, то  $I_{\infty p}$  определяется из соотношения:

$$I_{\infty p1} = \frac{E_p}{X_p + X_{en1}}.$$

Если напряжение на зажимах генератора благодаря регулятору достигает своего нормального значения

$$I_{\infty p2} = \frac{1}{X_{en2}}.$$

Когда это происходит одновременно, то  $I_{\infty p1} = I_{\infty p2}$  и  $X_{кр} = X_{вн1} = X_{вн2}$  определится из уравнения:

$$\frac{E_p}{X_p + X_{кр}} = \frac{1}{X_{кр}},$$

откуда

$$X_{кр} = \frac{X_p}{E_p - 1} = 0,874. \quad (22)$$

В каждой из предельных схем (рис. 6) величины, входящие в формулы (20) и (21), однозначно выражаются через параметры типовых машин и некоторый характерный для схемы параметр.

Эти уравнения для каждой предельной схемы решены относительно  $\beta'_p$ . Затем вычислены при разных  $\beta'_p$  значения  $T'$  и по формуле (21) значения  $i', i''$  и  $i_v$ . Далее по формуле (20) определены коэффициенты затухания  $\alpha_t$  и  $\alpha'_t$  для разных  $\beta'_p$  и  $t$  для каждой из схем рис. 6.

**Получение средних кривых затухания.** Средние коэффициенты затухания получены для различных  $\beta'_p$  и  $t$  как средние арифметические между наибольшими и наименьшими коэффициентами затухания, вычисленными для этих  $\beta'_p$  и  $t$  для предельных схем. Полученные в результате вычислений кривые приведены на рис. 9 и 10. Приведенные на рис. 10 средние значения  $\sigma''$  заимствованы из статьи «Вычисление токов к. з. методом двух и трех точек» [3].

При отсутствии автоматического регулирования напряжения, как было показано в статье «Вычисление токов к. з. методом двух и трех точек» [3], кривые коэффициентов затухания в методе трех точек совпадают для типовых турбо- и гидрогенераторов. У нормальных возбуждателей гидрогенераторов при наличии автоматического регулирования напряжения отношение «потолочного» напряжения к напряжению при полной нагрузке достаточно близко к таковому же у турбогенераторов. Что касается кривых нарастания напряжения на зажимах возбуждателей, то отсутствие достаточных данных не позволяет произвести подробного анализа, однако можно ожидать, что погрешности и здесь не выйдут из допустимых пределов.

**Построение кривых фиктивного времени.** В качестве расчетного тока при построении кривых фиктивного времени принят установившийся ток с учетом регуляторов  $I_{\infty p}$ . Фиктивное время может быть представлено [4] в виде суммы:

$$t_{\phi} = t_{\phi A} + t_{\phi D}. \quad (23)$$

Для периодической составляющей фиктивное время

$$t_{\phi A} = \frac{1}{I_{\infty p}} \int_0^t I_{At}^2 dt = \int_0^t \alpha_t^2 dt. \quad (24)$$

Для построения  $t_{\phi A}$  были использованы приведенные на рис. 9 средние кривые затухания тока в месте к. з. Кривые  $t_{\phi A} = f(\beta'_p, t)$  (рис. 11) построены по данным планиметрирования нанесенных на график зависимостей  $\alpha_t^2 = f(t)$  для разных  $\beta'_p$  в пределах от 0 до разных  $t$ .

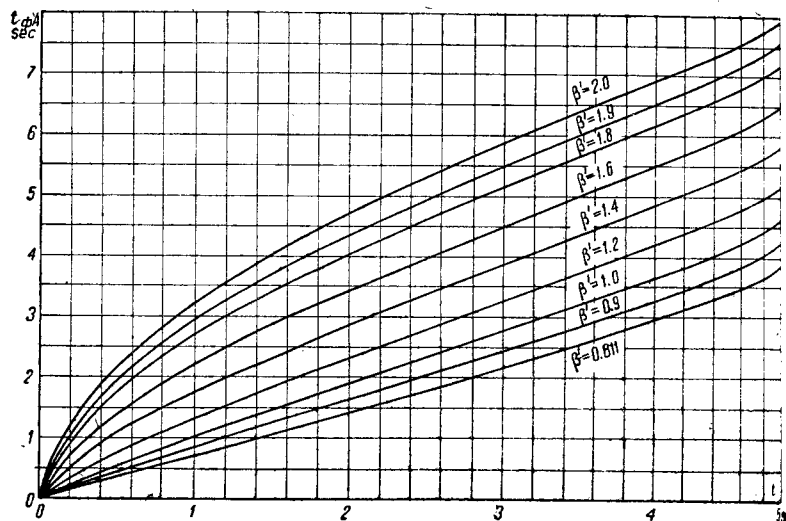


Рис. 11. Кривые фиктивного времени для тока  $I_{At}$  с учетом регулятор

Для малых выдержек времени ( $t \leq 0,25$  sec) при больших  $\beta'_p$  ввиду резкого загиба кривых вверх вычисление произведено по формулам приближенного интегрирования.

Возбудитель и регулятор на затухание аperiodической составляющей тока к. з. заметно влияния не оказывают. Поэтому аperiodическая составляющая тока к. з.

$$I_{Dt} = \sqrt{2} I'' e^{-\frac{t}{T_d}}. \quad (25)$$

В соответствии с этим фиктивное время выражается:

$$t_{\phi D} = \frac{1}{I_{\infty p}} \int_0^t I_{Dt}^2 dt = T_d \left( \frac{I''}{I_{\infty p}} \right)^2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{0,5 T_d}} \right). \quad (26)$$

Указанное выражение идентично с приведенным ранее в работе авторов [(4); см. там же рис. 12].

**Пример.** Вычислить ток в месте к. з.  $I_{At}$  через 0,25 sec и фиктивное время для  $t = 5,0$  sec при к. з. на первой секции шин 6,3 kV тэз (рис. 13). На шинах 110 kV параллельная работа с мощной гидростанцией. На всех генераторах установлены автоматические регуляторы напряжения.

При «потолочном» возбуждении для турбогенератора Т-24-2 расчетная э. д. с.

$$E_{dp} = 0,8 I_{fp} + 0,2 = 0,8 \cdot 4,0 + 0,2 = 3,4$$

расчетный реактанс

$$X_{dp} = \frac{E_{dp}}{окз \cdot I_{fp}} = \frac{3,4}{0,64 \cdot 4,0} = 1,33;$$

для гидрогенератора 60 MVA:

$$E_{dp} = 0,8 \cdot 3,5 + 0,2 = 3,0;$$

$$X_{dp} = \frac{E_{dp}}{окз \cdot I_{fp}} = \frac{3,0}{1,0 \cdot 3,5} = 0,858.$$

Базисная мощность  $P_6 = 1000$  MVA. Реактивная мощность линии передачи

$$X_A = \frac{X_l}{n} \cdot \frac{P_6}{U^2} = \frac{0,4 \cdot 30 \cdot 1000}{2 \cdot 110^2} = 0,497.$$



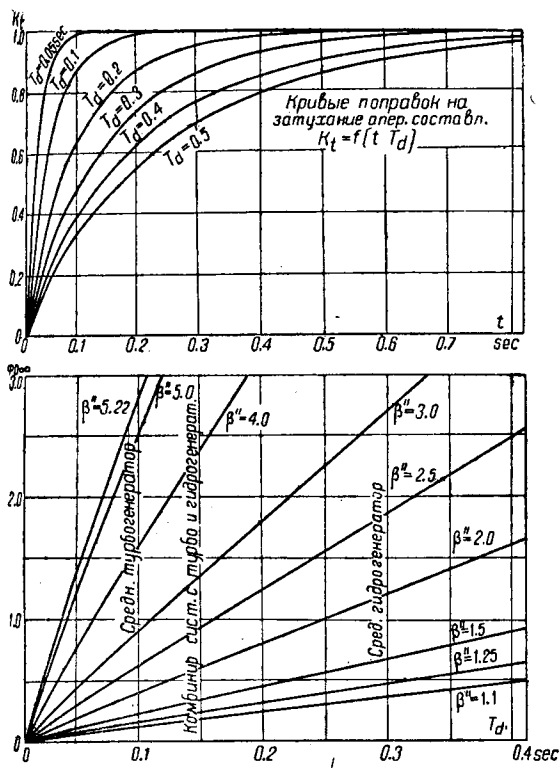


Рис. 12. Кривые фиктивного времени для аperiodической составляющей тока к. з.:

$$t_{\phi D} = f(T_d, \beta'', t), t_{\phi D} = t_{\phi D \infty} k_t$$

Схема приводится к разомкнутой преобразованием треугольника в звезду. Выполнив это, трудно получить расчетные схемы рис. 14, на втором все реактивности отнесены к  $P_6 = 1000 \text{ MVA}$ .

Вычисленные эквивалентные реактивности и т.д. расчетных схем: сверхпереходный режим —  $\beta'' = 1,12$ ;  $X''_k = 1,87$ ; переходный —  $E'_k = 0,942$ ;  $\beta' = 2,26$ .

Установившийся режим при потолочном возбуждении всех генераторов:  $E_{pk} = 1,69$ ;  $X_{pk} = 4,21$ . При вычислении следует иметь в виду, что напряжение на зажимах генераторов не должно превосходить нормального. Однако в данном случае остаточные напряжения (при условии «поточного» возбуждения) на зажимах генераторов

турбогенератор за реактором —  $U_1 = 52\% U_n$ ;  
гидрогенератор —  $U_2 = 112\% U_n$ .

Следовательно, возбудитель турбогенератора достигает потолка, а напряжение на зажимах гидрогенератора — нормального значения, причем возбудитель не достигает потолка. Таким образом первоначальное предположение не соответствует действительности. Поэтому необходимо произвести пересчет  $E_{pk}$  и  $X_{pk}$ , положив в расчетной схеме рис. 14  $X_1 = 0$  и  $E_{d1} = 1,0$ . Этот пересчет дает:  $E_{pk1} = 1,08$ ;  $X_{pk1} = 2,86$ .

Экстремальные значения токов в месте к. з.

$$I'' = \frac{E''_k}{X''_k} \cdot \frac{[P_6]}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1,12}{1,87} \cdot \frac{10^6}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 54 800 \text{ A};$$

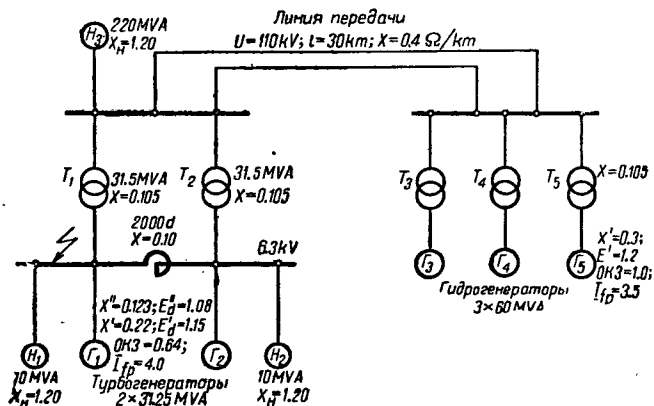


Рис. 13. Действительная схема сети

$$I' = \frac{E'_k}{X'_k} \cdot \frac{P_6}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{0,942}{2,26} \cdot 91 500 = 38 200 \text{ A};$$

$$I_{\infty p} = \frac{E_{pk1}}{X_{pk1}} \cdot \frac{P_6}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1,08}{2,86} \cdot 91 500 = 34 500 \text{ A}.$$

Кратность затухания

$$\beta'' = \frac{I''}{I_{\infty p}} = \frac{54 800}{34 500} = 1,59; \quad \beta' = \frac{I'}{I_{\infty p}} = \frac{38 200}{34 500} = 1,11.$$

Определение тока  $I_{At}$  через 0,25 сек.

Коэффициенты затухания  $\sigma''_t$  и  $\sigma'_t$  согласно рис. 10 при  $t = 0,25 \text{ sec}$  и  $\beta'_p = 1,11$ :

$$\sigma''_t = 0,20, \quad \sigma'_t = 1,07.$$

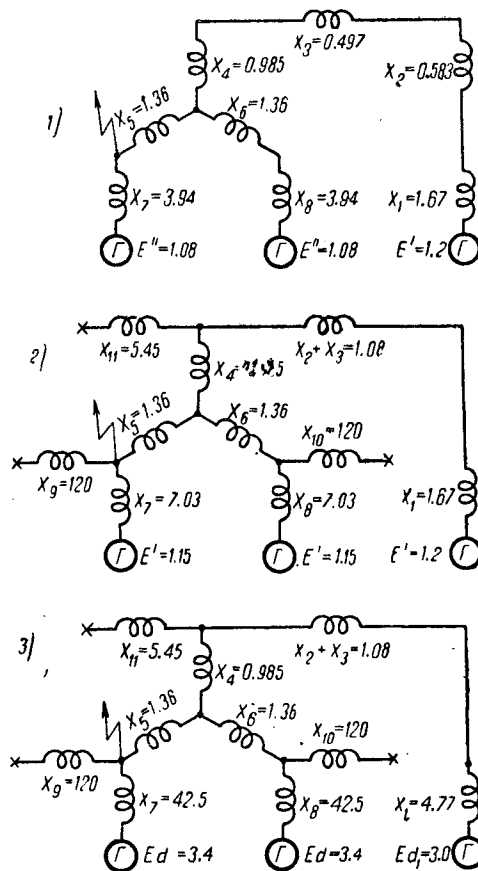


Рис. 14.

1 — расчетная схема сверхпереходного режима; 2 — переходного; 3 — установившегося режима

Ток  $I_{At}$  согласно формуле (5):

$$I_{At} = (I'' - I') \alpha_t'' + I_{\infty} \alpha_t' = (54\,800 - 38\,200) 0,20 + 34\,500 \times 1,07 = 40\,200 \text{ A.}$$

Определение фиктивного времени.

Согласно рис. 11 при  $\beta_p' = 1,11$  и  $t = 5 \text{ sec.}$  получаем:  $t_{\phi A} = 4,9 \text{ sec.}$  Согласно рис. 12 при  $\beta'' = 1,59$ ,  $t = 5 \text{ sec.}$ ,  $T_d = 0,15 \text{ sec.}$  (система с гидро- и турбогенераторами) получаем:

$$t_{\phi D} = t_{\phi D\infty} k_t = 0,4 \cdot 1,0 = 0,4 \text{ sec.}$$

Фиктивное время полного тока [формула (23)]:

$$t_{\phi} = 4,9 + 0,4 = 5,3 \text{ sec.}$$

Таким образом при проверке аппаратуры на

термический эффект от токов к. з. следует исходить из

$$I_{\infty}^2 t_{\phi} = 34\,500^2 \cdot 5,3 = 6,3 \cdot 10^9 \text{ A}^2 \text{ sec.}$$

### Литература

1. Wagner, Decrement of short-circuit currents, Trans. A. I. E. E., No. 5, 1933.
2. Н. Шедрин, Токи короткого замыкания высоковольтных систем, изд. ОНТИ, 1935.
3. Розенберг и Костенко, Вычисление токов методом двух и трех точек, "Электричество" № 23, 1937.
4. Розенберг и Костенко, Кривые фиктивного времени при отсутствии автоматического регулирования напряжения, "Электричество" № 2, 1938.

## Расчет мешающих влияний контактной сети на линии связи

Н. Н. Миролюбов

Ленинградский индустриальный институт

В СССР принято питание контактного провода электрических железных дорог постоянным током от ртутного выпрямителя. Поэтому помехи в линиях связи обуславливаются исключительно электромагнитной индукцией<sup>1</sup>, зависящей от высших гармоник тока, протекающего в проводе. Выбор рациональных мер защиты от мешающих влияний, естественно, требует умения предварительно оценить величину этих влияний. Здесь этот вопрос не рассматривается в полном объеме, но выводятся лишь приближенные расчетные формулы для определения величины мешающего напряжения на аппаратах, включенных в линию связи, которая частично или полностью находится в сфере электромагнитного влияния контактного провода.

Следует отметить, что выведенные формулы пригодны для расчета электромагнитных влияний не только при сближении с контактным проводом, но также и с любой другой линией передачи, например, с трехфазной линией передачи по системе «два провода—земля».

Необходимость в подобных расчетных формулах в настоящее время особенно сильно ощущается, так как в советской технической литературе появился ряд книг, в которых вопрос о мешающем электромагнитном влиянии рассматривается, но при этом иногда рекомендуются неправильные формулы.

**Однопроводная линия связи.** Рассмотрим сперва простейший случай сближения, для которого взаимное расположение линии связи и контактного провода представлено на рис. 1. На рисунке  $Z_a$  и  $Z_b$  — сопротивления включенных по концам линии аппаратов;  $I_0$  — эквивалентный мешающий ток в контактном проводе<sup>2</sup>.

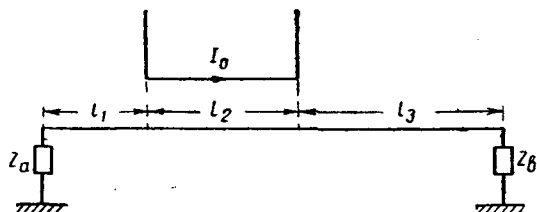


Рис. 1

Определение мешающего напряжения сводится к нахождению падения напряжения на сопротивлениях  $Z_a$  и  $Z_b$ . Для решения этой задачи имеем следующие уравнения для на-

<sup>1</sup> Электростатическая индукция вследствие небольшого рабочего напряжения практически не имеет значения. Непосредственное влияние блуждающих токов в земле в статье не рассматривается.

<sup>2</sup> Под  $I$  можно понимать также ток какой-либо одной гармоники, если эквивалентное мешающее влияние определять на стороне линии связи, что по нашему мнению более правильно.

пряжения  $U$  и тока  $I$  линии связи:

$$\text{для } 0 \leq x \leq l_1 \text{ и } l_1 + l_2 \leq x \leq l_1 + l_2 + l_3$$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dU}{dx} &= ZI; \quad Z = R + j\omega L; \\ -\frac{dI}{dx} &= YU; \quad Y = G + j\omega C; \end{aligned} \right\}$$

$$\text{для } l_1 \leq x \leq l_1 + l_2$$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dU}{dx} &= ZI + MI_0; \quad M = j\omega M; \\ -\frac{dI}{dx} &= YU. \end{aligned} \right\}$$

$R$ ,  $L$ ,  $G$  и  $C$  соответственно — сопротивление, индуктивность, утечка и емкость линии на 1 км длины.  $M$  — взаимный коэффициент индукции между контактным проводом и линией связи на 1 км сближения;  $\omega$  — круговая частота влияющего тока<sup>3</sup>.

Решение уравнений (1) и (2) имеет вид:

$$\text{для } 0 \leq x \leq l_1$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= A_1 e^{-\gamma x} + B_1 e^{\gamma x}; \\ I_1 &= \frac{1}{W} (A_1 e^{-\gamma x} - B_1 e^{\gamma x}); \end{aligned} \right\}$$

$$\text{для } l_1 \leq x \leq l_1 + l_2$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= A_2 e^{-\gamma x} + B_2 e^{\gamma x}; \\ I_2 &= \frac{1}{W} (A_2 e^{-\gamma x} - B_2 e^{\gamma x}) - \frac{M}{Z} I_0; \end{aligned} \right\}$$

$$\text{для } l_1 + l_2 \leq x \leq l_1 + l_2 + l_3$$

$$\left. \begin{aligned} U_3 &= A_3 e^{-\gamma x} + B_3 e^{\gamma x}; \\ I_3 &= \frac{1}{W} (A_3 e^{-\gamma x} - B_3 e^{\gamma x}). \end{aligned} \right\}$$

В этих формулах  $A_i$  и  $B_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — произвольные постоянные интегрирования;  $\gamma = \sqrt{ZY}$  — постоянная распространения;  $W = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$  — волновое сопротивление.

Для определения шести произвольных постоянных  $A_i$  и  $B_i$  воспользуемся граничными условиями:

при

$$x = 0 \quad U_1(0) = -I_1(0) Z_a;$$

$$x = l_1 \quad \begin{cases} U_1(l_1) = U_2(l_1); \\ I_1(l_1) = I_2(l_1); \end{cases}$$

<sup>3</sup> Ток  $I_0$  во избежание чрезмерных усложнений в расчетах считаем постоянным по величине и по фазе вдоль контактного провода.

$$x = l_1 + l_2 \begin{cases} U_2(l_1 + l_2) = U_3(l_1 + l_2); \\ I_2(l_1 + l_2) = I_3(l_1 + l_2); \end{cases}$$

$$x = l_1 + l_2 + l_3 = l; U_3(l) = I_3(l) Z_b.$$

Совместное решение этих шести уравнений относительно  $x$  и  $V$  не встречает затруднений.

Мешающее напряжение согласно приведенному выше определению будет равно  $U_1(0)$  или  $U_3(l)$ . Зная  $U_1(0)$ , несложно написать по аналогии выражение для  $U_3(l)$  и обратно. Поэтому мы будем определять мешающее напряжение  $E_a$  выражением:

$$E_a = U_1(0).$$

Путем довольно длительных, но элементарных преобразований получается следующая формула:

$$E_a = \frac{E_0}{\gamma} \frac{k_2 - k_1}{2(p_b x_3^2 - p_a)} (1 - p_a), \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} E_0 &= M I_0; \quad k_2 = x_2 - p_b \frac{x_3^2}{x_2}; \quad k_1 = x_1 - p_b \frac{x_3^2}{x_1}; \\ p_a &= \frac{W - Z_a}{W + Z_a}; \quad p_b = \frac{W + Z_b}{W - Z_b}; \\ x_1 &= e^{\gamma l_1}; \quad x_2 = e^{\gamma(l_1 + l_2)} = x_1 e^{\gamma l_2}; \quad x_3 = x_2 e^{\gamma l_3}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Чтобы проверить правильность полученной формулы, достаточно положить  $Z_a = Z_b = \infty$ ;  $l_1 = l_3 = 0$  и  $l_2 = l$ . При этом формула (6) переходит в хорошо известное выражение:

$$E_a = \frac{1}{\gamma} E_0 \operatorname{th} \frac{\gamma l}{2}.$$

Часто сближение бывает не параллельным, но в большей или меньшей степени отклоняется от него. На некоторых участках сближения линия связи и контактный провод располагаются под углом друг к другу. Точный учет действительного расположения проводов приводит к весьма сложным вычислениям, практически непригодным для расчета. Можно ограничиться известным способом „спрямления“ косых участков сближения, тем более, что ширина сближения обычно бывает достаточно большой. После такого спрямления косых участков сближения все сближение оказывается состоящим из отдельных параллельных участков с различными ширинами сближения. Следовательно, для каждого такого участка будет иметь место свой взаимный импеданс  $M_i$ , и величина э. д. с. индукции будет меняться при переходе от одного участка к другому. При этом расчет оказывается все же весьма сложным, и приходится идти к дальнейшему упрощению, которое сводится к тому, что указанное указанным способом взаимное расположение заменяется некоторым средним параллельным сближением, характеризующимся средним взаимным импедансом

$$\bar{M} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n M_i l_i,$$

где  $l_i$  — длина  $i$ -го параллельного участка сближения;  $n$  — число параллельных участков сближения и  $l = \sum l_i$  — длина всего сближения.

Формула (6) несколько сложна для технических расчетов. Попытаемся ее упростить.

Рассмотренный нами случай соответствует влиянию, сосредоточенному на участке сближения  $l_2$ , так что участки линии связи  $l_1$  и  $l_3$  свободны от влияний. С некоторым приближением можно эту картину влияния заменить фиктивной, в которой влияние распространено на всю линию связи, но при этом на 1 км линии будет приходиться э. д. с. индукции

$\bar{M} l_0$ , но  $q M I_0$ , где  $q = \frac{l_2}{l_1 + l_2 + l_3}$ . Такое приближение особенно приемлемо, если учесть, что нас всегда интересует замкнутая линия связи, ибо только в такой линии имеет смысл определение мешающего напряжения.

Однако при указанной замене следует считать с длинами участков  $l_1$  и  $l_3$ , вернее, — с величинами  $\gamma l_1$  и  $\gamma l_3$ . В зависимости от величины их модулей будет по-разному сказываться влияние концов линии связи. Соответственно этому рассмотрим три основных случая, обобщив несколько основных сближения, как это представлено на рис. 2.

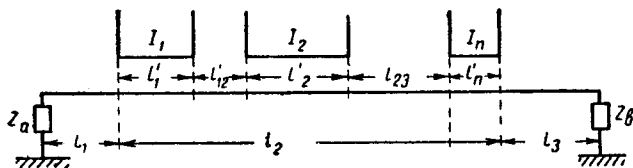


Рис. 2

Случай 1.  $|\gamma l_1| < 1$  и  $|\gamma l_3| < 1$ .

По указанному выше правилу определяем среднюю э. д. с. индукции на 1 км длины линии связи:

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{l_1 + l_2 + l_3} \sum_{k=1}^n M_k I_k l'_k. \quad (9)$$

Смысл  $l'_k$  ясен из рис. 2. Так как введением этого среднего значения э. д. с. мы распространили влияния на всю линию связи, то для определения  $E_a$  следует воспользоваться формулой (6) и положить в ней  $l_1 = l_3 = 0$ , а  $l_2 = l = l_1 + l_2 + l_3$ . При этом получаем:

$$E_a \approx \frac{1}{\gamma} \bar{E}_0 \frac{e^{\gamma l} - 1 + p_b e^{\gamma l} (e^{\gamma l} - 1)}{2(p_b e^{2\gamma l} - p_a)} (1 - p_a). \quad (9a)$$

Если, как это обычно бывает,  $Z_a = Z_b$ , то

$$E_a \approx \frac{Z_a}{Z} \bar{E}_0 \frac{1 + \frac{Z_a}{W} \operatorname{th} \frac{\gamma l}{2}}{1 + \frac{Z_a^2}{W^2} + \frac{2Z_a}{W} \operatorname{cth} \gamma l}. \quad (9b)$$

Наконец, при аппаратах, согласованных с линией

$$(Z_a = Z_b = W),$$

$$E_a \approx \frac{1}{2\gamma} \bar{E}_0 (1 - e^{-\gamma l}) = \frac{1}{2\gamma} \bar{E}_0 \frac{1 + \operatorname{th} \frac{\gamma l}{2}}{1 + \operatorname{cth} \gamma l}. \quad (9c)$$

При  $|\gamma l| \ll 1$  формулы (9b) и (9c) можно заменить приближенными<sup>4</sup>:

$$E_a \approx \bar{E}_0 l \frac{Z_a}{Zl \left(1 + \frac{Z_a^2}{W^2}\right) + 2Z_a}; \quad (9'b)$$

$$E_a \approx \frac{1}{2} \bar{E}_0 l \frac{1 + \frac{\gamma l}{2}}{1 + \gamma l}. \quad (9'c)$$

Случай 2.  $|\gamma l_1| > 1$ ;  $|\gamma l_3| > 1$ .

Величину  $\bar{E}_0$  в данном случае следует определять по формуле:

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{l_2} \sum_{k=1}^n M_k I_k l'_k, \quad (10)$$

т. е. влияние не распределяется по всей длине линии связи. Формулу (6) можно заменить приближенным выражением, которое справедливо для очень больших  $l_1$  и  $l_3$ , а именно:

$$E_a \approx \frac{1}{2} \bar{E}_0 \frac{1 - p_a}{\gamma} (1 - e^{-\gamma l_2}) e^{-\frac{\gamma}{2}(l_1 + l_3)}. \quad (10a)$$

В случае согласованности аппаратов с линией ( $Z_a = Z_b = W$ ) получаем:

$$E_a \approx \frac{1}{2\gamma} \bar{E}_0 (1 - e^{-\gamma l_2}) e^{-\frac{\gamma}{2}(l_1 + l_3)}. \quad (10b)$$

<sup>4</sup> Интересно отметить, что приближенная формула  $E_a = \bar{E}_0 l \frac{Z_a}{Zl + 2Z_a}$ , которой обычно пользуются для линии при малых значениях  $\gamma$ , в случае  $Z_a \gg W$  дает неверный результат.

Если  $|\gamma l_2| \ll 1$ , то, полагая  $1 - e^{-\gamma l_2} \approx \gamma l_2$ , находим<sup>5</sup>:

$$E_a \approx \frac{1}{2} \bar{E}_0 l_2 (1 - p_a) e^{-\frac{\gamma}{2}(l_1 + l_2)}; \quad (10'a)$$

$$E_a \approx \frac{1}{2} \bar{E}_0 l_2 e^{-\frac{\gamma}{2}(l_1 + l_2)}. \quad (10'b)$$

Случай 3.  $|\gamma l_1| < 1, |\gamma l_2| > 1$ .

В этом случае

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{l_1 + l_2} \sum_{k=1}^n M_k I_k l'_k, \quad (11)$$

т. е. влияние равномерно распределяется на участки  $l_1$  и  $l_2$  линии связи.

В формуле (6) полагая  $l_1 = 0$  и берем ее приближенное выражение при очень большом  $l_2$ . Получаем<sup>6</sup>:

$$E_a \approx \frac{1}{2\gamma} \bar{E}_0 (1 - p_a) (1 - e^{-\gamma l}), \quad (11a)$$

где  $l = l_1 + l_2$ .

При согласованности аппаратов с линией ( $Z_a = W$ ), получаем формулу (9с), но в ней следует положить  $l = l_1 + l_2$ .

Для  $|\gamma l| \ll 1$  имеем приближенные формулы:

$$E_a \approx \frac{1}{2} \bar{E}_0 l (1 - p_a) \frac{1 + \frac{\gamma l}{2}}{1 + \gamma l}; \quad (11'a)$$

$$E_a \approx \frac{1}{2} \bar{E}_0 l \frac{1 + \frac{\gamma l}{2}}{1 + \gamma l}. \quad (11b)$$

Интересно отметить, что при безграничном возрастании длины сближения  $E_a$  стремится к определенному конечному пределу.

Произведенный подробный разбор электромагнитного влияния на однопроводную линию связи с первого взгляда может показаться излишним, так как однопроводные телефонные линии почти не применяются. Однако его целесообразность становится ясной, если учесть (как это будет показано ниже), что все выведенные выше формулы остаются совершенно справедливыми (при соответствующей замене физического смысла некоторых обозначений) для вычисления мешающих напряжений в двухпроводных линиях вследствие поперечной асимметрии.

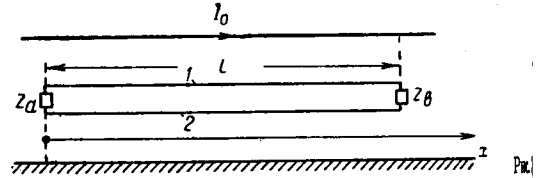
**Двухпроводная линия связи.** Как известно, мешающее напряжение на двухпроводной линии связи обуславливается поперечной и продольной асимметрией. Обычно вычисление производится следующим образом<sup>7</sup>. Определяются потенциалы на концах двух холостых не зависящих друг от друга однопроводных линий связи, которые характеризуются различными  $\gamma$  и  $M$ . Разность между найденными таким способом потенциалами принимается за мешающее напряжение двухпроводной линии. При таком методе расчета делается двойная ошибка: во-первых, мешающим напряжением считается напряжение на конце холостой линии и, во-вторых, двухпроводная линия заменяется двумя независимыми друг от друга однопроводными линиями.

Прежде чем перейти к расчету, напомним, что вследствие относительной малости величины как поперечной, так и продольной асимметрии их общее влияние может быть представлено в виде суммы двух членов, из которых один зависит только от поперечной асимметрии, другой — только от продольной асимметрии. Поэтому каждое из этих влияний может быть рассмотрено отдельно, независимо друг от друга.

При определении мешающего напряжения, обусловленного поперечной асимметрией, можно считать продольную асимметрию равной нулю, тогда получим идеальный двухпровод-

ный контур, отличающийся от однопроводной линией тем, что возврат тока здесь происходит не через землю по второму проводу. Следовательно, мешающее напряжение в двухпроводной линии от поперечной асимметрии определяется, если воспользоваться результатами предшествующего раздела. В приведенных выше формулах необходимо заменить постоянные, характеризующие однопроводную линию, соответствующими постоянными для двухпроводной линии:  $M, Z, Y, W$  и  $\gamma$  нужно соответственно заменить величинами  $M_d, Z_d, Y_d, W_d$  и  $\gamma_d$ . Все остальные величины, входящие в формулы, остаются без изменений.

Схема для расчета мешающего напряжения, обусловленного продольной асимметрией, представлена на рис. 3.



Введем обозначения:

$Z_i = R_i + j\omega L_i$  — полное сопротивление  $i$ -й однопроводной линии;

$Y_i = G_i + j\omega C_i$  — полная утечка с  $i$ -го провода на землю;

$M_i = j\omega M_i$  — взаимный импеданс между контактами провода и  $i$ -й однопроводной линией;

$M_{12} = j\omega M_{12}$  — взаимный импеданс между 1 и 2-й однопроводными линиями связи;

$Y_{12} = G_{12} + j\omega C_{12}$  — полная утечка между 1 и 2-м проводами;

$U_i$  — потенциал  $i$ -го провода относительно земли;

$I_i$  — ток  $i$ -го провода.

Постоянные  $Z_i, Y_i, M_i, M_{12}, Y_{12}$  отнесены к 1 км длины. Так как влияние поперечной асимметрии нами уже учтено, то полагая  $M_1 = M_2 = M$ .

Для  $U_i$  и  $I_i$  можно написать следующие уравнения:

$$-\frac{dU_1}{dx} = Z_1 I_1 + M_{12} I_2 + M I_0;$$

$$-\frac{dI_1}{dx} = Y_1 U_1 + Y_{12} (U_1 - U_2);$$

$$-\frac{dU_2}{dx} = Z_2 I_2 + M_{12} I_1 + M I_0,$$

$$-\frac{dI_2}{dx} = Y_2 U_2 - Y_{12} (U_1 - U_2).$$

Граничные условия следующие:

$$x = 0; \quad I_1(0) = -I_2(0)$$

и

$$U_1(0) - U_2(0) = -\frac{1}{2} Z_a [I_1(0) - I_2(0)];$$

$$x = l; \quad I_1(l) = -I_2(l)$$

и

$$U_1(l) - U_2(l) = \frac{1}{2} Z_b [I_1(l) - I_2(l)];$$

для простоты вычислений будем полагать:

$$Z_a = Z_b.$$

Если исключить из уравнений (12) токи, получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 U_1}{dx^2} &= \gamma_1^2 U_1 + \gamma_3^2 (U_1 - U_2) + M_{12} Y_2 U_2; \\ \frac{d^2 U_2}{dx^2} &= \gamma_2^2 U_2 - \gamma_4^2 (U_1 - U_2) + M_{12} Y_1 U_1, \end{aligned} \right\}$$

где

$$\gamma_1^2 = Z_1 Y_1, \quad \gamma_2^2 = Z_2 Y_2, \quad \gamma_3^2 = (Z_1 - M_{12}) Y_{12},$$

$$\gamma_4^2 = (Z_2 - M_{12}) Y_{12}.$$

При продольной асимметрии, равной нулю, т. е. для двухпроводной линии идеально симметричной относительно земли, а также в отношении материала и сечения проводов

$$\gamma_1 = \gamma_2; \quad \gamma_3 = \gamma_4; \quad Y_1 = Y_2; \quad Z_1 = Z_2$$

и

$$-\frac{d^2}{dx^2} (U_1 - U_2) = (\gamma_1^2 + 2\gamma_3^2 - M_{12} Y_1) (U_1 - U_2).$$

<sup>5</sup> Формулы (10'a), (10'b) годны для приближенного учета скрещиваний двухпроводной линии связи.

<sup>6</sup> Легко проверить, что такой же результат получится из формулы (9a), если положить в ней  $p_b = \infty$ , т. е.  $Z_b = W$ , принимая при этом  $l_b = 0$ .

<sup>7</sup> М. И. Михайлов, Защита линий связи (Учебное пособие для вузов связи), Связьтехиздат, 1935; тот же автор, Защита линий связи (Пособие для техникумов связи); М. Ю. Юрьев, Влияние высоковольтных линий на линии связи, 1929, и др.

Полагая  $U_1 - U_2 = U$  и  $\gamma_1^2 + \gamma_3^2 - M_{12}Y_1 = \gamma_d^2$ , находим из-  
вестное уравнение двухпроводной линии:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \gamma_d^2 U,$$

где

$$\gamma_d^2 = Z_d Y_d; \quad Z_d = 2(Z_1 - M_{12}) \quad \text{и} \quad Y_d = Y_{12} + \frac{1}{2} Y_1.$$

В дальнейших расчетах мы будем полагать  $Z_1 = Z_2$ , что  
практически имеет место в действительности, и  $Y_1 = Y_2 + \Delta Y$ ,  
где  $\Delta Y$  — малая величина.

При этих предположениях в результате весьма длитель-  
ных, но элементарных вычислений получается следующая  
формула для мешающего напряжения, обусловленного про-  
должной асимметрией:

$$E_{np} = \eta \frac{M_{10}\delta}{\gamma_p} \left[ \operatorname{th} \frac{\gamma_p l}{2} - \frac{\left( \operatorname{th} \frac{\gamma_p l}{2} + \frac{Z_a}{Z_d} \gamma_p \right) \left( 1 + \frac{Z_a}{W_d} \operatorname{th} \frac{\gamma_d l}{2} \right)}{1 + \frac{Z_a^2}{W_d^2} + \frac{2Z_a}{W_d} \operatorname{cth} \gamma_d l} \right], \quad (14)$$

которой

$$\gamma_p^2 = \frac{\gamma_p^2}{2(\gamma_1^2 - M_{12}Y_1)}, \quad \gamma_p^2 = (Z_1 + M_{12})Y_1; \quad \gamma_3^2 = (Z_1 - M_{12})Y_{12};$$

$$Z_d = 2(Z_1 - M_{12}); \quad Y_d = Y_{12} + \frac{1}{2} Y_1; \quad \gamma_d^2 = Z_d Y_d;$$

$$\Delta Y = \frac{\Delta Y}{2(Y_1 + Y_2)} \text{ — продольная асимметрия.}$$

Формула (14) довольно сложна. Рассмотрим приложение  
ее в одном представляющем наибольший практический инте-  
рес случае.

Случай 1.  $\gamma_p l_1; \gamma_p l_2; \gamma_d l_1; \gamma_d l_2 < 1$ . С некоторым приближе-  
нием может быть применена формула (14), только под  $M_{10}$   
следует понимать усредненную э. д. с. индукции на 1 км  
линии связи, вычисляемую по формуле

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{l_1 + l_2 + l_3} \sum_{k=1}^n M_k I_k l'_k,$$

полагая, что  $l = l_1 + l_2 + l_3$  — полная длина линии связи.

Нетрудно получить приближенные формулы, соответствую-  
щие предельным значениям  $\gamma l$ :

$$\gamma_p l \ll 1; \quad \gamma_d l \ll 1;$$

$$E_{np} \approx \frac{1}{4} \eta \bar{E}_0 \delta \frac{Z_d \gamma_d^2 l^2}{Z_d \left( 1 + \frac{Z_a^2}{W_d^2} \right) + 2Z_a}; \quad (15)$$

$$\gamma_p l \gg 1; \quad \gamma_d l \gg 1;$$

$$E_{np} \approx \eta \frac{\bar{E}_0 \delta}{\gamma_p} \frac{Z_a \left( 1 - \frac{\gamma_p}{\gamma_d} \right)}{Z_a + W_d}. \quad (16)$$

Из формулы (14) можно найти предельное выражение для  
 $E_{np}$ , соответствующее разомкнутой двухпроводной линии,

составленной из двух независимых друг от друга однопро-  
водных линий.

Для этого достаточно в формуле (14) положить  $M_{12} = Y_{12} = 0$ .

Тогда<sup>8</sup>

$$\gamma_p = \gamma_d = \sqrt{Z_1 Y_1} = \gamma \quad \text{и} \quad W_d = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = W.$$

Полагая затем  $Z_a = \infty$ , мы получаем следующее выра-  
жение:

$$E_{np} = \frac{1}{2} \frac{E_0 \delta}{\gamma} \operatorname{th} \frac{\gamma l}{2} \left( 1 - \frac{\gamma l}{\operatorname{sh} \gamma l} \right).$$

Правильность этой формулы легко проверить непосред-  
ственным решением задачи для этого предельного случая.

<sup>8</sup> Приходится, следовательно, вводить равенства, не имеющие места в действительности.

## Сопротивление взаимоиנדукции двух однопроводных цепей с землей в качестве обратного провода на косых участках сближения

В. М. Орлова

Центральный научно-исследователь-  
ский институт связи НКС

ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ полного сопротивления взаимоиנדук-  
ции между высоковольтной линией и линией связи, имею-  
щими землю в качестве обратного провода, на параллельных  
участках сближения применяются формулы Поллячека и Кар-  
сона. При расчете сопротивления взаимоиנדукции на косых  
участках сближения прибегают к преобразованию таких уча-  
стков в эквивалентные им параллельные участки. Чтобы  
ошибка при пользовании этим методом не превышала тех-  
нически допустимой величины, установлена величина отно-  
шения расстояний между линиями на концах косого участка  
сближения  $a_1/a_2 \leq 2$ .

Величина расстояния между линиями эквивалентного  
параллельного участка определяется выражением:  $a_3 =$   
 $= \sqrt{a_1 a_2}$ .

Ниже приводятся методы для расчета сопротивления  
взаимоиנדукции на косых участках более точные и более  
точные по затратам времени на вычисления.

Метод кривых среднего удельного сопротивления взаимо-  
иנדукции. Рассмотрим изменение удельного сопротивления

взаимоиנדукции в зависимости только от расстояний между  
влияющей и подверженной влиянию линиями, принимая  
постоянными на рассматриваемом участке сближения другие  
параметры этой функции: частоту переменного тока влияю-  
щей линии, проводимость земли и высоты подвеса прово-  
дов обеих линий.

Зависимость удельного сопротивления взаимоиנדукции как  
полного, так и отдельных его составляющих (активной и  
реактивной) от взаимного расстояния между линиями мо-  
жет быть выражена кривой, определяемой формулой Кар-  
сона или Поллячека.

Если мы имеем косой участок сближения (рис. 1, а)  
с расстояниями  $a_1$  и  $a_2$  между линиями на концах его и изоб-  
разим изменение полного<sup>1</sup> сопротивления взаимоиנדукции

<sup>1</sup> Для отдельных составляющих (активной и реактивной)  
полного сопротивления взаимоиנדукции справедливы рас-  
суждения и выводы, аналогичные приведенным ниже для  
полного сопротивления взаимоиנדукции.

на длине этого участка (рис. 1, а), то среднее значение этого сопротивления на единицу длины

$$\omega M_{cp} = \frac{1}{(a_2 - a_1) \operatorname{ctg} \alpha} \int_{a_1}^{a_2} F(x) dx \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{a_2 - a_1} \int_{a_1}^{a_2} F(x) dx [\Omega/\text{km}]. \quad (1)$$

Здесь  $F(x)$  — полное сопротивление взаимной индукции в функции  $x$ , выраженное формулой Карсона или Поллячека,

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{l_n}{a_2 - a_1}.$$

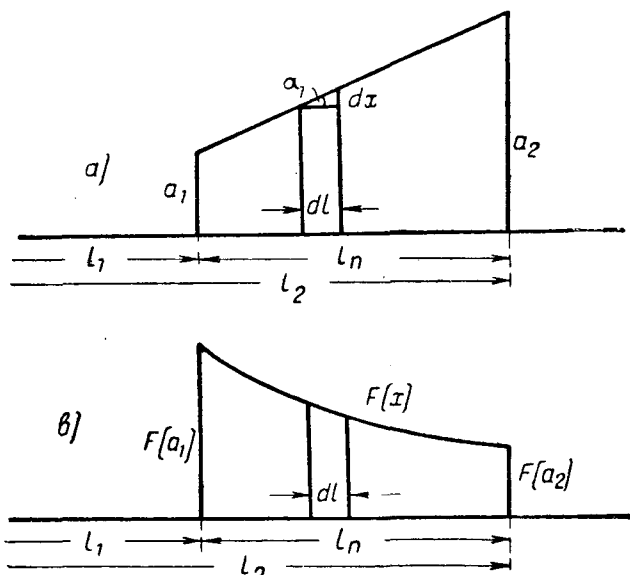


Рис. 1.

а — косой участок сближения; б — график полного сопротивления взаимной индукции на косом участке сближения

Формула (1) позволяет определить среднее значение удельного полного сопротивления взаимной индукции для любого интервала изменения расстояния между линиями, причем либо  $a_1$  либо  $a_2$  может быть равно нулю, т. е. формула пригодна и для участков пересечения линий.

С достаточной для технических целей точностью величину интеграла  $\int_{a_1}^{a_2} F(x) dx$  можно легко найти путем так называемого численного интегрирования.

Разобьем рассматриваемый участок на элементы с незначительной разницей в расстояниях между линиями на концах их  $[\Delta x = x_{i+1} - x_i]$  и определим приближенно для каждого такого элемента числовое значение подынтегрального выражения, входящего в формулу (1), принимая  $F(x)$  равным полусумме верхнего  $F(x_{i+1})$  и нижнего  $F(x_i)$  предельных значений удельного полного сопротивления взаимной индукции на рассматриваемом элементе.

Тогда, очевидно,

$$\int_{a_1}^{a_2} F(x) dx \approx \sum_{i=1}^{i=k} F(x_i) (x_{i+1} - x_i). \quad (2)$$

В этой сумме:

$k$  — число элементов, на которые разбит косой участок;  
 $x_i$  — расстояние между линиями, соответствующее среднему значению функции  $F(x)$  на элементе  $[x_{i+1}; x_i]$ .

Если примем минимальное расстояние между линиями постоянным ( $a_1 = a_{\min} = \text{const}$ ), а максимальное — непрерывно и независимо изменяющимся, то получим функциональную зависимость между средним удельным сопротивлением взаимной индукции и максимальным расстоянием между линиями для любых косых участков сближения, лишь ограниченных

с одной стороны  $a_{\min}$ . Принимая различные постоянные значения для минимального расстояния между линиями, можно получить ряд таблиц или серию кривых, позволяющих легко и быстро определять среднее значение удельного сопротивления для любого косого участка сближения по расстоянию между линиями на его концах.

На рис. 2 приведена подобная серия кривых среднего значения полного сопротивления взаимной индукции для косых участков сближения, вычисленных способом численного интегрирования.

Кривая А рис. 2 дает  $\omega M$  в  $\Omega/\text{km}$  в зависимости от  $a$  для параллельных участков сближения. Другие кривые рис. 2 дают среднее значение полного сопротивления взаимной индукции для косых участков сближения, имеющих минимальное расстояние между линиями, указанное на правом конце кривой в зависимости от его максимального расстояния между линиями. При расчете всех этих кривых была использована формула Карсона для полного сопротивления взаимной индукции и было принято: удельная проводимость земли  $\sigma = 26,5 \cdot 10^{-14}$  cgs; частота тока влияющей линии  $f = 50$  Hz; высота подвеса линии электропередачи  $b = 10$  м; высота подвеса линии связи  $c = 6$  м.

Для определения сопротивления взаимной индукции (полного или отдельных его составляющих) на всем данном косом участке сближения следует полученное по кривым среднее удельное сопротивление умножить на длину участка, считаемую по основной линии, обычно по влияющей высоте вольтовой.

Путем вычислений и построений, аналогичных описанным выше для полного сопротивления взаимной индукции, могут быть получены кривые среднего значения активной и реактивной составляющих полного удельного сопротивления взаимной индукции.

Ниже приводится примерный расчет опасного электромагнитного влияния для сближения, изображенного на рис. 1, проведенный с помощью кривых рис. 2.

Рассматривая индуктивные влияния на сближениях, имеющих несколько точек изменения направления, — либо в соковольтовой линии либо линии связи, — необходимо отметить изменение в этих точках фазного угла индуктируемой на линиях связи э. д. с. В этом случае индуктированная во всем сближении э. д. с. равна геометрической сумме э. д. с. полученных на отдельных участках.

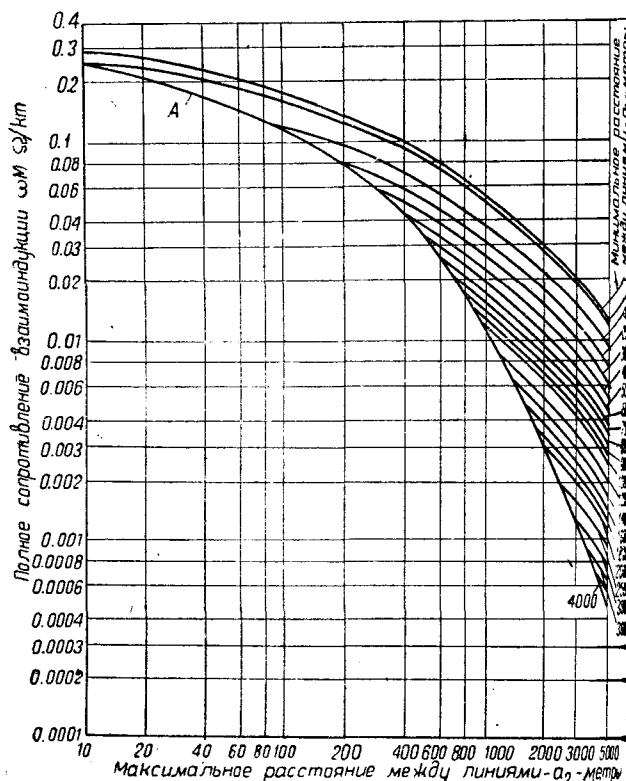


Рис. 2. Кривые среднего значения полного сопротивления взаимной индукции для косых участков сближения при:

$$= 26,5 \cdot 10^{-14} \text{ cgs}; f = 50 \text{ Hz}; b = 10 \text{ m}; c = 6 \text{ m}$$

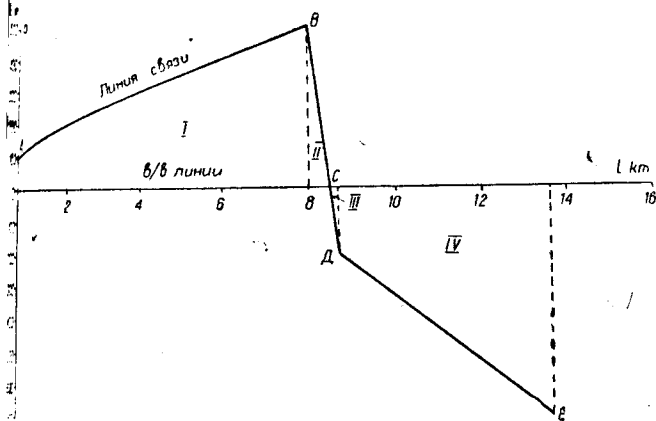


Рис. 3. Сближение высоковольтной линии и линии связи

(См. рис. 3)				Полное сопротивление взаимной индукции		
число участков	длина участка, км	расстояние между линиями, м		$\omega M$ Ω/km	$\omega M \cdot I_n$ Ω	$\Sigma \omega M I_n$ Ω
		$a_1$	$a_2$			
I	8	100	500	0,0638	0,5104	0,5104
II	0,5	500	0	0,0866	0,0433	0,5537
III	0,2	0	200	0,1372	0,02744	0,58114
IV	5	200	700	0,0427	0,2135	0,79464

Таким образом индуктированная на линиях связи э. д. с., может быть найдена более точно путем вычисления в отдельных участках активной и реактивной составляющих полного сопротивления на всем сближении:

$$E = -j\omega M I_n = -(R + jX) I_n,$$

$$\sum_1^n \dot{E} = - \left( \sum_1^n R I_n + j \sum_1^n X I_n \right) I,$$

$n$  — число участков на всем сближении;  $I$  — влияющий ток;  $l$  — длина участка.

Полное сопротивление находится, очевидно, как модуль того что написано в комплекс.

Разница значений полных сопротивлений, определенных арифметическим суммированием или векторным, может в некоторых случаях достигать 30%.

**Графический метод определения сопротивления взаимной индукции.** Изменение сопротивления, полного или отдельного составляющих, вдоль любого сближения может быть изображено графически. Для этого следует для достаточного числа точек сближения отложить в некотором масштабе на оси абсцисс их расстояния от начала сближения, а на оси ординат — соответствующие им полные сопротивления взаимной индукции, и нанесенные таким образом точки соединить сплошной линией. Сопротивление взаимной индукции в этом случае определяется по кривой для параллельных участков сближения, аналогичной кривой А рис. 2 и соответствующей данным значениям  $a$ ,  $f$ ,  $b$  и  $c$ .

При построении кривых сопротивления взаимной индукции для параллельных участков с разными  $a$ ,  $f$ ,  $b$  и  $c$  нужно иметь в виду, что при горизонтальных расстояниях между линиями, превосходящих 30 м, влиянием высот подвеса  $b$  на величину сопротивления можно пренебречь.

Очевидно, площадь, ограниченная кривой изменения сопротивления и осями координат, дает в некотором масштабе суммарное полное сопротивление взаимной индукции на всем рассматриваемом сближении. Например, если площадь будет  $S$  см<sup>2</sup>, масштаб сопротивления  $\alpha$ , а масштаб длины  $\beta$ , то сопротив-

$$Z = \frac{S}{\alpha \beta} [\Omega].$$

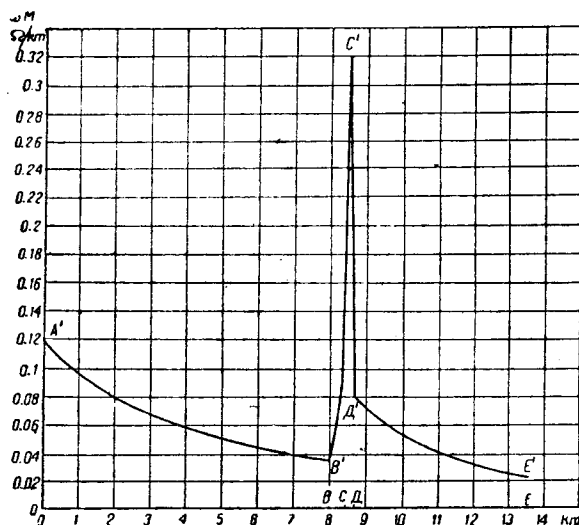


Рис. 4. График полного сопротивления взаимной индукции для сближения AE, изображенного на рис. 3

Определение площади может быть выполнено планиметром.

В качестве иллюстрации на рис. 4 дана кривая изменения полного сопротивления взаимной индукции — линия A'B'C'D'E' — вдоль сближения, изображенного на рис. 3. Сопротивление взаимной индукции для отдельных точек сближения было определено по кривой А рис. 2.

На приведенном графике (рис. 4) масштаб для удельного полного сопротивления взаимной индукции  $\alpha = \frac{0,188 \text{ см}}{0,01 \Omega/\text{км}}$ , масштаб для длины участка в километрах  $\beta = \frac{0,47 \text{ см}}{1 \text{ км}}$ . Площадь, ограниченная кривой и осями координат,  $S = 6,95 \text{ см}^2$ . Следовательно,

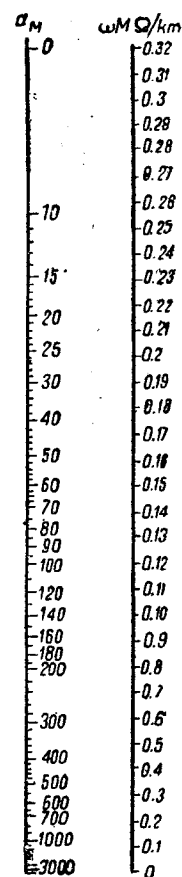
$$Z = \frac{S}{\alpha \beta} = \frac{6,95 \cdot 0,01}{0,188 \cdot 0,47} \approx 0,79 \Omega.$$

Для быстрого построения графиков сопротивления взаимной индукции удобнее пользоваться специальными масштабами, которые представляют собой прямолинейный отрезок, разделенный на доли, пропорциональные величинам сопротивления взаимной индукции, с отметкой у этих делений соответствующих горизонтальных расстояний между линиями. Пример такого специального масштаба для полного сопротивления взаимной индукции дан на рис. 5. При построении его была использована кривая А рис. 2.

Построение графиков сопротивления взаимной индукции для различных сближений еще более упрощается применением для этой цели специальной бумаги, разграфленной по тому же принципу, по которому строятся вышеуказанные специальные масштабы.

**Сравнение методов определения сопротивления взаимной индукции.** Точность результатов вычислений, производимых по применяемому в настоящее время методу преобразования косых участков в эквивалентные им параллельные участки, зависит от случайных на данном сближении отношений расстояний между линиями на концах участка ( $\frac{a_1}{a_2} \leq 2$ ); результаты вычисления будут тем точнее, чем это отношение будет ближе к единице.

Точность результатов предложенного метода, кривых среднего удельного

Рис. 5. Масштаб для полного сопротивления взаимной индукции ( $\alpha = 26,5 \cdot 10^{-14} \text{ cgs m}$ ;  $f = 50 \text{ Hz}$ ;  $b = 10 \text{ м}$ ;  $c = 6 \text{ м}$ )



сопротивления взаимной индукции для косых участков сближения" и графического метода почти одинакова; графический метод дает меньшую точность лишь при больших расстояниях между линиями.

По сравнению с методом преобразования косых участков, в эквивалентные им параллельные участки последние два метода имеют большую точность.

Наиболее эффективным в смысле затраты времени на вычисления является "метод кривых".

Для любого косого участка сближения в методе кривых

определяется только одно значение полного сопротивления взаимной индукции, между тем как в графическом методе в интервале косого участка следует построить несколько точек, чтобы иметь возможность начертить по ним кривую.

Однако следует отметить наглядность графического метода, снижающего ошибки в процессе вычислений и облегчающего проверку. Графический метод следует применять в тех случаях, когда рассматривается возможность изменения направления линий, так как при наличии графика быстро определяется примерное влияние предполагаемого изменения направления

## Проектирование обмоток электромагнитов с полями большой напряженности

А. С. Кантор

ВЭИ

**МАГНИТНЫЕ** поля большой напряженности — порядка  $10^5$ — $10^6$  Ое — применяются при различных физических исследованиях, в частности, при изучении строения атома. Для получения полей подобной напряженности выполняются электромагниты со специальными обмотками. В этой работе выясняются условия получения от обмотки электромагнитов максимально возможной напряженности поля.

Как известно, чтобы иметь напряженность  $H$  на длине  $L$ , необходима м. д. с.  $AW = 0,8 HL$ . Так как длина  $L$  определяется условиями работы аппарата, то для получения максимально возможных значений  $H$  необходимо по возможности увеличить  $AW$ .

Ампервитки, создаваемые какой-либо катушкой, могут быть определены из соотношения:

$$AW = k_1 b_s l_s j,$$

где  $k_1$  — коэффициент заполнения меди обмотки;  
 $l_s$  — длина катушки;  
 $b_s$  — ее ширина в мм;  
 $j$  — плотность тока в А/мм<sup>2</sup>.

С увеличением размеров катушки ( $l_s$ ,  $b_s$ ) растут габариты аппарата, удлиняется магнитная цепь, увеличивается рассеяние, что влечет за собой большую затрату м. д. с. на прохождение магнитного потока. Коэффициент заполнения  $k_1$  при больших электромагнитах получается близким к единице. Поэтому, очевидно, единственный радикальный способ для получения максимально возможной м. д. с. — это форсирование плотности тока  $j$ .

С увеличением плотности тока возрастают потери в меди. Эти потери, превращающиеся в тепло:

$$W = AW l_w j^2 t,$$

прямо пропорциональны ампервиткам  $AW$ , средней длине витка  $l_w$ , удельному сопротивлению материала  $\rho$ , плотности тока  $j$  и времени действия  $t$ .

При проектировании электромагнита необходимо или ограничить количество тепла, генерируемого за цикл работы, или обеспечить непрерывный отвод его, чтобы температура обмотки не превысила определенной величины. В соответствии с этим электромагниты для получения магнитных полей большой напряженности выполня-

ются или для длительной или для кратковременной работы.

В аппаратах, предназначенных для длительной работы, приходится допускать сравнительно небольшую плотность тока и прибегать, кроме того, к искусственному охлаждению. Охлаждение обмоток производится различными способами: обдуванием воздухом от специально установленных вентиляторов, помещением обмоток в бак, наполненный маслом и, наконец, охлаждением водой. Последний способ применен в электромагните, выполненном для университета в Упсале. Обмотка катушек сделана из прямоугольного проводника сечением  $21 \times 23$  мм с внутренним круглым отверстием диаметром в 10 мм для охлаждающей воды. Плотность тока в меди достигает  $4,3$  А/мм<sup>2</sup>. Аппарат создает поле напряженности до  $55000$  Ое на длине в 1 см и имеет один из наиболее мощных электромагнитов, выполненных для длительной работы [1]. Допустить в подобных электромагнитах плотности тока больше  $4$ — $5$  А/мм<sup>2</sup> при современных методах охлаждения, очевидно, невозможно.

При необходимости иметь магнитное поле еще большей напряженности приходится применять аппараты, рассчитанные для кратковременной работы. При таком режиме образующееся тепло благодаря тепловой инерции аппарата не успевает отводиться во время работы во внешнее пространство и практически полностью идет на нагрев самой обмотки.

Очевидно, что, сокращая время работы, можно резко увеличить плотность тока  $j$  и создать тем самым магнитное поле очень большой напряженности. Обмотки электромагнитов для кратковременной работы выполняются обычно также из меди, но в данном случае целесообразность выбора того или иного проводникового материала определяется не только удельной проводимостью его как в аппаратах для длительной работы, но и рядом других свойств.

Например, серебро, обладающее меньшим, в сравнении с медью, удельным сопротивлением, значительно уступает ей при применении в аппаратах для кратковременной нагрузки. Возможно с другой стороны, что некоторые металлические сплавы окажутся более пригодными, чем медь в условиях кратковременной работы.

Перегрев обмоток при кратковременном режиме работы можно определить известным уравнением [2]:

$$\vartheta = \frac{0,24\rho j^2 t}{c\gamma},$$

в котором  $c$  — теплоемкость;  $\gamma$  — удельный вес. Это уравнение действительно только в том случае, если  $\vartheta$  — разность конечной и начальной температуры — невелика и можно принять, что в пределах этой разности  $\rho$  постоянно.

Подставляя в это уравнение данные для меди:  $\rho = 8,9$ ;  $c = 0,093$ ;  $\rho = 0,0175$ , имеем:

$$\vartheta = \frac{0,24 \cdot 0,0175 j^2 t}{0,093 \cdot 8,9} = \frac{j^2 t}{197}.$$

Для серебра  $\gamma = 10,5$ ;  $c = 0,056$ ;  $\rho = 0,0165$  и

$$\vartheta = \frac{0,24 \cdot 0,0165 j^2 t}{0,056 \cdot 10,5} = \frac{j^2 t}{148}.$$

Как видно из приведенного иллюстративного примера, серебро нагревается при прочих равных условиях больше меди примерно на 25%. Меньшая пригодность серебра для кратковременной работы объясняется значительно меньшей, чем у меди, величиной его удельной теплоемкости  $c$ . Если разность начальной и конечной температуры сравнительно велика, то необходимо учесть изменение удельного сопротивления и ввести температурный коэффициент. В этом случае

$$\vartheta = \frac{1}{\alpha} \left( e^{\frac{0,24 j^2 \rho_0 t}{\gamma c}} - 1 \right).$$

На рис. 1 приведены кривые повышенные температуры для медного провода в зависимости от плотности тока для времени действия 1; 0,5; 0,2 и 0,1 sec.

Из последней формулы следует, что при больших разностях  $\vartheta$  — плотность тока;

$$j = \frac{\gamma c}{0,24 \rho_0 t} \ln(1 + \alpha \vartheta).$$

Увеличить плотность тока можно за счет уменьшения времени работы подбором материала с большим отношением  $\frac{\gamma c}{\rho_0 \alpha}$  или же допуская большую разность  $\vartheta$  конечной и начальной температуры.

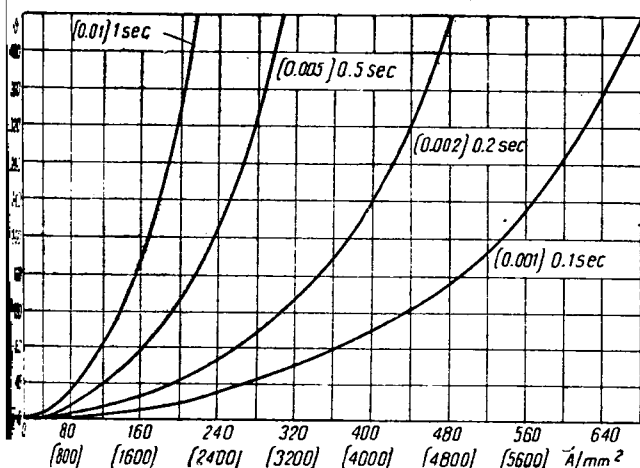


Рис. 1

Уменьшение времени действия является, конечно, самым действительным средством. При времени действия в 0,001 sec можно допустить плотность тока до 5200 А/мм², причем перегрев меди не превзойдет 200°. При некоторых исследованиях [3] время действия равнялось нескольким микросекундам. В течение 10 мсек и перегреве в 200° возможна плотность тока в 52000 А/мм².

Необходимо отметить, что обмотки имеют определенную индуктивность рассеяния, и поэтому нарастание тока происходит в течение определенного, иногда сравнительно продолжительного времени. Указанные выше плотности тока взяты при предположении мгновенного нарастания тока до полной величины и мгновенного же выключения. Пересчет на любую форму кривой тока не представляет каких-либо затруднений.

Автору неизвестны работы по подбору материала с максимальным отношением  $\frac{\gamma c}{\rho_0 \alpha}$ . Соответствующие исследования могут дать определенные результаты. Как пример укажем на кадмиевую бронзу (0,98% кадмия, остальное медь), которая обладает удельной проводимостью, равной 85,5% проводимости меди, но температурный коэффициент ее составляет 0,003149 вместо 0,0041 для меди. Поэтому при температуре в 350° бронза и медь имеют уже одинаковое сопротивление.

Как видно из последнего соотношения, резкое увеличение плотности тока одновременно с увеличением перегрева  $\vartheta$  имеет место в диапазоне температуры от 0 до 100°. При дальнейшем возрастании разности температур выигрыш в плотности тока уже не столь велик. В таблице показано, как увеличивается плотность тока для меди при повышении перегрева ступенями в 100° и времени действия 1 sec.

Повышение температуры °C	Плотность тока А/мм²	Приращение допустимой плотности тока А/мм²
0 до 100	128	128
100 до 200	168	40
200 до 300	192	24
300 до 400	208	16

Как видно из таблицы, увеличение перегрева на 100° в интервале 300 ÷ 400° дает увеличение плотности тока только на 16 А/мм², или на 8%. Дальнейшее увеличение разности температур  $\vartheta$  даст еще меньшие возрастания плотности тока вследствие увеличения сопротивления меди при высокой температуре. Кроме того, перегрев меди свыше 400° ухудшает ее механические свойства. Возможно, конечно, вместо меди применить провод из какого-либо жаростойкого материала и допустить при изоляции асбестом перегрев до 1200—1500°. К сожалению, известные в настоящее время жаростойкие материалы имеют большое удельное сопротивление. Проведенные подсчеты для разных материалов показали, что даже при разности температур в 1400° нельзя получить значительной плотности тока.

Остается увеличить разность температур в обратном направлении, понижая в значительной степени начальную температуру. Опыты в этом направлении должны дать, как показывают проведенные расчеты, значительный эффект. Если задаться, например, начальной температурой меди в  $-200^\circ$  и конечной в  $+400^\circ$ , т. е. используя практически доступный диапазон температур, получим возможную плотность тока для меди при времени действия в 1 сек  $547 \text{ A/mm}^2$ . При этом подсчете было принято, что температурный коэффициент меди остается равным 0,0011. Если до-

пустить время действия  $10 \mu \text{ sec}$ , как в указанных выше исследованиях [3], получим плотность тока равной  $175000 \text{ A/mm}^2$ . Такие плотности тока являются, очевидно, предельными при имеющихся в настоящее время материалах.

### Литература

1. L. Dreyfus, Grosse Elektromagnete für physikalisch-chemische Laboratorien. Е. u. М., 5/V, Н. 18, 1935, стр. 205.
2. К. Рихтер, Электрические машины. Москва 1936, стр. 356.
3. T. Wall, The Generation of very intense Magnetic Field. Journ. Inst. Elec. Engn., July, № 355, 1926, стр. 745.

## Расчет рассеяния головок зубцов машин постоянного тока

С. Б. Юдин  
ВЭИ

**ПОТОК РАССЕЯНИЯ** головок зубцов влияет на величину реактивной электродвижущей силы (э. д. с.), характеризующей коммутацию машины. Особенно значительно это влияние у машин с дополнительными полюсами при сравнительно малом воздушном зазоре под дополнительным полюсом.

Удельную проводимость<sup>1</sup> от потока рассеяния головок зубцов при условии, что ширина воздушного зазора  $\delta$  постоянна (рис. 1), можно выразить в зависимости от расположения рассматриваемого паза по отношению к середине дополнительного полюса в таком виде<sup>2</sup>:

$$\lambda_z(x) = 0,4\pi \left( \frac{b_d}{4k_1\delta} - \frac{x^2}{k_1\delta b_d} \right), \quad (1)$$

где  $b_d$  — ширина полюсного башмака;  
 $k_1$  — коэффициент Картера.

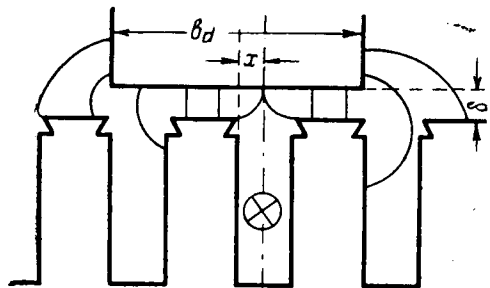


Рис. 1. Поток в головках зубцов под дополнительным полюсом

В виде примера на рис. 2 дана кривая удельной проводимости головок зубцов в зависимости от расположения паза относительно середины дополнительного полюса (для машины мощностью 6,5 kW).

В случае расположения паза под серединой дополнительного полюса имеем наибольшее значение удельной проводимости:

$$\lambda_{z\max} = 0,1\pi \frac{b_d}{k_1\delta}. \quad (2)$$

Среднее значение удельной<sup>3</sup> проводимости:

$$\begin{aligned} \lambda_{zcp} &= \frac{2}{b_d} \int_0^{\frac{b_d}{2}} \left( \frac{b_d}{4k_1\delta} - \frac{x^2}{k_1\delta b_d} \right) dx = \\ &= 0,4\pi \frac{b_d}{6\delta k_1}. \end{aligned}$$

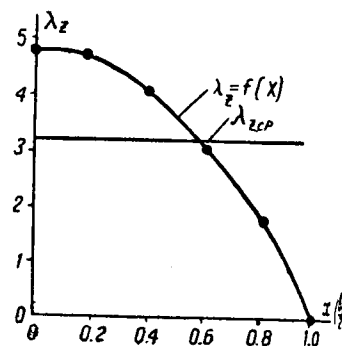


Рис. 2.  $\lambda_z$  в зависимости от расположения паза относительно дополнительного полюса

Среднее значение коэффициента удельной проводимости:

$$C_{zcp} = \frac{b_d}{6\delta k_1}.$$

При значительно изменяющемся воздушном зазоре следует подставить в уравнения (2, 3) средний воздушный зазор  $\delta_{cp}$ .

У машин постоянного тока без дополнительных полюсов поток рассеяния головок зубцов замыкается через воздух. Для подсчета удельной проводимости потока между головками зубцов мы примем, что расположение индукционных линий соответствует рис. 3. Тогда

$$d\lambda_z = 0,4\pi \frac{dx}{a_4 + \pi x}$$

и

$$\lambda_z = 0,4 \cdot 2,31 \lg \left[ \frac{a_4 + \pi t - \frac{\pi a_4}{2}}{a_4} \right] \approx 0,92 \lg \frac{\pi t}{a_4}.$$

Например, машина с  $t = 2,04 \text{ cm}$  и  $a_4 = 0,4 \text{ cm}$  имеет:

$$\lambda_z = 0,92 \lg \frac{\pi \cdot 2,04}{0,4} = 1,1.$$

<sup>1</sup> Удельная магнитная проводимость есть число магнитных сцеплений, созданных одним амперпроводом на 1 см его длины.

<sup>2</sup> Рихтер, „Электрические машины“, т. I.

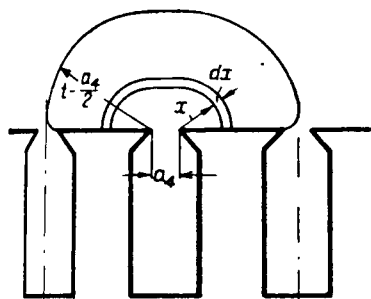


Рис. 3. Поток в головках зубцов у машин без дополнительных полюсов

В уравнениях (2) и (3) не учтено демпфирование потока рассеяния массивными наконечниками дополнительных полюсов. Эффект демпфирования мы попытались определить экспериментально. **Экспериментальная проверка.** Для проверки выведенных формул и определения коэффициента демпфирования был проведен ряд опытов в лаборатории акад. Шенфера (ВЭИ). Опыты заключались в экспериментальном определении рассеяния паза и головок зубцов при выполнении машины без дополнительных полюсов, с шихтованными и массивными наконечниками дополнительных полюсов. Для определения рассеяния без учета демпфирования при помощи флюксметра была применена схема *a* рис. 4. Определение же рассеяния с учетом демпфирования производилось при помощи осциллографа по схеме *б* рис. 4. В схеме *a* в качестве источника тока был использован аккумулятор, к которому была приключена секция, заложенная в пазы необмотанного якоря. Требуемое изменение тока (соответствующее процессу коммутации) при включении тока при помощи автомата *ab* достигалось соответствующим подбором сопротивления *R* и индуктивности *L*. Объем тока в пазу<sup>3</sup> варьировался

<sup>3</sup> Секция состояла из 48 витков; ток секции менялся от 10 до 10,4 А.

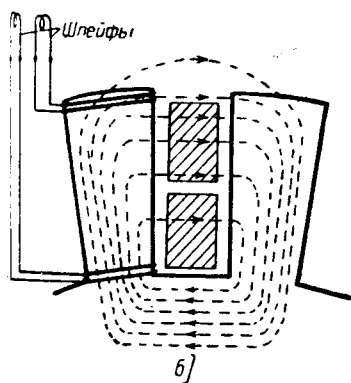
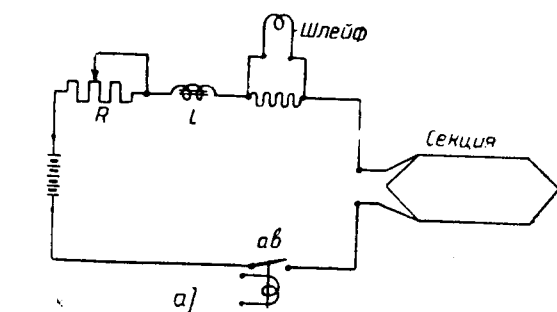


Рис. 4. Схема опытного определения удельной проводимости головок зубцов

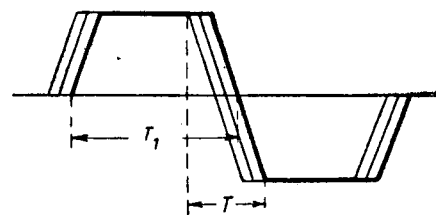
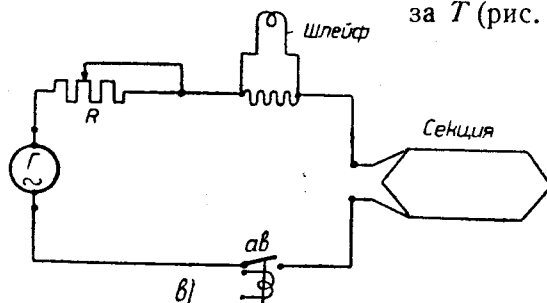


Рис. 5. К определению периода коммутации тока

при опыте от 0 до 500 А. В цепь секции были включены амперметр и шлейф осциллографа, позволявшие определить величину и форму кривой тока. Для измерения величины поперечного потока рассеяния паза и головок зубцов у основания зуба и в верху зуба были намотаны катушечки из тонкой проволоки. Эти катушечки затем присоединялись к флюксметру. По данным замера флюксметром найдены удельные проводимости, приведенные в таблице. Там же даны удельные проводимости, полученные из расчета без учета демпфирования. Из таблицы видно, что расчет рассеяния дает хорошее совпадение с опытом.

Таблица

Рассматриваемый случай	По рас- чету		По флюкс- метру		По осциллограммам				Массивный полюсный наконеч- ник $T=0,002\text{sec}$		
					шихтов. по- люсный на- конечник при $T=0,001\text{ sec}$		массивный полюсный наконечник $T=0,001\text{ sec}$				
	$\lambda_n + \lambda_z$	$\lambda_z$	$\lambda_n + \lambda_z$	$\lambda_z$	$\lambda_n + \lambda_z$	$\lambda_z$	$\lambda_n + \lambda_z$	$\lambda_z$	$\lambda_n + \lambda_z$	$\lambda_z$	
$\delta_{cp} =$	1,7 mm	5,9	4,16	5,9	4,15	4,28	3,11	3,96	2,5	5	3,43
	2,5 "	4,64	3,04	4,92	2,95	3,9	2,49	3,4	2,02	—	—
	2,85 "	4,32	2,72	—	—	3,75	2,33	—	—	—	—
	3,45 "	3,9	2,3	—	—	3,4	1,85	—	—	—	—
	3,6 "	3,81	2,21	—	—	—	—	2,85	1,55	—	—
	6,35 "	2,93	1,33	—	—	2,8	1,15	2,6	0,94	—	—
При отсут- ствии до- полнитель- ных полю- сов . . .		2,39	0,79	2,78	0,92	2,54	0,90	—	—	—	—

Здесь  $\lambda_n + \lambda_z$  — суммарная удельная проводимость паза и головок зубцов;  
 $\lambda_z$  — удельная проводимость головок зубцов.

Дальнейшие опыты были проведены для определения степени демпфирования потока рассеяния головок зубцов. Для этого была применена схема *в* рис. 4. В этой схеме в качестве источника тока был использован высокочастотный генератор. Регулированием его числа оборотов частота изменялась от 250 до 500 Hz. При первых опытах объем тока в пазу менялся от +250 до -250 А (при частоте  $f = 500$  Hz) за полпериода  $T = \frac{1}{2 \cdot 500} = 0,001$  sec; при последующих опытах

(частота  $f = 250$  Hz) — за время  $T = \frac{1}{2 \cdot 250} = 0,002$  sec.

Время изменения тока в пазу при опыте было выбрано на основании подсчета. Данные подсчета показывают, что период коммутации паза *T* (рис. 5) для нормальных машин нахо-

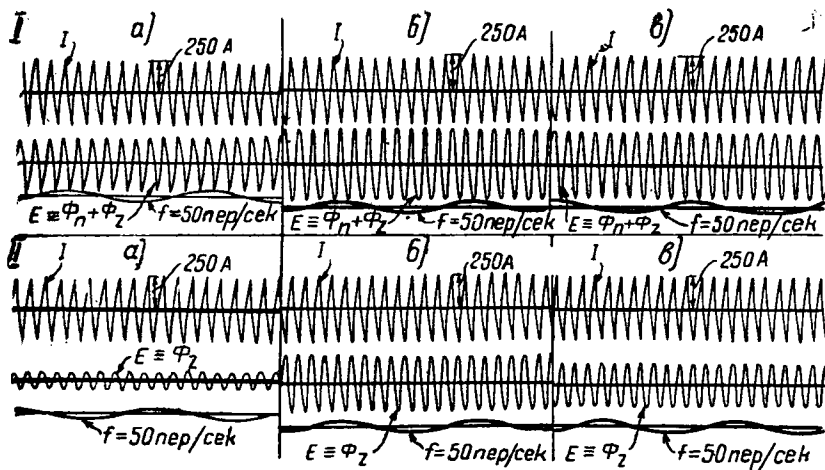


Рис. 6.

*I* — рассеяние паза и головок зубцов; *II* — рассеяние головок зубцов:  
 а) при отсутствии дополнительных полюсов,  
 б) при шлифованных наконечниках ( $\delta = 1,7$  мм),  
 в) при массивных наконечниках

дится примерно в тех же пределах, которые имели место при опытах, — от 0,001 до 0,002 сек. Для измерения поперечного потока рассеяния паза и головок зубцов катушечки (рис. 4, б) присоединялись к шлейфу осциллографа. На рис. 6 (*I* и *II*) приведена небольшая часть осциллограмм, полученных при опыте (э. д. с., индуктированных потоком рассеяния в измерительных катушечках). На рис. 1 даны осциллограммы э. д. с., индуктированных суммарным потоком паза, и головок зубцов в нижней катушечке; *II* дает осциллограммы э. д. с., индуктированные в измерительной катушке потоком рассеяния головок зубцов.

По осциллограммам были определены удельные проводимости, которые приведены в таблице. По данным таблицы построены кривые изменения удельной проводимости зубцов в зависимости от величины зазора (рис. 7, а) и кривые коэффициента демпфирования — отношения величины рассеяния при массивных наконечниках или шлифованных к рассеянию головок зубцов при отсутствии демпфирования (рис. 7, б).

Из таблицы и кривых рис. 7 можно сделать ряд заключений.

При малом воздушном зазоре удельная проводимость головок зубцов значительна. Коэффициент демпфирования потока рассеяния зубцов  $k_d$  при  $T_k = 0,001$  сек и массивных наконечниках равен в среднем 0,65, т. е. вследствие демпфирования удельная проводимость уменьшается на 35%. При шлифованных же наконечниках в среднем можно считать  $k_d$  равным 0,85. Из таблицы так-

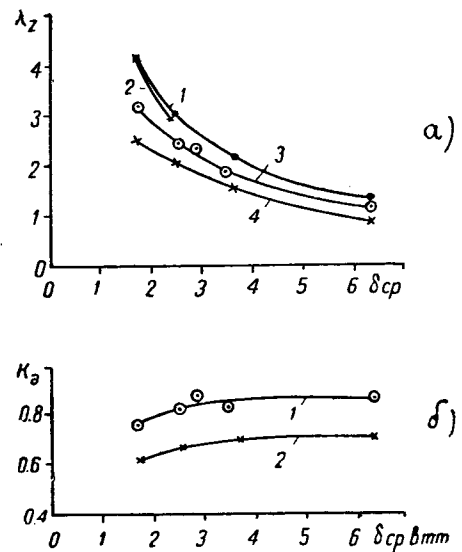


Рис. 7.

а.  $\lambda_z = f(\delta_{cp})$ . 1 — расчетная кривая; 2 — по флюксметру; 3 — по осциллограммам для шлифованного наконечника; 4 — по осциллограммам для массивного наконечника.  
 б.  $k_d = f(\delta_{cp})$  при шлифованном 1 и массивном 2 полюсном наконечнике

же видно, что при большей величине  $T_k$  (0,002 сек) уменьшается степень демпфирования, так что коэффициент демпфирования  $k_d = \frac{3,43}{4,15} = 0,83$  (вместо прежней величины 0,65). Так как период коммутации паза для нормальных машин находится примерно в пределах 0,001—0,002 сек, то можно принять средний коэффициент демпфирования для массивных наконечников дополнительных полюсов равным  $k_d = 0,7$ . Тогда окончательные выражения для удельной проводимости головок зубцов у машин с массивными наконечниками дополнительных полюсов примут вид:

$$\lambda_{z \max} = 0,1 \pi \frac{b_d k_d}{k_1 \delta_{cp}} = 0,2 \frac{b_d}{k_1 \delta_{cp}}; \quad (6a)$$

$$\lambda_{z \text{ ср}} = 0,4 \pi \frac{b_d k_d}{6 k_1 \delta_{cp}} = 0,15 \frac{b_d}{k_1 \delta_{cp}}.$$

Например, для машины мощностью 6,5 kW при  $b_d = 2,5$  см,  $k_1 = 1,14$  и  $\delta_{cp} = 0,21$  см максимальное значение удельной проводимости потока головок зубцов

$$\lambda_{z \max} = 0,2 \frac{b_d}{k_1 \delta_{cp}} = 0,2 \frac{2,5}{1,14 \cdot 0,21} \approx 2,1.$$

Среднее значение

$$\lambda_{z \text{ ср}} = 0,15 \frac{b_d}{k_1 \delta_{cp}} = 0,15 \frac{2,5}{1,14 \cdot 0,21} \approx 1,6.$$

# Измерение коэффициента мощности в трехфазных цепях одним ваттметром

А. В. Коллегин

Крымэнерго

Для УСПЕШНОЙ борьбы за улучшение  $\cos \varphi$  каждому промышленному предприятию необходимо знать текущую величину этого коэффициента в разные часы суток при различных режимах работы в отдельных элементах электроустановки. Такой контроль проще всего осуществляется помощью установленного на щите ваттметра.

**Случай 1.** Трехфазная цепь с равномерной — моторной — нагрузкой фаз (рис. 1).

При нормальном положении  $ab$  переключателя ваттметр показывает активную мощность  $P_A$ . При перестановке переключателя в положение  $ac$  ваттметр покажет <sup>1</sup> мощность

<sup>1</sup> Вывод аналогичной формулы для рассматриваемого случая (также для случая 2) приведен в статье автора «Косинусные методы измерения реактивной электроэнергети», «Электричество» № 17, 1934.

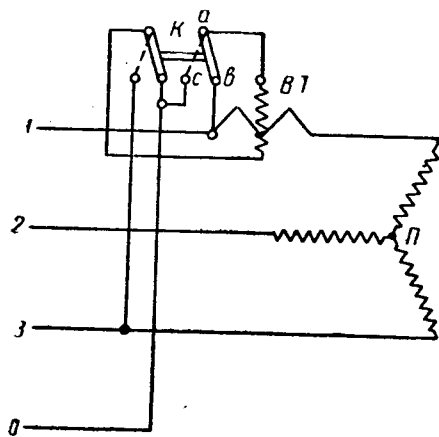


Рис. 1.

$\Pi$  — приемники (электромоторы);  $BT$  — щитовой ваттметр типа ВИН;  $K$  — переключатель

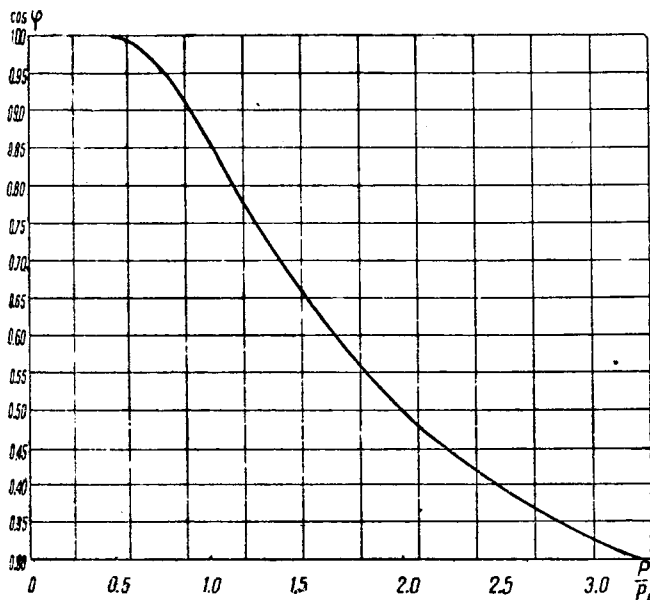


Рис. 2

$$P = \frac{P_A}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} P_P,$$

где  $P_P$  — реактивная мощность.

Пользуясь кривой или номограммой (рис. 2 и 3), построенными на основании приведенной формулы, можно легко определить  $\cos \varphi$ .

**Случай 2.** Трехфазная трехпроводная цепь с неравномерной нагрузкой фаз (рис. 4).

Произведя такие же измерения, как и в случае 1, определяем  $\cos \varphi$  при помощи рис. 2 и 3.

**Случай 3.** Трехфазная четырехпроводная цепь с неравномерной нагрузкой фаз (рис. 5).

Ваттметр, применяемый в этой схеме, аналогичен по своему устройству трехфазному счет-

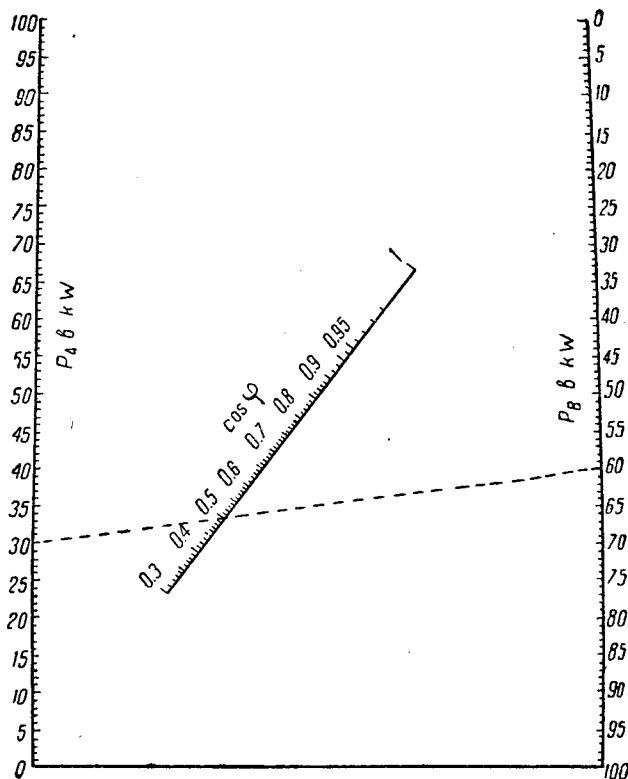


Рис. 3

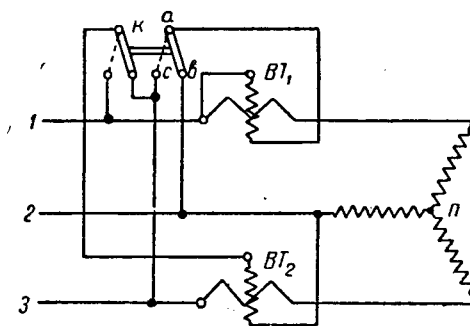


Рис. 4.

$\Pi$  — приемники (лампы и электрические моторы);  $BT_1$  и  $BT_2$  — элементы щитового ваттметра типа ВИН;  $K$  — переключатель

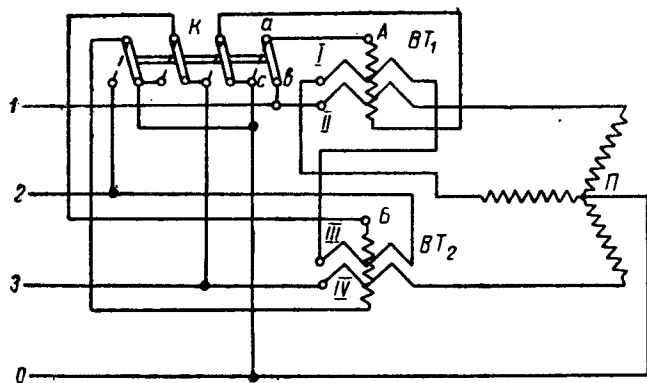


Рис. 5.

$\Pi$  — приемники (лампы и электромоторы);  $BT_1$  и  $BT_2$  — элементы щитового ваттметра для четырехпроводных цепей;  $K$  — переключатель

чику типа Иг и может быть переделан из ваттметра ВИТ заменой каждой из его двух токовых обмоток двумя обмотками с числом витков, меньшим прежнего в  $\sqrt{3}$  раз. Значения шкалы должны быть, понятно, увеличены в  $\sqrt{3}$  раз.

При положении  $ab$  переключателя ваттметр показывает, как известно, активную мощность  $P_A$ . При положении же  $ac$  переключателя показание ваттметра

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4,$$

где  $P_1$  — часть показания ваттметра, обусловленная взаимодействием обмоток  $I$  и  $A$ ;  $P_2$  — обмоток  $II$  и  $A$ ;  $P_3$  —  $III$  и  $B$  и  $P_4$  — взаимодействием обмоток  $IV$  и  $B$ .

Обозначим:  $U_1, U_2$  и  $U_3$  — фазовые напряжения;  $I_1, I_2$  и  $I_3$  — фазовые токи;  $\varphi_1, \varphi_2$  и  $\varphi_3$  — углы сдвига фаз между токами и соответствующими им фазовыми напряжениями.

Предположим, что звезда напряжений не искажена, т. е.

$$U_1 = U_2 = U_3 = U;$$

$$\angle(U_1, U_2) = \angle(U_2, U_3) = \angle(U_3, U_1) = 120^\circ.$$

Тогда на основании схемы рис. 5 и диаграммы рис. 6 будем иметь:

$$P_1 = -\frac{UI_2 \cos \varphi_2}{2} + \frac{\sqrt{3} UI_2 \sin \varphi_2}{2}$$

$$P_2 = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{2} + \frac{\sqrt{3} UI_1 \sin \varphi_1}{2}$$

$$P_3 = UI_2 \cos \varphi_2;$$

$$P_4 = \frac{UI_3 \cos \varphi_3}{2} + \frac{\sqrt{3} UI_3 \sin \varphi_3}{2}.$$

Следовательно,

$$P = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{2} + \frac{UI_2 \cos \varphi_2}{2} + \frac{UI_3 \cos \varphi_3}{2} + \frac{\sqrt{3} I_1 \sin \varphi_1}{2} + \frac{\sqrt{3} I_2 \sin \varphi_2}{2} + \frac{\sqrt{3} I_3 \sin \varphi_3}{2} = \frac{P_A}{2} + \frac{\sqrt{3} P_p}{2},$$

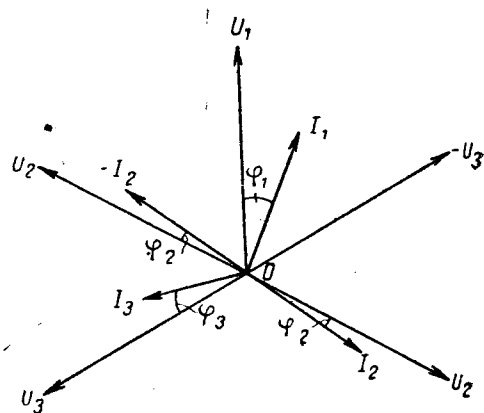


Рис. 6

т. е. имеем для  $P$  то же самое выражение, что и в случаях 1 и 2.

Таким образом все три случая аналогичны в смысле определения  $\cos \varphi$ .

Изложенный способ определения  $\cos \varphi$  в сравнении с общеизвестным методом измерения его одним (однофазным) ваттметром имеет следующие преимущества.

Можно измерять  $\cos \varphi$  не только при равномерной (случай 1), но также и при неравномерной нагрузке фаз (случаи 2 и 3) как в трехпроводной, так и в четырехпроводной трехфазной цепи.

Его возможно применять в особенно распространенных в настоящее время трехфазных электроустановках напряжением 380 В при наличии ваттметра<sup>2</sup> на напряжение 220 В (случаи 1 и 3).

В общеизвестном способе в отличие от изложенного измерения  $\cos \varphi$  одним ваттметром мощность получается косвенным путем как сумма двух отсчетов по ваттметру. Следовательно, он дает большую погрешность.

В сравнении же с общеизвестным способом измерения  $\cos \varphi$  помощью ваттметра, вольтметра и амперметра описываемый способ имеет первое из перечисленных преимуществ. Кроме того, он обуславливает большую простоту измерений (два отсчета по измерительным приборам вместо трех и применение для определения  $\cos \varphi$  простых графиков).

Недостатком изложенного способа является то обстоятельство, что его можно применять только при незначительных колебаниях нагрузки.

В заключение следует указать, что один и тот же ваттметр можно использовать для измерения  $\cos \varphi$  в нескольких цепях, применив для этой цели переключатели или специальный контроллер.

<sup>2</sup> Ваттметры ВИН и ВИТ выпускаются заводом для непосредственного включения в цепь, без трансформатора напряжения, на предельное напряжение 220 В.



# Построение искусственных характеристик серийного двигателя при универсальном включении

И. М. Ключко

Харьковский электротехнический институт

ПОДБОР НАИВЫГОДНЕЙШИХ характеристик для того или иного привода является задачей очень сложной и осуществляется методом последовательного приближения. Представленная на рис. 1 схема, являясь комплексом нескольких вариантов включения, дает возможность значительно облегчить труд расчетчика. Благодаря тому, что необходимый вид характеристики может быть получен путем изменения определенного сопротивления.

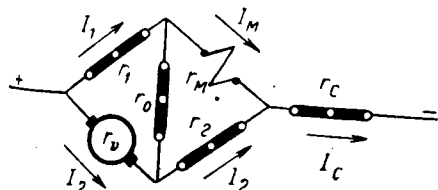


Рис. 1

Анализируя характеристики, получаемые при универсальной схеме включения рис. 1, можно заключить, что схема является наиболее гибкой для выбора наивыгоднейших характеристик двигателя.

Известна следующая зависимость между магнитным потоком  $\Phi$ , током якоря  $I_a$ , оборотами  $n$  и моментом  $M$ :

$$n = \frac{U - I_a r_a}{c \Phi} \quad (1)$$

$$M = I_a c \Phi \eta \quad (2)$$

где  $r_a$  — сопротивление якоря;

$U$  — напряжение на зажимах его;

$\eta$  — к. п. д. двигателя.

В случае универсального включения для определения зависимости  $n = f(I_a)$  необходимо найти связь между  $I_a$  и  $c \Phi$ . Обозначив ток, протекающий по обмотке возбуждения серийного двигателя, через  $I_m$  и воспользовавшись естественной характеристикой данного двигателя  $n = f(I)$ , можно ток  $\Phi$  выразить, через ток  $I_m$  и соответствующие ему обороты  $n_m$ :

$$c \Phi = \frac{U - I_m (r_a + r_m)}{n_m} \quad (3)$$

где  $U$  — напряжение, подводимое к двигателю при нормальном включении.

Так как при универсальном включении серийного двигателя всегда будет существовать взаимная зависимость между токами  $I_m$  и  $I_a$ , то выражение для  $(c \Phi)$  из уравнения (3) можно подставить в уравнение (1) и (2):

$$n = n_m \frac{U - I_a r_a}{U - I_m (r_a + r_m)} \quad (4)$$

$$M = I_a \left( \frac{U - I_m (r_a + r_m)}{n_m} \right) \eta \quad (5)$$

Чтобы исключить к. п. д. двигателя, можно момент  $M$  выразить через момент, соответствующий по естественной характеристике току  $I_m$ :

$$\left. \begin{aligned} M &= I_a c \Phi \eta; \\ M_m &= I_m c \Phi \eta; \\ M &= M_m \frac{I_a}{I_m}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Следовательно, для окончательного вывода уравнений (4) и (6) необходимо определить зависимость между током якоря  $I_a$  и током, протекающим по обмотке возбуждения  $I_m$ , а также выразить величину напряжения  $U$  через ток  $I_a$  и полное напряжение  $U$ . Для решения этой задачи воспользуемся методом трансформации.

Обозначив:

$$\left. \begin{aligned} R_I &= \frac{r_m r_0}{r_m + r_0 + r_2}; & R_{II} &= \frac{r_0 r_2}{r_m + r_0 + r_2}; \\ R_{III} &= \frac{r_m r_2}{r_m + r_0 + r_2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

После преобразования найдем:

$$I_m = \frac{U(r_0 - R_I) - I_a[r_0 - R_I)(R_{III} + r_c) - R_{II}(R_I + r_1 + R_{III} + r_c)]}{r_0(R_I + r_1 + R_{III} + r_c)} \quad (8)$$

а подставляя значение  $U$  в (4), получим окончательный вид уравнения для определения числа оборотов:

$$n = n_m \frac{U \left( \frac{R_I + r_1}{R_I + r_1 + R_{III} + r_c} \right) - I_a \left[ \frac{(R_I + r_1)(R_{III} + r_c)}{R_I + r_1 + R_{III} + r_c} + R_{II} + r_a \right]}{U - I_m(r_a + r_m)} \quad (9)$$

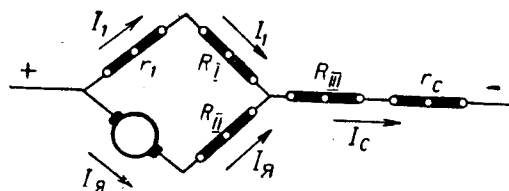


Рис. 2

Для удобства вычисления ниже все сопротивления выразим в процентах от нормального сопротивления  $R_{II} = \frac{U}{I_m}$ .

Пользуясь выведенными уравнениями (8) и (9), можно получить уравнение  $n = f(I_a)$  для любого частного случая включения двигателя. Например,  $r_1 = r_2 = \infty$  (рис. 3) будет соответствовать нормальному включению серийного двигателя.



Рис. 3

Подставляя заданные значения  $r_1$  и  $r_2$  в уравнения (8) и (9), получим:

$$\begin{aligned} I_m &= I_a; \\ n &= n_m \frac{100 - \frac{I_a}{I_m} (r_a + r_m + r_0 + r_c)}{100 - \frac{I_a}{I_m} (r_a + r_m)}; \end{aligned}$$

$r_0 = \infty$ , что соответствует схеме рис. 4.

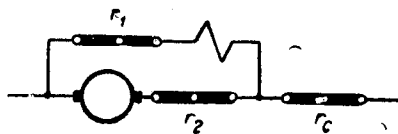


Рис. 4

$$\begin{aligned} \frac{I_m}{I_a} &= \frac{100 - \frac{I_a}{I_m} r_c}{r_m + r_1 + r_c}; \\ n &= n_m \frac{100 \frac{r_1 + r_m}{r_1 + r_m + r_c} - \frac{I_a}{I_m} \left[ \frac{r_c(r_1 + r_m)}{r_1 + r_m + r_c} + r_2 + r_a \right]}{100 - \frac{I_a}{I_m} (r_a + r_m)}; \end{aligned}$$

$r_2 = \infty$  (рис. 5)

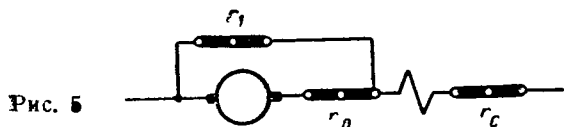


Рис. 5

$$\frac{I_M}{I_H} = \frac{100 + \frac{I_H}{I_M} r_1}{r_1 + r_M + r_c};$$

$$n = n_M \frac{100 \frac{r_1}{r_1 + r_M + r_c} - \frac{I_H}{I_M} \left[ \frac{r_1 (r_M + r_c)}{r_1 + r_M + r_c} + r_0 + r_H \right]}{100 - \frac{I_H}{I_M} (r_H + r_M)};$$

$r_1 = \infty$  (рис. 6).

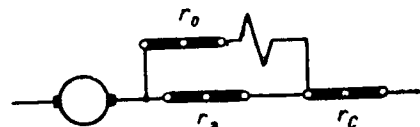


Рис. 6

$$\frac{I_M}{I_H} = \frac{I_H}{I_M} \frac{r_2}{r_M + r_0 + r_2}$$

$$n = n_M \frac{100 - \frac{I_H}{I_M} (R_{III} + r_c + R_{II} + r_H)}{100 - \frac{I_H}{I_M} (r_H + r_M)}.$$

Таким образом универсальная схема включения (рис. 6) дает возможность получить любые характеристики.

## ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

### Начальный этап учения об электричестве

М. И. Радовский

Ленинградский электротехнический институт  
инженеров связи и сигнализации

**ПЕРВЫЕ** шаги научного исследования загадочных электрических явлений, известных еще с древних времен, были сделаны на грани XVI и XVII вв., именно в тот период, когда создавались начальные представления современного естествознания.

Вместе с ростом естественных наук и учение об электричестве постепенно превращалось в грандиозную отрасль физики. Незначительный участок знаний, привлекавший на первых этапах внимание лишь немногих исследователей, со временем передвигается в центр естественно-научных представлений. Не меньшее значение имело и практическое использование электричества. Многочисленные достижения современного материального производства оказались тесно связанными с применением электрической энергии.

И учение об электричестве и его практическое применение, достигшее необычайных высот, еще далеки от кульминационной точки развития. Тем не менее вряд ли может быть какое-нибудь сомнение в том, наступило ли время для углубленного изучения того исторического пути, который проделала эта важнейшая отрасль научно-технических знаний. В настоящее время является общепризнанным положение, что современная материальная культура развивается под знаком электрификации народного хозяйства, как и физические воззрения наших дней проникнуты представлениями об электричестве.

Началом учения об электричестве принято считать 1600 г., когда вышел в свет трактат знаменитого английского врача Вильяма Гильберта (1543—1603) «О магните, магнитных телах и самом большом магните — земле». Как показывает само название, автора интересовали явления магнитные. Им он посвятил свыше полутора десятков лет упорных и систематических исследований, создавших ему заслуженную славу отца современного учения о магнетизме.

Эти исследования английского ученого были отнюдь не случайными. Ближайшее знакомство с эпохой, в которой жил и работал Гильберт, показывает, что они были подготовлены и обусловлены всем предшествующим социально-экономическим развитием как самой Англии, так и других стран, где новые, капиталистические отношения совершали свое победное проникновение в общественную жизнь. Англия, как отмечает Маркс, была только наиболее передовой страной в этом отношении.

Эпоха, в которую были созданы труды Гильберта, носит название эпохи первоначального накопления.

Отличительные черты ее всесторонне рассмотрены Марксом в специальной главе I т. «Капитала» (гл. 24). К основным из них относятся ограбление колониальных народов и торговля рабами — моменты немаловажные в создании мирового рынка.

Развитие международного рынка вызвало к жизни и виданное в истории мореплавание. Возникают мировые морские пути сообщения, перед которыми меркнут так называемые великие водные пути древности и средневековья. Начинается океанское судоходство, возможны лишь при условии употребления надежных компасов основательного знакомства с магнитными явлениями.

Компас, вошедший в практику европейского мореплавания еще в XIII в., скоро стал неотъемлемым прибором в этой важнейшей отрасли транспорта. Однако отсутствие научных исследований в области магнетизма было причиной того, что употребление компасов часто ставилось ненадежным: так называемые магнитные склонения, обусловленные несовпадением магнитных и географических полюсов земного шара, не могли не притягивать к себе внимание исследователей еще задолго до Гильберта. Однако все наблюдения носили настолько несистематический, разрозненный характер, что до самого конца XVI в. существовало магнетизма как определенной научной дисциплины.

Между тем накопленные данные и настоятельные требования практики диктовали необходимость создания этой области науки. Налицо были необходимые условия для появления такого исследователя, который привел бы в систему все известные факты и на основе экспериментальной проверки последних сделал бы новый шаг.

Таким исследователем был Гильберт.

Но Гильберт опирался не только на данные, накопленные его предшественниками. Он и сам обогатил учение о магнетизме многочисленными открытиями. Одним из самых блестящих экспериментаторов, каких только знала начальная история нового естествознания, верный эмпирическому методу, он неизменно искал новых фактов. «Весьма легко людям даже с острым умом, — подчеркивал Гильберт, — без опытов заблуждаться и затемнять полезную истину». Вместе с тем ему было чуждо преклонение перед голыми фактами. Сочинение Гильберта по магнетизму, выходящее по своему времени за пределы исследования электрических явлений. Но его главней-

искусства заключаются в опытной части его исследований. По мнению многих историков науки как экспериментатор он не уступает даже Галилею, который, кстати сказать, оставал большую дань теоретическим обобщениям английского ученого.

Трактат Гильберта был в высшей степени новым и оригинальным. Так писать, как писал Гильберт, можно было только, живя не на континенте Европы. За пропаганду новых идей в естествознании католическая церковь, как известно, расправлялась самым жестоким образом. В том же 1600 г., когда был издан труд Гильберта, вышел на костер Джордано Бруно, а через несколько лет не избежал застенка инквизиции и Галилей.

Гильберт открыто выступил против душителей «истинной философии», как он называл естествознание. «Зачем стал бы я, — писал он в предисловии к «De Magnete», — в обширном океане книг, какими смущаются и переполняются умы учащих, какими оупьяняют эту толпу и люди грубого ума, — безумствуя, надумавшись, учиня литературные побоища, производя себя в философы, медики, математики, астрономы, а истинно учеными людьми пренебрегая и презирая их, зачем, говорю, стал бы сообщать что-либо дальнейшее этой мятущейся ученой республике и излагать сию славную и наследствие многого неслыханного как бы совершенно новую и невероятную философию людям, слепо верящим чужим мнениям, нелепешим искажениям, грамматикам, софистам, придирам и извращенной сволочи, излагать на осуждение и терзание проклятиями. Нет, к вам только, мужам разума и истинной философии, ищущим науки не в книгах только, но и в самых вещах, обращаю я эти основания магнитной науки, добытые новым рядом философствования».

За двадцать с лишним веков, истекших с момента, когда знаменитый греческий философ древности Фалес Милетский наблюдал впервые электрические явления, — единственное явление природы обволакивалось, особенно в трудах средневековых схоластов, мистическими баснями. Публикацию своих исследований по электричеству Гильберт начинает с решительного выступления против этих «омрачений».

«Магнит и янтарь, — писал он, — призываются многими философами, когда они, стремясь изъяснить сокровенное, омрачают разум, препятствуя его движению вперед. Любопытнейшие же богословы объясняют божественные тайны, сущие за пределами человеческого ума, действием магнита и янтара, а пустые метафизики, распространяя бессладкие фантазии, учат, что магнит подобен дельфийского меча ко всему приложим... Так, многие взялись за дело, причину которого объяснить не могут, вводя магнит и янтарь в качестве замаскированных защитников, и вследствие всем им общей ошибки — незнания причины магнитных движений и притягивания янтара — далеко расходятся, легко колеблются и сами обобщаются своими соображениями».

Твердо убежденный, что истину надо искать «в самих вещах», Гильберт обследует предмет, над которым он работает.

«Преки, — писал он, — называют янтарь электроном, так как разогретый трением он притягивает к себе соломинки, поэтому говорится еще и хризифором (по золотистому его цвету)».

Лингвистический анализ привел Гильберта к заключению, что именно греческое название отвечает сущности исследуемого им явления.

Всестороннее изучение Гильбертом предмета исследования приводит к следующему: только свойства янтара, приобретаемые им при натирании, являются предметом изучения. Но Гильберт обращает внимание и на самое вещество, интересуется не только его природой, но и его происхождением. Он собирает о нем все доступные ему сведения.

«Янтарь по большей части происходит из моря; так, после сильнейших бурь его находят и собирают по берегам мелкими сетями и другими приспособлениями precisely как в Пруссии, так и на нашем Британском побережье. Он образуется в глубинах земли (так же, как остальные земляные смолы), выносятся волнами моря и под действием морской воды и соли, сгущаясь, затвердевает. Первоначально же бывает мягкой и клейкой массой, поэтому мушки, червячки, комары, муравьи, поlying в маленькие комочки и в них угробленные, сохраняются вечно прозрачных гробов в том виде, как они прилетели, вползли или упали».

Столь старательное знакомство с веществом, одно лишь свойство которого он исследует, не является плодом ненасытного любопытства досужего естествоиспытателя. Оказывается, что проникновение в природу предмета необходимо Гильберту, как увидим это ниже, для того, чтобы дать некоторую теорию электрических явлений. Как высоко ни ставил он опыт, ему он приписывал роль примата в естествознании — сами по себе факты без их обобщения и технического осмысления не составляли еще науки в глазах Гильберта.

«Наш век дал много книг о скрытых, сокровенных и тайных явлениях и чудесах, и во всех них янтарь и гагат приводятся как притягивающие соломинки, но из опытов не выводится ни причины ни доказательств; авторы орудуют только словами, набрасывающими лишь большой мрак на самую сущность дела. Посему такая философия не приносит никакого плода (эти всезнайки цеголяют несколькими греческими словами или употребляют слова грубой черни, считая это верхом искусства и огребают народное золото), а многие философы, ничего самостоятельно не доискаясь, досужие и бездельные, ничему не споспешествуют своими «памятниками» и сами не видят, какой свет они могли бы пролить своими рассуждениями».

Но раньше, чем рассматривать теоретические выводы, к которым пришел Гильберт, необходимо остановиться на экспериментальной части его исследования. К сожалению, он не дает описания тех многочисленных опытов, которые он осуществил. Приведены только результаты и то не в хронологической последовательности, как они были им получены, а в связанном изложении. Из него видно, что Гильберт испытал огромное количество веществ и нашел, что интересующим его свойством янтара отличаются и многие другие тела.

«Привлекают разные тела также и алмаз, сапфир, карбункул, ирис, опал, аметист, венцетина и бристол (английский драгоценный камень); берил и хрусталь делают то же. Такую же силу притяжения имеет, повидимому, и стекло (особенно чистое и прозрачное), затем поддельные драгоценные камни, составленные из стекла и хрустала, сурьмяное стекло и многие рудные жилы, а также беленыты. Притягивают также сера, мастика и твердый воск для печатей, составленный из окрашенных разными цветами лаков. Притягивает затвердевшая смола, как и мышьяк, но гораздо слабее, едва-едва; в сухом климате — кристаллы соли, слюда и горные квасцы».

Все эти вещества при натирании обнаружили «электрическую силу»: все они притягивали легкие предметы. Но Гильберт экспериментировал с множеством других веществ, которые никакой «электрической силы» не обнаруживали. Это привело его к выводу, что в природе существуют электрические и неэлектрические тела. Таким образом осталось найти причину этого различия, исследуя природу самих явлений.

«Причину этого, — пишет Гильберт, — мы поймем, когда исследуем первичные тела. Земная масса, или, лучше сказать, состав земли и ее коры, как всем известно и всеми принят, состоит из двух частей: жидкости (влаги) и твердого и сухого вещества. Из этой двойственной природы или простейшей конкреции возникают различные тела, природа которых то земляная, то водяная. Те, которые возникают из жидкости и, густея, принимают формы простейшей конкреции, и те, которые в течение долгих веков сами собой свариваются и окончательно затвердевают: впоследствии, будучи очищены, отполированы и натерты, они притягивают к себе все тела, находящиеся в воздухе, если только этому не воспрепятствует большой вес. Ибо янтарь вырастает из влаги, также и гагат; прозрачные гемы происходят из воды, также и хрусталь, сплывающийся постепенно из прозрачной влаги, не всегда при сильнейшем холоде и резком морозе (как думают некоторые), но иногда и при слабой силе солнца в скрытых влагою впадинах наподобие того, как рождаются рудные жилы. Таким же образом свариваются из песка прозрачное стекло и другие субстанции, ведущие свое начало от влажных веществ. Куски же металла, камни и скалы, деревья, держащие землю или смешанные с большим количеством земли, не привлекают к себе других тел».

Рассуждения Гильберта толкали на мысль, что «электрические тела» обладают некоей жидкостью, которая при натирании и является носительницей «электрической силы». Оставаясь верным своему убеждению, что без

опыта легко заблуждаться всем людям без исключения, он старается экспериментально проверить сделанные им выводы. Раз «электрические тела» сохраняют известную влагу, следовательно, внешним воздействием ее можно удалить. Так рассуждал Гильберт и направил в эту сторону свои опыты. Полученные результаты окончательно укрепили его теорию.

«Хрусталь, слюда, стекло и янтарь, если их жечь или если они пересохнут, перестают привлекать к себе тела, ибо начала влаги погибают от жара, и они, изменяясь, умирают. Следовательно, все то, что возникло из преобладания влаги в крепкой конкреции и удержало свою первоначальную природу в крепком теле, привлекает все тела — как влажные, так и сухие».

Таким образом, казалось, что учение об электричестве при самом своем зарождении обрело стройную и вполне четкую теорию. Однако сам Гильберт не мог не заметить, что его теория не объясняет всех известных ему фактов. Никто иной, как он сам, прекрасно знал, что «все то, что действительно представляет части земного тела или немного от него отличается, тоже, как кажется, может оказывать «притяжение». Но это выходящее из созданного им ряда явление он объяснил «совершенно другой причиной, — скажем, силой магнетизма», — писал Гильберт.

Идея Гильберта об «электрических истечениях», которые представляют собой «тончайшую материю», долго питала многих исследователей, пытавшихся теоретически осмыслить электрические явления. Заслуги Гильберта заключаются еще в том, что он строго разделил электрические и магнетические явления. В свое время это имело весьма важное значение. Электрические явления более не отождествлялись с магнитными и стали предметом самостоятельного изучения. Такое разделение имело благотворное влияние только до поры до времени. По мере накопления новых данных наука все чаще указывала на сродство электрических и магнитных явлений, пока Андре-Мари Ампер не выдвинул своей знаменитой «магнитной» теории электричества и Михаилу Фарадею не удалось «превратить электричество в магнетизм».

Влияние трудов Гильберта на дальнейшее развитие учения об электричестве было огромно. Однако оно сказалось не сразу: прошло свыше полстолетия, пока был сделан следующий шаг. Сделал его знаменитый ученый XVII в. Отто фон-Герике.

Для истории науки исследования Герике в области электричества остаются одним из самых невыясненных вопросов. Неизвестно, в каких условиях он работал и что толкнуло его — изобретателя воздушного насоса и магдебургских полушарий — заняться изучением электрических явлений. Все, что дошло до нас, заключается в XV гл. 4-й книги его известных трудов.

Из этого более чем ограниченного документа, однако, явствует, что труды Герике были весьма существенны и что вклад его в учение об электричестве по тем временам был весьма выдающимся. К тому же в авторе замечательно сочетались редкие качества крупнейшего ученого и исключительно талантливого изобретателя.

Заслуги Герике состоят прежде всего в том, что он, так сказать, механизировал процесс возбуждения электрических зарядов. До него все исследователи, в том числе и Гильберт, добывали электрические заряды путем натирания «электрического тела» каким-нибудь веществом. Герике же изобрел для этого специальное приспособление, с описания которого он начинает главу, посвященную описанию его электрических опытов.

Как ни примитивен с современной точки зрения аппарат Герике, он тем не менее представляет собой прототип простейшего электростатического генератора. Более того, изобретение Герике должно быть признано первым электрическим генератором вообще. Во всяком случае, работая с таким источником электричества, можно было — и Герике это сделал — значительно расширить новую область знаний.

Добытые Герике данные казались ему настолько грандиозными, что он пытался посредством их разрешить проблемы всего мироздания. Его сочинение не оставляет никаких сомнений в том, что в наэлектризованном им шаре он видел ключ к пониманию законов, которыми управляется земной шар, а также принципов движения луны. На эту мысль его натолкнуло наблюдение над взаимодействием между заряженным шаром и пером, наэлектризованным посредством этого шара.

«Та часть или сторона пера, за которую удерживал его однажды шар, — пишет Герике, — и затем его толкнул, неизменно сохраняется даже в орбите силы, так что если провести шаром над пером, то оно повернется в воздухе и будет обращено к шару той же стороной».

И тут же замечает:

«Разве не по этой же причине происходит то, что луна поворачивает к земле всегда ту же сторону, и без сомнения она также отталкивается от нее в орбите над землей и в ней удерживается».

Но, разумеется, не теоретические обобщения Герике являются тем вкладом, который прославил его имя в истории науки. Достижения Герике заключаются в целом ряде новых открытий, правда, не всегда до конца осознанных, которыми он обогатил учение об электричестве.

До Герике было известно одно лишь свойство названного тела — «электрическое притяжение». Он первый наблюдал и пытался объяснить «отталкивающую силу». Представление о двух разнородных электричествах и их взаимодействии появилось только в следующем, XVIII в. Герике был близок к установлению такого понятия, все же он до него не дошел. Оно было найдено в 30-х гг. XVIII в. французским ученым Дюфа, который в отличие от Герике ставил перед собой вполне ограниченные задачи: его интересовали не космические проблемы, а электрические явления в собственном смысле; им он целиком посвятил свое внимание, стараясь разгадать их специфическую сущность.

Не менее важным является и следующее открытие Герике: он первый заметил «электрическую проводимость».

«Если за вершину заостренной палки, укрепленной на столе или в скамье, зацепить льняную нитку и спустить ее примерно на локоть так, чтобы внизу она могла проходить до какого-либо предмета, удаленного больше, чем на большой палец, то внизу нить соединяется с ближайшим предметом (всякий раз, когда к вершине палки приближается возбужденный шар). Таким образом наглядно доказывается, что эта сила распространяется по всей льняной нитке до ее нижнего конца: то время, как ее притягивает или соединяет с собой шар».

У Герике можно найти представления о «силе звука» и «силе свечения», которые вызываются наэлектризованным телом. Этим явлениям посвящены специальные выделенные параграфы. К сожалению, треск и искры, которыми сопровождалась соответствующая опыты Герике, описаны им чрезвычайно кратко, причем нет никакого упоминания, как впрочем и при описании других опытов, о тех условиях, в которых получались эти эффекты. Поэтому обычно воздерживаются закрепить у Герике приоритет в наблюдении явления треска и искры. Последнее привлекло к себе внимание многих других исследователей несколько позднее, а именно в начале XVIII в. Подробно описывая их, эти ученые ничего не знали об опытах Герике.

Исследования Герике в области электричества прошли вообще мало замеченными. Но достаточное внимание обратил на них Дюфа, который начал публиковать своих трудов с исторического обзора всего того, что было сделано до него.

Должного отклика не вызвали и другие относящиеся к XVIII в. работы по электричеству, хотя они принадлежали крупнейшим исследователям. Достаточно упомянуть флорентийских академиков, затем Бойля и Ньютона. Правда, изыскания этих ученых по части электричества не были так плодотворны, как их же исследования в других отделах физики. Учение об электричестве обогатили лишь некоторыми новыми фактами и их исследования не выходили за пределы чисто эмпирических изысканий. Этим, повидимому, и объясняется то, что никому из них не удалось сказать нового слова, которое могло бы стать началом следующего этапа в развитии учения об электричестве.

Флорентийские академики и не имели в виду строить свои работы с такой целью. Как ученики Галилея они прекрасно знали, что влечет за собой в условиях могущества папских мракобесов высказывание «каких-либо далеко идущих теоретических обобщений». Они-то в Академиях де Сimento создали как корпорацию, преследующую лишь опытные цели, полагая, что против голых фактов, экспериментально установленных, теоретически не обобщенных, Ватикан возражать не

бует. Однако папская власть с самого начала возникновения «Опытной Академии» встретила и это невинное научное учреждение с нескрываемой враждой. Только покровительство герцога Тосканского дало возможность просуществовать этой одной из первых академий Европы около десяти лет. Впрочем герцог закрыл ее без колебаний, когда Рим поставил это непременным условием получения герцогом кардинальского звания.

Многочисленные труды флорентийских академиков были описаны секретарем Академии и изданы на итальянском языке в 1667 г. во Флоренции. Этот объемный том называется: «Естественно-научные опыты, произведенные в Опытной Академии под покровительством светлейшего государя Леопольда Тосканского и описанные секретарем Академии».

Опыты по электричеству начинаются с классификации веществ по признаку их «богатства электрической силой». Опыты с «веществами, обладающими электрической силой», уже известными и вновь выявленными, показывали, что более всех этой силой богат желтый янтарь. Поэтому свойства электрических явлений изучались флорентийскими академиками на зарядах, возбужденных именно в янтаре. В их сочинении неизменно говорится о свойствах янтара.

Первое наблюдение флорентийских академиков заключалось в том, что «янтарь не притягивает лишь одного огня». Но при этом было установлено, что дым, наоборот, притягивается.

Любопытно было наблюдать, — читаем мы в этом трактате, — как при приближении натертого и горячего янтара дым потушенной свечи тотчас же склоняется в его сторону. Одна часть удерживается им, а другая как отражение от зеркала подымается вверх. Притянутая часть собирается в виде облачка, которое по мере сжигания янтара снова расходится в дым и рассеивается».

Дальнейшие опыты привели к заключению, что «пламя не только не притягивается, но если натертый янтарь обводить вокруг него, то сила его пропадает, в то же время «чистый лед не вредит янтарию».

Затем было установлено, что возбуждение «электрической силы» зависит не только от тел, «где имеется ее запас», но и от вещества, которым оно возбуждается. «Не все вещества обладают способностью вызывать силу янтара. Если его тереть о тела с гладкой и прозрачной поверхностью, как стекло, хрусталь, слоновая кость, полированные металлы, драгоценные камни, то сила эта дремлет и не истекает из него».

Весьма важным наблюдением было то, что притяжение есть «взаимное действие». «Обычно думают, что янтарь притягивает к себе тела. На самом же деле — это взаимное действие, и оно принадлежит не только одному янтарию, но также и телам, которыми он притягивается, или же он к ним прилипает не меньше, чем они к нему».

Не во всем удачны были опыты с жидкостями. Установив, что «силу янтара испытывают и жидкости» и «даже ртуть», флорентийские ученые утверждали, что «существуют такие жидкости, смачивание которыми натертого янтара лишает его вышеуказанной силы». Дюфе это утверждение «показалось очень странным». Он тогда воспроизвел опыты и «не нашел ни одной жидкости, которая не притягивалась бы электрическими телами после того, как они были смочены ею, а затем хорошо вытерты и высушены». «Очевидно, — пишет Дюфе, — что вышеуказанные явления зависели от других причин».

Современник флорентийских ученых англичанин Роберт Бойль (Robert Boyle) воздерживался от широких обобщений. Как известно, закон сжатия газов, носящий его имя, был формулирован не им, а французским ученым Мариоттом, почему закон этот и принято называть законом Бойля-Мариотта. Яростный поборник экспериментального метода в естествознании Бойль обогатил физику своими знаменитыми опытами и исследованиями, для ему и не были чужды теоретические размышления. Последние касаются строения вещества и изложены в ряде сочинений.

Исследования Бойля по электричеству описаны им в со работе «Опыты и заметки о механическом происхождении и получении электричества». Само название указывает, каких воззрений на причины электрических явлений придерживался Бойль. Этим вопросом, как мы видели выше, занимался Гильберт, рассматривавший электрические явления как истечение некоторой жидко-

сти из натираемого вещества. Последующие высказывания по этому вопросу были по существу модификациями утверждений Гильберта.

Ученый иезуит XVII в. Николай Кабео предполагал, что при натирании электрического тела из него выступают пары; ударяясь об окружающий воздух, они отталкивают его; последний встречает сильное противодействие в атмосферном воздухе и отгоняется назад. На обратном пути он влечет за собой притягиваемое тело к электрическому.

Другой автор XVII в. Кенелт Дигби высказал гипотезу, которая мало разнится от гипотезы Кабео. Из электрического тела при его натирании истекают маслянистые пары, имеющие ту же температуру, что и теплое — вследствие трения — вещество, из которого они выступают. Выступив наружу, эти пары встречаются с воздухом, обладающим температурой несколько ниже, чем их собственная. Вследствие охлаждения они отступают назад и влекут за собой все легкие тела, лежащие на их пути.

Бойль указывает на эти и на другие гипотезы, как, например, на гипотезу Декарта, которая отвергает предположения Кабео и Дигби. Не высказываясь категорически ни за одну, Бойль, однако, считает, что первые ближе к истине, ибо они допускают «образование электричества благодаря механической силе трения одного притягивающего тела или обоих — как притягивающего, так и притягиваемого».

Без внешнего воздействия «электрические истечения» не имеют места. Бойль объясняет это тем, что пары «электрических тел» закрыты другими веществами, и трение необходимо для их удаления. «Обтирание, как и трение, — пишет Бойль, — образует электричество, удаляя те тела, которые, прилипая к поверхности, закрывают пары янтара и мешают истечению эманации». Вместе с тем Бойль признает, что «электрические тела» только благодаря теплу становятся способными к выделению истечений. Однако лучший эффект получается, когда нагревание «электрического тела» происходит от трения, нежели от огня. «Янтарь притягивает гораздо сильнее, когда он нагрет благодаря трению; в этом случае движение истечений, а также внутренних частиц изменяется более благоприятно, чем при действии огня».

Таким образом для Бойля совершенно ясно «механическое происхождение и получение электричества». Но наблюдения показали, что тела сохраняют «электрические свойства» и по прекращении трения. Это Бойль объясняет тем, что «смятение в частицах массы, вызванное трением, не прекращается тотчас же».

Выяснив «происхождение и получение электричества», Бойль начал исследовать влияние, оказываемое внешними условиями на электрические явления. Опыты с воздухом привели к весьма важному заключению: «Электрическая сила сохраняется и в пустоте». «Чтобы узнать, имеет ли воздух значение при образовании электричества, я подвесил кусок янтара (двигающий при возбуждении уравновешенную стрелку часов, указывающую четверти) в небольшом сосуде, и после откачивания воздуха янтарь притягивал и в пустоте положенные около него перья или солому».

Огромное значение имеет и следующее наблюдение Бойля. Он определенно говорит о «возможности проникновения электрических истечений в поры других тел». Он описывает следующий опыт:

«Кусок янтара мы повесили на шелковой нитке, прилепив его к ней воском. Затем мы натирали его при помощи подушки для булавок, крытой грубой черной шерстяной материей. Когда он был возбужден, ему давали остановиться и подносили подушку к возбужденным концам. Оказалось, что истечения настолько захватывали ее, что янтарь двигался за нею несколько раз в течение 10—11 мин., если ее удаляли от него».

Кроме этого, у Бойля есть еще описание следующего опыта:

«Я воспользовался пушистым пером, вырванным из тела птицы. Когда оно было притянуто янтарем, я приложил к нему кончик пальца, и оно прилипло к нему и отстало от янтара. Такие же результаты были получены, когда опыт производился с кончиком серебряного предмета, железного ключа и кусочка черного полированного мрамора. То же самое получилось, когда опыт был произведен через несколько времени позднее. Но замечательно, что янтарь потерял свою притягивающую силу раньше, чем я прикладывал палец или другие предметы:

перо не желало шевелиться до тех пор, пока янтарь не был возбужден».

Из работ XVII в. необходимо остановиться на опытах Ньютона.

Исаак Ньютон в своих исследованиях самых разнообразных областей физики и других отраслей естествознания один лишь раз и то мимоходом коснулся электрических явлений. В одном выступлении в Королевском обществе (9 декабря 1675 г.), касающемся «гипотезы, объясняющей свойства света», он описал опыты по электричеству. Ньютон натирал кусок стекла шерстяной материей и получал настолько большие заряды, что положенные на стол маленькие кусочки бумаги не только притягивались, но и «подпрыгивали к стеклу... соскальзывали вниз и лежали на столе, затем снова подсакивались, снова спускались и так может быть несколько раз». Ньютон при этом заметил, что сила притягивания зависит также и от натирасмого вещества.

Истолкование Ньютоном наблюдаемых им явлений не идет дальше общих представлений XVII в. об электричестве.

«Откуда же, — пишет Ньютон, — протекают эти беспорядочные движения, как не от некоего тонкого вещества, находящегося в сгущенном состоянии в стекле и разреженного трением, подобно тому, как вода разрежается в пар под влиянием тепла: при этом разрежении оно (вещество) распространяется по всему пространству вокруг стекла и на большое расстояние; оно движется и циркулирует в различных направлениях и таким образом действует на бумагу до тех пор пока не вернется снова в стекло и снова там сгущается».

Перечисленные данные — опыты и выводы из них — собственно и заключают в себе те относительно немногие достижения, которыми обогатилось учение об электричестве в течение первого века своей истории. Лишь в XVIII в. оно разрастается в большую отрасль естествознания, расцвет которой связан с рядом имен глубоких исследователей, посвятивших изучению электрических явлений много лет интенсивнейшего труда.

Начало XVIII в. ознаменовано работами Фрэнсиса Гауксби. Но раньше, чем перейти к рассмотрению того, что было сделано Гауксби, необходимо остановиться на работе одного английского автора д-ра Уолла, в сочинении которого имеется много любопытного.

В письме Уолла к секретарю Королевского общества, озаглавленном «Опыты со свечением янтара, алмазов и камеди» (помещено в «Philosophical Transactions» за 1708—1709 гг.), автор определенно уподобляет электрические явления явления молнии. «Треск и свет до известной степени похожат на гром и молнию».

К занятиям электричеством Уолла привели его опыты с телами, «святившимися ночью». Исследования он начал с фосфора, главным образом искусственного, добываемого из мочи и других отбросов. Получились весьма важные выводы: «Мое знакомство с искусственным фосфором, — пишет он, — заставило меня размышлять над ним и над возможностью существования *in regum natura* (в природе вещей) натурального фосфора... Хорошо известно, что моча человека и навоз изобилуют маслом и обыкновенной солью, так что я считаю, что искусственный фосфор является не чем иным, как животным маслом, коагулированным с минеральной соляной кислотой... Эти соображения заставили меня предположить, что янтарь, рассматриваемый мною как минеральное масло, коагулированное с минеральной летучей кислотой, является натуральным фосфором. Я стал экспериментировать с ним и обнаружил, что легкое потирание в темноте сухой рукой хорошо отполированного куса янтара (в данном случае это был набалдашник моей трости) вело к образованию света. Тогда я достал большой кусок янтара, велел придать ему удлиненную и коническую форму и затем легко проводил по нему совершенно сухой согнутой ладонью: он давал довольно сильный свет. Я применял всевозможные мягкие животные ткани и нашел, что ни одна из них так не подходит, как шерсть. Вслед за этим обнаружились новые явления: протаскивая очень быстро кусок янтара через шерстяную материю и сильно его сжимая в руках, я слышал множество маленьких потрескиваний, и каждое из них давало небольшую вспышку света».

Продолжая свои опыты, Уолл варьировал их и добивался все более ярких эффектов. В ряде случаев это ему удавалось. («Когда я держал на небольшом рассто-

янии от янтара палец, то получался сильный треск с последующей вспышкой света».) Однако он не сумел должным образом истолковать свои наблюдения и в подвинул вперед учения об электричестве. Впрочем Уолл сам прекрасно это сознавал. Для него было совершенно ясно, что его наблюдения могут послужить материалом, на который будут опираться исследователи будущего «счастливого гения». Его скромность выразилась в заключительных строках его сообщения:

«Может быть некоторые сочтут пустяком этот быстрый и краткий отчет о моих наблюдениях, но также смотрели, вероятно, и на притяжение железным магнитом, когда оно было замечено впервые: незначительное само по себе явление дало возможность пытливым умам открыть другие свойства этого минерала, который затем нашел новые применения во многих странах. И я надеюсь, что появится какой-нибудь высокий и счастливый гений, который поднимет эти намеки на высоту, недоступную для лиц с узкими взглядами, обреченных на тесные рамки того, что уже известно, и самодовольство которых успокаивается на *pes plus ultra*. Итак, сэр, меня радуют новые картины природы, видимые в далекой перспективе: они мало совершенны теперь, но в дальнейшем они будут закончены искусной рукой и приспособлены для ближайшего рассматривания, хотя раньше, чем наступит это время, от меня ничего не останется, кроме настоящего свидетельства моего доброгожелательства к человеческому роду и особого уважения к Вам».

Значительный шаг вперед сделал Фрэнсис Гауксби (Fransis Hauksbee), известный в истории учения об электричестве своими многочисленными исследованиями. Собственно Гауксби был первым после Гильберта исследователем, который посвятил области электричества весьма длительные и систематические опыты. Этих вопросов он занимался около десяти лет и опубликовал ряд работ, которые появлялись в «Philosophical Transactions», начиная с 1705 г. Основные исследования по электричеству были им завершены в 1709 г. В том же году они были изданы в выпущенной им книге «Phisico-Mechanical Experiments, 1709».

Об этом исследователе, с именем которого связана одна важная проблема в учении об электричестве, сохранились более чем скудные сведения. Год его рождения неизвестен, дата смерти — не установлена. Принадлежность она относится к 1713 г. Между тем фигура этого экспериментатора представляется весьма интересной. Известно, что в Королевском обществе он занимал место механика, поэтому было бы чрезвычайно любопытно проследить путь, по которому он достиг вершин науки. Но, к сожалению, никаких данных об этом у нас не дошло, и судить о его творчестве можно только по тому материалу, который содержится в опубликованных им самим работах.

После Герике Гауксби был первым исследователем, который соотечел в себе и качества талантливого изобретателя и внимательного наблюдателя. Не сохранилось никаких указаний, был ли Гауксби знаком с трудами Герике. Повидимому, нет. Некоторые наблюдения, описанные уже Герике, повидимому, были сделаны Гауксби самостоятельно. Это видно из того, что к каждому новому достижению он шел своим путем.

К области электричества Гауксби привели его наблюдения над свечением в барометрической трубке при встряхивании. Это явление занимало многих ученых, пытавшихся как-то его объяснить. Гауксби истолковывал его трением ртути о стенки стеклянной трубки, иными словами, объяснял свечение «электрическими причинами». Связанный с Королевским обществом крупнейшей мировой научной корпорацией, Гауксби постоянно докладывал ему о своих наблюдениях и мыслях.

В одном из отчетов об опытах Гауксби находим, например, следующие строки: «Я имел честь произвест перед почтенным обществом несколько опытов, касающихся получения света от разных тел и разными способами; они нашли в нем поддержку, были им одобрены и опубликованы, как представляющие в некоторых отношениях нечто новое сравнительно с тем, что производилось до сих пор». «Это вместе с надеждой сделать еще новые открытия и представить их на рассмотрение общества, а также возвышенность предмета побудили меня продолжать их».

Королевское общество так заинтересовалось исследованием Гауксби, что по одному и тому же вопросу



приходилось выступать неоднократно. Особый интерес вызвало наблюдение Гаусси, описанное им следующими словами:

«Я беру стеклянный шар диаметром около девяти дюймов и, выкачав из него воздух, отделяю его от насоса, но предвзвешиваю повертываю кран, чтобы воздух снова не вошел. После этого я укрепляю его для приведения в движение большим колесом, которое быстро его вращает. Я покрываю всю поверхность шара ладонями, и через некоторое время получается сильный свет. Но я еще передвигаю несколько раз руки с места на место, чтобы удалить отовсюду все влажные истечения (быстро сгущающиеся на стекле). Тогда свет становится настолько ярким, что при нем можно читать слова из заглавных букв, как это было замечено по крайней мере присутствующими джентльменами. В другой раз свет был такой сильный, что без труда можно было заготовить слова, написанные крупным шрифтом, и одновременно хорошо осветилась вся комната, хотя она была значительных размеров. Мы могли видеть стену, находившуюся в десяти футах. Свет казался странного пурпурного цвета и получался при нежном и легком касании ладоней шара, который в то же время стал довольно горячим».

Из этого отрывка видно, что Гаусси, подобно Герике, пользовался в своих опытах приспособлением, которое может быть признано одной из начальных конструкций электростатического генератора. Как и изобретение Герике, устройство Гаусси также не вошло в широкую практику ближайших его последователей. Миновало более четверти столетия, пока исследователи стали пользоваться в своих опытах электрической машиной, причем к этой идее экспериментаторы опять-таки пришли самостоятельно, не подозревая, что их предшественники Герике и Гаусси давно уже указали путь в этом направлении. И только, когда стало совершенно ясно, что дальнейшее изучение электрических явлений можно успешно продвинуть вперед, только исследуя большие электрические заряды, электрическая машина вошла в практику каждого экспериментатора как необходимый элемент опыта.

Но такое положение электрический генератор завоевал только лишь в 40-х гг. XVIII в. До этого же для возбуждения электрических зарядов исследователи, в их числе и такой видный ученый, как Дюфэ, знакомый с трудами своих предшественников, пользовались весьма примитивными средствами, вроде стеклянных трубок, натертых шерстью или чем-либо иным. Даже Гаусси, добившись значительных эффектов именно благодаря своему механическому устройству, в других опытах пользовался стеклянными трубками.

Гаусси не ограничивался одним лишь стеклом как веществом, в котором он возбуждал электрические заряды. Он экспериментировал также с лаком, серой, смолкой и канифолью. В одном из его отчетов имеется описание сургучного цилиндра, напоминающего шар Герике.

«Я велел приготовить из дерева цилиндр, — пишет Гаусси, — диаметром в 4 дюйма и длиной в 3 дюйма. Его укрепили на оси; затем я расплавил в ковше около 1/2 фунта самого лучшего сургуча, и когда он растопился, опустил в него деревянный цилиндр и до тех пор вращивал его там, пока он не покрылся на поверхности (я имею в виду поверхность, наиболее удаленную от оси) оболочкой толщиной в полдюйма. Когда он издал, я поместил его на машину, приводившую его в движение большим колесом (как это имеет место в опытах с трением стеклянного шара); после того как движение и трение длились некоторое время, я поддержал над цилиндром обруч с нитками, и они притянулись им в направлении его центра точно так же, как при опыте со стеклянным шаром. Равным образом нитки, пока они оставались направленными, взлетали и при приближении шара. Полностью соответствуя электричеству, истечения сургуча очень сходны с получаемыми при трении шара, либо натянутая палочка этого сургуча притягивает мелкую фольгу и быстро ее возвращает».

Этот отрывок взят из статьи Гаусси, названной им «Отчет о нескольких опытах, касающихся электричества и света, получаемых при трении различных тел». Как видно, Гаусси был близок к тому, чтобы сказать то же слово, которое было сказано через четверть века Дюфэ, а именно: выдвинуть идею о противоположных электричествах (стеклянное и смоляное по Дюфэ), т. е.

сделать новый шаг в смысле теоретических воззрений на природу электричества. Но он этого не сделал потому, что над ним довели представления об «электрических эманациях». Это была та теоретическая база, на которой он основывал все свои исследования. Укоренившаяся теория истечений настолько владела Гаусси, что даже в тех случаях, когда сам материал подсказывал необходимость сделать выводы, он сводил новые факты к чисто количественным моментам. «Я не вижу разницы, — писал Гаусси, — между законами различных истечений, только у стекла истечения сильнее и действуют энергичней».

В теоретической области, следовательно, Гаусси ничем не обогатил учения об электричестве. Его заслуги заключаются в чисто экспериментальных изысканиях. В этом отношении ему удалось достичь больших эффектов, чем его предшественники. «Электрическое свечение» было известно и до него, но никто не получал света, который был «настолько ярким, что при нем можно читать слова из заглавных букв».

«Электрическое звучание» также отмечено до Гаусси, но до него никто не получал таких больших результатов: «Когда опыт производился в полной тишине, — пишет он, — я слышал треск на расстоянии 7—8 футов и более».

Прошло около двух десятилетий, пока замечательные опыты нового исследователя не привлекли к себе внимания ученого мира не только в Англии, но и далеко за ее пределами. Этим исследователем был Стефан Грей, труды которого не замедлили вызвать отклик за границей и послужили исходным пунктом знаменитых исследований французца Дюфэ.

Как и о Гаусси, о Стефане Грее почти не сохранилось биографических сведений: достоверно известен лишь год его смерти (1736). Первые занятия Грея вопросами электричества относятся к 1720 г.

В XXXI томе «Philosophical Transactions» появилась его первая статья под названием «Отчет о некоторых новых электрических опытах Стефана Грея». В этой статье автор сообщает, что, как оказалось, многие тела, которые до того считались «неэлектрическими», могут быть наэлектризованы. Поставленные им опыты обнаружили, что такие тела, как перья, волосы, полотно, шелк, шерсть, бумага, кожа, дерево, пергамент, при нагревании или хорошо высушенные приобретают «электрическую силу».

Грей в своем «Отчете» описывает, как последовательно он осуществлял свои опыты: «Я часто наблюдаю, — пишет он, — в электрических опытах со стеклянной трубкой и с пушинкой, привязанной к концу небольшой палочки, что после того, как ее волоски притянулись к трубке, даже когда последнюю отодвигали, большая часть волосков притягивалась палочкой, как если бы она была электрическим телом или электричество было сообщено ей или перу. Это навело меня на мысль, не произведет ли перо, проведенное между пальцами, тот же эффект, приобретая некоторую долю электричества. Это случилось на самом деле при первом же опыте: маленькие пушистые волокна у ствола пера притягивались моим пальцем, когда я приближал его к ним; иногда также притягивалась верхняя часть пера вместе со стволом, но не всегда с одинаковым успехом. Затем я попробовал, не обладают ли волосы тем же свойством. Для этого я взял один волос из своего парика и 3—4 раза провел его между большим и указательным пальцами, и оказалось, что на расстоянии полдюйма он притягивался пальцем. Вскоре после этого я нашел, что такие волосы из уха собаки были сильно электрическими: я провел ухо собаки между пальцами, и множество их сразу притянулось к моему пальцу».

От перьев и волос Грей постепенно перешел к другим веществам, и в перечисленных выше телах «открыл» электрическое притяжение, что было еще неизвестно.

Не сохранилось сведений о том, имели ли эти опыты Грея непосредственное продолжение. Следующая его работа была опубликована лишь через десять с лишним лет. В «Philosophical Transactions» за 1731/32 г. помещена его большая статья, в которой описывается ряд новых наблюдений. Статья эта носит название: «Письмо к Кромвелю Мортимеру, члену и секретарю Королевского общества, содержащее описание различных опытов с электричеством». Она начинается с изложения «открытия, которое показало, как электрическая сила стеклянной трубки настолько передается любому телу, что оно



становится способным притягивать и отталкивать легкие предметы так же, как и сама трубка, когда она возбуждена трением».

К этим исследованиям привел Грея следующий опыт. «Я хотел узнать, — пишет он, — есть ли разница в притяжении, когда трубка закупорена пробками с обоих концов или когда она открыта — и особой разницы я не заметил. Но держа пушинку над верхним концом трубки, я нашел, что она приближается к пробке, притягиваясь и отталкиваясь так же, как это имеет место у трубки, когда она возбуждена трением. Я тогда держал перо против плоского конца пробки, которая несколько раз его притягивала и отталкивала. Это меня сильно поразило, и я решил, что притягивающая сила, без сомнения, сообщается пробке от возбужденной трубки».

Наблюдаемое явление показалось Грею в высшей степени замечательным, и он стал повторять свои опыты, всячески разнообразя их. «Имея с собой шар из слоновой кости, — читаем мы в письме Грея, — с диаметром в 1,3 дюйма и со сквозным отверстием, я укрепил его на сосновой палочке длиной в 4 дюйма, воткнув ее одним концом в пробку. Потерев трубку, я нашел, что шар притягивал и отталкивал перо с гораздо большей силой, чем пробка, и это повторялось много раз». В данном случае Грей имел уже дело с передачей заряда на известном расстоянии, что показалось чрезвычайно любопытным.

Обнаружив факт сообщения электрических зарядов на известном расстоянии наэлектризованными телами ненаэлектризованным, Грей заинтересовался, как далеко могут передаваться эти заряды. «Я занялся исследованием, — пишет он, — на какое расстояние передается электрическая сила. Для этого я взял полую трость длиной в 2 фута 7 дюймов, составлявшую, повидимому, часть удочки, отрезал от нее большой кусок и вделал ее в отверстие трубки, куда она вошла на 5 дюймов; после того как трубка была возбуждена, трость притянула фольгу на высоту более 2 дюймов, как это сделал и шар из слоновой кости, когда я прикрепил его при помощи пробки и палки к концу трости. Такое же действие оказывала и сплошная трость, введенная в трубку тем же способом, как и полая. Затем я взял два верхних конца длинных удочек; один из них был из испанского тростника, другой — частью из дерева и частью из китового уса. Все это вместе с трубкой составляло в длину более 14 футов. На тонком конце китового уса был прикреплен пробковый шар диаметром в 1 1/4 дюйма. После того как толстый конец удочки был введен в трубку, фольга положена на стол, а трубка возбуждена, шар притянул фольгу более чем на 3 дюйма. Я сделал из нескольких кусков испанского тростника и сосновых палок прут, который вместе с трубкой превышал 18 футов; эта длина была предельной, с которой я мог оперировать в моей комнате; и я нашел, что притяжение было почти столь же сильным, как и при укреплении шара на более коротких прутах».

В другой обстановке Грей экспериментировал с более длинными проводниками, и результаты были такими же эффективными. В одном случае (31 мая 1729 г.) наэлектризованную трубку с шаром соединяли прут и привязанная к нему веревка общей протяженности в 52 фута, и «электрическая сила проходила от трубки к пруту, и дальше вниз по веревке к шару из слоновой кости, притянувшему фольгу».

Все эти опыты Грей осуществлял, передавая «электрическую силу» вертикально. Но случилось так, что у него больше «не было возможности передачи ее перпендикулярно с больших высот», и он перешел к опытам «передать электрическую силу веревке в горизонтальном направлении».

Еще одно наблюдение Грея заключалось в том, что «электрическая сила передается одновременно в нескольких направлениях». К двум волосным веревкам он привязал по куску пробки. Веревки соединялись бечевой. Когда он натирал трубку, находившуюся близ одной из веревок, то обе пробки притягивали фольгу, подложенную под ними.

Из многочисленных других экспериментов Грея, неустанно добивавшегося установить проводимость электричества различными телами, замечателен опыт, доказывающий, что человеческое тело является проводником электричества.

«8 апреля 1730 г., — пишет Грей, — я произвел следующий опыт над мальчиком лет восьми-девяти. Он был в одежде 47 фунтов 10 унций. Я подвесил его горизонтально при помощи двух волосных веревок, служащих для сушки белья. В балку моей комнаты, толщиной один фут, были вбиты один против другого два крюка, а на расстоянии двух футов — другая пара их. Веревки я повесил на эти крючки за петли, так что получилось нечто вроде качелей, которые отстояли от комнаты примерно на 2 фута. Мальчика положили на эти веревки лицом вниз, одна веревка охватывала его грудь, а другая его бедра. Фольгу положили на расстоянии 1 фут и с наклеенной белой бумагой; pedestal ее имел в высоту 1 фут. Когда трубку потерли и подержали около ног мальчика, не прикасаясь к ним, то фольга притягивалась лицом мальчика настолько сильно, что подымалась на высоту 9, а иногда и 10 дюймов».

Этот опыт Грея вызвал всеобщее удивление. Никто из него не решался, вернее, никому в голову не приходило испытывать «электрическую силу» на человеческом теле. Через 15 лет известный немецкий физик Георг Маттиа Бозе в своей поэме «Электричество в его возникновении и открытиях поэтическим пером написанное» не без новации поражаемся смелости Грея:

«Безумный Грей, что знал ты в самом деле  
О свойствах силы той, неведомой доселе?  
Разрешено ль тебе, безумец, рисковать  
И человека с электричеством связать?»

Из опубликованных работ Грея не видно, глубоко ли пытался он «человека с электричеством связать», т. е. изучал ли Грей, каковы действия электричества на живые тела. Насколько можно судить по дошедшим источникам, он интересовался, главным образом, вопросом являются ли животные «электрическими телами». Вопрос же действия электричества на животных занимал его последователей, особенно в 40-х гг. XVIII в., когда было открыто явление электрического конденсатора исследователи имели дело с большими зарядами. Тогда же было установлено, что в ряде случаев электричество способно оказывать весьма благотворное воздействие на человеческое тело при различных недугах. Зарождение электротерапии относится именно к концу первой половины XVIII в. (в 1745 г. вышла в свет первая книга этой области). Опыт Грея, несомненно, послужил чрезвычайно важным моментом в этом деле.

Дальнейшие опыты Грея привели его к новым наблюдениям. Так, он установил, что «вода, как и твердые тела, приобретает силу притяжения, а также отталкивания, если к ней поднести возбужденную трубку».

Грей также — первый после Волла — уподобляет электрические явления явлению молнии. Одна из его статей оканчивается следующими словами: «Электричество может вызвать настоящий огонь вместе со взрывом, а также вскипание воды. И хотя эти эффекты сейчас кажутся минимальными, возможно, что со временем будет найден способ собирания больших количеств электричества, вместе с тем увеличится сила электрического огня, который, как доказывают многие из опытов (если мы можем сравнивать с великим) имеют ту же природу, что гром и молния».

Прошло около 20 лет, и трудами многочисленных исследователей были осуществлены те смелые предположения, которые допускал Грей. Изобретение лейденской банки дало ученым «способ собирания больших количеств электричества», и знаменитые исследования Вильяма Франклина в области атмосферного электричества подтвердили, что молния действительно есть не что иное, как «увеличенная сила электрического огня».

Но от исследователей лейденской банки и Франклина отделяет целый этап в учении об электричестве. Этот этап связан с именем Шарля Франсуа де Систер Дюфе, поднявшего своими экспериментальными и теоретическими исследованиями учение об электричестве на новую ступень. Бозе с полным правом мог писать о нем:

«Когда из Галлии Дюфе за опыты взялся  
Он памятник себе за то воздвигнул вечный.  
Не тронет ржа его, иль века бесконечность».

## Большое дело в заброшенности

Электротехнические правила и нормы не подвергались серьезному обсуждению и обновлению в течение IX Всесоюзного электротехнического съезда, т. е. в течение около 10 лет.

Ясно, что за такой промежуток времени, в особенности при быстрых темпах развития электротехники СССР, принятые IX Всесоюзным электротехническим съездом электротехнические правила и нормы очень отстали от жизни и ни в коей мере не соответствуют современному уровню техники.

Между тем пересмотр электротехнических правил и норм поставлен более чем неудовлетворительно и организационно и по существу. Этим вопросом занимаются и ЦК отдельных союзов, и ВЦСПС, и разные организации: Горно-техническая инспекция, Управление пожарной охраны НКВД и др.

Основным ведомством, призванным заниматься пересмотром существующих правил и норм и составлением новых, является Главэнерго НКТП, организовавшее для этой цели специальную комиссию при Теплоэлектропроекте (ТЭП) в Ленинграде.

Эта комиссия существует уже около 3 лет, но до сих пор еще ни одного труда в свет не выпустила.

Кроме того, следует отметить, что Главэнерго интересуется, главным образом, вопросом районных электростанций и подстанций и высоковольтных сетей. Об этом, кстати, говорит и то обстоятельство, что комиссия по пересмотру правил и норм создана при ТЭП. Если в области высоких напряжений 35—220 kV, можно надеяться, все же что-то будет сделано, то в области фабрично-заводского электрооборудования работы по правилам и нормам совсем не ведется.

В работу по составлению новых электротехнических правил и норм должны активно включить и Главэнергопром и Главэлектропром Наркомата машиностроения, исследовательские институты и заводы электропромышленности. Но с их стороны

до сих пор не проявляется к этому важному делу необходимой заботы.

Такое положение вещей дальше нетерпимо, и поэтому следует приветствовать инициативу, проявленную электротехнической общественностью, поставившей этот вопрос в порядок дня работы секции промэнергетики Московского научного инженерно-технического общества энергетиков (МОНИТО-Э).

Заседание секции происходило в декабре 1937 г. под председательством проф. Е. А. Русаковского.

Единодушные выступления ряда товарищей ярко подчеркнули остроту вопроса о правилах и нормах и абсолютную неудовлетворительность ведающейся по этому вопросу работы.

Заседание постановило обратиться в Главэнерго с просьбой поставить доклад перед широкой электротехнической общественностью о состоянии и плане работ по пересмотру правил и норм и перспективах на ближайшее будущее.

Для подробного и точного выявления действующих и устаревших правил и норм и установления желательной очередности выпуска новых создана бригада в составе представителей от Отдела охраны труда ВЦСПС, проектирующих организаций и заводов.

Этой бригаде поручено также разработать проект организации составления, прохождения и утверждения правил и норм.

Я. Л. Зеликсон

### ОТ РЕДАКЦИИ

Тов. Зеликсон Я. Л. в своем письме отмечает инициативу, проявленную МОНИТО-Э в вопросе пересмотра устаревших электротехнических правил и норм. Необходимо, чтобы эта инициатива была поддержана главками электрохозяйства и электропромышленности, работниками электростанций, электросетей и заводов.

**К. ХЕННЕЙ. ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЕ ПРИБОРЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.** Перевод с английского Л. Г. Брауде под редакцией А. А. Соколова. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебного пособия для энергетических вузов. Тираж 4000 экз.

В книге впервые на русском языке излагается систематическое описание применения радиоламп, фотоэлементов, тиратронов и ионных приборов для целей автоматики.

Автор поставил себе целью показать способы промышленного применения ламп и на этих примерах объяснить основные принципы их использования. Книга Хеннея охватывает большой круг вопросов, позволяющих читателю детально познакомиться с современным состоянием электровакуумной техники и ее промышленного использования.

В начале книги приведены основные сведения об электрических цепях, свойствах электрона, законах движения. Автор кратко излагает современную теорию проводимости материалов.

В главе второй даны описания современных ламп, методы управления потоками электронов. Описаны почти все существующие виды ламп и ионных преобразователей и даны материалы для их сравнения.

Ориентация книги на широкие круги американских читателей (инженеров, практиков, учителей, студентов и т. д.) заставила автора отказаться от помещения в книге каких-либо расчетов и ограничить содержание ее только приборами и схемами, описанными в американской и английской литературе. Этот же круг читателей определил расположение материала и форму изложения.

Поэтому буквальный (зачастую до абсурда) перевод книги на русский язык не имел смысла. Необходимо было полностью переработать книгу применительно к потребностям советского читателя.

Перевод книги сделан с первого издания, хотя имеется более позднее издание, вышедшее три года спустя после первого.

В ряде мест при переводе настолько искажен смысл, что ничего нельзя понять.

Так, на стр. 157 раздел назван «Схемы управляемого выпрямителя для регулирования энергии». Вместе с тем в тексте речь идет о регулировании мощности.

В разделе о регулировании мощности в книге имеется следующая фраза: «Мощность выпрямителя может меняться от полной нагрузки до нуля небольшим поворотом ротора, определяемым числом полюсов фазорегулятора».

В действительности это место переводится так: «Мощность, потребляемую со стороны постоянного тока выпрямителя, можно плавно менять от наибольшей величины до нуля, поворачивая ротор фазорегулятора на угол, величина которого определяется числом полюсов фазорегулятора».

На стр. 158 говорится об использовании тиратронов вместо контакторов.

В этом разделе сказано: «В сравнении с обычным выключателем или контактором лампа имеет большую чувствительность, т. е. она управляет данной мощностью при меньшем потреблении энергии, она имеет большую скорость». Что имели в виду сказать этой фразой переводчик и редактор? Очевидно, речь идет о большей скорости процессов включения и выключения, осуществляемых тиратроном по сравнению с механическим контактором; о возможности управлять при помощи тиратронных схем такими же мощностями, как и контакторами, при во много раз меньших затратах мощности на управление.

Это очень важные вопросы, и здесь лампы имеют существенные преимущества перед контакторами. Однако из-за безграмотности фразы читатель вряд ли поймет, о чем идет речь.

Стр. 162. Приводится описание синхронизации конвейера. Понять что-либо из описания нельзя.

На стр. 174 говорится: «Ионные лампы с сеточным уп-

равлением идеально приспособлены для преобразования электрической энергии из одной формы в другую». Идет о преобразовании рода тока из постоянного в переменный, а не о преобразовании энергии из одного вида в другой. Путаница понятий совершенно недопустима.

На той же странице говорится: «Сейчас построены преобразовательные установки, имеющие 400 kV, выпрямители и инверторы, питающиеся от линии переменного тока в 11 kV и 40 Hz, выпрямляющие ток и дающие 12500 V постоянного тока и затем преобразующие постоянный ток в 60-периодный переменный ток, используемый для приведения в действие 400-kV однофазного преобразователя». О чем идет речь — непонятно.

Только заглянув в английский текст, можно понять смысл этой фразы, которая должна быть переведена так: «В настоящее время построена лабораторная преобразовательная установка мощностью 400 kVA, в которой выпрямитель питается от сети переменного тока частотой 40 Hz и напряжением 11 kV. Выпрямленный ток напряжением 12500 V питает инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный с частотой 60 Hz. Этот переменный ток используется для питания однофазного преобразователя мощностью 400 kVA».

Помимо приведенных примеров неряшливости и безграмотности перевода, текст пестрит такими фразами: «Функцией потенциометра является давать» (стр. 158), «Пропускать меньше тока и замедлять ход мотора» (стр. 161), «Свет тушится» (стр. 156), «Брать энергию» (стр. 157), «Значение тока в нагрузку» (стр. 231), «Нагревающий ток входит в печь» (стр. 325).

В книге нет редакционных примечаний, объясняющих те или иные места текста, трактуемые о специфических капиталистических условиях. Так например, на стр. 2 автор говорит: «Силовые системы США имеют такую мощность, достаточную для удовлетворения требований промышленности. До тех пор, пока это тяготение не изменится, нежелательно радикально изменять методы регулирования, передачи и использования электроэнергии».

Совершенно очевидно, что такие высказывания автора порождаемые уродливыми капиталистическими отношениями, тормозящими внедрение новых более совершенных методов, которыми располагает современная электроника, должны быть снабжены редакционным примечанием.

На стр. 223 автор приводит соображения о целесообразности применения управляемых ионных приборов для соединения силовых систем с разными частотами. Это также является специфически американским вопросом, на что необходимо указать советскому читателю. Вместе с тем следует указать, что преобразование частоты в наших условиях может найти себе применение в таких установках.

Отсутствие редакционных примечаний может в ряде случаев дезориентировать советского читателя, создавая впечатление, что описываемые в книге схемы и применения электроники имеют место лишь в США. Вместе с тем у нас в СССР имеется ряд интересных и оригинальных работ, указать на которые был обязан редактор.

При описании работы Willis по коммутированию тиратронами нужно было сказать о советских патентах на бат-Жежерина, Эттингера.

Одна ссылка на копировальный станок Вихмана, введенная в текст, и приложенные в конце книги таблицы ламп и фотоэлементов, выпускаемых отечественными заводами, не восполняют этого пробела.

Все перечисленные недостатки резко снижают ценность переведенной книги.

Б. Е. Телешевский

## НОВЫЕ КНИГИ

**ГУЛЛИКСЕН Ф. Г. и ВЕДДЕР Е. Г.** Промышленная электроника. Перевод с английского. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебного пособия для энергетических втузов. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 212 стр. с иллюстр. Ц. 3 р. 25 к., перепл. 1 р. 75 к.

В книге описываются наиболее важные современные электронные приборы, применяемые в промышленности. Первая часть содержит характеристику различного вида приборов; во второй даны основные электронные схемы; в третьей описывается электронная контрольно-измерительная аппаратура; четвертая посвящена описанию электронных регуляторов.

Задачник по теории переменного тока. Под ред. П. Л. Калантарова. Утверждено ВКВШ при СНК СССР в качестве учебного пособия для электротехнических втузов. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 300 стр. с чертеж. Ц. 2 р. 25 к., перепл. 1 руб.

Задачник имеет целью дать учащимся материал для усвоения методов расчета цепей переменного тока с сосредоточенными параметрами. В основу подбора материала положены задачи, предлагавшиеся кафедрой теоретической электротехники при Ленинградском промышленном институте.

Курс теоретической электротехники. Под общ. ред. И. Л. Каганова, А. С. Касаткина и М. А. Перекакина. Утверждено ВКВШ при СНК СССР в качестве учебного пособия для энергетических втузов. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 564 стр. с чертеж. Ц. 11 руб., перепл. 2 руб.

**МАКСИМЕНКО М. С., проф.** Основы электротермии. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебного пособия для химических втузов. Л., Химтеорет, 1937, 136 стр. с чертеж. Ц. 2 руб., перепл. 75 коп.

В первой части книги излагаются общие теоретические основы электротермических процессов; во второй дано описание новых, еще не опубликованных в советской литературе отдельных термических процессов.

Нормы времени и расценки на электро- и монтажные работы. Утверждены распоряжением Главэлектропрома № 126 от 10/XI 1937 г. для обязательного применения в системе Главэлектропрома. Вып. II. V—Монтаж аппаратов и приборов распределительных

устройств (управления, учета и защиты). VI—Монтаж трансформаторов и аккумуляторных батарей. VII—Монтаж щитов, пультов, сборок, щитков, предохранителей, рубильников и контактных панелей (магнитных станций). М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 205 стр. Ц. 6 р. 50 к.

**РОЗЕНФЕЛЬД В. Е., проф.** Расчет тяговых сетей. М.—Л., Гострансиздат, 1937, 232 стр. с рис. Ц. 4 р. 65 к.

Автор предлагает законченную методику расчета тяговых сетей. Расчет ведется путем применения теории вероятности. Книга предназначена для студентов старших курсов и для инженеров.

**УЛЬЯНОВ С. А.** Токи короткого замыкания. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебника для энергетических втузов. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 240 стр. с чертеж. Ц. 4 руб., перепл. 75 коп.

Главное внимание в учебнике уделено вопросам методики вычисления токов и напряжений при коротких замыканиях в трехфазных установках и сетях высокого напряжения. Вначале весь материал относится к трехполюсному короткому замыканию и затем на базе теории симметричных составляющих делаются обобщения для всех остальных несимметричных видов короткого замыкания в одной точке сети.

**ШЛЯПОШНИКОВ Б. М.** Выпрямление однофазного тока управляемыми ионными преобразователями. Экспериментально-техническое исследование. М.—Л., Издательство Академии наук СССР, 1937, 181 стр. с иллюстр. Ц. 8 р. 50 к., перепл. 2 р. 50 к.

Для решения вопроса о выборе системы тока для всей будущей электрификации автор предлагает один из возможных вариантов—это подача энергии на электровозы в виде переменного однофазного тока и последующее его преобразование на электровозе в постоянный ток.

Энергетик Донбасса. Сборник статей. Вып. I. Харьков, Госуд. научно-технич. изд-во Украины, 1937, 90 стр. с чертеж. Ц. 2 руб.

В сборник вошли статьи: инж. М. М. Акодис «Трубчатые разрядники», инж. И. И. Михайлов «Линейные фильтры для телемеханики», инж. Суслов «Дефект дистанционных реле ИР-101 и ИР-103 изготовления завода ХЭТЗ» и др.

## РЕФЕРАТЫ

Новые кабельные линии. El. Engng., 1937, стр. 739

В 1936/37 г. происходило расширение кабельной сети Edison Company в Чикаго.

Установлено четыре новых подстанции, каждая мощностью 100 MVA, которые в общем питают 160 км одножильного маслonaполненного кабеля на рабочее напряжение 66 kV.

Эксплуатационный опыт и техно-экономические сравнения показывают, что современный маслonaполненный кабель имеет значительно большую перегрузочную способность и меньшие годовые расходы на kVA, чем соответствующие кабели с вязкими массами.

Сечение меди жилой кабеля на 66 kV составляет 1000 мм<sup>2</sup>, а на некоторых участках—1400 мм<sup>2</sup>.

Повышение температурных границ нагрева кабеля значительно улучшило использование проводящего сечения.

Толщина изоляции кабеля составляет всего 8 мм; одна треть изоляции состоит из уплотненной кабельной бумаги. Улучшение конструкции труб, в которых проложены кабели, освобождает от необходимости иметь жесткие защитные оболочки.

Поэтому для свинцовой оболочки толщиной 3,6 мм применялся сплав с медью (вместо обычно применяемого сплава с оловом), что удешевляет цену кабеля на 5%. Соединительные муфты помещаются в камерах обыч-

ного типа. Конструкция муфты отличается компактностью: размер ее составляет 100×13 см.

В качестве изолирующего материала для соединительных муфт применяют вместо кабельной бумаги кембри (пропитанную маслом лакированную материю), что значительно повышает механическую прочность и снижает потери.

Концевые муфты выполнены в виде жестких бумажных трубок (Herpolite), имеющих внутри каналы для масла.

Эта конструкция успешно заменяет концевые муфты с фарфоровыми изоляторами.

Отрезки кабеля между муфтами имеют длину 200 м. Расстояние между питающими пунктами 1 км.

Особо следует отметить специальную масляную дифференциальную защиту, которая работает, когда разность между давлением масла в различных фазах превышает допустимую величину.

При прокладке кабеля это защитное устройство располагается в передвижном вагоне (или палатке) наряду с другими необходимыми приборами.

Реферруемая статья, кроме американских сведений, содержит обстоятельный обзор современной кабельной техники и особо подчеркивает преимущества высоковольтных маслonaполненных кабелей.

В. М. Файницкий

E. I. Workman, I. W. Beams and L. B. Snoddy. Фотографическое изучение молнии. *Physiks*, vol. 7, № 10

Авторы при помощи вращающихся с различными скоростями камер (80 и 850 см/сек) и статического аппарата фотографировали разряды молнии в гористых местностях Новой Мексики. Опираясь на литературные данные, авторы принимают: разность потенциалов между тучей и землей— $10^9$  V, градиент, достаточный для начала разряда,—10 kV/cm, полярность тучи—по Вильсону.

В грозовом сезоне 1935 г. были зарегистрированы три типа разрядов.

Разряд первого типа, зарегистрированный камерой со скоростью записи в 80 см/сек, показан на рис. 1. Он состоит из 8 импульсов, из которых 4 видны на снимке.

1-й импульс прошел от тучи к земле 0,98 km и резко оборвался в воздухе; 2-й, начавшись через 0,0008 sec, удлинил путь первого до 1,2 km и также оборвался. Через 0,01 sec 3-й импульс продолжил путь до 1,7 km; 4-й импульс, возникший спустя 0,009 sec после 3-го, удлинил канал до 1,8 km и достиг земли. Благодаря медленному вращению камеры лидер отметить не удалось.

Рис. 1



Рис. 2

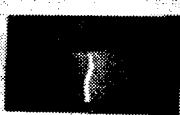


Рис. 3

По мнению авторов эти 4 импульса следует отнести к незавершенным разрядам, так как расстояние между ними во времени и их интенсивность больше, чем у лидеров. Образование незавершенных разрядов объясняется тем, что энергия тучи была недостаточна для полного пробоя промежутка «облака—земля»<sup>1</sup>.

Ко второму типу относятся лидерные разряды с многократными импульсами. Один из таких разрядов состоял из 12 импульсов.

На рис. 2 и 3 показаны 2 лидерных импульса, время между которыми составляет 0,017 sec. Скорость движения обоих лидеров—около  $4 \cdot 10^9$  см/сек. Длина канала без учета пространственных зигзагов—1,2 km. Разряды третьего типа протекают без лидеров. Один из них был снят камерой со скоростью записи 850 см/сек (рис. 4). Разряд состоит из 4 импульсов, отстоящих во времени на  $1,2 \cdot 10^{-4}$ ;  $1,3 \cdot 10^{-4}$  и  $2,4 \cdot 10^{-4}$  sec, длина канала без учета зигзагов равна 1,8 km. При существовании лидера последний был бы снят вследствие весьма благоприятных условий фотографирования.

3 типа разрядов указывают на существование различных механизмов разряда молнии, зависящих от физических свойств тучи и условий на пути разряда (различной силы дождь, ветер), однако авторы придерживаются мнения Шонланда, согласно которому в любом случае главному разряду предшествует лидер<sup>2</sup>. Продвижение лидерного разряда весьма похоже на движение свечения в длинных разрядных трубках, замеченное одним из авторов<sup>3</sup>, имеет скорость того же порядка.

Скорость распространения свечения и волны напряже-

ния в разрядной трубке, заземленной на одном конце, определяется величиной приложенного импульсного напряжения, давлением газа и не зависит от знака импульса.

Распространение свечения в трубке объясняется движением пространственного заряда, что может быть характерным и для разряда молнии. Любопытно, что как в разрядной трубке, так и в случае молнии скорость продвижения увеличивается при слабой предварительной ионизации. Разряду, показанному на рис. 4, возможно, предшествовал межоблачный разряд, вследствие чего между облаком и землей оказалось столь высокое напряжение, что лидера заметить не удалось.

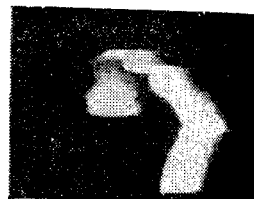


Рис. 4

Разряда, показанного на рис. 1, еще не приводило в литературе. Существование в этом случае трех завершенных разрядов можно объяснить тем, что сопротивление внутри облака настолько велико, что скорость притока энергии из прилежащих частей облака была недостаточна для поддержания раз начавшегося разряда, вследствие чего последний прекращается, возникая вновь по восстановлению напряжения.

Когда разряд достигает земли благодаря малому сопротивлению канала, соседние части облака оказываются под высоким напряжением. Это приводит или к искровым или к светящимся разрядам внутри облака, понижающим внутреннее сопротивление его, что ведет к сильному 4-му разряду<sup>4</sup>.

Далее авторы пытаются развить свое собственное представление о механизме разряда, основанное на принципе каскадных разрядников, состоящих из цепочки последовательно соединенных искровых промежутков. Оди конец такой цепочки заземлен, а на другой дается импульсное напряжение, более чем достаточное для пробоя первого промежутка, но недостаточное для пробоя всех. При этом происходит последовательный пробой всей цепочки. В случае молнии роль электродов играют капли дождя, группы ионов или другие проводящие области в воздухе. По мнению авторов имеются все основания полагать, что в туче существуют проводящие области большие, чем капли дождя. Zeleny и др. показали, что капли воды в поле с градиентом 10 kV/cm могут вызывать кистевой разряд, благодаря чему значительные области воздуха становятся проводящими.

Элементарный анализ показывает, что наибольший потенциал ложится на первый промежуток. При пробое первого промежутка этот потенциал переносится на второй, пробивает его и таким образом распространяется дальше. Авторы полагают, что такая схема может объяснить открытый Шонландом ступенчатый лидер.

Х. С. Валеев и В. С. Комельков

D. I. Malan and H. Collens. Тонкая структура ствола молнии. *Proceedings of the Royal Society* № 909, 15 сентября 1937 г., vol. 162

В статье авторы, не вдаваясь в физику процессов, дают систематизированный материал 120 наблюдений (бойсограмм) над главным каналом ствола молнии.

Из бойсограмм явствует, что кривая свечения главного канала во времени не является простой, а имеет сложную структуру. В различные моменты развития канала свечение нарастает и падает, как результат появления дополнительной энергии в стволе, притекающей из разветвлений и облака.

Таким образом главный разряд, идущий с земли, является

<sup>1</sup> Объяснение авторами незавершенного разряда ничем не отличается от объяснения движения ступенчатого лидера. Ре ф.

<sup>2</sup> Здесь нужно отметить, что безлидерные разряды были получены в экспедиции Академии наук СССР и ВЭИ см. «Электричество» № 1, 1938).

<sup>3</sup> *Phis. Rev.*, 1930.

<sup>4</sup> Это положение едва ли верно, так как из работ Collens и Malan (*Pros. of the R. Soc.*, 1937) и экспедиции Академии наук и ВЭИ отчетливо видно, что наибольшее свечение наблюдается у земли (это, между прочим, можно заметить и на фотографиях, полученных авторами), во время как по предположению авторов оно должно было наблюдаться у облака. Возможно, что описанный в статье процесс вызывает появление «облачных» составляющих свечения главного канала. Ре ф.

как бы сочетанием целого ряда составляющих обратных ударов.

Авторы прежде всего рассматривают идеализированный процесс свечения канала во времени в некотором случае, когда первый (лидерный) импульс имеет три разветвления. На рис. 1, изображающем такой удар, горизонтальная линия показывает время, "развертываемое" по направлению стрелки. Густота штриховки характеризует интенсивность свечения.

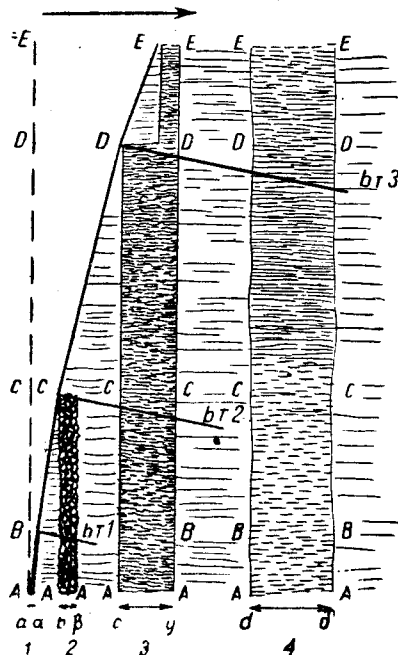


Рис. 1

Как видно, у поверхности земли разряд состоит из четырех составляющих свечения (столбики на рисунке), а у облака (верхняя часть рисунка) из двух, причем одна из них двойная. Составляющие имеют края отчетливого и размытого свечения. Первые обозначаются буквами  $a, b, c$  и  $d$ , вторые —  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $\delta$ .

Интервалы времени  $a\alpha, b\beta, c\gamma, d\delta$  дают значения эффективной длительности свечения 1, 2, 3 и 4 составляющих.

Наклон линии ведущего края ( $A, B, C, D$ ) характеризует скорость движения обратного разряда в любом месте канала<sup>1</sup>.

В точке  $A$  скорость движения свечения весьма высока и практически не поддается измерению. По мере движения вверх скорость уменьшается, заметно падая (скачком) у начала разветвлений<sup>2</sup>. Между составляющими свечения и разветвлениями существует прямая связь; каждая составляющая появляется в момент соприкосновения ведущего края с соответствующим разветвлением канала.

Когда обратный импульс достиг точки  $B$ , свечение распространяется вдоль разветвления 1 и вверх по направлению к  $C$ , причем отрезок  $AB$  и разветвление 1 имеют более яркое свечение, чем отрезок  $BC$ . В момент соприкосновения обратного импульса с разветвлением 2 от точки  $A$  начинается составляющая 2, мгновенно достигающая земли. При этом свечение отрезка  $AC$  и второго разветвления возрастает, свечение же от  $C$  до  $D$  продолжает уменьшаться. Вторая составляющая длится до тех пор, пока свечение не пройдет весь канал второго разветвления (на рис.  $b\beta$ ).

Если ответвление 3 длинно и расположено вблизи облака, то свечение третьей составляющей тянется дольше, чем это необходимо для прохождения ветви три разрядом. Увеличение продолжительности свечения, очевидно, связано с процессами, возникающими в облаке.

Составляющая 4 начинается после того, как составляющая 1 достигла тучи и завершила все разветвления; таким образом

<sup>1</sup> Тангенс угла наклона достаточно малого отрезка линии ведущего края есть средняя скорость движения разряда в данном месте.

<sup>2</sup> Автор оговаривает, что в местах ответвлений скачок скорости измерить не представляется возможным ввиду малости размытости промежутка.

она, несомненно, связана только с процессами, идущими внутри облака.

В случае разряда без разветвлений составляющие образуются после того, как обратный импульс достигнет облака; интенсивность свечения их сравнительно слабая.

Ведущий край  $a$  первой составляющей виден отчетливо в то время, как края  $b, c, d$  и т. д. последующих составляющих расплывчаты, вследствие чего их измерения несколько неточны.

На рис. 2 показано распределение по времени и продолжительности составляющих шестнадцати ударов, из которых 2 не разветвлены (97b и 75c).

Ось ординат совпадает с моментом начала обратного разряда (край  $a$  у точки  $A$  на рис. 1); обозначения слева дают номера разрядов.

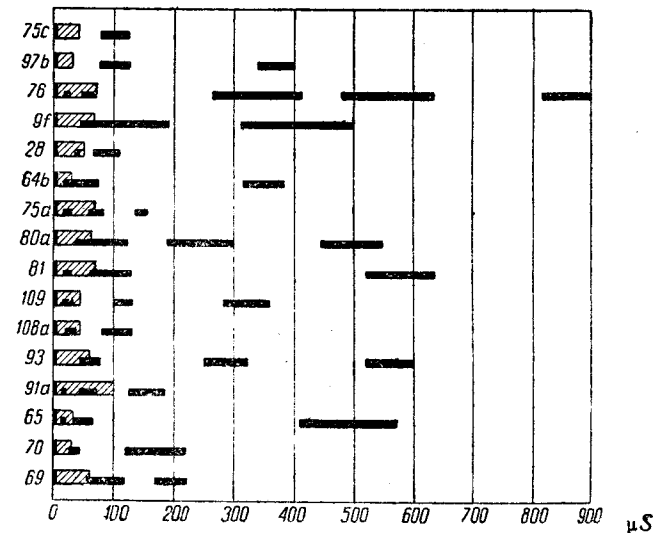


Рис. 2

Прямоугольники, заштрихованные тонкими горизонтальными линиями, характеризуют полное время прохождения обратного разряда от земли до облака.

В ударах 76, 80a, 81 вследствие близкого расположения камеры авторам не удалось снять полную длину обратного разряда, поэтому для них в диаграмме указано вычисленное время. Черные полосы относятся к компонентам, причем длина полос указывает их длительность.

Приблизительно вычислено, что верхний предел первой компоненты имеет длительность порядка 10 мкс.

Наиболее частые значения продолжительности и времени начала компонент указаны в таблице.

Составляющая	Продолжительность мкс	Время начала, мкс
1	10	0
2	20	25
3	50	70
4	100	(100÷500)

На рис. 3 указан момент начала составляющей в зависимости от времени соприкосновения идущего снизу обратного разряда с ветвью.

Точки, лежащие на линии, показывают совпадение времени начала составляющей и ветви. Большинство точек лежит вне прямой, что указывает на отставание компонент. Порядок опоздания  $10^{-5}$  сек/км длины канала от земли до ветви.

Как было указано, составляющие, связанные с ветвями, "берут" очень мало времени для покрытия расстояния между землей и точкой разветвления.

Если высота ветви невелика, то соответствующая компонента интенсивна и ее ведущий край отчетлив, но интервал времени, подлежащий измерению, чрезвычайно короток. Наоборот, когда ветвь удалена от земли, интервал времени больше, но края более расплывчаты. Скорость распространения компонент во всех случаях достигает  $10^{10}$  см/сек, что является пределом измерений.



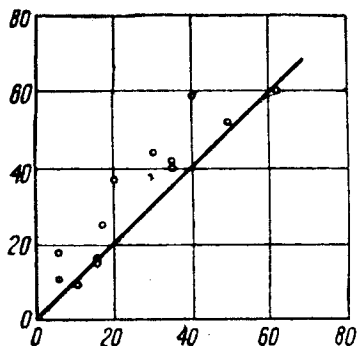


Рис. 3

Направление распространения по существующим данным не может быть определено. Анализ 9 снимков, по которым может быть дано определенное заключение, показал, что в двух случаях «облачные» составляющие развивались вверх от земли и в семи — вниз от облака. Максимальные скорости в  $10^{10}$  см/сек относились к идущим компонентам как сверху, так и снизу. Более низкие скорости порядка  $4,7 \cdot 10^8$ ,  $2 \cdot 10^9$ ,  $2,7 \cdot 10^9$  см/сек принадлежат только составляющим, идущим от облака к земле.

Авторы приводят в статье детальный анализ случаев удара без разветвлений и ударов с одним или большим числом разветвлений.

Можно ожидать, что каждая ветвь имеет свою компоненту, если только последняя не сольется с компонентой следующей ветви.

Максимальное число компонент разветвленного удара—6, наиболее часто встречаются 4 компоненты. Неразветвленный удар имеет редко больше двух компонент, чаще всего одну. В исключительных случаях их число достигает двадцати.

Свечение канала продолжается довольно долго; в литературе уже была указана<sup>3</sup> длительность в 0,23 сек. Наиболее частая продолжительность — 1000  $\mu$ sec, в некоторых случаях она колеблется от нескольких сотен  $\mu$ sec до 0,5 sec.

Длительность по мнению авторов, очевидно, не имеет связи ни с порядком ни с интенсивностью ударов, составляющих разряд. Предположение Wal'ger, что большая длительность соответствует большему сопротивлению земли, — опровергается Mc. Eachron and Mc. Morris, показавшими, что различные удары одного и того же разряда, поразившего металлическую конструкцию, имели различную длительность, в то время как сопротивление заземления оставалось неизменным.

В той же статье указано, что ранние составляющие разветвленных ударов имеют связь с ответвлениями канала, независимо от свойства земли, в то время как более поздние компоненты образуются разветвлениями или иными процессами в облаке.

Фотометрирование свечения канала молнии, сделанное авторами, показало, что наиболее интенсивны первые две составляющие, вторая составляющая иногда имеет большую яркость, чем первая.

Наиболее существенные изменения интенсивности свечения канала связаны с разветвлениями. Так как свечение канала зависит от тока, проходящего через него, то, следовательно, ток в канале также связан с разветвлениями.

Менее существенные изменения в свечении происходят после того, как обратный удар достиг облака.

Нет никаких доказательств возникновения автоколебаний в цепи облако — канал — земля, предположенных Симпсон (1929 г.). Такие колебания, если они существуют, должны иметь частоту, превышающую  $100\,000 \frac{1}{\text{сек}}$ . Они мало вероятны, так как не согласуются с механизмом обратного удара.

Составляющие свечения, а следовательно, и усиленный ток, возникают после того, как обратный разряд достиг от-

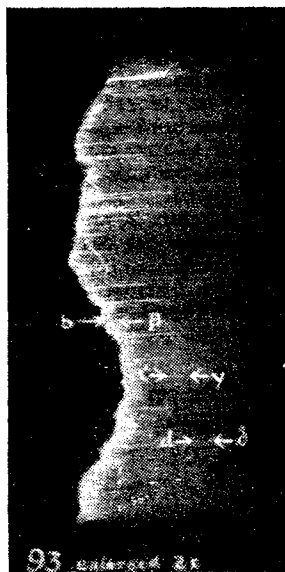


Рис. 4а

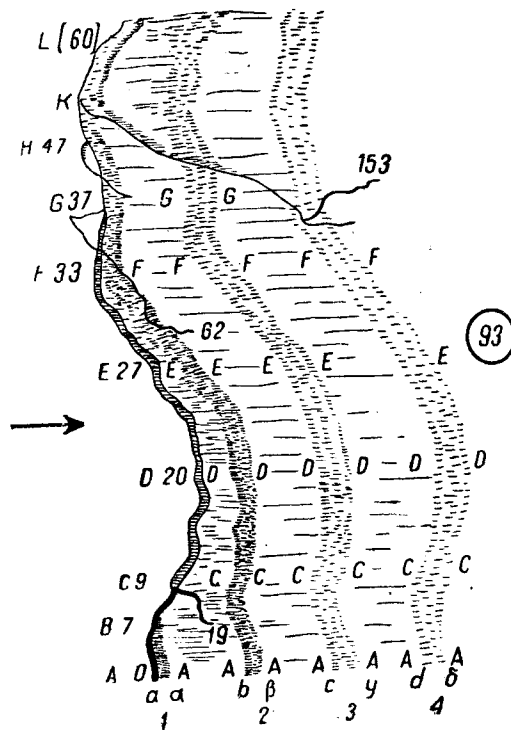


Рис. 4

ветвления. Новая составляющая тока возникает после того, как ответвление частично развилось.

Х. С. Валеев и В. С. Комельков

#### Новый измерительный трансформатор постоянного тока ETZ № 34, 1937

Действие описываемого прибора основано на известном явлении изменения сопротивления переменному току обмотки дросселя при подмагничивании сердечника при помощи постоянного магнитного потока. Принципиальная схема трансформатора тока изображена на рис. 1. Первичной обмоткой является шинный провод постоянного тока; вторичной обмоткой — рамка, обтекаемая переменным током от сети 380/220 В. Так как ток вторичной обмотки находится в линейной зависимости от величины постоянного тока в шинном проводе, то тем самым обуславливается косвенный замер тока в первичной цепи трансформатора. Сухие выпрямители во вторичной цепи аппарата преобразовывают переменный ток вторичной цепи в ток постоянного направления.

По внешнему своему виду трансформаторы тока АЕГ мало чем отличаются от обычных стержневых трансформаторов тока. Большим преимуществом конструкции АЕГ является отсутствие вращающихся частей, чем, например, страдает устройство Koch и Sterzel.

Потребляемая мощность трансформатора тока класса 0,5 равна 30 W и класса 1—60 W. Следует отметить, что такие величины весьма приемлемы, так как в случае обычных шунтов, применяемых в многоамперных установках (30 ÷ 50 kA), потери в них достигают до 10 kW.

В журнале АЕГ Mitteilungen № 7, 1937 можно встретить описание крупной ртутно-выпрямительной подстанции для электролиза в 80 kA, где установлены описанные трансформаторы постоянного тока.

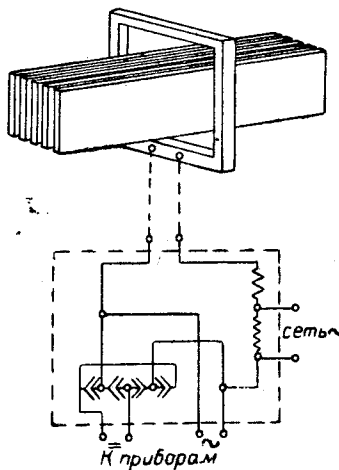


Рис. 1. Схема измерительного трансформатора постоянного тока фирмы АЕГ

Г. К. Церава

генератор выпрямленного напряжения 1700 kV. RGE 7 августа 1937, стр. 170—172

В статье описывается схема получения очень высоких выпрямленных напряжений посредством каскадного включения кенотронов и конденсаторов, а также установка на 1700 kV относительно земли ламповой фирмы Филипс и на 1250 kV Кембриджского университета.

В основу положено развитие схемы удвоения напряжения по Грейнахеру. Схема удвоения напряжения по Грейнахеру показана на рис. 1. Работает она следующим образом. В время отрицательной полуволны напряжения трансформатора конденсатор заряжается до напряжения, приблизительно равного амплитуде напряжения трансформатора  $E$ , причем на обкладке конденсатора, присоединенной к выводу трансформатора, заряд скапливается отрицательный. В противоположную положительную полуволну напряжения трансформатора и конденсатора складываются, а конденсатор  $C_2$  через кенотрон  $V_2$  заряжается до значения напряжения, почти равного удвоенному напряжению трансформатора  $2E$ .

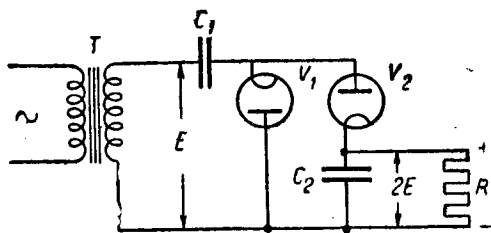


Рис. 1. Схема удвоения напряжения по Грейнахеру

На рис. 2 показана принципиальная схема учетверения напряжения<sup>1</sup>, в которой от трансформатора, дающего напряжение 100 kV, можно получить выпрямленное напряжение в точке  $e$  относительно земли  $+400$  kV. Если перевернуть полярность кенотронов, то потенциал точки  $e$  будет 400 kV.

В установке фирмы Филипс смонтировано 8 ступеней из 6 кенотронов, чем достигается постоянное напряжение 100 kV относительно земли при допустимом токе нагрузки 4 мА. Посредством второй подобной же установки с обратным направлением кенотронов можно получить между шинами 3400 kV.

В лаборатории Кембриджского университета при шести ступенях получается 1250 kV.

Конденсаторы применены бумажные с емкостью порядка 0,1 мкФ. Для уменьшения эффекта короны применены шары из листового железа. Между генератором и поддерживающей колонной<sup>2</sup> включено демпфирующее сопротивление 100 Ом. В колонне находится масляное сопротивление 1500 мОм, к которому связан с электростатическим вольтметром, который позволяет точно контролировать величину напряжения.

<sup>1</sup> До точки  $c$  схема идентична схеме Грейнахера. Посредством добавления конденсаторов  $C_3$  и  $C_4$  и кенотронов  $V_3$  и  $V_4$  можно в точке  $e$  получить учетверенное напряжение трансформатора относительно земли. Действительно, когда чувствал напряжения трансформатора отрицательная, конденсатор  $C_1$  заряжается через кенотрон  $V_1$ . В рабочий период падение напряжения на кенотроне мало, поэтому в простоты можно предположить, что в этот момент между точками  $b$  и  $b_1$  устанавливается проводящее соединение. Как конденсатор  $C_2$  заряжен до положительного напряжения  $2E$ , то он через кенотроны  $V_3$  и  $V_4$  соединяется в параллель с конденсатором  $C_3$  и заряжает его (в несколько раз) также до напряжения  $2E$ , причем обкладка  $d$  принимает положительный заряд. Так как конденсатор  $C_3$  заряжен до напряжения  $+2E$ , а  $C_1$  до  $+E$ , то в положительную полуволну эти напряжения складываются с напряжением трансформатора  $+E$ , давая в точке  $d$  потенциал  $+4E$  относительно земли. Кенотроны  $V_1$  и  $V_3$  при этой полуволне не пропускают тока, а конденсатор  $C_4$  заряжается через кенотрон  $V_4$  до положительного значения напряжения  $+2E$  между точками  $e$  и  $c$ . Потенциал точки  $e$  становится равным  $+4E$ . Нетрудно видеть, что каждый из кенотронов в рабочий период находится под напряжением на его зажигании, не превосходящим  $2E$ . Поэтому схема должна работать надежно. Аналогичным же образом заряжаются и последующие конденсаторы в случае дальнейшего увеличения числа ступеней каскада. Прим. ред.

<sup>2</sup> Вероятно, приемником энергии. Прим. ред.

Падение напряжения в этом аппарате не превосходит 40 kV на миллиампер нагрузки.

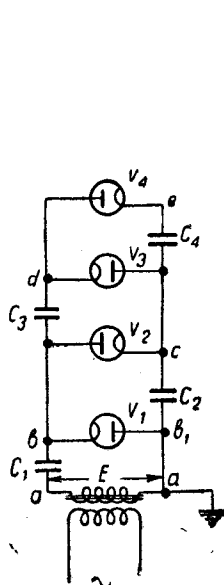


Рис. 2. Принципиальная схема умножения напряжения постоянного тока в развитие системы Грейнахера

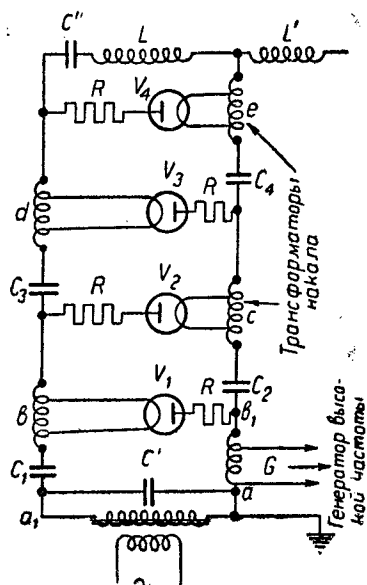


Рис. 3. Схема генератора постоянного напряжения в лаборатории фирмы Филипс (Голландия). Накал кенотронов током высокой частоты

**Кенотроны.** Кенотроны применены с оксидированным катодом и с ртутным насыщенным паром. В этой конструкции сильно экономится энергия (до 90%) накала по сравнению с кенотронами с вольфрамовой нитью, и, кроме того, внутреннее падение напряжения составляет всего 50 В. Но напряжение зажигания велико и составляет 7 kV.

В установке применен интересный способ накала кенотронов током высокой частоты. Схема питания изображена на рис. 3. Между точками  $a$  и  $b$  приложено напряжение с частотой 750 kHz от передатчика мощностью около 150 W. Этот ток (силой 0,7 А) циркулирует в установке высокого напряжения, вызывая накал кенотронов. Никаких помех друг на друга обе схемы выпрямления и накала не оказывают. Сила тока высокой частоты ограничена до 0,7 А во избежание больших потерь в конденсаторах. Так как для накала необходимо 3,5 А, то применены специальные маленькие трансформаторы с железным сердечником, малым рас-

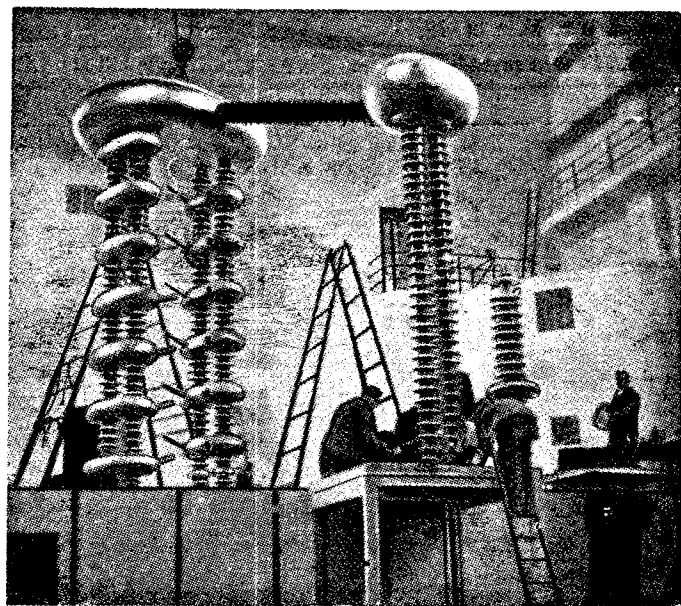


Рис. 4. Фото генератора постоянного напряжения на 1700 kV в лаборатории Кембриджского университета



сеиванием и большой связью. Сопротивления  $R = 20\,000\ \Omega$  включены последовательно с кенотронами для того, чтобы воспрепятствовать ответвлению через них токов высокой частоты, в то время как конденсаторы  $C'$  и  $C''$  имеют противоположное назначение. Катушка  $L$  уменьшает сопротивление аппарата для высокой частоты до наименьшего возможного значения при резонансе. Катушка  $L'$  препятствует прохождению токов высокой частоты в приемник.

Кенотроны представляют стеклянные трубки, в которых расстояние между катодом и анодом составляет около 45 см. Диаметр трубки около 30 мм. Каждая из них соединена по длине девятью индивидуальными трубками, которые можно рассматривать как индивидуальные электроды, что увеличивает допустимое напряжение на зажимах кенотрона в нерабочий период. Наконец, на зажимах каждой трубки включен маленький конденсатор, назначение которого выравнивать

распределение напряжения по трубкам. По мере увеличения числа ступеней становится необходимым уменьшить падение напряжения в ступенях. Внутреннее сопротивление генератора можно определить по формуле  $Rt = K \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{f} \cdot n$ .

$K$  — постоянная;  $C$  — емкость конденсатора;  $f$  — частота питающего напряжения и  $n$  — число этажей. Эта формула показывает, что для уменьшения падения напряжения можно увеличивать величину емкости и частоту питающего напряжения. В установке Кембриджского университета применена частота 200 Hz, а в лаборатории Филипс — 500 Hz.

На рис. 4 показана фотография установки Кембриджского университета.

Е. В. Калинин

## Содержание

	Стр.
Если враг не сдается, — его уничтожают . . . . .	1
По-большевистски поднять культуру электрохозяйства . . . . .	2
Федоров Е. К. — Магнитное поле Арктики . . . . .	4
Шершов С. Ф. — Рационализация потребления энергии в электротермических процессах . . . . .	5
Акодис М. М. — Защита подстанций разрядниками . . . . .	13
Кожухов В. К. — Импульсные характеристики изоляторов, покрытых слоем загрязнений . . . . .	19
Беляков А. П. и Стекольников И. С. — Влияние различных факторов на развитие искрового разряда . . . . .	25
Дроздов Н. Г. и Смирнов В. А. — Статические заряды на ремнях трансмиссий . . . . .	28
Меерович Э. А. — Расчет переходных электромагнитных процессов символическим методом . . . . .	31
Розенберг Б. И. и Костенко М. В. — Упрощенный метод вычисления токов к. з. и кривые фиктивного времени при автоматическом регулировании напряжения . . . . .	36
Миролюбов Н. И. — Расчет мешающих влияний контактной сети на линии связи . . . . .	44
Орлова В. М. — Сопротивление взаимной индукции двух однопроводных цепей с землей в качестве обратного провода на косых участках сближения . . . . .	47
Кантер А. С. — Проектирование обмоток электромагнитов с полями большой напряженности . . . . .	50
Юдицкий С. Б. — Расчет рассеяния головок зубцов машин постоянного тока . . . . .	52
Коллегин А. В. — Измерение коэффициента мощности в трехфазных цепях одним ваттметром . . . . .	55
Ключко И. М. — Построение искусственных характеристик серийного двигателя при универсальном включении . . . . .	57
Радовский М. И. — Начальный этап учения об электричестве . . . . .	58
На обложке — Героическая четверка папанинцев встречается на льдине 19 февраля 1938 г. участников экспедиции „Таймыра“ и „Мурмана“ Фото Я. Халип (спец. корреспондент „Союзфото“)	

ИЗДАТЕЛЬ ОНТИ

Техн. редактор А. П. Александрова  
Зав. ред. М. Г. Башкова

Отв. редактор Я. А. КЛИМОВИЧ

Сдано в набор 14/II 1938 г.

Подп. к печати 27/III 1938 г.

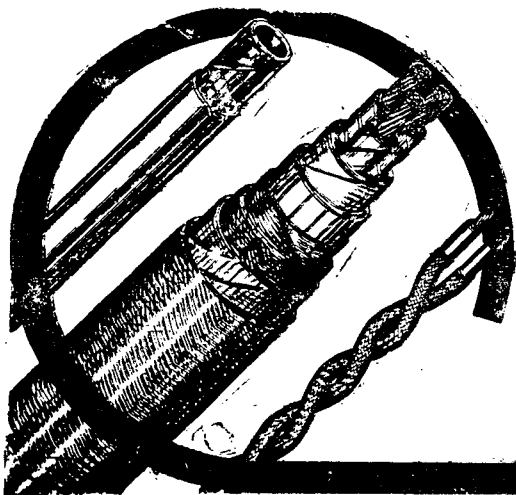
Стат. ф. 226X28

Печ. л. 9,5. У. а. л. 12,35

Печатн. зн. в листе 78

Уполн. Главлита Б-40904 1-я Журн. тип. ОНТИ НКТП СССР. Москва, Денисовский пер., 30.

Заказ. 313. Тираж 11000

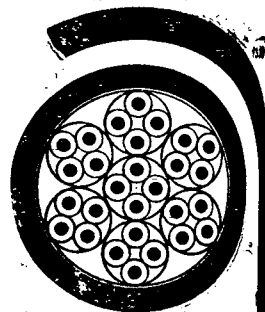


### Свинцовые кабели

для сильных токов, телефона, телеграфа, сигнализации, радио и телевидения, а также принадлежности к ним.

Провода с резиновой изоляцией  
любого назначения

Изоляционные трубки



KABEL- & GUMMIWERKE A. G.

EUPEN БЕЛЬГИЯ

# ТОВАРНА НА КАБЛЕ, Анц. 0-во

## БРАТИСЛАВА (Чехословакия)

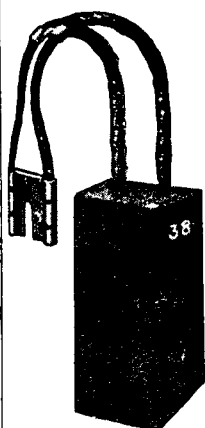
Производители Вы электрическую сварку?

Если да — то требуйте образцы и предложения о наших патентованных зажимных захватах

„флекс“.

100%-ая надежность в эксплуатации!

0748

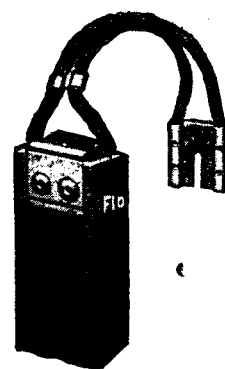


## SCHUNK & EBE

### GIESSEN (Германия)

Фабрика угольных щеток и щеткодержателей

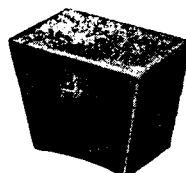
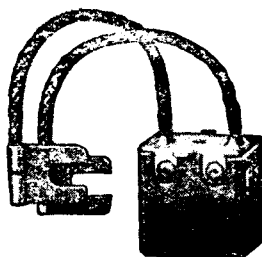
Мы являемся между прочим постоянным поставщиком всех сортов и качеств изображенных в настоящем объявлении угольных щеток для советских промышленных предприятий



Наша фабричная марка



гарантия высокого качества



6737

# N. V. NEDERLANDSCHE KABELFABRIEK

DELFT (Голландия)

■ ■ ■ ■

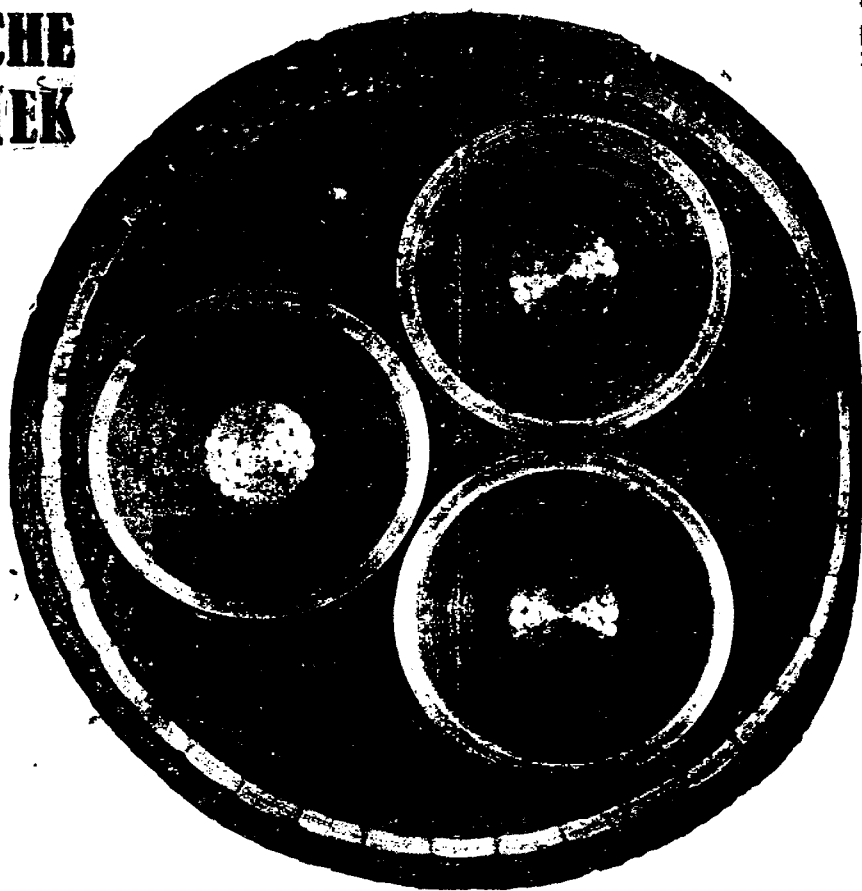
## ПРОИЗВОДИТ:

Подземные электрические  
кабели высокого и низкого  
напряжения с бумажной  
изоляцией

Подземные телефонные и  
сигнализационные кабели

Подводные кабели

Неизолированную проволоку  
и неизолированные кабели  
из электролитическ. меди



860

## „ИЗОЛА“

**изоляционные материалы  
для  
электротехники**

Изделия „мика“

Фибры пропитанные бакелитом

Пропитанное сукно, пропитанный шелк

Изолировочная бумага

Пропитанные ткани

Пропитанный азбест

Изоляционные лаки

Изолированная проволока:

эмалированная проволока,

изолирующая лента,

азбеститовая проволока

Изолирующие трубки (не на тканной  
основе)

**Schweizerische Isola-Werke  
Breitenbach (Швейцария)**

8786

## Для всех

измерений постоянного и перемен-  
ного тока пригоден  
новый мавометр WGI

(Обратите внимание на наши  
последующие объявления!)

8785



8/88

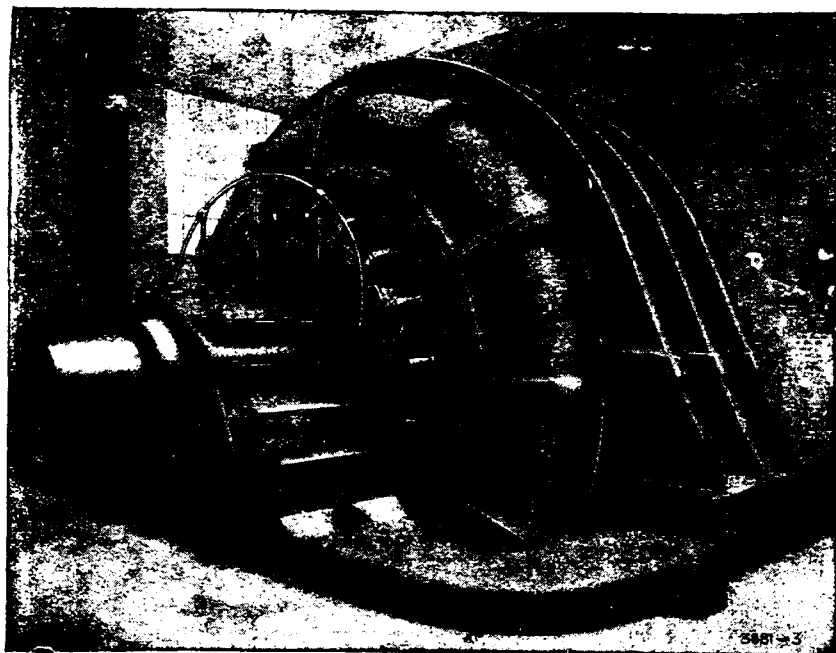
# ATELIERS DE CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES DE CHARLEROI

A. C. E. C.  
CHARLEROI (Бельгия)



## ЭЛЕКТРОМАШИНЫ

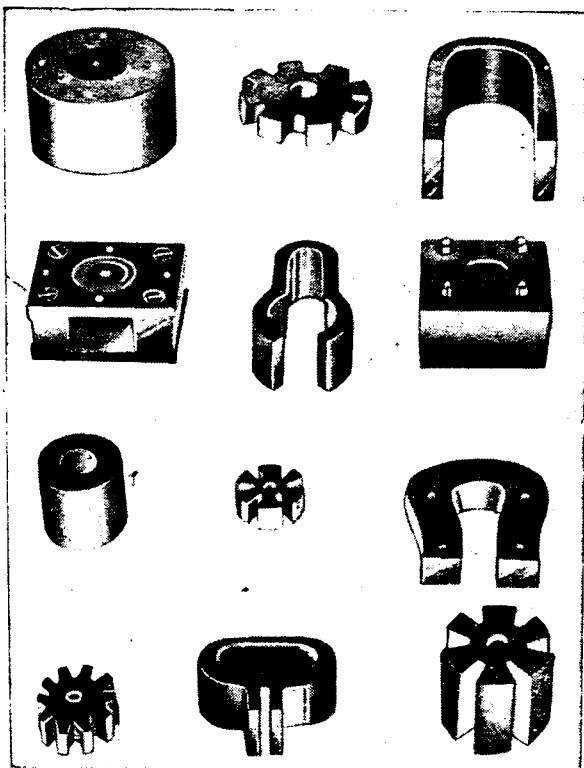
разной мощности  
разного напряжения  
разного применения



Реверсивный мотор постоянного тока для прокатного станка  
от 4600-17 500 л. с., 1000 V, 50-120 об./мин.

775

## ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ из никель-алюминия и кобальтовой стали



**DARWINS LIMITED** SHEFFIELD  
(АНГЛИЯ)

## Kabelfabrik- und Drahtindustrie- Aktiengesellschaft

Wien XII/3, Oswaldgasse 33 (Австрия)



Армированные и неармированные свинцовые кабели для всех напряжений  
Телефонные междугородные кабели, телеграфные кабели, сигнальные кабели, судовые кабели, подводные кабели

**Кабельная арматура**

**Укладка целых кабельных сетей**

Армированные и неармированные свинцовые оболочки для проводов в сырых помещениях, или помещениях, подвергающихся действию кислот и щелочей

Все сорта изолированных проводов и кабелей

Канаты и провода для голой воздушной проводки из меди, бронзы, алюминия, железа и стали; полые кабели

Изоляционные трубки и трубки из стальной брони со вспомогательным оборудованием

6744

**Megger**



Фабриканты ряда приборов для испытания изоляции проводов составили на русск. языке полный список изготовленных ими аппаратов.

Требуйте по нижеуказанному адресу бесплатной присылки списка № R. 178.

ENGLAND

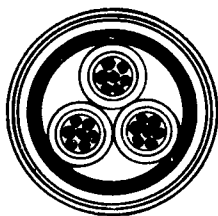
**EVERSHED & VIGNOLES, LTD.** CHISWICK LONDON

177

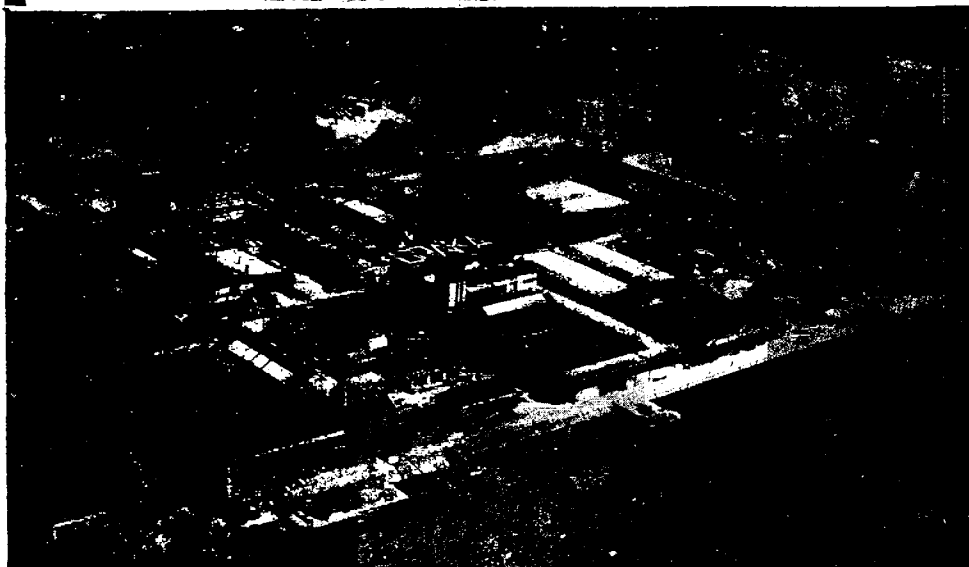
**DRAKA**

N.V. HOLLANDSCHE  
DRAAD- EN KABEL FABRIEK  
AMSTERDAM — HOLLAND.

адрес для телеграмм: DRAKA · AMSTERDAM · ГОЛЛАНДИЯ



специальность :  
все сорта проволоки и  
кабелей для электричества  
с резиновой изоляцией.



# ПОЛНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ для КАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

п. 53 г.  
58

Благодаря непрерывным улучшениям в течение ряда лет, фирма БРИДЖ имеет теперь возможность предложить кабельным заводам машины для всех отраслей этого производства, непревзойденные по замыслу и конструкции.

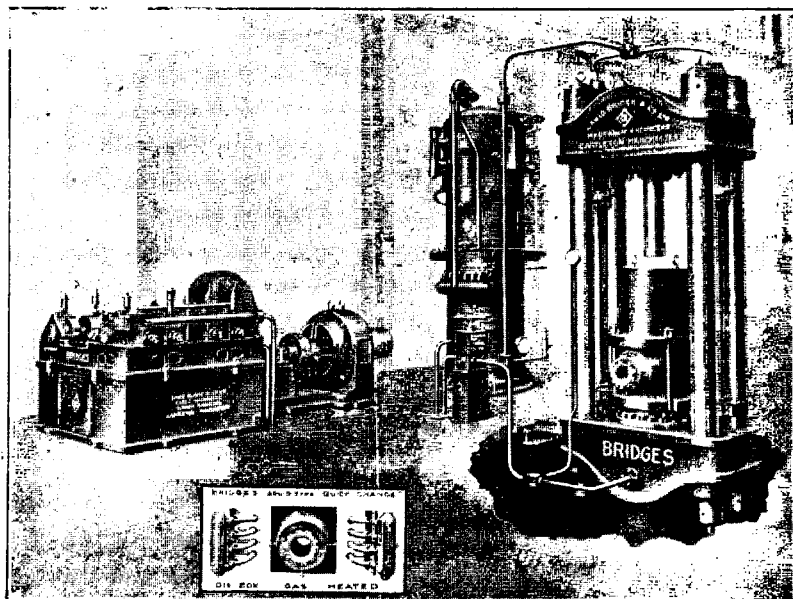
Ниже описан **Усовершенствованный ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЕСС БРИДЖА для СВИНЦОВЫХ КАБЕЛЕЙ**

Мы специально сконструировали этот пресс со вспомогательными поршнями для обратного хода главного поршня. Само собой понятно, что такое устройство устраняет бесконечные неудобства при перемене кожаных прокладок, причем совершенно нет надобности менять нижнюю прокладку.

**DAVID BRIDGE & Co. Ltd.**  
ENGINEERS, IRON AND BRASS FOUNDERS  
Castleton, Manchester.

а также:

Aldwych House, Aldwych,  
LONDON W.C.2 (Англия)



260

## JOHNSON & PHILLIPS, Ltd.

ELECTRICAL ENGINEERS & CABLE MAKERS  
CHARLTON LONDON

**Джонсон и Филлипс, Лимитед**  
ЛОНДОН, АНГЛИЯ

О О О

Заводы ДЖОНСОН и ФИЛЛИПС предоставляют Вам воспользоваться их более чем 60-тилетней промышленной практикой, а также высококачественным выполнением, признанным инженерами всего мира

**КАБЕЛИ** вплоть до 33.000 вольт

**РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ДОСКИ**

Специальность: распределительные  
доски для индустрии

**Т Р А Н С Ф О Р М А Т О Р Ы**

**СТАТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ**  
для увеличения активности электрич. силы

**ВОЗДУШНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
ПРОВОДКА** и материалы для нее

**ИНСТРУМЕНТЫ**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ**

ПОСЫЛАЙТЕ НАМ ВАШИ ЗАПРОСЫ!

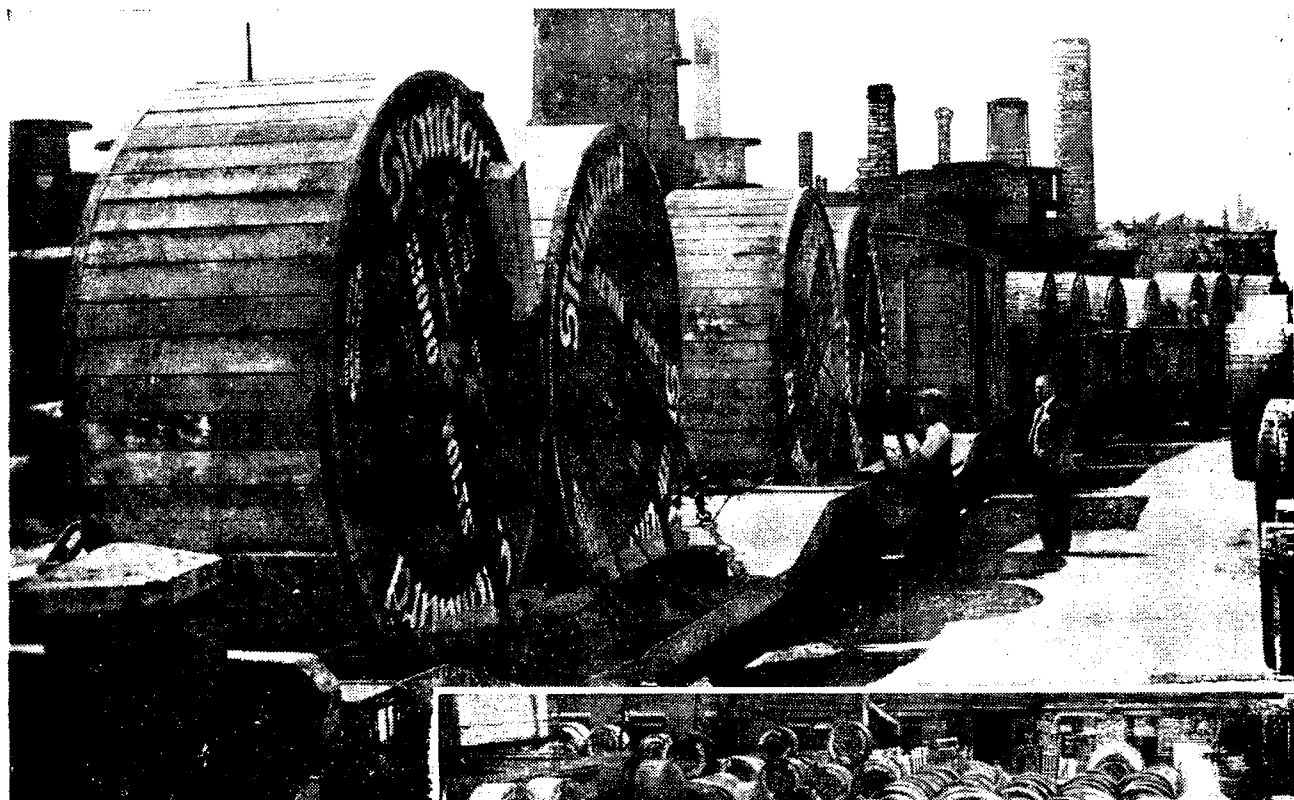
233

4

Цена 2 р. 75 к.



# СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ ЛЮБОГО НАПРЯЖЕНИЯ



Для отправки  
грузовиками, по  
железной дороге и  
морем  
поставщикам  
и потребителям  
электроэнергии  
в Англии и  
заграницей



Присылайте Ваши спецификации на силовые кабели "STANDARD"

*Standard Telephones and Cables Limited*

**NORTH WOOLWICH LONDON, E.16. АНГЛИЯ**

**ОТДЕЛЕНИЯ И ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА ВО ВСЕМ МИРЕ**

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.