

1932

„Коммунизм—есть советская власть
плюс электрификация всей страны“
ЛЕНИН

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

№ 14

ИЮЛЬ

В Ы П У С К II



МОСКВА
ЛЕНИНГРАД

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ОНТИ

КНИГОЦЕНТР

ОНТИ

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1932 год
на ЖУРНАЛЫ

„ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ“

Ежемесячный орган Всесоюзного электротехнического объединения ВЭО

ЗАДАЧИ ЖУРНАЛА: достижения советской электропромышленности сильного тока, описание новых типов выпускаемых изделий с их технической характеристикой, результаты лабораторных испытаний, виды и условия применения, опыт эксплуатации и качество электротехнических изделий. Особый отдел—электродвигательные приводы к производственным станкам и машинам. Отделы плано-экономический.

ЖУРНАЛ РАССЧИТАН на инженеров, техников, квалифицированных рабочих и студентов вузов.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год	10 р. — к.
на 6 мес.	5 р. — к.
на 3 мес.	2 р. 50 к.
Отдельный номер	1 р. — к.

Льготная при коллективной подписке не менее 10 экз.

на год	9 р. — к.
на 6 мес.	4 р. 50 к.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЖУРНАЛ ЭНЕРГОЦЕНТРА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ГОД ИЗДАНИЯ 3-й

ГОД ИЗДАНИЯ 3-й

ПРОГРАММА ЖУРНАЛА: Описание проектов новых станций и сооружений. Освещение опыта эксплуатации станций и их отдельных частей. Вопросы организации строительства. Вопросы планирования электростроительства и распределения энергии. Разбор новых проблем эксплуатации и рационализации энергохозяйства. Эксплуатация высоковольтных сетей и электропередач. Параллельная работа станций. Освещение достижений Запада в вопросах электростроительства.

Журнал рассчитан на инженера, техника и квалифицированного рабочего станции, учащихся вузов и вузов, библиотеки, научно-исследовательские и проектирующие институты.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год	15 р. — к.
на 6 мес.	7 р. 50 к.
на 3 мес.	3 р. 75 к.
Отдельный номер	1 р. 50 к.

Льготная при коллективной подписке не менее 10 экз.

на год	8 р. — к.
на 6 мес.	4 р. — к.
на 3 мес.	2 р. — к.

Подписка принимается во всех отделениях и магазинах Книгоцентра ОГИЗа, его уполномоченными и на почте.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

14

И Ю Л Ъ
1932

Орган Всесоюзного электротехнического объединения (ВЭО), Главного управления энергетического хозяйства (Главэнерго), Секции технической реконструкции и электрификации Института техники и технической политики Коммунистической академии ЦИК СССР и Всесоюзного энергетического комитета (ВЭК)

Адрес редакции:

МОСКВА, Ильинка, Ипатьевский пер., д. 2, 1-й этаж. Телеф. 72-46 и 1-57-19

С о д е р ж а н и е

	Стр.		Стр.
А. И. Колпакова—Технико-экономические основы планирования единой высоковольтной сети	711	Д. И. Марьяновский—О расчете проводов постоянного тока	741
А. А. Ананьев, С. Г. Седых, В. С. Шамонин—Проблема использования энергии ветра в СССР	716	А. Зингерман—К вопросу о механическом расчете шин	743
Н. Ф. Ракушев—Скользкие клеммы для стальнойалюминиевых проводов	718	М. Л. Элькинд и Р. Ю. Малая—Некоторые вопросы проектирования сложных электрических систем	756
Н. Богородицкий и И. Майгельдинов—О методах пропитки дерева для применения его как изолирующего материала	722	Д. М. Айзенберг—О речных направлениях единой высоковольтной сети	758
Л. Н. Богдавленский и А. Г. Стрельман—Грозовые разряды и методы исследования влияния их на линии передач	726	Хроника	759
В. В. Усов—О механических свойствах проводникового алюминия	727	Вопросы метеорологии и линии передач	
П. П. Бенар и Б. Г. Лившиц—Сплошные железные провода переменного тока	731	Всесоюзный Электротехнический Институт	
		Библиография	
		Передача больших мощностей на далекие расстояния Цейтлин	760
		Из книг и журналов	761
		Аннотации	762

Технико-экономические основы планирования единой высоковольтной сети¹⁾

А. И. Колпакова.

Секция электрификации института техники и теплотехники, Москва.

Единая высоковольтная сеть, начало сооружения которой должно быть положено в ближайшие годы, будучи одной из важных технико-экономических проблем народнохозяйственного плана развернутого социалистического строительства, является огромным шагом вперед и вместе с тем, качественным показателем перехода на высшую ступень в деле электрификации СССР. Постановка этой проблемы стала возможной в результате того пути в области реконструкции энергетического хозяйства, который пройден под руководством ленинской партии от отсталого варварского хищнического энергохозяйства царской буржуазной России до создания таких мощных энергетических систем, как Днепровская гидроцентральный, Донбасс, Московский и Ленинградский узлы.

На базе достижений первой пятилетки строится генеральный план электрификации. К 1937 г. намечается электрификация железнодорожных линий общей протяженностью около 20.000 км с грузооборотом в 43% от общего грузооборота по СССР.

Мощность тракторного парка в сельском хозяйстве доходит до $15 \cdot 10^6$ л. с. кладется начало электрификации сельского хозяйства, отпуск энергии на нужды сельского хозяйства, предполагается довести до $10 \cdot 10^9$ kWh в год. Теплоэлектроцентрали дают огромный рост, мощность их предполагается довести до 8 000 MW, что знаменует большие победы в деле реконструкции теплового хозяйства.

Мощность электрических станций на конец второй пятилетки намечается около 25.000 MW и выработка электроэнергии за 1933 г. в $100 \cdot 10^9$ kWh. Больше половины намечаемой мощности электростанций концентрируется в семи крупнейших по мощности районах: Северо-Западный, куда входит Ленинградский район и Карелия; Центральный, куда входят Московский район, Ивановский, Нижегородский и Верхняя Волга; Южный, куда входят Приднепровье, Донбасс и северо-западная часть северокавказского края; Урал, куда входит Башреспублика; Кузбасс, Средняя Азия и Закавказье.

Эти районы являются основными индустриально-хозяйственными центрами СССР и, будучи расположенными друг от друга на расстояниях, измеряемых тысячами километров, прежде всего требуют наличия хорошо организованной и экономич-

¹⁾ Настоящая статья в более полном виде печатается в „Сборнике секции электрификации Института Техники и Теплотехники посвященного основным технико-экономическим проблемам ВЭС.

той транспортной связи между ними. Это требование, диктующее необходимость полной реконструкции транспорта, приводит к той колоссальной программе по электрификации железных дорог, которая намечена в работах второй пятилетки.

Так как железнодорожные магистрали, соединяя развитые районы, пересекают районы хозяйственно очень слабые с совершенно еще неразвитой энергетикой, то для осуществления электрификации железных дорог потребуется или построить специальные станции сравнительно небольшой мощности или производить питание их от крупных районных центральных, расположенных друг от друга иногда на несколько сотен километров.

Основными преимуществами, вытекающими из построения единой высоковольтной сети, являются прежде всего возможность лучшего использования энергетических ресурсов, возможность широкого внедрения электрификации в хозяйство страны и возможность проведения реконструкции таких отраслей хозяйства, которые при иных условиях оставались бы на более низком техническом и экономическом уровне развития. Этот эффект не может быть легко и просто выражен элементарными экономическими расчетами; его в настоящее время можно охарактеризовать только качественно, дав несколько наиболее ярких позитивных примеров. Кроме того, единая высоковольтная сеть дает возможность получить экономии в капитальных затратах на энергетическое хозяйство, значительно лучшее использование установленного оборудования, и тем самым и более эффективное использование затраченных средств при одновременном повышении надежности эксплуатации, повышении качества работы.

В настоящее время еще нельзя дать окончательной схемы развития единой высоковольтной сети, но уже можно в порядке постановки вопроса дать первые грубые наброски ее. На конец пятой пятилетки единая высоковольтная сеть должна охватить почти все основные промышленные районы Союза: Ленинградский, Московский, Донбасс, Приднепровье, Закавказье, Среднюю Волгу, Урал, Кузбасс и Карагандинский район. Далее, по наброскам генерального плана, она распространится на Среднюю Азию, Прибайкалье и потянется дальше на восток за Байкал.

Осуществление единой высоковольтной сети в таком масштабе прежде всего ставит вопрос, какие формы примет единая высоковольтная сеть и какими техническими средствами мы располагаем для ее осуществления.

Создание единой высоковольтной сети предполагает широкое проведение кустового соединения их высоковольтными линиями передачи, являющимися в то же время питательными линиями для электрификации железнодорожных магистралей, промышленности прилегающей промышленности и сельского хозяйства. Часть этих связующих отдельные районы линий будет в основном выполнять функции питания железнодорожных магистралей и сельского хозяйства и дополнительно нести функции маневренного обмена сравнительно небольшими мощностями между районами на сравнительно небольших расстояниях.

Это будет иметь место в менее развитых в промышленном отношении частях Союза и сравнительно бедных энергетическими ресурсами. Для этих линий в начальный период их работы будет достаточным напряжение 110 кВ. Другая часть связующих линий, соединяющих крупные энергетические центры, будет нести маневренные функции межрайонного обмена большими мощностями; в некоторых звеньях будет служить проводником мощных потоков энергии из богатых энергетическими ресурсами районов в районы, бедные энергией, и, в частности, будет нести функции питания железных дорог и сельского хозяйства. Эти связи должны быть достаточно мощными, чтобы обеспечить единство энергетического хозяйства в пределах единой высоковольтной сети и потребуют применения сверхвысокого напряжения. Они составят остов магистральных линий передачи единой высоковольтной сети, вокруг которой будут разрастаться районные сети, проникая все глубже и глубже внутрь страны, охватывая своим влиянием все большую часть территории Союза и новые отрасли хозяйства.

Географическое положение основных хозяйственных районов Союза обуславливает широкое направление мощных сверхмагистралей, связывающих крупнейшие энергетические центры с перемычками в долготном направлении, совпадающими с географической протяженностью этих энергетических центров.

В настоящее время можно грубо наметить, как это видно из прилагаемой карты, две широтные магистрали в пределах европейской части СССР: 1) Ленинград-Москва-Нижегород-Новгород-Свердловск, 2) Днепропетровск-Донбасс-Сталинград-Самара-Челябинск с долготными перемычками Москва-Донбасс, Самара-Челябинск, Свердловск-Челябинск. Уральская перемычка имеет ответвления на Северном Урале в Башкирию, а перемычка Москва-Донбасс переходит в магистраль, связывающую единую высоковольтную сеть с Закавказьем. В пределах азиатской части Союза намечается 3 широтных магистрали: 1) Челябинск-Омск-Новосибирск-Кузбасс-верховья Ангары, 2) Камышин-Южно-Сибирская железнодорожная магистраль-Кузбасс-верховья Енисея, 3) Камышин-Средняя Азия-верховья Иртыша-Кузбасс. Долготные перемычки в азиатской части еще не определились в достаточной степени, кроме перемычки в Кузбассе; возможно появление долготных магистралей в Карагандинском районе и в районе ангаро-енисейских гидроустановок.

Намеченные магистрали не исчерпывают все возможности и не могут претендовать на точность намечаемых направлений; повторяем, эти являются одной из первых грубых набросков скелета единой высоковольтной сети.

Кроме перечисленных основных магистралей сверхвысокого напряжения в состав единой высоковольтной сети будут входить связующие линии, менее мощные, носящие характер местных вспомогательных магистралей; их конфигурация целиком определяется направлением электрификации железных дорог.

Генеральный план электрификации Союза предусматривает осуществление целого ряда крупнейших гидроэлектрических станций мощностью до 1500 MW и выше. Сооружение таких гидрогигантов будет связано с переброской энергии на огромные расстояния, измеряемые тысячами километров. Мощности, подлежащие передаче, будут измеряться миллионами киловатт. Такие передачи невозможно осуществить теми средствами, которыми владеет в настоящее время мировая техника, но пути разрешения этой проблемы уже намечаются. Техническая мысль в СССР работает над применением для этой цели постоянного тока высокого напряжения. Предстоит огромная работа в разрешении этой задачи. Разработка вопросов применения постоянного тока должна вестись такими темпами, чтобы обеспечить осуществление тех задач, которые ставит перед нами генеральный план электрификации.

Вопрос выбора рода тока для периода начального строительства решается однозначно. На ближайшее время мы располагаем только техникой переменного тока; поэтому все проектировки единой высоковольтной сети в настоящее время ведутся для переменного трехфазного тока.

Первый вопрос, который при этом встает,— это вопрос напряжения.

Начало постройки первых звеньев магистральных линий передач единой высоковольтной сети должно быть положено уже в 1933—1934 гг. К этому времени мы будем располагать только напряжением 220 kV, которое, как показал ряд расчетов, будет достаточно для первого периода работы. Развертывание магистральных линий и их маневренной работы, рост мощности гидростанций и мощности агрегатов на паровых станциях потребуют в целом ряде звеньев магистральных линий переброски таких мощностей, которые выходят за пределы, возможные для напряжения 220 kV, и уже теперь необходимо самым интенсивным образом работать над освоением напряжения в 400 kV, чтобы к концу второй пятилетки его можно было бы применять в наиболее мощных звеньях единой высоковольтной сети.

Единая высоковольтная сеть намечает осуществление целого ряда мощных магистралей в нагорных районах, где осуществление воздушных линий передач по условиям коронирования будет чрезвычайно затруднено. Встретятся большие затруднения в осуществлении воздушных передач сверхвысокого напряжения также в районах гололедных и районах с усиленной грозовой деятельностью. Для таких районов самым актуальным вопросом является применение кабелей сверхвысокого напряжения.

Таким образом основные магистрали единой высоковольтной сети при ее развитии отнюдь нельзя мыслить как единую воздушную линию передачи одного напряжения. В зависимости от характера работы различные звенья магистрали могут осуществляться разным напряжением и даже разным родом тока, будучи выполнены воздушными линиями, частично кабельными.

Вторая категория вопросов, связанных с осуществлением единой высоковольтной сети,— это вопросы коммутации.

Единую высоковольтную сеть, которая будет

к концу второй пятилетки объединять мощность порядка 15000 MW, а по генеральному плану до 50000 MW, нельзя представить себе в виде простейшим образом соединенных в одну электрическую систему станций. Ее единство надо понимать в более широком техническом и экономическом смысле. Единая высоковольтная сеть должна представлять собой единую хозяйственно-техническую систему, дающую возможность использовать все преимущества такого единства. Простое соединение на параллельную работу всех районов дало бы очень громоздкую и, как показывают предварительные расчеты, недостаточно надежную в работе систему.

Предварительные проектировки показывают, что в целях локализации аварийных явлений, способных нарушить устойчивость параллельной работы станций, а также в целях повышения самой устойчивости параллельной работы, является целесообразным разделение единой высоковольтной сети на ряд отдельных секций, внутри которых будет осуществляться параллельная работа.

Если эти секции правильно спроектировать в смысле подбора мощности, объединяемой на параллельную работу, направления и пропускной способности основных магистралей внутри секции, если обеспечить достаточно гибкую связь между отдельными секциями, то можно создать такую коммутацию единой высоковольтной сети, которая позволит, сохраняя техническое и хозяйственное единство ее, осуществлять надежную и четкую в техническом отношении работу. В настоящий момент схема коммутации, даже грубо приближенная, не разработана еще, но проработка эскизного проекта одного из звеньев единой высоковольтной сети—магистрали УСК—позволила нащупать ряд конкретных моментов, которые могут быть положены в основу дальнейших проектировок и должны быть этими проектировками проверены.

Эти основные моменты таковы.

Мощность секций может колебаться в пределах 1500—5000 MW, что в достаточной мере согласуется с экономическими требованиями, позволяя использовать мощность агрегата до 200 MW.

Географическая протяженность секций может достигать до 2000 km, что даст возможность осуществить достаточно гибкую коммутацию для использования преимуществ, получаемых вследствие сдвига времени при широтном расположении магистралей.

Стык основных секций желательно производить в районах с большими нагрузками, выбирая основные места разделения между секциями в точках токораздела питательных потоков энергии и приурочивая их к крупным станциям, способным обеспечить переброску достаточно больших мощностей (двух-трехкратных наибольшего агрегата) из одной секции в другую. Конфигурация магистральных линий, выполняющих маневренную работу единой высоковольтной сети и одновременно являющихся связующими линиями между отдельными районами—кустами внутри секции, должна быть простой, отнюдь не петлевой.

Осуществление единой высоковольтной сети будет органически в общий народнохозяйствен-

ный план, переплетаясь теснейшим образом с целым рядом отдельных больших отраслей этого плана. В качестве примера, не исчерпывающего всей сложности хозяйственных взаимодействий, можно привести электрификацию железных дорог. Ее осуществление будет базироваться на создании единой высоковольтной сети, но она должна оказать в свою очередь огромное влияние на размещение производительных сил, а тем самым на размещение и мощность энергетических узлов как в смысле потребления энергии, так и в смысле производства.

Единая высоковольтная сеть, которая дает возможность наиболее экономично осуществить электрификацию железных дорог и снизить стоимость перевозки до $0,5 \div 0,3$ коп. за 1 tkm, способна дать все преимущества единого энергетического хозяйства только при условии электрификации железных дорог, обуславливающей указанное снижение стоимости перевозки. Экономичный транспорт является одним из существенных условий возможности наиболее целесообразного с энергетической точки зрения размещения энергопромышленных комбинатов, использование которых наряду с использованием гидроэнергии и составляет основное экономическое преимущество, вытекающее из создания единой высоковольтной сети.

При осуществлении единой высоковольтной сети электрическая станция перестает быть самостоятельной единицей, а становится "элементарной клеточкой целого организма". Масштаб предстоящих по энергетике работ и темпы строительства, которые диктуются бурным развитием социалистического хозяйства, требуют проведения типового и стандартного строительства. Малое число типов станций является очень существенным с точки зрения сокращения шкалы стандартов оборудования и аппаратуры и тем самым увеличения производственных возможностей энергомашиностроения.

Не менее эффективное влияние на производственную мощность машиностроительных заводов должна оказать возможность массового применения при наличии единой высоковольтной сети укрупненных агрегатов.

Загрузка аппаратных заводов дополнительным количеством аппаратуры, необходимым для создания единой высоковольтной сети, с излишком компенсируется рационализацией производства машиностроительных заводов, которую внесет единая высоковольтная сеть.

Переход к укрупненным агрегатам важен для нас не только с точки зрения уменьшения капитальных затрат на установленный киловатт мощности на станциях, но также с точки зрения общехозяйственной, с точки зрения возможности выполнения намеченного плана в возможно короткий срок и с наименьшими затратами на металл и машиностроение, которые для начального периода развития являются наиболее узким местом.

Проектировка единой высоковольтной сети должна проверить те установки, которые принимаются в настоящее время при разработке вопросов типизации станций и стандартизации оборудования и аппаратуры.

Переходя к другим экономическим преимуществам, которые вытекают из осуществления еди-

ной высоковольтной сети, прежде всего необходимо отметить электрификацию железнодорожного транспорта и включение сельского хозяйства в систему единого энергетического хозяйства страны.

Электрификация железных дорог прежде всего дает огромный эффект с точки зрения экономии использования энергетических ресурсов. Экономия топлива, если считать в эквивалентно 7 000-калорийном топливе, составит около 60%, т. е. расход сократится в $2\frac{1}{2}$ раза. Цифра достаточно разительная, но значение этой экономии по существу не полностью оценивается приведенными цифрами, так как топливо не только экономится в размере 60%, но и в отношении остальных 40% происходит замена хорошего, высококалорийного топлива, пожираемого паровыми, низкосортным топливом, а отчасти и гидроэнергией. По масштабу проводимой электрификации железных дорог в 1937 г. и их нагрузке сбережения высококалорийного топлива за год составят около $17 \cdot 10^6$ t, а абсолютная экономия около $10 \cdot 10^6$ t. Электрификация дает значительное увеличение пропускной способности дорог, скорости движения грузов и быстроты оборота подвижного состава и их более эффективное использование и вместе с этим значительную экономию черного металла.

Что касается сельского хозяйства, то этот вопрос является значительно менее изученным. Эффективность электрификации сельского хозяйства не может быть выражена в настоящий момент какими-либо конкретными цифрами, но значение единой высоковольтной сети в деле электрификации сельского хозяйства может быть оценено исходя из того, что в зону влияния единой высоковольтной сети попадает значительная часть освоенной сельскохозяйственной территории.

Наличие единой высоковольтной сети дает возможность наиболее гибкого развития энергетической части агро-индустриальных комбинатов. В связи с этим стоит вопрос об использовании энергии ветра, играющей для некоторых районов очень существенную роль, а также вопрос о мелких сельскохозяйственных теплостанциях. Создание сети таких станций даст возможность использовать местное сельскохозяйственное топливо и извлечь все преимущества комбинированной выработки электрической и тепловой энергии для нужд сельского хозяйства. Но чтобы обеспечить строительство этих мелких станций соответствующим оборудованием (а его потребуется очень большое количество) необходимо до крайности упростить и стандартизировать сельскохозяйственную комбинированную установку, чтобы иметь возможность поставить производство необходимого оборудования в массовом масштабе конвейерным способом, как ставится производство электромоторов.

Овладение техникой пара высокого давления передачи тепла на большие расстояния (в настоящее время до 10 km) открывает возможность централизации производства электрической и

1) Экономия топлива дана по сравнению с расходом топлива на железных дорогах при условии применения мощных паровозов, т. е. при условии реконструкции паровой и железных дорог.

ловой энергии. Однако при условии даже очень большой концентрации производства тепловой энергии мощность тэц в части комбинированной работы редко будет превышать 100 MW, в большинстве случаев оставаясь ниже этого предела. Такие мощности тэц могут привести или к дроблению мощности станций и агрегатов (в масштабе мощностей конца второй пятилетки) или к увеличению конденсационной части станций.

Необходимо теперь же поставить проработку вопросов выбора типа тэц и определения стандарта укрупненных теплофикационных агрегатов под углом зрения работы их в системе единой высоковольтной сети.

Проработка эта, по существу, еще не началась, в то время как на вторую пятилетку мощность тэц предусматривается в размере $\frac{1}{3}$ всей мощности станций. Поэтому быстрейший и правильный выбор стандарта агрегатов и типа тэц является одним из условий удачного построения энергетического хозяйства второй пятилетки.

Использование гидроресурсов представляет огромной важности задачу в первую очередь потому, что стоимость гидроэнергии при благоприятных условиях значительно ниже стоимости энергии на тепловых станциях. Лучшие гидравлические установки могут дать ток даже более дешевый, чем теплоэлектроцентрали. Но вопрос не стоит о конкуренции тэц и гидростанций, единая высоковольтная сеть даст возможность использовать и то и другое, сокращая до крайнего предела конденсационную выработку энергии, расточительно пожирающую топливо.

Использование гидроэнергии представляет собой гораздо более сложную задачу, нежели использование энергии конденсационных станций. Постройка гидроэлектрических станций часто является лишь одним из звеньев больших гидротехнических сооружений, связанных с ирригационными и транспортными проблемами. Выполнение таких сооружений представляет собой часто целую программу реконструкции хозяйства всего района, превращения края из пустыни в цветущий сад. Так обстоит дело, например, с установками восточной части Закавказья, Средней Азии, Волги и др.

Вопрос об использовании переменной мощности гидростанций в единой высоковольтной сети теснейшим образом связан с графиком потребления электрической энергии.

Более высокий коэффициент заполнения суточного графика дает возможность вести более экономично работу станций и, не выключая ежедневно отдельных машин, держать их нагрузку в пределах наиболее высоких значений к. п. д. установки. Кроме эксплуатационных преимуществ, уплотнение графика является существенным условием более полного использования оборудования электрических станций, а тем самым более эффективного использования вложенных средств. Поэтому мы, имея в руках орудие планового хозяйства за последние годы предпринимали целый ряд мероприятий, позволивших добиться значительного уплотнения суточного графика, и для крупнейших наших объединений коэффициент заполнения зимнего суточного графика составляет 75-80% и выше.

График располагаемой мощности при наличии гидростанций и теплоэлектроцентралей всегда будет иметь большую или меньшую дополнительную летнюю сезонную мощность. Его очертания, как правило не совпадают с графиком нагрузки. Чтобы судить о степени уплотнения годового графика, необходимо сопоставить график располагаемой мощности с графиком нагрузки и графиком ремонта и ревизии агрегатов, располагая ремонтные работы так, чтобы они по возможности не вызвали дополнительную установку агрегатов.

Вопрос определения наивыгоднейшего годового графика нагрузки осложняется тем, что сезонная мощность гидростанций не является величиной определенной, заданной извне. Размер ее можно выбрать и стоимость дополнительного киловатта может быть различна в зависимости от выбираемой мощности. При определении мощности гидростанции необходимо учитывать весь сложный комплекс вопросов, связанных с эксплуатацией объединения электрических станций и, в частности, 1) возможности развития сезонных потребителей, т. е. приспособления графика нагрузки и располагаемой мощности и 2) возможности использования сезонной мощности для ремонта машин объединения, если дополнительная сезонная мощность, установленная для этой цели, потребует меньше затрат, чем установка паровых агрегатов.

Кроме гидростанций сезонную мощность можно получить также на теплоэлектроцентралях за счет использования мощности котельной, частично освобождающейся вне отопительного сезона. Сезонность этой мощности является более определенной, чем для гидростанций. Ее размер и продолжительность использования определяются климатическими условиями и могут быть с большой степенью точности заранее определены. Вопрос об использовании сезонной мощности тэц связан также с наличием и графиком сезонной мощности гидростанций. Из предыдущего ясно, что вопрос наиболее полного использования гидроресурсов переплетается с целым рядом других вопросов и может быть разрешен только в системе единого энергетического хозяйства, включая сюда и вопрос о развитии специальных производств для заполнения провала графика. Неравномерное распределение по территории Союза гидроресурсов и различная характеристика их также диктуют необходимость объединения энергетического хозяйства в единое целое.

Единая высоковольтная сеть, объединяя все гидроэлектрические станции, включая в свою систему крупные теплоэлектроцентрали, позволяя осуществить электрификацию транспорта, включая в единую систему энергетического хозяйства сельскохозяйственное производство и вместе с ним местные источники энергии (ветер и сельскохозяйственные теплоэлектростанции), обнимая своими сетями значительную часть территории Союза, действительно даст возможность наивыгоднейшим образом использовать энергетические ресурсы страны, добиться максимальных темпов развертывания строительства и освоения новых районов, а также на базе дешевой электрической энергии, реконструкции основных отраслей народного хозяйства.

ПРОБЛЕМЫ КРУПНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ

Проблема использования энергии ветра в СССР

А. А. Ананьев, С. Г. Седых, В. С. Шамонин

Секция электрификации института техники, Москва

Социалистическое строительство требует мобилизации всех имеющихся в распоряжении советской страны энергоресурсов. Само собой разумеется, что эта мобилизация одновременно требует, во-первых, экономнейшего расходования невозобновляемых видов энергии (нефть, уголь и т. д.), во-вторых, рациональной эксплуатации их и в частности такой эксплуатации, которая максимально разгрузит транспорт и которая максимально использует все местные ресурсы.

В связи с этим огромное значение приобретает „даровая“, повсеместно встречающаяся, постоянно возобновляемая энергия ветра.

Помимо этого, к проблеме использования энергии ветра заставляет отнестись вдумчиво тот факт, что удельный вес ветроэнергии в общем балансе энергоресурсов весьма значителен. Мощность же ветродвигателей, используемых в СССР, равна приблизительно всего 700 000 л. с., что по отношению к суммарной мощности двигателей в СССР представляет относительно малую величину. В структурном же отношении эти 700 000 л. с., получаемых с помощью ветра, представляют, пожалуй, наиболее отсталый технический сектор — ветряные мукомольные мельницы мощностью от 3 до 10 л. с. с примитивным устройством.

Такое положение с использованием энергии ветра объясняется тем, что до последнего времени мы не имеем мощных ветродвигателей, что эта энергия непостоянна, изменяется в очень больших пределах и использование ее по постоянному графику представляет сравнительно большие трудности. Прогресс в области авиационной техники и в области электротехники в настоящее время дает возможность по-новому разрешить все эти вопросы, по-новому поставить проблему использования энергии ветра.

Ветер и единая высоковольтная сеть

Наиболее целесообразной формой использования энергии ветра в крупном масштабе является включение ее в единую высоковольтную сеть. Во-первых, потому, что неравномерность в подаче энергии может быть сглажена в системе единой сети, и во-вторых, работа непосредственно в сеть высокого напряжения дает возможность обойти аккумуляцию.

С другой стороны, единая высоковольтная сеть в некоторых частях может быть осуществлена в наиболее выгодной форме, если при ее построении будут учтены ветровые ресурсы. Дело в том, что в больших пролетах этой сети в целом ряде районов нет никаких видов энергии, кроме энергии ветра. Это так называемые „провальные районы“. К таким пролетам можно отнести, например, пролет Челябинск—Кузбасс, характерный тем, что топливные ресурсы имеются только в Челябинском районе и Кузбассе, а в промежутке на расстоянии 500—800 км нет выявленных ресурсов, кроме сравнительно небольших запасов торфа и бурого угля. Здесь придется строить станции на привозном топливе, если пренебречь энергией ветра. А между тем как раз в этих районах скорости ветра являются такими, которые дают возможность строить мощные ветроэлектростанции. Так, в пролете Челябинск—Омск среднегодовая скорость ветра на высоте нескольких десятков метров от земли равна 4 м/сек, а в пролете Омск—Новосибирск—4÷3 м/сек. Вместо того чтобы строить электроцентраль на привозном топливе, можно воспользоваться энергией ветра, построив мощные ветряные станции.

В техническом решении вопросов использования ветра в сравнительно крупных масштабах для производства электроэнергии играют большую роль следующие два момента: возможность получения больших количеств энергии ветра в одном пункте и возможность включения непостоянной энергии ветра в кольцо высокого напряжения.

Некоторое представление о мощности ветроэлектростанций, которые уже осваиваются современной техникой, дает следующее сообщение, сделанное на заседании французского общества электриков об одном проекте: „На высоте 250 м на держателях будут установлены два параллельных горизонтальных бруса, имеющих форму ромба. На концы их две воздушные турбины, состоящие каждая из трех элементов, вращающихся в противоположную сторону в плоскости, проходящей по оси башни. Так как турбины установлены на вращающихся

платформах, они наподобие флюгера поворачиваются все в направлении ветра. Обе турбины соединены посредством зубчатой передачи с электрическими генераторами, установленными в зданиях, построенных у подножия башни. Их суммарная максимальная мощность достигает 6 000 kW. Согласно численному инженеру себестоимость 1 kWh составит приблизительно 6 сантимов“.

В германской печати обсуждается проект Ганнефа о ветроэлектростанции мощностью 20 000 kW. Вот описание этого проекта. „На башне высотой 430 м должны быть смонтированы три ветряных колеса, каждый диаметром в 160 м. Каждое ветряное колесо состоит из двух половин, вращающихся в противоположных направлениях для компенсации центробежной силы и для лучшего использования ветра. Генераторы, в которых ветряная энергия превращается в электрическую, должны быть выстроены непосредственно на ветряных лесах“¹⁾.

По проекту Ганнефа такая установка может дать 20 000 л. с. причем стоимость одного установленного киловатта равна приблизительно 225 марок.

Опытная ветроэлектростанция по проекту Ганнефа с диаметром крыльев 60 м на башне высотой 225 м уже начата строительством, и ее предполагается закончить в этом году.

Что касается второго вопроса, вопроса о включении башен ветроэлектростанций в сеть высокого напряжения, то он имеет сравнительно легкое решение, если сеть высокого напряжения будет сетью постоянного тока, хотя бы потому, специфические условия работы ветровой энергии (неравномерность оборотов и т. д.) делают более выгодным применение динамомашины постоянного тока.

При переменном токе появляется целый ряд осложняющих обстоятельств. Однако и в этом случае решение возможно. Одним из примеров может служить следующая схема, придуманная французским журналом: „Сооружают батареи ветряных двигателей, каждый из которых приводит в действие динамо машины постоянного тока и постоянной мощности, но регулируют напряжение по системе Тюри. Генераторы различных групп соединены между собой последовательно, и постоянный ток высокого напряжения, полученный таким образом, создает каждый момент суммарную мощность пропорциональную скорости ветра на каждый двигатель. Этот постоянный ток высокого напряжения посылается вращающимся преобразователям, трансформирующим его в трехфазный ток, способный аналогичным тому, который применен в Лионе для постоянного тока высокого напряжения, получаемого с Альп. Этот трехфазный ток может быть отдаваем в сети, а с другой стороны, на термические или гидравлические станции“²⁾.

Препятствия к использованию энергии ветра в капиталистических странах коренятся, главным образом, в самой системе капиталистического общества, а не в технических условиях, ибо технические трудности к тому, чтобы подвести от ветроэлектростанций энергию к трансформатору и от трансформатора в сеть не непреодолимы.

Изолированные ветроэлектростанции

Однако было бы неправильным думать, что использование энергии ветра является рентабельным только в единой высоковольтной сети. Изолированные ветроэлектростанции могут быть построены с большой выгодой в районах, где имеются достаточные скорости ветра. К таким районам нужно отнести район Новороссийска, где имеется средняя годовая скорость ветра, равная 8,5 ÷ 8,9 м/сек, и где имеются возможности естественного гидроаккумулирования; целый ряд районов Казакстана, где имеются стабильные ветры большой силы течение года, например, Акмолинск—Аральское море со средней годовою скоростью в 5 м/сек, Аральское море—Каспийское море—со скоростью 5 ÷ 6 м/сек. Еще более благоприятны ветряные условия для постройки ветроэлектростанций в малонаселенных районах побережья Северного Ледовитого океана, где на огромных пространствах (Пустозеро, Таймырский полуостров) среднегодовая скорость равна от 6 м/сек.

¹⁾ Fortschritte der Technik. Февраль 1932.

²⁾ Bulletin de la Société Française de Electriciens. Июнь 1929, т. IX, №

С помощью энергии ветра можно приступить к освоению этих районов, а когда там будут выявлены другие виды энергии, ветер обратится в резерв гидроэлектростанций и тепловых станций.

Проблема аккумуляции энергии может быть решена в различных формах в зависимости от местных особенностей. Самым выгодным способом аккумуляции ветровой энергии является гидроаккумуляция особенно в тех районах, где имеются естественные резервуары и мощные водные бассейны (район Новороссийска). Гидроаккумуляция уничтожает основной недостаток энергии ветра — непостоянную вибрирующую пульсацию его — путем поднятия воды в естественные резервуары, а затем использования ее в водяных турбинах. Аккумуляция энергии ветра в районах, где отсутствуют водные бассейны, более сложно, но тем не менее в некоторых случаях тоже является выгодным, так например, аккумуляция энергии электрического котла, который, как показал опыт электростанции, установленного на Ниагаре, мощностью 18 000 kW³⁾, дал вполне удовлетворительные результаты в качестве аккумулятора электроэнергии; при таком аккумуляции также уничтожается неравномерность и колебание ветра. Наконец, необходимо отметить электрохимическую аккумуляцию, электролитическую, путем разложения воды на кислород и водород с использованием последнего для водородных двигателей и т. д. Таким образом техническая проблема аккумуляции также не представляет непреодолимых затруднений.

Нужно иметь в виду, однако, что в изолированных станциях можно избежать аккумуляции, если использовать высокие ветровые течения (в частности из этого исходит проект Гоннефа). Дело в том, что на большой высоте, порядка нескольких сот метров, скорости ветров увеличиваются примерно в полтора-два раза по сравнению со скоростью надземной в том районе, и главное движение воздушного потока является более постоянным и изменяется в сравнительно небольших интервалах. Это дает возможность снять в одном пункте большое количество энергии и иногда избежать аккумуляции. Но одновременно с этим увеличиваются расходы по сооружению башен. Так что использование энергии ветра в этой форме выгодно только тогда, когда проектируются крупные станции.

Комбинирование ветроэлектростанций с тепловыми станциями и гидроэлектростанциями местного значения

Наряду с устройством изолированных ветроэлектростанций уже сейчас на практические рельсы можно поставить вопрос об использовании энергии ветра в качестве резерва тепловых станций и гидроэлектростанций (сезоны ветров и многоводья взаимно противоположны) местного значения в районах с достаточной скоростью ветра.

На Украине и Северном Кавказе средняя скорость ветра колеблется от 4 до 5 m/sec, повышаясь у берегов Черного моря до 6—7 m/sec, а в отдельных пунктах (Новороссийск) до 8,5—8,9 m/sec.

Как показал опыт Данин⁴⁾, ветряные электростанции соответствующей мощности, работающие в качестве вспомогательных станций в системе тепловых электростанций, вырабатывают в течение года до 50% всего количества энергии. Таким образом ветроэлектростанции, построенные в качестве резервных станций к местным тепловым станциям, в районе Украины и Северного Кавказа могли бы сэкономить большое количество топлива.

В СССР имеется опыт в этом направлении. Близ Балаклавы Центральным ветроэнергетическим институтом (ЦВЕИ) построена ветроэлектростанция, пока небольшой мощности, порядка 100 kW. Однако эта станция доказала возможность параллельной работы ветроэлектростанции с тепловыми станциями трехфазного тока. Этот опыт имеет большое значение и является первым шагом в деле использования этого источника энергии в большом масштабе.

В некоторых районах большое значение будет иметь блокировка ветроэлектростанции с солнечными электростанциями. Этим способом в значительной степени будет выравниваться нагрузка и намного увеличится суточная и годовая продукция, потому что ветер, как правило, бывает более сильным в па-

смурную погоду и в ночное время, т. е. когда солнечное излучение уменьшается или совсем отсутствует⁵⁾.

Возьмем такие районы, как пустыни Кара-Кум и Кызыл-Кум. В этих районах годовая сумма количества тепла на один квадратный сантиметр равна от 130 до 180 cal. В то же время ветровые ресурсы там (средние годовые скорости порядка 4—5 m/sec) являются вполне благоприятными для постройки крупных ветроэлектростанций.

Комбинированные ветровые и солнечные станции дадут возможность оживить пустыню и включить природные богатства этих пустынь в дело социалистического строительства.

Использование ветродвигателей для орошения

Постройка ветроэлектростанций само собой разумеется не исключает непосредственного использования их для других целей, например, для подъема воды и т. д. В частности большое значение ветродвигатели приобретают в орошении засушливых районов.

Использование ветроэнергии для орошения может пойти в четырех направлениях в зависимости от местных условий: а) регулирование стока по снегу и водозадержание, б) орошение, базирующееся на привлечении воды от крупных рек, в) лиманное орошение, г) при наличии рельефных условий — механический подъем воды и т. д.

При разрешении вопроса о применении ветродвигателей для орошения нужно иметь в виду то благоприятное обстоятельство, что период засухи есть период „сухоев“, дающих максимальное количество ветровой энергии, которая при правильном использовании для орошения может возместить тот ущерб, который суховеи приносят. Пользуясь энергией сухоев, можно повести в массовом масштабе орошение колхозов и совхозов засушливых районов (Нижняя Волга, Казакстан, Украина и др.).

Ветрофикацию орошения можно базировать на мощных ветряках, устанавливаемых на определенных расстояниях один от другого на возвышенных местах по берегу рек.

Опыт в этом отношении уже имеется в мировой технике. Всем известен опыт Голландии по применению энергии ветра в осушении и отвоевании у моря земли. Маленькая Голландия имела, главным образом, для этой цели 1972 ветряка⁶⁾.

Нередко ветряки применяются для орошения и в Америке. В САСШ по данным, относящимся к 1929 г., для целей водоснабжения и орошения использовалось 851 000 ветроустановок. В восточном Колорадо, в Западном Канзасе и Набраске 4—5% всей обрабатываемой площади орошается с помощью ветряков, причем на орошаемых площадях получается „повышенная доходность“ с фермерской точки зрения. Развитию орошения с помощью ветряков в Америке ставит известные пределы мелкий фермерский капиталистический тип хозяйства. Это обуславливает и мелкий, маломощный тип установки.

Тот тип ветродвигателя, который разработан ЦАГИ (Д-30), вполне годен для массового применения в центробежном орошении. Этот ветродвигатель, будучи соединен с центробежным насосом, может оросить, например, в условиях Волго-Ахтубинского района 300—500 га.

Опыт работы такого типа ветряного двигателя с диаметром колеса 14 м, установленного ЦВЕИ в Баку на Бенагодинских нефтяных промыслах, с групповым приводом к поршневым насосам на 5 глубоких скважинах, свидетельствует о реальной выгоде использования энергии ветра для целей откачки жидкостей: За 7 первых месяцев своей работы 85% всего поднятого количества нефти на этой установке было добыто за счет энергии ветра и только 15% за счет резервного теплового двигателя.

Если для применения ветродвигателей в производстве электроэнергии еще кой-чего недостает в технических деталях, то в области орошения для применения ветродвигателей давным-давно у нас созрели объективные и субъективные предпосылки, и мы просто-напросто не реализуем те технические возможности, которые имеем с своих руках.

Необходимо наладить массовое серийное производство этих двигателей во 2-й пятилетке, для того чтобы установить десятки тысяч их в засушливых районах.

План орошения засушливых районов с помощью ветряков и план массового производства ветродвигательных конструкций требуют пристального внимания планирующих организаций и органов Нормкомзема.

³⁾ Scientific Supplement, № 1899.

⁴⁾ Saabroe van de Hoofdsche Moby 1927. Amsterdam

⁵⁾ La Nature. 1924, т. 524.

⁶⁾ Многие дакие электрические станции обнаружили, что поддержка их ветряной станцией компенсируется уже в том случае, если ветряные двигатели производят только 20% общего количества отдаваемой энергии. Г.о они (фактически) принимают гораздо большее участие в производстве энергии, как это было установлено, они производят большей частью 50% всего количества отдаваемой энергии" (Биллау. „Die Windkraft in Theorie und Praxis“).

Ветряки в колхозах и совхозах для колодцев и помола

Некоторые ориентировочные цифры дадут представление о том, какое количество ветродвигателей должно в ближайшее время найти себе применение в области откачки и подема воды.

На Украине имеется 130 000 колодцев, из них 75% на глубине более 30 м. На Северном Кавказе имеется около 50 000 таких колодцев. Механизация подема воды, в частности в засушливых районах, имеет большое значение для колхозов и совхозов вообще и для животноводческих особенно.

На VI Съезде советов СССР г. Яковлев правильно поставил вопрос: „у нас этими ветряными двигателями кое-кто пренебрегает, а ведь это совершенно не плохие двигатели. Их можно превосходно использовать для добывания воды. ВСНХ по нашему заказу в этом году уже производит небольшое количество таких двигателей. Мы ведем переговоры с промышленниками, чтобы в будущем 1932 году произвести сорок—пятьдесят тысяч ветряных двигателей. Нам они нужны прежде всего для животноводческих хозяйств, ибо совершенно не обязательно работать нефтяными двигателями, даже заочно работать нефтяными двигателями, когда можно обойтись ветряными, тем более, что в чем другом, а в ветре у нас недостатка нет, в особенности в Казакстане, где развевается большое количество животноводческих хозяйств, остро нуждающихся в воде“.

Для размолы муки сейчас работают примерно 100 000 мельниц очень примитивной конструкции („голландки“), перемалывающих десятки миллионов пудов. Эти мельницы нужно реорганизовать на основе современного уровня ветротехники. Безусловно колхозы и совхозы предъявят спрос на тип ветряка для помола муки лучших и более мощных конструкций. Через эти мельницы могут быть пропущены сотни миллионов пудов муки, идущие, главным образом, на местные нужды. Нужно, чтобы промышленность была готова удовлетворить спрос колхозов и совхозов.

Использование энергии ветра в других областях

Большое значение применение ветряной энергии может иметь и в других областях, в частности в строительном деле.

„Мельницы для измельчения твердых материалов, как-то: ней, песка, цемента, извести⁷⁾, шамота, соли, какао, сахара, костей, дерева, руд, угля, эмалевых масс—могли бы хорошо обслуживаться ветряными двигателями. Лесопилки с горизонтальной лесопильной рамой и автоматическим приво- могут рассматриваться как установки, работающие при бурении руды и разработки угля имеют место быть частью в отдельных местностях в стороне от путей сообщения; здесь ветряной двигатель может оказать ценную услугу так как его работа не связана с подвозом топлива и специального ухода. Равным образом, ветряные моторы, изготовляющие сжатый воздух для рабочих машин, могут быть полезными при сооружении мостов или подсобных им построек в отдаленной местности“⁸⁾.

В СССР—необъятное поле перечисленных выше областей, в местностях, отдаленных от путей сообщения, к которым может быть применен ветродвигатель.

Производство ветродвигателей

Все вышесказанное делает интересным такой вопрос—сколько в СССР выпущено заводским путем ветродвигателей в 1931 г. Почти—ноль. Между тем, в Америке производилось в докризисные годы 100 000 ветряков в год только для откачивания воды, в Аргентине до 1914 г. устанавливалось ежегодно от 12 000 до 15 000 ветродвигателей заводского типа. Вывод совершенно ясен: нужно догнать и перегнать.

Происходившая весной этого года в Харькове I Всесоюзная ветроэнергетическая конференция выдвинула предложение использовать во второй пятилетке энергию ветра в размере 300 000 kW для нужд промышленности и в размере 2,5 млн. л. с. для нужд сельского хозяйства. Осуществление этих задач потребует постройки крупных заводов по производству ветродвигателей и соответствующей аппаратуры, а также широкого развертывания научно-исследовательской работы в области ветра.

Необходимо сдвинуть это дело с мертвой точки, унять, наконец, лед недоверия, инертности, пассивности в этом вопросе. Необходимо, наконец, осуществить указания Владимира Ильича в „Набросках плана научно-технических работ“—Академии наук о „применении водных сил и ветродвигателей вообще и в применении к земледелию“⁹⁾.

Скользящие клеммы для стальнойюминиевых проводов

Н. Ф. Ракушев
Челябинск, ЧГР

Существующие у нас в настоящее время нормы механического расчета проводов и опор высоковольтных линий электропередачи требуют рассчитывать промежуточные опоры на случай одновременного обрыва двух проводов в одном пролете. При этом, в случае подвески проводов в зажимных или глухих клеммах, усилия, действующие на опоры при аварии, измеряются сотнями килограммов, в силу этого конструкция опоры получается тяжелой и дорогой. Естественно, что конструкторская мысль и у нас и за границей пошла по пути изыскания способов уменьшения усилий, действующих по проводу при его обрыве, и с этой целью были предложены различные типы опор с повышенной гибкостью и различные способы подвески проводов в клеммах.

За границей были разработаны специальные конструкции металлических опор с поворотными кронштейнами, чем достигалось снижение усилий в момент обрыва проводов на 15—20%. С другой стороны, стали входить в употребление новые типы клемм, которые высвобождали провод в том случае, когда усилие по нему превышало некоторую вполне определенную величину. В результате провод проскальзывал в клемме, натяжения в соседних пролетах, таким образом, выравнивались, и опора в значительной степени разгружалась от аварийных усилий.

В СССР появились деревянные П-образные промежуточные опоры с повышенной гибкостью, предложенные Н. И. Сушкиным и А. А. Глазуновым, а также скользящие клеммы, предложенные теми же авторами. Эти клеммы, давая проводу полную возможность свободно перемещаться в случае появле-

ния каких-либо натяжений вдоль линии, практически разгружали опоры почти целиком от аварийных усилий, и, в итоге, в отступление от наших официальных норм позволяло рассчитывать промежуточные опоры на обрыв только одного провода. Таким путем были достигнуты весьма серьезные экономические успехи в деле строительства линий электропередачи—пролет был повышен до 200—225 м при простейших деревянных П-образных мачтах; упростился монтаж проводов, весьма сильно облегчилась конструкция промежуточных опор и способы их расчета, что в целом позволило снизить стоимость 1 km высоковольтной линии электропередачи на 15—20%. Однако все выгоды, связанные с применением скользящих клемм, получались только при медных проводах. Поэтому только оказалось необходимым перейти на стальнойюминиевые провода, так тотчас же пришлось отказаться от применения скользящих клемм в силу опасности серьезно повредить провода, изготовленные из весьма мягкого металла; снова пришлось рассчитывать промежуточные опоры на обрыв двух проводов, подвешенных в глухих клеммах, снова пришлось уложить конструкцию опор и, в результате, 1 km одиночной линии 110 kV, рассчитанной на одинаковую электрическую проводимость (например, при меди сечение 95 mm², а у стальнойюминия—соответствующее ему 193,7 mm²), оказывался при стальнойюминиевых проводах дороже, чем при медных.

Если отвлечься от незначительного утяжеления конструкции промежуточных опор в силу повышения давления ветра, является неизбежным, так как диаметр стальнойюминиевых проводов примерно в полтора раза больше, нежели у медных равной с ними проводимости, то можно было бы считать, что в случае подвески стальнойюминиевых проводов в скользящих клеммах должны получиться те же цифры стоимости 1 km линий передачи, как и при медных проводах. Поэтому и к

⁷⁾ Перелом известия, как известно, узкое место в известковании в сельском хозяйстве.

⁸⁾ Б. Лану. „Die Windkraft neude und Praxis“

⁹⁾ Ленин. соч. т. XXII, стр. 434

конструкция опор не потребовала бы никаких серьезных изменений, можно было бы воспользоваться опорами, которые предназначались для медных проводов, и подвесить на них провода стальнойюминиевые, сохранив старый пролет и только добавив две крестообразно расположенные ветровые связи. При этом в зависимости от соотношения цен на медь и алюминий, что можно было бы получить при стальнойюминиевых проводах еще лучшие экономические результаты, нежели при медных. Очевидно, что благоприятное разрешение этого вопроса зависело от того, удастся ли сконструировать пригодную для стальнойюминиевых проводов скользящую клемму.

Основные требования, которым должна удовлетворять всякая скользящая клемма независимо от материала проводов, которую она поддерживает, таковы:

- 1) износ провода в клемме должен быть минимальным;
- 2) усилие, которое необходимо, для того чтобы передвинуть провод в клемме, должно иметь достаточно большую величину, чтобы избежать постоянного перемещения провода в клемме и, следовательно, его изнашивания;
- 3) это же усилие не должно быть чрезмерно велико, чтобы не нагружать бесполезно опору при авариях;
- 4) одна и та же клемма должна допускать подвеску проводов самых разнообразных сечений, т. е. она должна быть универсальной.

Когда впервые был поставлен на обсуждение вопрос о введении медных скользящих клемм для медных же проводов, то никто не высказывал опасений за целостность провода или его чрезмерное истирание. Предполагалось, что износ хотя и будет наблюдаться, но в очень небольших размерах. Казалось бы, что такая же картина должна иметь место и в случае подвески стальнойюминиевого или чисто алюминиевого провода в алюминиевой же скользящей клемме. В том и другом случае материал провода находится в относительно одинаковых условиях, следовательно, истирание или повреждение такого должно быть также одинаковым.

Для окончательного выяснения этого вопроса в электротехнической лаборатории Челябинской государственной районной электростанции были произведены опыты с различными конструкциями скользящих клемм. Постановка и исполнение этих опытов по общим указаниям автора были произведены инж. В. А. Волоховой, причем клеммы изготовлялись в механических мастерских станции.

Всего было испытано три типа клемм. Первый тип—чугунная роликовая клемма с двумя чугунными роликами, применявшаяся для подвески медных проводов сечением 95 мм² на южно-уральской сети в 110 кВ, общее протяжение которой около 286 км. Вся эта сеть в настоящее время закончена и находится в эксплуатации. Второй тип—такая же клемма, но с алюминиевыми роликами, изготовленная применительно к стальнойюминиевым проводам марки СА-95. Наконец, третий тип—алюминиевая безроликовая скользящая клемма (лодочка), изготовленная для провода той же марки из согнутого по шаблону алюминиевого листа.

Опыты имели целью определить прежде всего величину износа и повреждения провода при перемещении его в клемме и затем примерный порядок усилия, необходимого для того, чтобы сдвинуть провод в клемме (усилие, необходимое для преодоления силы трения в покое). Опыты проводились при обратном расположении провода в клемме: на растянутый провод надевалась клемма, после чего к ней подвешивался требуемый груз и определялось усилие трогания.

Испытанию был подвергнут сперва стальнойюминиевый провод в клемме с алюминиевыми роликами, а затем для сравнения медный провод в клемме с чугунными роликами.

Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

№	Тип клеммы	Вид провода	Вертикальная нагрузка кг	Усилие трогания кг	Коэффициент трения в покое	
					частый	средний
1	Роликовая..	Медный 95 ²	100 200 300	8 14 23	0,080 0,070 0,077	} 0,0757
2	То же, ролики алюминиевые...	СА-95	200	18	0,090	
3	Сплошная алюминиевая (лодочка) ...	СА-95	200	100	0,500	

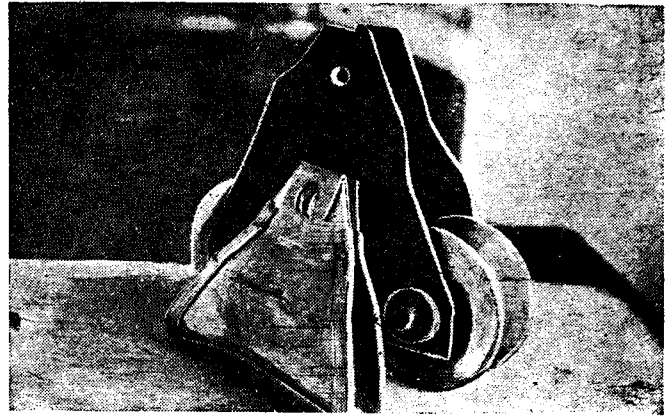


Рис. 1.

Общий вид клеммы для стальнойюминиевого провода (роликов и лодочки) показан на рис. 1.

Все эти клеммы весьма сильно повреждали провод. Тотчас же после однократного продвижения клеммы на проводе появлялись сильные царапины. При этом характер повреждения провода у роликовой клеммы был несколько иного вида, нежели у лодочки. В первом случае наблюдалась деформация отдельных проволонок, из которых свит провод. Благодаря малой площади соприкосновения провода с роликом отдельные жилы кабеля расплющивались, и поверхность его постепенно принимала гладкий вид. Отдельные жилы растекались, раздавливались и заполняли собою углубления провода, так что он в конце концов приближался по внешнему виду к гладкому металлическому цилиндру. Эти изменения происходили как с алюминием, так и с медным кабелем приблизительно с одинаковой скоростью. На рис. 2 и 3 изображен вид проводов (медного и стальнойюминиевого) до и после опыта. Изменение структуры кабеля, как видно из фотографий, настолько сильно, что говорить о применении данного типа клемм не приходится.

Такой результат был получен после приблизительно 350 передвижений роликовой клеммы. Деформация кабеля начинается, как уже указывалось, сразу, постепенно нарастает, и в конце концов провод совершенно теряет свою первоначальную форму, его поверхность повреждается, приобретает матовый вид, а следовательно, должны сильно измениться и механические свойства провода, в частности его временное сопротивление растяжению. Таким образом провод, подвешенный в роликовых клеммах, с течением времени в силу постоянных передвижений в клемме приобретает в точках подвеса нечто вроде шеек или перетяжек. Это должно неизбежно повысить риск обрыва кабеля. Данный тип клеммы должен быть признан негодным еще и потому, что усилие трения в клемме для такого весьма незначительно. Поэтому всякая, даже небольшая (порядка 15 ÷ 20 кг) разность натяжений по проводу, могущая возникнуть в соседних пролетах, немедленно влечет за собою перемещение провода. Правда, подвеска кабеля на гириляндах уменьшает в силу гибкости гирилянды перемещения проводов в клеммах, но тем не менее повреждения поверхности провода в местах соприкосновения его с роликами, даже в случае полной неподвижности всей

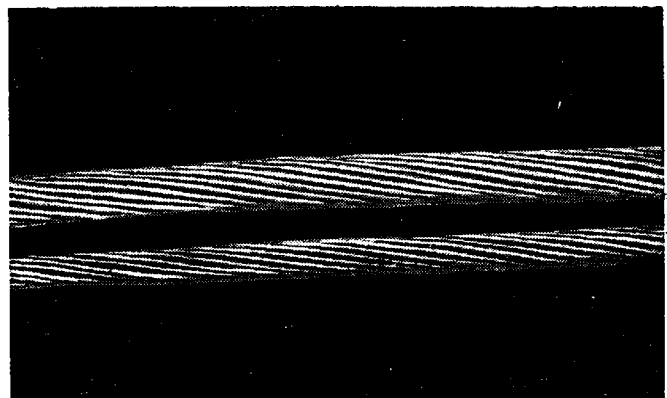


Рис. 2. Вид медного и стальнойюминиевого провода до опытов.

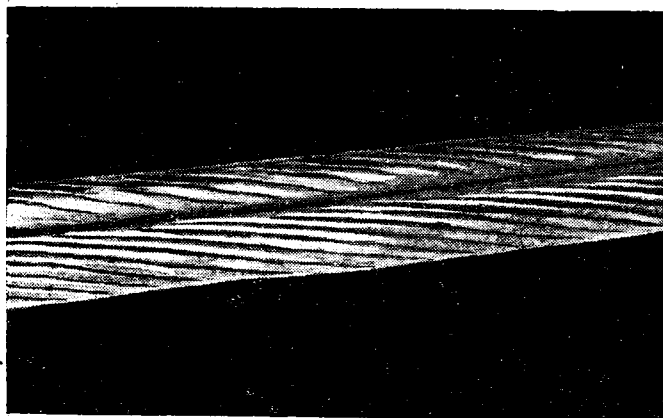


Рис. 3. Вид медного и стальалюминиевого провода после опытов.

системы остаются, так как удельная нагрузка от веса провода на единицу площади соприкосновения слишком велика. Поэтому появление вмятия на поверхности провода при данном типе клеммы неизбежно, а следовательно, неизбежна и постепенная деформация кабеля и понижение его механических качеств.

Сплошная алюминиевая клемма (лодочка) выгодно отличается от роликовой прежде всего своим большим усилием трогания, которое составляет около 100 кг. Таким образом случайные перемещения провода в силу, например, неодинаковой загрузки соседних пролетов гололедом в значительной степени отсутствуют, но зато повреждения провода в случае передвижения его в клемме весьма существенны. Верхний слой провода сдвигается клеммой, как рубанком, уже при однократном передвижении на глубину от 0,5 до 1 мм. К сожалению, не удалось провести такой же опыт и с медным проводом из-за отсутствия медных клемм-лодочек. Однако можно заключить, что и с медными проводами, подвешенными в медных клеммах, будет происходить то же самое.

Таким образом в случае обрыва провода на линии электропередачи, смонтированной на скользящих клеммах-лодочках поверхность провода будет серьезно поцарапана во всех тех клеммах, в которых провод проскользнет. Это повлечет за собой повышение риска обрыва линии после каждой новой аварии во все большей и большей степени.

Единственный способ предотвратить повреждение поверхности провода в скользящей клемме—это сделать либо всю клемму целиком из такого материала, который не портит ни при каких условиях провода в силу своей мягкости, либо сделать из этого материала только те части клеммы, которые непосредственно соприкасаются с проводом. Можно было бы, например, снабдить клеммы-лодочки прокладками из свинца, однако это решение, если даже отвлечься от дефицитности данного материала, непригодно для стальалюминиевых проводов, так как алюминий подвергнется электролитическому раз'еданию. Очевидно, что и никакой иной материал из металлов в силу этой же причины не будет годиться для данной цели.

Исходя из этого, автор пришел к мысли испытать в качестве материала для скользящих клемм обыкновенное

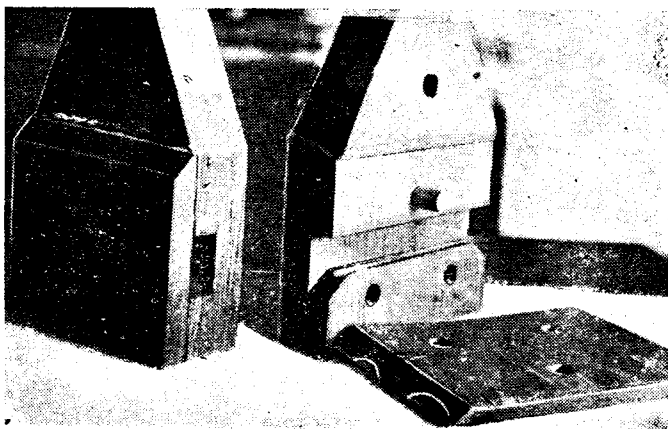


Рис. 4

дерево. При надлежащих размерах клеммы, сделанной из твердых пород дерева (например, из дуба), она будет иметь вполне достаточную механическую прочность, и в то же время можно быть уверенным, что никогда и ни при каких условиях провод не будет подвергнут повреждению. Единственным неприятным обстоятельством в этом случае является горючесть дерева, избавиться от которой весьма трудно. Однако возможность загорания деревянной клеммы может быть предотвращена при надлежащей ее конструкции.

Результаты испытания двух деревянных клемм, из сосны и из дуба, приведены в табл. 2, а общий вид клемм — рис. 4.

Таблица 2

№	Тип клеммы	Вид провода	Вертикальная нагрузка, кг	Усилие трогания, кг	Коэффициент трения в покое	
					частный	средний
1	Дубовая ...	СА-95	100	26	0,260	0,259
			200	51	0,255	
			300	79	0,263	
2	Сосновая ..	СА-95	100	20	0,200	0,214
			200	44	0,220	
			300	67	0,223	

После многократного передвижения дубовой клеммы и провода не было обнаружено никаких следов повреждения, а на клемме образовался небольшой желобок глубиной около 3 мм. Сосновая клемма оказалась менее пригодной, так как желобок в ней оказался более глубоким, усилие трогания было на 15–20 меньше, а сминание верхних слоев дерева более значительным. В обоих случаях скольжение провода в клемме происходило по торцевой части дерева, т. е. перпендикулярно направлению волокон.

Для того чтобы правильно подойти к оценке полученных результатов, необходимо предварительно ознакомиться с теми силами, которые действуют на провод при нормальных условиях его работы. Эти силы сопоставлены в табл. 3.

Таблица 3

Марка провода	Пролет, м	Вес провода в пролете, кг	Давление провода без гололеда, кг	Давление ветра с гололедом, кг	Вес гололеда	Вес провода с гололедом, кг
Медный	200	169	60,6	156,3	127,4	297
95 мм	250	211	75,8	195,4	159	370
Стальалюминий	200	134	90,3	186,4	162,6	297
СА-95	250	167,5	112,8	233	203	372

Пользуясь введенным в табл. 2 коэффициентом трения, легко определить, что для стальалюминиевого провода марки СА-95 усилие трогания составляет для дубовой клеммы около 34,7 кг при пролете 200 м и около 43,4 кг при пролете 250 м в случае отсутствия ветра и гололеда. По отношению к ветровой нагрузке (без гололеда) это составляет 38,6% в обоих случаях, т. е. свыше $\frac{1}{8}$ давления ветра. При роликовой клемме, пользуясь данными табл. 1, получим усилие трогания 12,1 кг при пролете 200 м и 15 кг при пролете 250 м. Другими словами, чтобы передвинуть провод в клемме, необходимо потянуть его с усилием, приблизительно составляющим всего только 13,3% от давления ветра. Риск повреждения провода, как видно, в случае применения роликовых клемм гораздо серьезнее, нежели при деревянных, в силу значительно большей подвижности провода, подвешенного на роликах. Это вполне понятно, так как такие колебания в силе ветра, которые вызывают изменение ветровой нагрузки провода в двух смежных пролетах на 38,6%, бывают гораздо реже, нежели колебания с изменением нагрузки в 13%. Таким образом при деревянных дубовых клеммах провод будет передвигаться гораздо реже, нежели в роликовых. Так как сама по себе деревянная клемма совершенно не портит проводов, то сокращение количества передвижек кабеля в клемме имеет значение только лишь с точки зрения уменьшения износа и истирания самой клеммы и понижения провода вдоль линии, какая наблюдается при роликовых клеммах.

До сих пор речь шла о проводе, свободном от гололеда. Вообще говоря, в случае обледенения проводов возможность

перемещения их в клеммах сильно уменьшается. Но все же здесь деревянные клеммы имеют преимущество перед роликовыми, так как, для того чтобы провод начал скользить в клемме, необходимо, чтобы при совершенно свободном от льда пролете в смежном с ним на проводе образовался слой льда весом около 45—52 kg в зависимости от величины пролета против 15—18 kg при роликовых клеммах.

Так как временное сопротивление льда раздавливанию составляет, в зависимости от температуры, от 10 до 25 kg/cm²¹⁾, то усилие, необходимое для того чтобы раздавить корку льда, наросшую на провод, будет очень невелико. В самом деле, считая, что около клеммы и провода образовался слой гололеда толщиной стенки 20 мм, получим общую площадь льда для СА-95 около 1,3 см². Чтобы срезать этот слой льда, необходимо усилие от 13 до 33 kg, в среднем около 19÷20 kg. Пользуясь всеми вышеприведенными данными, можно составить общую таблицу усилий, необходимых для продвижения провода в клемме при разных условиях нагрузки. Марка провода принята СА-95 (табл. 4).

Таблица 4

Наименование силы	Вес про- вода	Равнодей- ствующая от веса про- вода и да- вления вет- ра	Вес прово- да с голо- ледом	Равнодей- ствующая от веса с гололе- дом и давле- ние ветра на обледенелый провод
ш	kg	kg	kg	kg
200 Равнодей- ствующее да- вление на провод	134	162	287	351
Усилие трогания	34,7	42	77	$91 + 25^2) =$ 111
650 Равнодей- ствующее да- вление на провод	167,5	202	373	428
Усилие трогания	43,5	52,4	96,5	$111 + 20^2) =$ 131

Таким образом в случае, если расчет проводов ведется для температуры — 5°С, ветром и гололедом, то при обрыве провода достаточно принимать усилие не свыше 150 kg. Если же расчетным случаем будет — 40°С, то достаточно рассчитать опору на усилие от обрыва провода, равное 50 kg. Как в том, так и в другом случае, при пролетах 200—250 м давление ветра является решающей нагрузкой, и наиболее тяжелым для опоры будет случай нормальной работы при необорванных проводах и тросах при — 5°С, ветре и гололеде.

Выше было уже упомянуто о том, что легкая возгораемость дерева является препятствием для введения деревянных скользких клемм на линиях электропередачи. Другим также весьма значительным недостатком дерева является подверженность его гниению. Путем принятия надлежащих мер защиты оба недостатка могут быть в значительной степени смягчены.

С повреждением клемм вольтовых дугами при перекрывах гирлянд можно бороться, устраивая защитные рога обычной конструкции. Так как, однако, от непосредственного действия дуги должна быть защищена не только деревянная клемма, но и сам провод, то конструкция клеммы должна иметь какую-либо металлическую проводящую часть, находящуюся в непосредственном соединении с проводом, к которой уже могут быть прикреплены оббойные рога. Эта металлическая часть не должна нести никакой нагрузки от провода, тяжесть которого должна ложиться на деревянное тело клеммы. На рис. 5 показана конструкция скользкой клеммы²⁾, снабженной верхней металлической накладкой, несущей рога и обеспечивающей путь току, в случае перекрытия гирлянды обход деревянных частей клеммы.

При конструировании подобного рода клеммы необходимо обращать внимание, чтобы не образовалось замкнутых токопроводящих контуров, изолированных деревянными частями от провода. В этом случае получается короткозамкнутый трансформатор, вызывающий добавочный расход энергии в

линии, нагревание замкнутых частей клеммы и добавочный сдвиг фаз.

В изображенной на рис. 5 клемме все растягивающие силы воспринимаются металлическими частями, а дерево работает только на сжатие. Во избежание чрезмерного износа деревянные части должны быть рассчитаны таким образом, чтобы давление от провода на дерево не превышало для дуба 10÷15 kg на 1 см² проекции провода на плоскость клеммы.

Загорание клеммы можно в значительной степени предотвратить путем выбора плотного твердого сорта дерева, загорящегося с трудом, как например, дуб. Вообще говоря, при работе деревянных клемм на линиях передачи трудно ожидать действительно загорания клемм. Скорее можно ожидать частичного обгорания и обугливания клемм, что не будет отражаться на прочности их деревянных частей, ибо, как известно, при воздействии пламени дерево не так быстро теряет свою прочность как металл. Какие бы то ни были окраски огнеупорными составами или пропитки специальными веществами вряд ли могут быть рекомендованы, так как большинство красок и пропиточных составов, применяемых в целях защиты дерева от пламени, не безразличны по отношению к алюминию. Хорошей мерой следует признать покрытие дерева тонким, прочным (по способу Шоопы) слоем алюминия. Подобного рода металлизированные деревянные клеммы будут защищены не

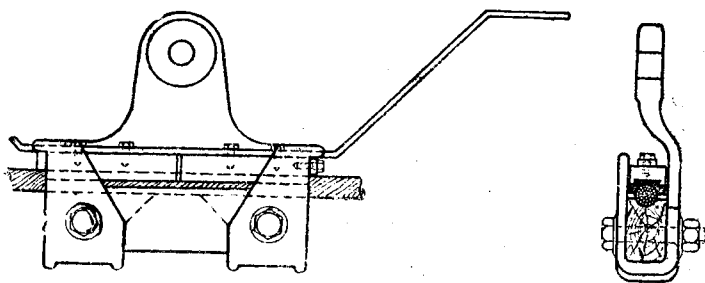


Рис. 5.

только от загорания, но также и от загнивания. Для борьбы с этим последним можно рекомендовать прежде всего применение твердых гнилостойких сортов дерева, в частности дуба. Далее следует либо покрывать клеммы слоем алюминия, либо пропитывать их каким-либо безразличным по отношению к материалу провода химическим составом.

Из общего списка противогнилостых веществ, применяемых для пропитки дерева, должны быть исключены, прежде всего, все составы, содержащие соединения галлоидов (фтористые, хлористые и т. п. соли), так как они вредно действуют на алюминиевые провода. Кислые и щелочные составы также должны быть запрещены. Лучшее всего применить для данной цели пропитку или двухкратную окраску деревянных клемм нейтральным карболинеумом или подобными ему безразличным по отношению к алюминию веществами. Окраска олифой или пропитка трансформаторным маслом не может быть рекомендована, — первая в силу незначительности достаточных результатов, вторая — по причине уменьшения почти вдвое коэффициента трения провода в клемме, а кроме того, и в силу увеличения огнеопасности промасленного дерева.

Подведем итоги всему сказанному выше. Из применяющихся в настоящее время способов снижения усилий, действующих по проводу в момент его обрыва, следует признать наиболее безраздельно применение поворотных кронштейнов с подвеской проводов в глухих зажимных клеммах. В этом случае, если только монтаж провода в клеммах произведен правильно, не происходит проскальзывания кабеля в местах его закрепления, следовательно, провод не повреждается. Недостатком этого способа является усложнение и удорожание конструкции опор. Кроме того, снижение усилий, достигаемое в данном случае, относительно невелико, приблизительно на 15—20%.

Следующая мера — подвеска провода в скользких, а также в полускользких (выпускающих) клеммах при употреблении в настоящее время конструкции таковых, хотя и обеспечивает разгрузку опор от аварийных усилий, но эта разгрузка окупается ценой сильного повреждения поверхности провода. Если вспомнить, с какой тщательностью производится раскатка, подвеска и натяжка проводов на линиях при монтаже с единственной целью избежать повреждения поверхности кабеля, то совершенно непозволительно идти на заведомое истирание поверхностного слоя материала провода, подвешивая его в металлических выпускающих, роликовых или ленточных клеммах. Единственная мера, радикально предотвращающая порчу провода в местах подвески, —

¹⁾ В. Е. Ляхницкий, Курс морских и речных портов 1926, ГИЗ

²⁾ 0 kg — усилие для раздавливания льда.

³⁾ Один из вариантов.

это применение деревянных или смешанных—деревометаллических клемм. Эти клеммы имеют благоприятные показатели как в смысле величины усилия, необходимого для передвижки провода, так и в отношении износа материала клемм и предотвращения бесполезного перемещения провода взад и вперед, как это наблюдается у роликовых клемм.

Недостатки дерева—слабая огне-и гнилостойкость могут быть смягчены путем покрытия поверхности клеммы слоем того же металла, который применен и для провода, и устройством предохранительных рогов. Может быть также рекомендована пропитка деревянных частей клеммы нейтральными противогнилостными составами, не оказывающими на провод разрушительного действия. Само собой разумеется, окончательное решение по поводу возможности применения таких клемм на линиях может быть вынесено только самой жизнью. В случае, если бы результаты практической проверки оказались отрицательными, пришлось бы говорить только о подвеске проводов в глухих клеммах. В этом последнем случае необходимо все же было бы применять меры к облегчению усилий, действующих при авариях на опоры, путем внесения некоторых изменений в наши нормы. В частности для стальноалюминиевых проводов было бы целесообразно принять уменьшенные на 20% напряжения в материале провода (вместо 9 kg/mm^2 принять $7,2$ или $7,0 \text{ kg/mm}^2$ для алюминия и вместо 25 допускать 20 kg/mm^2 для стали). Кроме того, целесообразно ограничить аварийные условия для промежуточных опор случаем обрыва только одного провода вместо двух, как это имеет место в настоящее время. Эти последние меры, даже и при глухих клеммах дали бы весьма заметный экономический эффект, снизив приблизительно в полтора раза расход дерева для промежуточных опор. Целесообразность такого

изменения наших норм особенно ощутительно скажется в случае применения толстых проводов—от СА-95 и выше, как при них все равно в силу ограниченной прочности и винных опор получается недоиспользование механических свойств провода, и приходится ослаблять максимальные напряжения металла на 15–20% во избежание чрезмерного желения конструкции опор. Кроме того, вероятность обрыва таких проводов, натянутых к тому же слабее нормы, от незначительна.

В заключение следует упомянуть еще об одной разновидности клемм, о которой иногда приходится слышать. Я идет о выбрасывающих клеммах, которые в случае превышения некоторой определенной нагрузки вдоль провода поднимут и совершенно высвободят, и он падает на землю. Как и в данном случае кабель не гарантирован от повреждения поверхности при падении на землю с высоты 9–10 м и время протягивания по ней в силу разности тяжений в сильных пролетах, то от применения этого рода клемм в широких размерах следует воздержаться впредь до практического испытания результатов их работы на линиях. Можно высказать предположение, что при твердых скалистых грунтах, где повреждение провода в случае падения и протаскивания по земле очень велико, от применения выбрасывающих клемм целесообразно будет воздержаться. Наоборот, в равнинных местах с обычным мягким почвенным слоем, к тому же и покрытым травой, данный вид клемм может оказаться полезным. Для окончательного суждения по этому вопросу необходимо все же предпринять ряд опытов с линиями передачи, результаты которых только и позволят разрешить все вопросы, связанные с выбором того или иного типа клемм, и принять окончательное решение в этом весьма важном деле.

0 методах пропитки дерева для применения его как изолирующего материала

Н. Богородицкий
И. Майгельдин
Ленинград, ГФ

Дерево принадлежит к группе волокнистых материалов, главной составной частью которых является целлюлоза.

Основным недостатком этой группы материалов с точки зрения электротехники является гигроскопичность. Присутствие влаги понижает электрические свойства древесины. При при-

менении древесины для целей изоляции дерево подвергается пропитке изолирующими веществами (парафином, олифой и др.). В настоящее время установлено, что пропитка не только предохраняет волокнистый материал от гигроскопичности, а также замедляет процесс поглощения влаги. С другой стороны, пропитка повышает электрические свойства волокнистого материала. Высушивание материала, происходящее в процессе пропитки, ведет к повышению сопротивления и уменьшению диэлектрических потерь; заполнение пор пропитывающим веществом увеличивает электрическую прочность. Так, в результате пропитки прочность кабельной бумаги или пропитки повышается в 8–10 раз.

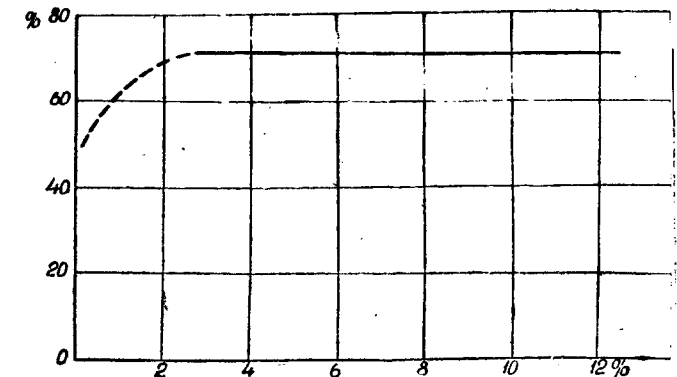


Рис. 2. Процентное количество поглощенного парафина в зависимости от процентного содержания в древесине березы влаги при проварке образцов в парафине

Основной характеристикой изоляции при применении ее в аппаратах высокого напряжения является электрическая прочность. Настоящая работа имеет целью выяснить влияние пропитки на это свойство древесины. Прочность определялась направлением хода волокон в зависимости от породы дерева, длины образца, рода пропитывающего вещества и др. В большинстве случаев на практике применяется наиболее проч-

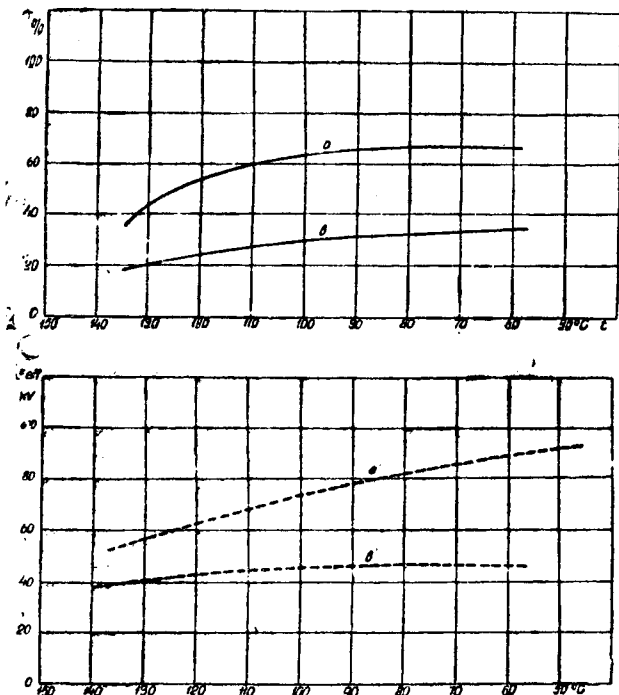


Рис. 1. Зависимость количества поглощенного парафина (сплошные кривые) и электрической прочности древесины березы (пунктирные кривые) от температуры, при которой образцы извлекались из парафиновой ванны после проверки; а—воздушносухие образцы, б—предварительно высушенные образцы

способ пропитки дерева, а именно, проварка материала в пропитывающем веществе.

Работы нашей лаборатории с прессшпаном и деревом показали, что для получения удовлетворительных в электрическом отношении результатов достаточно вести проварку при температуре около 135°C , до полного прекращения выделения пузырьков пара и воздуха.

Весьма существенное значение при проварке имеет предварительное состояние образцов: для лучшей пропитки необходимо, чтобы древесина содержала некоторое количество влаги. На рис. 1 показано влияние состояния образца до проварки на количество поглощенного парафина, а также на электрическую прочность. Из этих кривых видно, что воздушносухие образцы поглощают при проварке больше парафина и имеют большую электрическую прочность, чем образцы, предварительно высушенные. Большое значение, особенно для влажных образцов, имеет температура ванны в момент извлечения из нее образца.

Механизм поглощения пропитывающего вещества при проварке может быть объяснен следующим образом. Воздух, находящийся в порах древесины, при пропитке должен быть заменен пропитывающим веществом. При проварке предварительно высушенных образцов эта замена, по видимому, происходит очень неполно. Количество поглощенного парафина при этом способе достигает в лучшем случае $35 \div 40\%$. Процент поглощения парафина несколько увеличивается, как видно из рис. 1 (кривая b), если образцы извлекают из ванны при температуре застывания парафина (около 60°C).

При проварке же воздушносухих образцов замена воздуха пропитывающим веществом облегчается тем, что влага, испаряясь и вытесняя воздух, занимает весь объем пор, а при последующей конденсации паров воды образуется вакуум в порах, благодаря которому пропитывающее вещество энергично заполняет поры.

Из рис. 1 (кривая a) видно, что если извлечение образцов производить из горячего парафина, то количество поглощенного парафина приближается к количеству для предварительно высушенных образцов; извлечение же образцов при температуре ниже 100°C , т. е. когда происходит конденсация паров, дает наилучший результат. Из того же рисунка (пунктирные кривые) видно, что при более полной пропитке электрическая прочность повышается.

Для выяснения влияния количества содержащейся влаги на процент поглощения парафина при проварке была произведена пропитка образцов березы с разным содержанием воды в древесине.

Из рис. 2 видно, что результат получается одинаковый, как в случае большого содержания влаги (около 12%), так и в случае небольшого количества воды (около 4%), и только совсем сухие образцы впитывают почти вдвое меньшее количество парафина. Предварительное вымачивание дерева в воде, при котором количество влаги в древесине превышает 100% , также не увеличивает процента поглощения парафина. При проварке дерева в парафине не следует древесину предварительно сушить; нет необходимости также дерево вымачивать перед проваркой. Вполне хороший результат получается при проварке воздушносухих образцов.

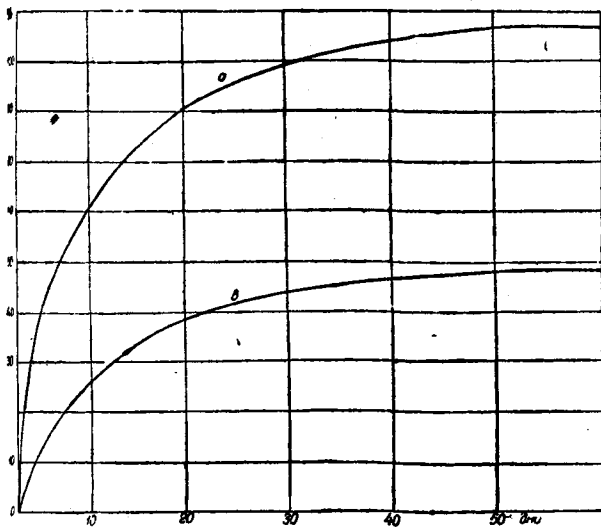


Рис. 3. Зависимость процентного количества поглощенной воды от времени пребывания образцов в воде: a — непропитанный дуб, b — парафинированный дуб.

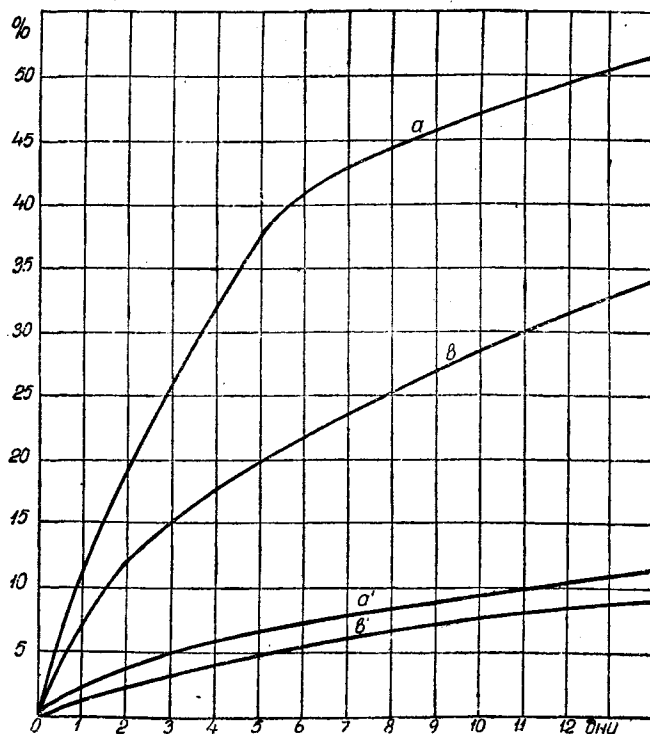


Рис. 4. Влияние термической обработки на гигроскопичность древесины. Кривые b и b' относятся к образцам, которые перед вакуумной пропиткой были подвергнуты подогреву при 150°C в течение 4 час. a и b — выдержанные в воде, b' и b' — выдержанные в 100% влажности.

При пропитке с применением вакуума процесс идет значительно быстрее. При этом способе пропитки дерево высушивается при температуре $105 \div 110^{\circ}\text{C}$ под вакуумом до постоянного веса, после чего в пропиточный котел сразу выпускается расплавленный парафин, который и заполняет поры древесины. В табл. 1 показаны результаты пропитки с применением вакуума и простой проверки древесины березы, белого бука и дуба. Из данных таблицы видно, что вакуумная пропитка и проварка дают одинаковые результаты.

Таблица 1

Порода	Количество поглощенного парафина в процентах	
	Вакуумная пропитка	Проварка
Береза	84	81
Белый бук	34	32
Дуб	53	52

Применение давления при пропитке дерева также не дает увеличения количества поглощенного парафина.

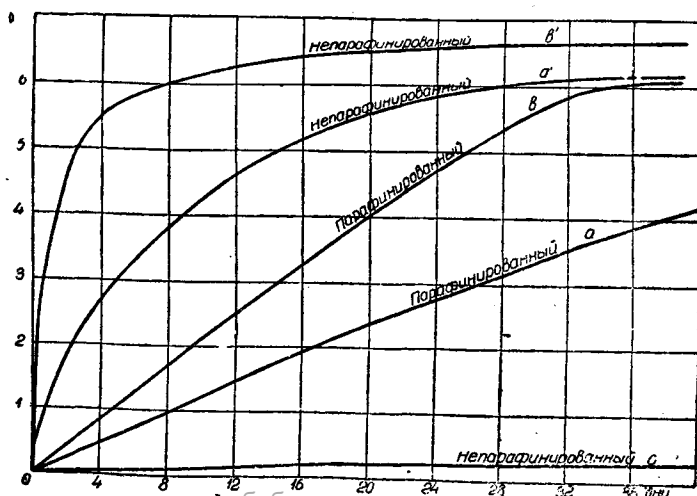


Рис. 5. Количество поглощенных паров разных жидкостей древесиной дуба: a — парафинированный дуб, b — непропарафинированный дуб.

Изучая процессы пропитки древесины, мы в своих опытах применяли различные способы пропитки. Однако никогда не удавалось получить полного насыщения древесины пропитывающим веществом; пропитанное дерево всегда оставалось способным поглощать воду. На рис. 3 представлены кривые, показывающие поглощение воды парафинированным и непарафинированным дубом.

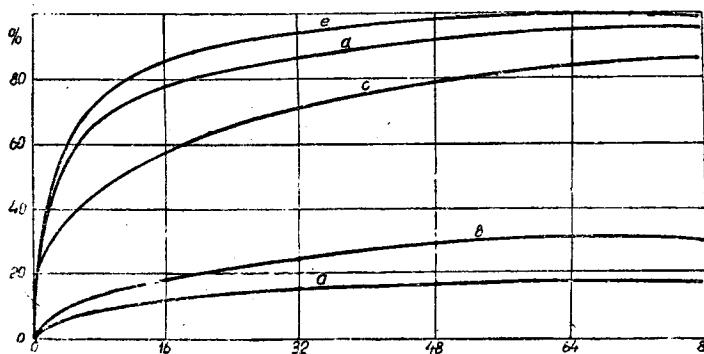


Рис. 6. Объемное количество в процентах поглощения древесиной дуба разных жидкостей: а—трансформаторное масло, б—бензин, с—спирт, д—вода, е—ацетон.

Делались попытки уменьшить гигроскопичность древесины путем термической обработки (прогрева). Рис. 4 показывает, что прогревание древесины дуба дает только небольшое уменьшение гигроскопичности.

При изучении вопроса пропитки прессшпана мы пришли к заключению, что парафин заполняет только поры, не проникая в вещество волокон—целлюлозу. Аналогичную картину мы видим в опытах с деревом. Парафин при пропитке заполняет поры дерева, совершенно не проникая в целлюлозу.

Это предположение в достаточной степени подтверждается результатами следующего опыта. В атмосферу, насыщенную парами исследуемой жидкости, помещались два образца березы, один предварительно парафинированный, другой высушенный, но не парафинированный. Образцы имели одинаковые размеры. На рис. 5 показана прибыль в весе образцов в зависимости от времени выдержки их в парах воды. Опыт показывает, что с течением времени парафинированные образцы поглощают такое же количество паров воды и ацетона, как и непарафинированные. Пары бензина древесиной почти не поглощаются.

Аналогичный результат получается при погружении древесины непосредственно в жидкость. На рис. 6 показано поглощение древесиной дуба разных жидкостей.

Результаты описанных опытов позволяют предполагать следующее. Полярные вещества, к которым относится вода, спирт, ацетон и др., жадно поглощаются целлюлозой. Отметим, что все эти вещества обладают низкими электрическими свойствами и не могут, конечно, применяться как пропитывающие—диэлектрики. Вещества неполярные, как парафин, минеральные масла, бензин и др., заполняют только поры древесины, не проникая совершенно в целлюлозу.

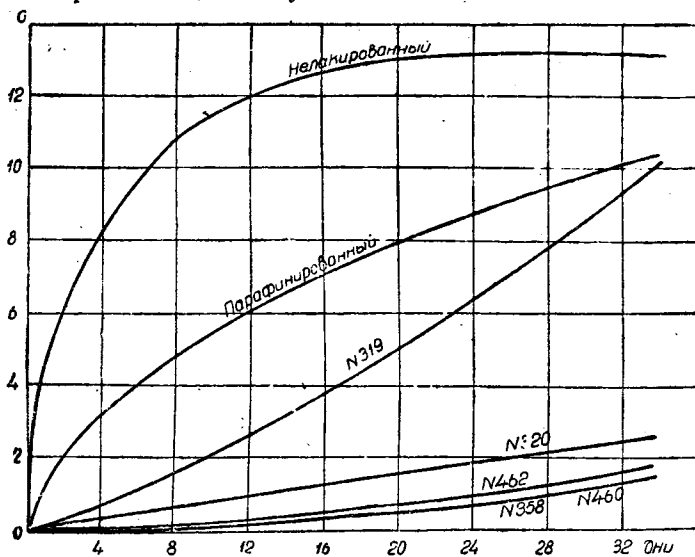


Рис. 7. Прибыль в весе березовых образцов в зависимости от времени пребывания их в воде.

Предохранить дерево от поглощения влаги на основе вышеизложенного можно только, защитив поверхность непроницаемой для влаги оболочкой. Для этой цели можно покрывать дерево лаком, дающим прочную пленку. Чтобы выяснить, насколько лак может предохранить дерево от гигроскопичности, предварительно высушенные образцы березы одинаковых размеров были покрыты равными лаками в два слоя и затем погружены в воду. Одновременно с этими образцами был опущен и образец нелакированной березы и парафинированный образец. Лаки употреблялись № 319, № 320, № 462, № 358 и № 460, предоставленные электроизоляционной лабораторией завода «Электро

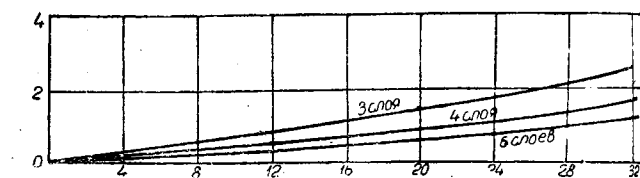


Рис. 8. Прибыль в весе березовых образцов, покрытых лаком № 329, в зависимости от времени пребывания их в воде.

лаком значительно уменьшит скорость впитывания древесиной влаги (даже по сравнению с парафинированным деревом), все же радикально не устраняет гигроскопичности. Увеличение числа слоев покровного лака задерживает поглощение воды; в случае, показанном на рис. 8, образцы лакированы три, четыре и шесть раз лаком № 329.

Электрическая прочность древесины, как известно, зависит от направления электрического поля по отношению к направлению волокон древесины. Пробивной градиент при пропитке древесины вдоль волокон имеет наименьшее значение; приложении поля перпендикулярно направлению волокон прочность зависит еще от направления сердцевинных лучей по отношению к направлению поля. При совпадении направления поля с направлением сердцевинных лучей прочность получается меньше, чем в случае, если линии поля составляют с направлением лучей угол, близкий к 90°. В табл. 2 приведены значения электрической прочности древесины серого бука березы.

В аппаратах высокого напряжения по конструктивным соображениям часто дерево располагается так, что направление волокон совпадает с направлением поля. Поэтому представляет интерес выяснить влияние различных факторов на электрическую прочность именно вдоль волокон. На рис. 9 и 10 представлена зависимость пробивного напряжения от длины образцов для древесины березы и серого бука, обработанной различными способами. Кривые показывают, что пропитка парафином, олифой и трансформаторным маслом повышает прочность дерева в 1,5–2,5 раза. Высушивание образцов также немного увеличивает пробивное напряжение. Во всех случаях пробивной градиент уменьшается с увеличением длины

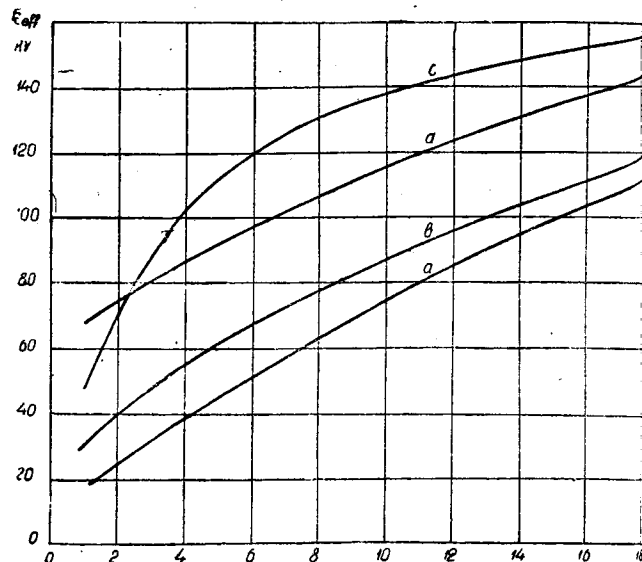


Рис. 9. Зависимость пробивного напряжения от длины образцов древесины серого бука (вдоль волокон): а—воздушно-сухая, б—высушенная, в—парафинированная, д—пропитанная трансформаторным маслом.

Таблица 2

Направление электрического поля	Электрич. прочность kV				Примечание
	воздушносухие образцы		парафинированные образцы		
	Береза	Бук	Береза	Бук	
Вдоль волокон	15	14	23	24	Длина образцов во всех случаях составляет 1 см
Поперек волокон по направлению сердцевинных лучей	60	42	55	52	
Поперек волокон под углом, большим 75° к направлению сердцевинных лучей...	—	52	65	58	

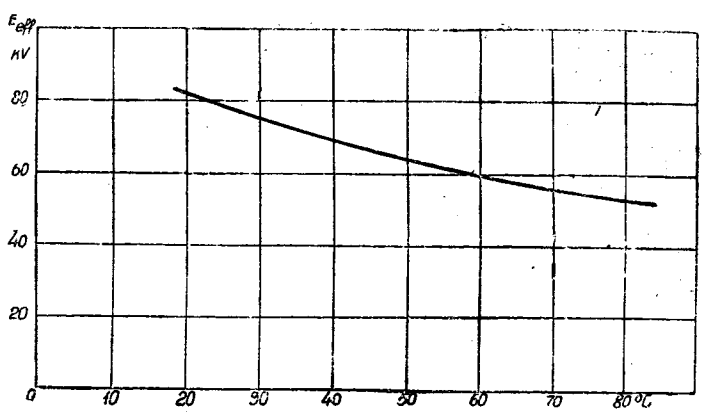


Рис. 11. Зависимость пробивного напряжения для пропитанной в трансформаторном масле древесины серого бука (вдоль волокна) от температуры при длине образца 100 мм.

маслом. Из рисунка видно, что прочность несколько убывает с увеличением температуры.

В табл. 4 приведена зависимость пробивного напряжения пропитанного бука от времени выдержки образцов под напряжением; электрическая прочность дерева при нормальной температуре не зависит от времени выдержки под напряжением.

Таблица 4

Зависимость электрической прочности пропитанной трансформаторным маслом древесины серого бука (вдоль волокон) от времени выдержки образцов под напряжением при $T = 20^{\circ} \text{C}$

Длительность приложения напряжения	Пробивное напряжение (эф. фективное) kV	Длина образца мм
Импульс	140	40
Около 15 сек.	149	40
1 мин.	143	40
6 "	145	40
8 "	142	40
45 "	142	40
1 ч. 22 "	138	40

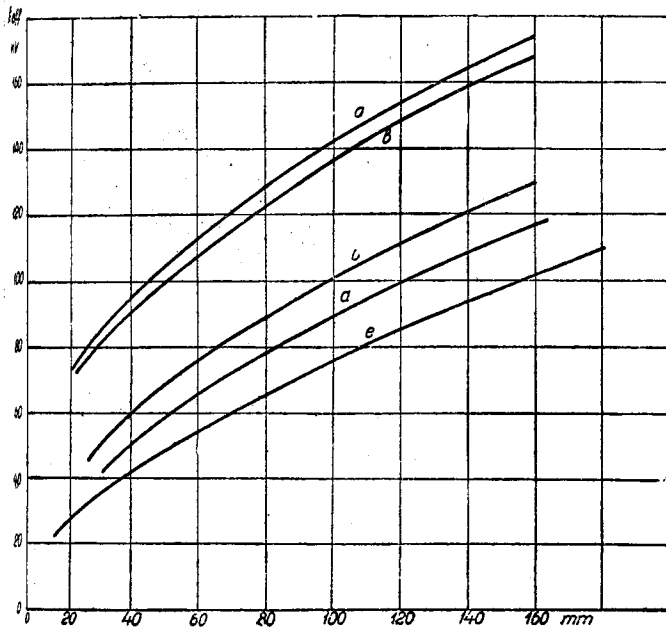


Рис. 10. Зависимость пробивного напряжения от длины образца для древесины березы (вдоль волокон): а—парафинированная, б—пропитанная трансформаторным маслом, в—пролифенная, г—высушенная, д—воздушносухая.

Влияние породы дерева на электрическую прочность древесины вдоль волокон иллюстрируется табл. 3, из данных которой видно, что породы, подвергнутые испытанию, равнозначны в электрическом отношении.

Таблица 3

Электрическая прочность пропитанной трансформаторным маслом древесины различных пород дерева

Порода дерева	Пробивное напряжение (эф. фект.) kV	Длина мм
Серый бук	90,0	40
Белый бук	92,0	
Береза	88,0	
Серый бук	135,0	140
Белый бук	140,0	
Береза	138,0	

При всех испытаниях пробой производился под маслом между цилиндрическими электродами диаметром 12 мм с закругленными краями. Напряжение поднималось ступенями с выдержкой по 15 сек. на каждой. На рис. 11 показана температурная зависимость пробивного напряжения для древесины серого бука образцов длиной в 10 мм, пропитанных трансформаторным

Электрическая прочность дерева сильно понижается при поглощении древесиной влаги, что хорошо показывает рис. 12. Результаты настоящей работы можно свести к следующему.

Пропитка дерева изолирующими веществами не уничтожает гигроскопичности его, а только замедляет процесс поглощения влаги. Объясняется это тем, что пропитывающее вещество заполняет только поры древесины, не проникая в вещество ее волокон, тогда как влага впитывается целлюлозой.

Покрyтие дерева лаком значительно уменьшает скорость впитывания влаги, но все же радикально не устраняет гигроскопичности.

Пропитка повышает электрическую прочность древесины (вдоль волокон) в лучшем случае в 2,5 раза.

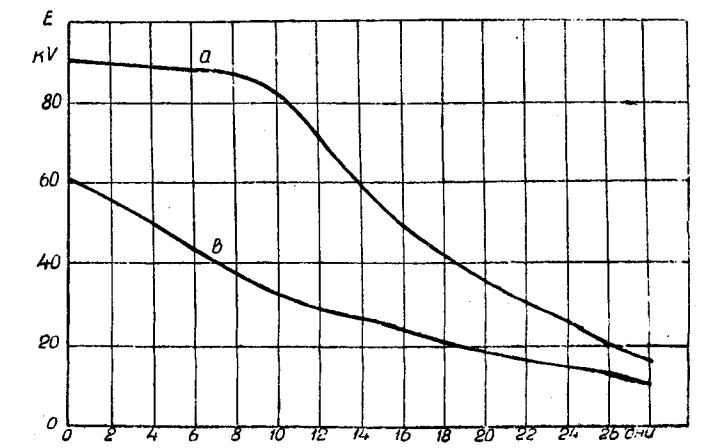


Рис. 12. Зависимость электрической прочности дерева от времени пребывания в 100% влажности. Длина образцов 31 мм: а—парафинированная, б—непарафинированная.

С увеличением длины образца пробивной градиент резко уменьшается как для пропитанного, так и для непропитанного дерева.

Перечень литературы

1. Михайлов и Майгельдинов, Электрические свойства некоторых пород дерева, „Вестник теор. и экспер. электротехники“, 1928, № 10.
2. Михайлов, Богородицкий и Майгельдинов, Электрические свойства пропитанного прессшпана, „Журнал прикладной физики“, 1929, вып. 6.
3. Wernicke, Wood as Insulating Material, „Elektrische Bahnen“.

4. Duntton and Muir, Woods for Insulation, „Electric No. 237—193.
5. Vitte, Etude Générale sur les bois employés en électricité, „Bull. de la Société française des Electriciens“, Novembre 1929.
6. Monkhouse, „Insulating Materials“, 1926.
7. Peek, Dielectric Phenomena, 1916.
8. Eberlin and Burgees, Impregnating wood with paraffin, „Industr. and Engineer. Chemistry“, 1927, V. 19. No. 1.
9. Leitsätze für die Bewertung und Prüfung von Holzisolier, ETZ, 1929, Heft 7.
10. Никитин, Соледник и Комаров, „Химическая технология дерева“, 1931.

Грозовые разряды и методы исследования влияния их на линии передач¹⁾

Л. Н. Богоявленский
и А. Г. Стрельман
Ленинград

Надежность работы линий передачи высокого напряжения большой мощности является важнейшим условием. Как показывает статистика, перебои в работе обуславливаются, главным образом, перенапряжениями. Особенно опасны перенапряжения, вызываемые атмосферными электрическими разрядами (грозами), достигающие десятков миллионов вольт, которые вызывают повреждения линий. Вопрос об изучении эффекта грозовых явлений является тем более актуальным, что по американским статистическим данным процент выключения линий передач от грозовых явлений по отношению к общему числу выключений колеблется от 60 до 90.

Из всех грозных явлений наиболее опасным являются, несомненно, прямые удары молнии, разрушительное действие которых может быть очень велико. В последнее десятилетие на основании статистических данных был установлен факт избирательной способности по отношению к некоторым местам земной поверхности, которые обладают способностью как бы притягивать молнию. В большинстве случаев эти опасные места ограничиваются небольшой площадью, измеряемой несколькими сотнями квадратных метров. Признаки этих часто поражаемых зон были выяснены работами французских геофизиков Dauzet и Bouget в период времени с 1915 по 1930 гг. и работами Радиологической лаборатории ВИМС (бывш. Главной палаты мер и весов), выполненными по заданиям Энергоцентра в 1930 и 1931 гг. Из результатов этих работ, взаимно подтверждающих друг друга, выяснилась необходимость обращать особенное внимание на эти поражаемые места как при прокладке новых линий, так и при выборе мер защиты по отношению к существующим линиям. Эти работы позволяют сделать заключение, что постановка геофизических исследований на линиях передач дает возможность значительно сократить расходы по защите линий. Проведение такого рода исследований дает указание на опасные места в смысле поражения молнией, и следовательно, эти места должны быть или обойдены в случае строящейся линии или усиленно снабжены всеми мерами защиты в случае существующей.

Ввиду того что поражаемые места, как уже было упомянуто выше, ограничены очень небольшой сравнительно площадью, обход таких мест не представляет затруднений и не вызывает больших затрат, придется только пожертвовать принципом прямолинейности линий, которого до сих пор обычно придерживаются. Некоторое увеличение стоимости линии в этом случае возмещается с избытком надежностью ее эксплуатации вследствие уменьшения числа аварий и уменьшения перебоев в подаче энергии потребителю.

При выборе мест для подстанций, трансформаторных постов и т. п. сооружений выявление опасных мест имеет еще большее значение, так как случаи прямых ударов молнии не только в электротехнических сооружениях, но и в линии передач вблизи электротехнических установок влекут за собой аварии дорогостоящих машин и приборов и вызывают длительные перебои в подаче электрической энергии.

Переходя к вопросу о влиянии ударов молнии на линии передач, необходимо отметить следующее.

В своем классическом исследовании о молнии Симпсон (Simpson) приводит теоретические соображения о том, что индуктированное напряжение на линиях передач, вызванное

ударами молнии вблизи этих линий, должно быть велико. Он считает, что максимальная величина напряжения в этом случае будет, по крайней мере, в 100 раз меньше, чем перенапряжение, происходящее в линии передачи в случае прямого удара. Принимая величину перенапряжения для прямого удара 5000 kV, он приходит к выводу, что при непрямом ударе максимальная величина будет порядка 50 kV и, следовательно, будет неопасна для линий высокого напряжения.

Работа американских ученых (Peek, Lewis, Fortesche и др.), которые вопросам защиты от грозовых разрядов электрических линий передач уделяют очень большое внимание, подтверждают теоретические выводы Симпсона рядом наблюдений над грозовыми разрядами, произведенными в полевых лабораториях, установленных на работающих линиях передачи САСШ. На Международной конференции по высоким напряжениям в Париже в 1931 г. вопросам о защите линий передач от грозовых разрядов было посвящено большое число докладов, из которых приводятся ниже заключения, высказанные в этих докладах и дискуссиях по ним, о величине перенапряжения, вызываемого в линиях передач в случае непрямого удара молнии.

Льюис (W. W. Lewis) на основании данных пятилетних наблюдений над грозовыми разрядами на линиях передачи САСШ приходит к выводу, что не прямые удары молнии для линий передач высокого напряжения (110 ÷ 220 kV) не могут вызвать опасных перенапряжений.

Нориндер (Norinder, Швеция) показал на основании многолетних наблюдений, что наивысшая величина перенапряжения при непрямом ударе молнии, зарегистрированная приборами, установленными на линиях передач Швеции, не превышает 50 kV, и только в одном случае была отмечена величина 75 kV. Нориндер полагает, что величина перенапряжения от не прямых ударов не может превышать 100 kV и полагается опасной лишь для линий передач, работающих при напряжении 20 kV и ниже.

Фаллу (Fallou, Франция) сообщает, что перенапряжение от не прямых ударов неопасно для линий передач, работающих при напряжении свыше 100 kV, и даже предлагает снять установленные для этой цели на линиях передач громоздкие и дорогостоящие защитные приборы.

Бергер (Berger, Швейцария) считает на основании наблюдений, произведенных на линиях передач Швейцарии, что величина перенапряжения от непрямого удара молнии не может превышать 50 kV.

Приведенные выше мнения выдающихся авторитетов в области электротехники показывают, что перенапряжения, возникающие от не прямых ударов молнии, не могут достигнуть значительной величины (более 100 kV) и потому неопасны для линий передач высокого напряжения.

Имевшие место в нашем Союзе выключения линий передач высокого напряжения (110 ÷ 115 kV) во время грозы следовало отнести к прямым ударам молнии в линию передачи, которые не оставили видимых следов поражения, что часто имеет место, например, в случае металлических опор с заземленным защитным тросом или при применении деревянных опор с защитным тросом, который часто прокладывают на участках прилегающих к электротехническим установкам (станциям, подстанциям и т. п.).

В качестве иллюстрации и заключения о влиянии на линии передачи прямых ударов можно привести случай удара молнии в участке земли, заключенном между двумя линиями высоковольтной передачи, идущими параллельно на расстоянии порядка 100 м). Случай этот был сфотографирован вблизи расположенной лаборатории по исследованию грозовых разрядов, приборы которой не дали никакого указания появления перенапряжения в линии передачи.

Из всего вышесказанного следует, что необходима организация в СССР соответствующих геофизических исследований. Область применения методики, выработанной за последний двухлетний период, должна быть расширена вследствие выяснившейся необходимости надежного заземления как меры защиты, для чего необходимо знать величину сопротивления поверхностных слоев почвы.

В целях выяснения выгод, которые получаются при производстве вышеуказанных работ геофизического характера, можно привести нижеследующие соображения.

На основании многолетних наблюдений, произведенных на линиях передач САСШ, Льюис приходит к заключению, что наиболее надежной защитой линии передачи от прямых ударов молнии является применение не менее двух защитных тросов на каждую цепь и надежное заземление опор при условии, что сопротивление заземления будет не более 4 Ω . По данным Волховстроя и Свирьстроя стоимость хорошо проводящего троса, не считая его установки, выражается суммой около 1000 руб./км. При двух тросах эта сумма примерно удваивается. Устройство надежного заземления опор по данным Волховстроя и других строителей выражается в сумме около 300 руб. на одну опору, т. е. при 5 опорах на 1 км порядка 1500 руб./км. Таким образом общие расходы по защите составят около 3500 руб./км.

Применяемые другие меры защиты на линиях передач с деревянными опорами, как установка искровых промежутков по

Реек и громоотводов телеграфного типа, которые не являются вполне надежными, вызывают также значительные расходы. Установка грозовых разрядников типа Thyrte, которые широко применяются в Америке, едва ли будет рациональна, так как стоимость установки их не будет ниже стоимости других мер защиты. К тому же разрядники этого типа у нас пока не изготавливают, и следовательно, они являются импортным оборудованием.

Если по данным, полученным при помощи геофизических методов, будут устанавливаться опасные зоны на линии передачи, то, очевидно, установка мер защиты на всем протяжении упадет. Как показывают данные эксплуатации и как уже было упомянуто выше, протяжение опасных зон невелико и составляет не более 10% от общей протяженности линии. Таким образом, если придется снабжать надежными мерами защиты в худшем случае даже 25% протяженности всей линии передачи, то экономия на каждые 100 км составит около 250 000 руб.

В заключение можно привести сравнение двух существующих методов определения поражаемости местности молнией: метода, разработанного и применяемого в САСШ (установка регистраторов грозовых явлений, указателей числа ударов молнии, грозовых счетчиков и т. п.), и вышеприведенного геофизического метода. Первый метод может дать надежные результаты только через большой промежуток времени, так как он базируется на многолетних наблюдениях над грозовыми явлениями, и окончательные надежные результаты при помощи этого метода можно иметь только через несколько лет. При применении геофизических методов результаты получаются немедленно, и не требуются никаких расходов на самой линии передачи, кроме расходов на недорогостоящую аппаратуру, необходимую для производства геофизических исследований, и на оплату персонала, причем аппаратура может служить для дальнейших работ и на других линиях. Вся аппаратура изготавливается у нас в Союзе, и никаких валютных расходов на приобретение ее не требуется.

О механических свойствах проводникового алюминия

В. В. Усов
ВЭИ

Алюминий, служащий материалом для проводов и шин, имеет как один из недостатков по сравнению с медью более низкие механические свойства. Так, временное сопротивление разрыву медь в отожженном состоянии имеет в среднем 24 кг/мм², а алюминий—лишь около 10 кг/мм². Для повышения механической прочности алюминия его подвергают холодной протяжке или прокатке, вследствие чего его крепость на разрыв удается повысить до 15—28 кг/мм² в зависимости от степени полученного наклепа. Однако наклеп может сохраняться в металле лишь до определенной температурной границы, выше которой вследствие рекристаллизации механические свойства металла резко падают.

Шины работают обычно при температуре более высокой, чем окружающая. По новым нормам²⁾ нагрузка шин током рассчитывается с допускаемым перегревом их против окружающего воздуха на 40° С. Если принять максимальную температуру воздуха равной 40° С, то шины будут работать в таком случае при нагреве до 80° С. В случае короткого замыкания шины могут оказаться нагретыми током до 200° и более.

Что касается открытых воздушных кабелей, то они по указанию Zeerleder и Bourgeois [1] могут быть также нагреваемы током и солнцем до 90° С.

Механическая прочность отожженных чистых металлов, если они не испытывают аллотропических изменений³⁾, постепенно снижается по мере повышения температуры их нагрева. По охлаждению до первоначальной температуры механическая прочность их возвращается вновь. Но в случае наклепанного металла такой возврат прочности возможен лишь после нагрева до температур ниже температуры рекристаллизации, после нагрева выше которой наклеп исчезает, и следовательно,

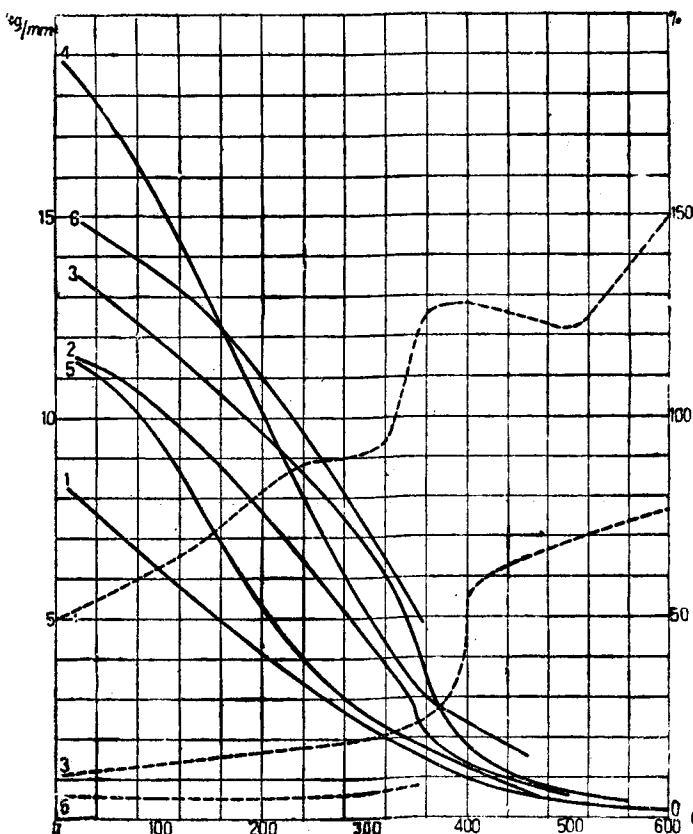


Рис. 1. Сопротивление разрыву и удлинение алюминия в зависимости от нагрева:

1—по Мартин отожжен, 2—по Мартин холоднокатан, 3—по Bengough, 4—по De Chatelier, 5—по Lindwall (отожжен 350°), 6—по опытам ВЭИ (холоднотянутая шина 40×4 мм).

¹⁾ Trans. A. I. E. E., № 2, 1931.

²⁾ Утверждение президиумом ВСНХ 8 января 1932 г.

³⁾ До недавнего времени некоторые авторы считали, что алюминий испытывает аллотропическое превращение около 580°, но последние исследования Honda и garasi, Нааз (дилатометрический метод) [4] и А. Алиханова (рентгенографический метод) [5] отвергли это предположение. А. Алиханов, делая рентгенографическое исследование алюминия при нагревах до 800°, нашел во всех случаях структуру куба с центрированными гранями. Точка превращения около 580°, найденная прежними авторами, должна быть отнесена, таким образом, за счет загрязнений, в применявшемся им алюминии.

исчезает также связанная с ним повышенная механическая прочность металла.

Проводниковый алюминий хотя и выбирается наиболее чистый, все же всегда содержит примеси кремния и железа в количестве нескольких десятых процента.

Железо в алюминии находится в виде включений алюминидов (FeAl_3), неспособного переходить в твердый раствор. Кремний, напротив, при высоких температурах хорошо растворим, но при медленном охлаждении сплава до обыкновенной температуры почти весь выделяется в свободном виде. Так, по данным Köster и Müller растворимость кремния в алюминии при 550° равна $1,5 \div 1,6\%$, а при 300° только $0,1\%$ [2]. На основании изучения электропроводности Zeerleder и Bosshard [3] полагают, что при одновременном присутствии в алюминии железа и кремния образуется соединение, состоящее из железа, кремния и алюминия. Это соединение обладает ограниченной растворимостью в алюминии. Предел растворимости соответствует $0,3\%$ железа при 300°C [4].

Таким образом проводниковый алюминий не является в собственном смысле чистым металлом, но представляет собой сплав, и потому характер изменения механических свойств его при нагреве усложняется еще изменениями, происходящими в составе твердого раствора, образованного алюминием с упомянутыми примесями.

Характер механических испытаний

Вследствие приведенных выше соображений нами был произведен ряд механических испытаний алюминиевой шины как в горячем состоянии при нагревах от 50 до 350°C , так и в охлажденном после таких же нагревов (т. е. в отожженном при указанных температурах) состоянии.

Испытания производились:

- 1) на твердость при температурах 20 (комнатная), 50 , 100 , 150 , 200 , 250 , 300 , 350°C ;
- 2) на разрыв при тех же температурах, причем определялись временные сопротивления и удлинения образцов при разрыве;
- 3) на твердость после 15-минутного отжига при 50 , 100 , 150 , 200 , 250 , 300 , 350°C и охлаждения на воздухе до комнатной температуры;
- 4) на разрыв при тех же условиях.

Для испытания на твердость и разрыв была взята шина сечением 40×4 мм. Этот размер выбран потому, что шины небольшого сечения имеют большую степень наклепа, вследствие чего изменения их свойств, связанные с исчезновением наклепа при нагреве, должны сказаться наиболее отчетливо.

Испытания на разрыв при нагреве и после отжига

Испытания алюминия на разрыв при нагреве производились неоднократно разными авторами. Но все полученные результаты мало совпадают между собою, особенно в пределах от 50 до 350°C . Это можно объяснить различной чистотой алюминия и степенью наклепа испытанных образцов.

Ниже приводим результаты, полученные T. Martin, G. D. Bengough, H. Le Chatelier и P. Ludwik [6].

Данные по T. Martin [7]

Нагрев ($^\circ\text{C}$)	16	100	200	300	350	400	500	600	
Сопротивление разрыву (kg/mm^2)	8,2	6,4	4,35	2,50	1,63	1,10	0,54	0,28	Образец отожженный
Удлинение (%)	51,2	62,3	83,9	90,4	124,0	127,9	121,4	150,0	
Сопротивление разрыву (kg/mm^2)	11,7	10,3	7,7	4,65	2,10	1,44	0,64	—	Холодно-катаный

Данные по G. B. Bengough [8]

Нагрев ($^\circ\text{C}$)	20	200	275	330	375	396	450	520	560	610
Сопротивление разрыву (kg/mm^2)	13,6	9,9	7,8	5,4	2,7	1,55	1,1	0,7	0,39	0,33
Удлинение (%)	11,5	15,0	17,2	20,3	25,0	56,0	65,0	68,5	70,3	75,0
Сжатие поперечного сечения (%)	75	78	79	88	88	90	96	Почти 100		92

Данные по Le Chatelier

Нагрев ($^\circ\text{C}$)	15	100	150	200	250	300	350	400
Сопротивление разрыву (kg/mm^2)	18,7	15,3	12,9	10,1	7,7	5,7	3,3	2,4

Данные по P. Ludwik [9]

Нагрев ($^\circ\text{C}$)	20	75	135	310	403	510	600	
Сопротивление разрыву (kg/mm^2)	11,6	10,6	7,65	2,6	1,25	0,55	0,35	Образец отожжен при 350°

Результаты испытаний алюминия на разрыв при нагреве, полученные разными авторами, изображены на рис. 1.

Нами испытание на разрыв производилось на двухтонной прессе Moog и Federhaff (рис. 2). Образцы вырезывались

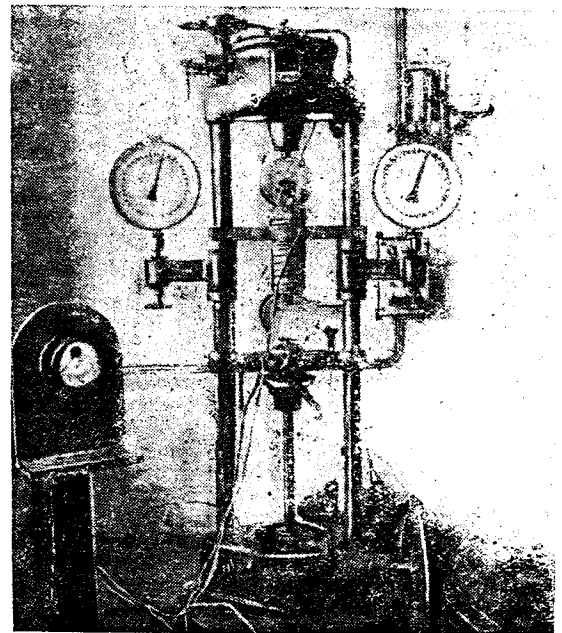


Рис. 2. Установка для испытания на разрыв при нагреве

шины согласно рис. 3, причем расчетная длина для определения удлинения образца была принята равной 200 мм.

Нагрев образцов для отжига и при испытании в нагретом состоянии производился в трубчатой печи диаметром 600 мм и длиной 200 мм с никелиновой обмоткой. Измерение температуры образцов производилось медно-никелиновой термопарой. Спай термопары привязывался к середине разрывного образца асбестовым шнуром так, чтобы он касался образца. Выдержка при достижении нужной температуры при отжиге равнялась 15 , а при испытании образцов в нагретом состоянии 10 мин.

Результаты испытаний на разрыв при нагреве и после отжига приведены соответственно на табл. 1 и 2 и рис. 4 и 5.

Испытание на твердость

Испытание производилось на прессе Schopper при нагрузке 62,5 кг шариком 5 мм в диаметре.

Для испытания твердости при нагреве был взят кусок шины сечением 40×4 мм и длиной 880 мм. Нагрев шины производился током, для чего к концам ее были присоединены провода от трансформатора тока.

Общий вид установки показан на рис. 6.

Измерение температуры производилось той же медной никелиновой термопарой, что и при испытаниях на разрыв. Слай термопары был вставлен сбоку в отверстие, высверленное посредине шины.

При достижении нужной температуры делались три отпечатка шарика, причем отпечатки делались по возможности вблизи середины шины, дабы температуры испытываемых участков вполне соответствовали температуре, показываемой пирометром. Испытания производились как при нагреве образца, так и при охлаждении его.

Определения твердости после отжига делались на соответствующих разрывных образцах. Результаты измерения твердости¹⁾ приведены в табл. 3 и 4 и на рис. 4 и 5.

Таблица 1

Результаты испытания шины на разрыв при нагреве

№ образцов	Нагрев °С	Временное сопротивление кг/мм ²	Удлинение %	Среднее значение временного сопротивления кг/мм ²	Среднее значение удлинения %
1	Без нагрева	14,8	7	14,9	5,75
2	Без нагрева	15,0	4,5		
11	50	14,7	5	14,5	5
12	50	14,3	5		
13	100	14,1	8	13,55	7
14	100	13,0	6		
15	150	12,3	6	12,35	7,25
16	150	12,4	3,5		
17	200	10,5	5,0	10,5	5,75
18	200	10,5	6,5		
19	250	9,4	5,5	9,08	5,5
20	250	8,75	5,5		
21	300	7,45	6,0	7,14	6,25
22	300	6,85	6,5		
23	350	4,5	6,5	4,75	7,0
24	350	5,0	7,5		

Таблица 2

Результаты испытания шины на разрыв до и после отжига

№ образцов	Отжиг	Временное сопротивление кг/мм ²	Удлинение %
1	До отжига	Среднее	5,75
2		14,9	—
3	50	14,8	6,0
4	100	14,5	5,0
5	150	14,8	6,0
6	200	13,8	5,0
7	250	13,3	6,0
8	300	11,3	10,0
9	350	8,6	35,0

¹⁾ Данных об измерении твердости алюминия при нагреве в литературе немного. Из последних работ отметим исследование твердости и сопротивления удару, произведенное W. Schwinning и F. Fischer [10] в пределах от -80 до +200°С. Полученные ими результаты для 2 листов толщиной 8 мм:
Температура - 80° 0° + 200°
Твердость по Бринеллю 35 ÷ 40 32 ÷ 38 22 ÷ 18
Сопротивление удару (кг/см²) 5,2 ÷ 6,2 4,0 ÷ 4,2 2,8 ÷ 3,0
По охлаждению до комнатной температуры твердость листов возрастала, п. е. жия.

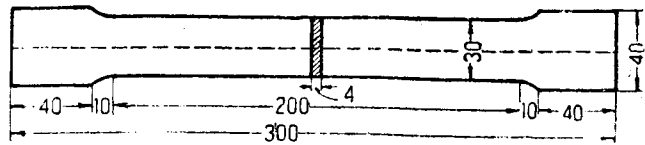


Рис. 3. Форма образцов, служивших для испытания на разрыв

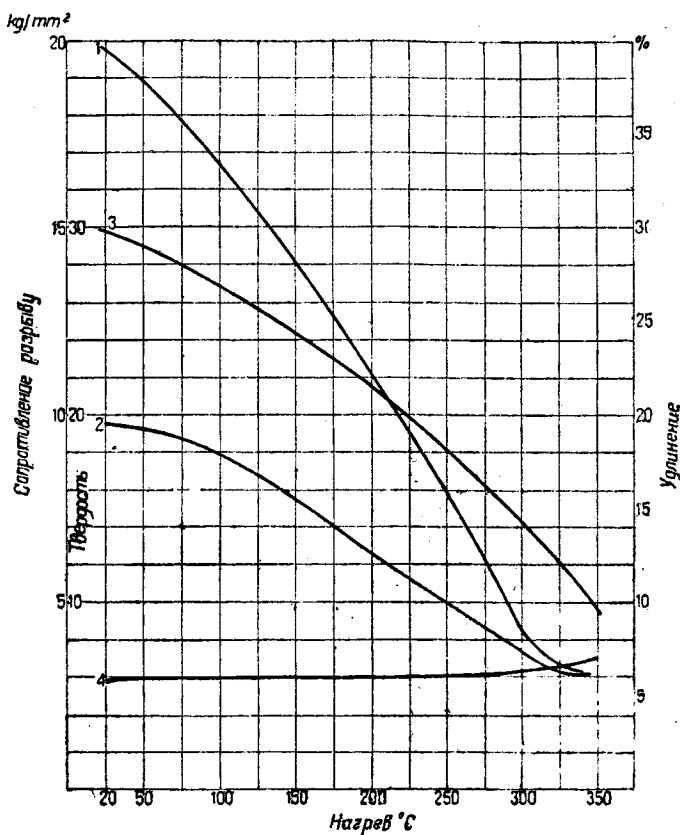


Рис. 4. Механические свойства алюминиевой шины при нагреве: 1—твердость при нагреве, 2—твердость при охлаждении, 3—сопротивление разрыву, 4—удлинение

Таблица 3

Результаты испытания шины на твердость при нагреве и охлаждении

Нагрев °С	Средний диаметр трех отпечатков шарика мм	Число твердости по Бринеллю
До нагрева	1,41	39,6
50	1,42	39,6
100	1,54	33,0
150	1,64	28,5
200	1,90	21,0
250	2,18	15,9
300	3,00	8,0
350	3,36	6,1
300	3,18	7,0
250	2,72	9,9
200	2,43	12,6
150	2,25	15,0
100	2,05	18,2
50	1,9	19,0
20	1,96	19,4

Таблица 4

Результаты испытания шины на твердость до и после отжига

Отжиг °С	Диаметр отпечатка мм	Число твердости по Бринеллю
До отжига	1,35	42
50	1,35	42
100	1,42	39,6
150	1,40	39,8
200	1,42	39,6
250	1,45	38,0
300	1,63	28,5
350	1,89	21,5

Испытания механических свойств проводов и шины после нагрева током

В условиях эксплуатации открытые провода и шины, как указано, могут быть нагреваемы иногда до $80 \div 100^\circ$.

Общая длительность таких нагревов за время службы проводов и шин может исчисляться тысячами часов. С другой стороны, при коротком замыкании нагрев может достигнуть 200° и более, но длительность его в таких случаях будет не более нескольких секунд.

Нагрев наклепанного металла, каким являются холоднотянутые или катаные провода и шины, может быть допущен не выше температуры рекристаллизации, выше которой прочность металла, вызванная наклепом, исчезает и не возвращается при охлаждении. Практически температура рекристаллизации, соответствующая резкому изменению механических свойств наклепанного металла, зависит 1) от степени наклепа, 2) от продолжительности нагрева при данной температуре и 3) от чистоты металла. При сравнительно кратковременных отжигах проводникового алюминия, чистота которого довольно высока, необходима температура $250 \div 300^\circ$ для появления рекристаллизации, тогда как по указанию Jeffries и Archer [1]

в случае длительного отжига сильно наклепанного алюминия рекристаллизация наступает при 150° С. Zeerleder и Bosshard указывают, что алюминиевые провода после нагрева током в течение 1000 час. при $70 \div 90^\circ$ С оказались частично отжигнутыми: их сопротивление разрыву снизилось с $15 \div 10 \text{ kg/mm}^2$. В этом случае кроме длительности нагрева, немалую роль сыграла значительная степень наклепа, которую имеет холоднотянутая проволока проводов.

Влияние кратковременного нагрева на механические свойства алюминиевой проволоки ($R = 21 \text{ kg/mm}^2$, $I = 4\%$) изгот. Siebe [12]; он установил, что полный отжиг проволоки 260° наступил через 60 сек., при 350° — через 10 сек., а 400° — через 4 сек., при 500° — через 1 сек.

Более короткие нагревы током, соответствующие случаю короткого замыкания, производил с холоднотянутой проволокой ($R = 22,3 \text{ kg/mm}^2$) H. Smitt [13]. Он установил, что потери прочности алюминиевой проволоки происходит после нагрева до $160 \div 180^\circ$ С. После нагрева до 180° в течение 0,1 сек. крепость ее составляла 99,8%, а через 10 сек. — от первоначальной. После нагрева до 200° крепость проволоки через те же периоды оказалась равной 93 и 81%, после нагрева до 250° — 78 и 68% и после нагрева до 300° — 63 и 51%.

Из приведенных данных видно, что проводниковая алюминиевая проволока, имеющая сильную степень наклепа, весьма чувствительно относится как к длительным нагревам до 100° С, так и к коротким в пределах от $200 \div 300^\circ$ С.

Для выяснения влияния нагрева током на механические свойства шины, шина сечением 40×8 и длиной 1600 мм нагревалась током при температуре $90 \div 100^\circ$ в течение 162 час. и после этого при температуре $200 \div 230^\circ$ в течение 16 час. До нагрева и после обоих периодов нагрева были определены твердость, сопротивление разрыву и удлинение образцов, вырезанных из шины. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

	Температура нагрева током °С	Сила тока А	Продолжительность час.	Удлинение %	Твердость по Бринеллю	Временное сопротивление разрыву kg/mm^2
1	До нагрева	—	—	8,0	40,0	12,6
2	$90 \div 100$	900	162	8,0	37,0	12,7
3	$200 \div 230$	1500	16	15,0	30,5	8,8

Обзор полученных результатов

1. Изменение сопротивления разрыву. Нагрев до 50° С уже снижает временное сопротивление алюминия. По мере дальнейшего нагрева временное сопротивление начинает быстро падать. Это падение тем значительнее, чем выше начальное сопротивление разрыву металла. Около 600° все кривые на рис. 1 сближаются и стремятся к одной точке.

Испытанная нами шина потеряла от первоначальной крепости

при 50° 2,5%

„ 100 9,2%

„ 200 30%

Что касается шин большего сечения, то степень наклепа убывает с сечением. Так, твердость и сопротивление разрыву испытанных нами в холодном состоянии шин были:

Сечение $40 \times 4 \text{ mm}$ твердость 42 сопротивление $14,9 \text{ kg/mm}^2$ разрыву

„ 40×8 „ „ 40 „ 12,69

„ 60×8 „ „ 30,2 „ 10,8

„ 80×10 „ „ 28,5 „ Не определяли

Характер изменения при нагреве механических свойств шин с разной степенью наклепа должен быть аналогичен кривым на рис. 1. Сопротивление разрыву от первоначального значения при комнатной температуре будет падать до 400° , где кривые сходятся почти в одной точке при $1,5 \text{ kg/mm}^2$. Таким образом, зная начальное сопротивление шин в холодном состоянии, можно приблизительно определить сопротивление разрыву при других температурах.

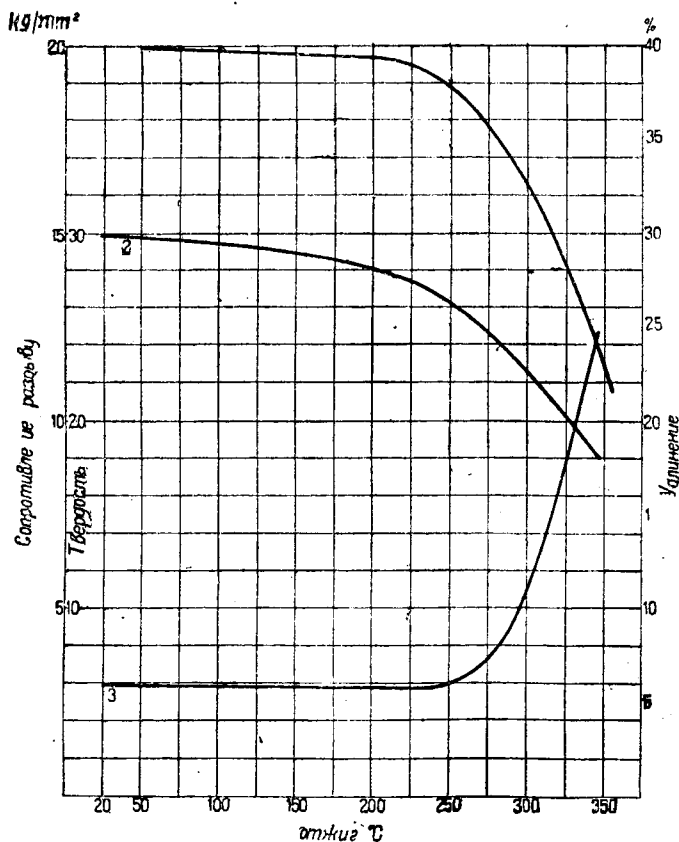


Рис. 5. Механические свойства алюминиевой шины после отжига

1—твердость, 2—сопротивление разрыву, 3—удлинение

По охлаждении после нагрева в пределах от 50 до 150° первоначальное сопротивление разрыву шины практически восстанавливается (рис. 4). Более высокие нагревы ведут к постепенной потере крепости металла в холодном состоянии. Так, при 200° имеем потерю крепости, равную 7,5%. Резкое понижение сопротивления разрыву наблюдается после отжига при 250°, что связано с появлением рекристаллизации. В слу-

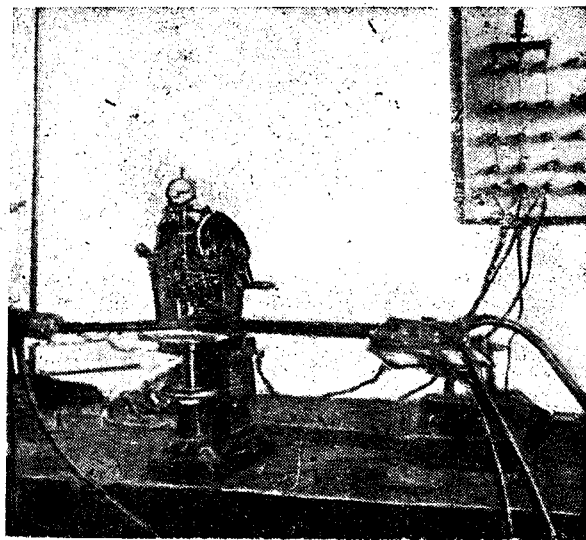


Рис. 6. Установка для испытания на твердость при нагреве

чае холоднотянутой проволоки потеря прочности наступает при более низких температурах отжига и при более коротких нагревах (см. вышеприведенные данные опытов Н. Smitt).

2. Изменение удлинения при разрыве. Удлинение при испытании нагретых образцов шины до 250° не изменялось. Также сравнительно мало изменялось удлинение до этой температуры и в опытах Bengough. Это показывает, что в горячем состоянии алюминий, теряя механическую прочность, повидимому, не увеличивает заметным образом вязкость до появления рекристаллизации. После отжигов до 250° удлинение образцов остается прежним, но начиная с 250° вследствие рекристаллизации удлинение быстро растет.

3. Изменение твердости. Твердость нагретой шины меняется с температурой в общем аналогично сопротивлению

разрыву. При 50° понижение твердости незначительно, затем при более высоких нагревах твердость быстро падает. При 50° потеря твердости составляет около 4% (рис. 2), при 100°—16,5% и при 200°—47% от первоначальной. После отжигов при температурах от 50 до 150° твердость практически остается без изменения, но выше 150° начинается ее падение, особенно резко выраженное при 250° С.

Заключение

На основании наших опытов и литературных данных можно сделать следующее заключение относительно изменения механических свойств алюминиевых шин и проводов при температурах, соответствующих максимальному рабочему нагреву и нагреву током короткого замыкания.

1. Нагрев шин до 80° С сравнительно мало (около 10%) снижает их механическую прочность в горячем состоянии и практически не влияет на их прочность в холодном состоянии.

2. Провода вследствие большей степени наклепа при аналогичном нагреве теряют более значительную часть механической прочности и после длительного нагрева могут потерять до 25% первоначальной крепости.

3. Нагрев до 200° ведет к значительной потере крепости в горячем состоянии (от 30 до 50%), которая после кратковременного нагрева шин возвращается с небольшой (до 10%), а в проводах со значительной (от 10 до 20%) потерей первоначальной крепости.

Более высокие нагревы проводов током короткого замыкания могут привести к их полному отжигу.

Библиография

1. Zeerleder a. Bourgeois, „J. Inst. of Metals“, 1929. Реф. „Zeitschr. für Metallkunde“, 1930, H. 8.
2. W. Köster und F. Müller, „Zeitschr. für Metallk.“ 1927, H. 2.
3. Zeerleder und Bosshard, „Zeitschr. für Metallk.“, 1927, H. 11.
4. M. Haas, „Zeitschr. für Metallk.“, 1927, H. 10.
5. А. И. Алиханов, „Zeitschr. für Metallk.“, 1929, H. 4.
6. M. V. Schwarz, „Zeitschr. für Metallk.“, 1927, H. 4.
7. „J. Inst. of Met.“, 1924.
8. „J. Inst. of Met.“, 1912.
9. P. Ludwik, „VDI“, 1915.
10. W. Schwinning und F. Fischer, „Zeitschr. für Metallk.“, 1930, H. 1.
11. Jeffries and Archer, The Science of Metals.
12. P. Siebe, „Zeitschr. für Metallk.“, 1927, H. 10.
13. H. Schmitt, „ETZ“, 1928, H. 18.
14. H. Bohner, „Zeitschr. für Metallk.“, 1927, H. 7.

СЕТИ И ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ

Сплошные железные провода для переменного тока

П. П. Бепар и В. Г. Лившиц
Союзсельэлектро ВЭИ

Развертывание электрификации сельского хозяйства СССР в первой и особенно во второй пятилетке связано с большим ростом потребления цветных металлов, и, в первую очередь, дефицитной меди, для постройки широко разветвленной распределительной сети. Поэтому задачи замены меди железом, весьма действенная для всей электрификации страны, приобретает в области сельской электрификации особо боевое значение. Применение железа здесь должно дать большую экономию также и потому, что электрическая нагрузка проводов (плотность тока) очень мала и сечение меди используется недостаточно.

От редакции

В сельноточной промышленности железные провода были впервые применены в широком масштабе в Германии во время мировой войны по причине острого дефицита меди. В СССР в сравнительно широких размерах железные провода были впервые применены в Боровичско-Валдайской районной сети сельскохозяйственного значения, где в 1927 г. Электросельстроем¹⁾ (теперь „Союзсельэлектро“) было сооружено около 150 км линий 3,3 и 22 kV железным одножильным проводом. В настоящее время железный провод завоевал прочное место в определенной области нашего электростроительства, и неизжитый пока дефицит цветных металлов настоятельно требует дальнейшего расширения этой области.

Однако здесь имеются трудности двоякого рода: с одной стороны, недостаточная изученность электрических и магнитных свойств железного провода при передаче энергии пере-

менным током, с другой стороны, неудовлетворительность применяемого сортажента железных проводов (так называемой телеграфной проволоки). Действительно, производившиеся по настоящее время в советских лабораториях и в отдельных установках исследования, ограничиваясь одним двумя сортами случайного рыночного провода, были несколько бессистемны, а в „Руководящих указаниях по применению железных проводов“ ЦЭС в качестве основы для расчета наиболее ходового пятимиллиметрового провода предлагаются кривые, полученные Випет (во Франции) по совершенно случайному материалу. Неясность вопроса для наших инженеров-практиков видна также из того, что они согласно „Руководящим указаниям“ применяют отожженный провод, что в корне неправильно.

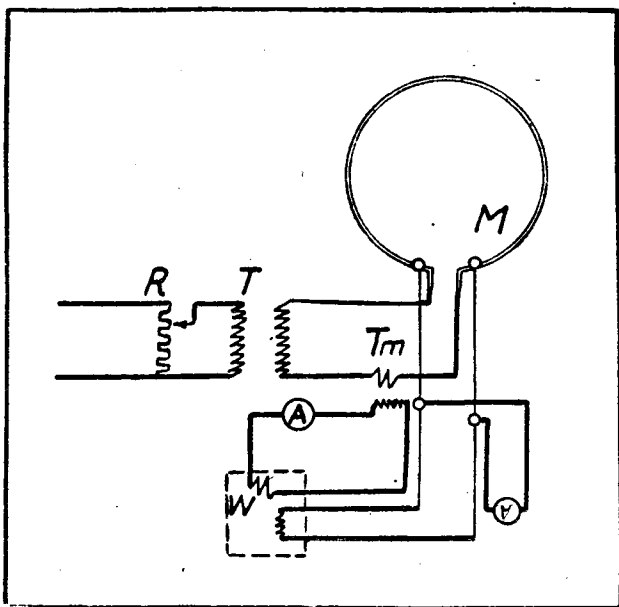
Ниже приводятся основные данные систематических исследований, произведенных по инициативе ВЭИ и „Союзсельэлектро“ в лабораториях ВЭИ, Московского института меха-

¹⁾ По инициативе проф. М. Г. Евремова.

изации и электрификации сельского хозяйства (МИМЭСХ) и в линии хозяйственного значения.

Экспериментальная работа по приспосабливанию наилучшего провода велась в направлении уменьшения потерь на гистерезис, юниформности и сопротивления постоянному току.

Как известно, наклеп значительно уменьшает проницаемость железа, и повышает потери на гистерезис и сопротивление постоянному току. Точно так же действует и углерод, являющийся основной примесью рыночной стали.



ис. 1. Схема установки для снятия электрических характеристик. 1. М—испытуемый образец; 2. Т—силовой трансформатор; 3. Т_м—измерительный трансформатор; 4. V—милливольтметр с термоэлементом; 5. R—потенциометр; 6. А—амперметр; 7. W—ваттметр

Целью данной работы явилось, кроме того, установление градиента наклепа и углерода, которые влияют на импеданс провода в двух диаметрально-противоположных направлениях: а) понижая его за счет падения проницаемости и б) повышая за счет возрастания потерь на гистерезис и сопротивления постоянному току.

Постановка исследования

Соответственно задачам исследования оно было расчленено на две части. Первая касается влияния наклепа, а вторая — количества углерода (цементита) на проводниковую сталь. Было изучено омическое сопротивление ρ , импеданс Z , активное сопротивление R_w и $\cos \varphi = \frac{R_w}{Z}$, коэффициент крепости при разрыве p и микроструктура образца.

Омическое сопротивление измерялось двойным мостиком омсоном фирмы Siemens-Halske. Электрические характеристики Z и R_w в зависимости от силы тока I снимались на установке, схема которой показана на рис. 1.

Падение напряжения измерялось термоэлементом, присоединенным к гальванометру, чувствительностью 10^{-7} . Концы медных проводов, соединенные с термоэлементом, припаивались к испытуемому проводу на расстоянии 1,5—4 м. Расходуемая на испытуемом проводе мощность измерялась дифференциальным ваттметром с подвесной системой на 5 А и 3 В. Ток при испытании брался из сети 120 В и 50 циклов. Средняя точность измерений Z и R_w около $\pm 2\%$. Разрывные испытания производились на двух- и пятитонных гидравлических прессах Амслера.

Микрофотографирование производилось большим металлизаторскопом Рейхерта. Термообработка проводов производилась в трубе, заполненной очень тонким кварцевым песком. Нагрев осуществлялся током, проходившим через образец. Окисления образцов после термообработки не наблюдалось. Обезуглероживание стальных образцов не заходило глубже 0,02 мм.

Экспериментальная часть

Влияние наклепа. Для исследования влияния наклепа на электротехнические свойства было выбрано по возможности малоуглеродистое техническое железо следующего состава:

C—0,07%, P—0,43, Mn—0,39%, S—0,032%, Si—0,0%. В дальнейшем этот материал обозначен—сталь № 1.

Все образцы стали № 1 имели одно и то же сечение и различных градациях наклепа. Это определялось необходимостью изолировать влияние наклепа от влияния размеров сечения. Для этого катанка стали № 1 диаметром 10,82 мм была предварительно протянута на последовательно уменьшающиеся диаметры и отожжена при температуре 930—950° в железных опилках. Отожженный материал имел на поверхности синий цвет побежалости. Затем проволоки различных сечений протягивались без промежуточных термообработок на размер 4 мм.

Степень обжатия вычислялась по формуле $\frac{F - F'}{F} 100\%$,

где F —площадь сечения провода до протяжки, а F' —после протяжки.

Влияние протяжки на импеданс и активное сопротивление видно из рис. 2 и 3. Сопротивление постоянному току, среднему $\cos \varphi$ и коэффициент крепости при разрыве изменяются, и это иллюстрирует рис. 4. В табл. 1 дана сводка всех этих величин.

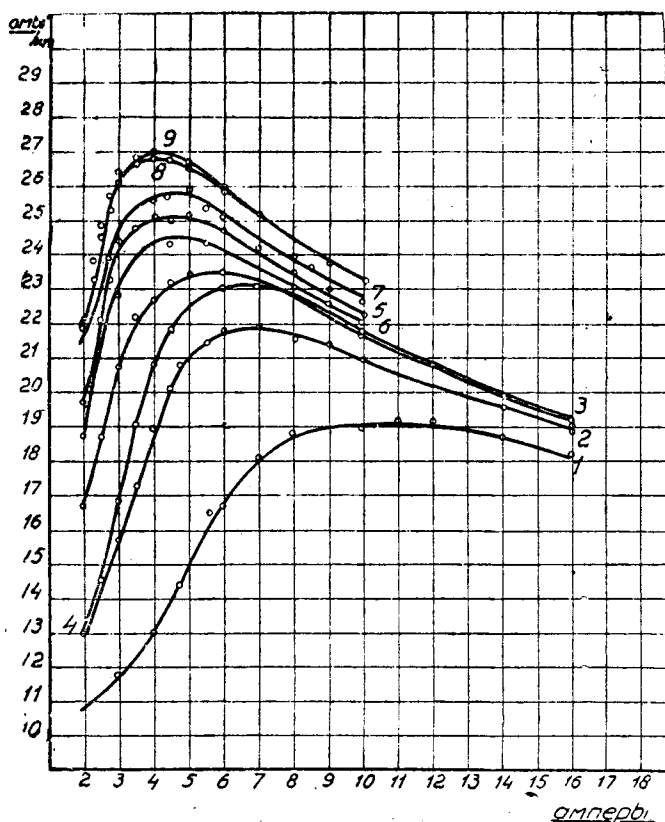


Рис. 2. Зависимость импеданса от силы тока для различных наклепанных четырехмиллиметровых образцов 1—9 стали № 1

Как видно из таблицы, выводы однозначны. Наклеп, повышая прочность железа, действует на его электротехнические свойства благотворно, понижая импеданс и активные потери и повышая $\cos \varphi$. Электрические характеристики при этом после своих экстремальных значений, значительно выравниваются: сопротивление наилучшего провода (№ 1 в этой серии) колеблется при нагрузках на все сечение от 10 до 20 А всего лишь между 18 и 19 Ω.

Для подтверждения результатов, полученных на стали № 1 из стали № 2 (состава: C—0,116%, Si—0,04%, Mn—0,49%, S—0,053%, P—0,051%) был изготовлен провод, диаметром 3,99 мм из катанки 11,3 мм без промежуточных отжигов. Степень обжатия этого образца 97,5% как видно из табл. 1 электротехнические свойства этого провода из стали № 2 примерно такие же, как и образца № 1. Отжиг ухудшает свойства этого провода.

Таблица 1

Свойства образцов стали № 1 и № 2 диаметром 4 мм, изготовленных протяжкой в холодном состоянии

№ образца	Диаметр мм	Обжатие %	Сечение мм ²	Удельное сопроти- вление $\frac{\Omega/\text{мм}^2}{\text{м}}$ ρ	Н а л			Z_{max} kg	R_{max} kg	Средний $\cos \varphi$	Кэффи- циент крепости P kg/mm ²	Сила тока при ма- ксималь- ном им- педансе в А I
					Сопроти- вление по по- стоянно- му току Ω R_g	Импе- данс Z_{max} Ω	Активное сопроти- вление R_w Ω					
Сталь № 1 С = 0,07%												
0 . .	4,07	Ото- жженная	13,07	0,1235	9,45	27,4	26,00	2,90	2,75	0,928	35,8	3,50
9 . .	3,99	4,21	12,50	0,1245	9,95	27,0	24,5	2,71	2,46	0,904	36,4	4,00
8 . .	3,99	8,62	12,50	0,123	9,85	26,3	24,0	2,67	2,44	0,874	40,7	4,25
7 . .	3,99	12,65	12,50	0,123	9,85	25,9	23,1	2,63	2,35	0,881	42,8	4,75
6 . .	3,99	17,20	12,50	0,1231	9,85	24,5	22,5	2,48	2,28	0,900	44,7	4,75
5 . .	3,99	19,10	12,50	—	—	26,9	23,3	—	—	0,916	45,5	4,50
4 . .	3,99	37,90	12,50	0,1245	9,95	23,5	21,5	2,36	2,16	0,916	52,3	5,50
3 . .	3,98	54,5	12,44	0,1245	10,0	23,1	21,8	2,31	2,18	0,902	58,3	6,00
2 . .	3,98	65,6	12,44	0,1247	10,0	22,4	20,4	2,24	2,04	0,923	61,8	1,50
1 . .	3,90	84,0	11,95	0,125	10,45	19,2	18,4	1,84	1,76	0,950	70,9	11,00
Сталь № 2 С = 0,116%												
1 . .	3,99	87,5	12,50	0,123	9,85	18,4	17,8	1,87	1,80	0,96	74,0	12,0
2 . .	3,96	Ото- жженная	12,30	0,120	9,75	27,4	25,3	2,81	2,6	0,93	—	4,0

Таблица 2

Характеристики образцов сталей № 1, 5, 3, 4, 6 и 8 диаметром 4 мм в холоднотянутом и отожженном состояниях

№ стали и содержа- ние угле- рода в %	№ об- разца	Диам- метр об- разца мм	Обжатие в % и термооб- работка	Сече- ние мм ²	Удельное сопроти- вление $\Omega/\text{мм}^2 \text{ м}$	Н а л к м				$R_{\text{w max}}$ R_g	Сред- ний $\cos \varphi$	Кэф- фици- ент крепости при раз- рыве P kg/mm ²	Сила тока соответ- ственно Z_{max} I_{max} А
						R_g — со- проти- вление постоян- ному току Ω	Импе- данс Z_{max} Ω	Активное сопроти- вление $R_{\text{w max}}$ Ω	Z_{max} R_g				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
№ 1,5 0,13% С	1	4,05	81,5%*	12,90	0,134	10,4	18,3	17,7	1,76	1,70	0,97	83,6	14,0
№ 3 0,26% С	2	4,07	—	13,0	0,176	13,5	21,2	20,6	1,57	1,53	0,945	77,7	13,0
	1	4,04	Отжиг 840°	12,8	0,1725	13,5	27,4	25,0	1,53	1,85	0,94	45,3	8,5
№ 4 0,37% С	1	4,05	Отжиг 810°	12,9	0,190	14,7	22,2	20	1,39	1,43	1,94	58,3	9,0
	2	4,06	—	12,95	0,190	14,65	20,4	21,0	1,52	1,36	0,98	88,2	16,0
№ 6 0,59% С	1	4,05	Отжиг 780°	12,9	0,2145	16,6	21,0	20,5	1,26	1,23	Около 1	78,0	12,0
	2	4,11	Отжиг 860°	13,25	0,2080	15,7	22,4	21,4	1,43	1,36	0,97	70,0	8,0
	3	4,08	—	13,05	0,2155	16,5	20,3	20,1	1,23	1,22	1,0	128,25	18,0
№ 8 0,81% С	1	4,00	Отжиг 760°	12,56	0,238	14,95	21,9	21,0	1,15	1,11	1,0	105,7	16
	2	4,01	Отжиг 850°	12,60	0,2295	18,2	21,5	21,7	1,18	1,19	1,0	97,7	От 12—18
	3	4,03	—	12,8	0,236	18,4	19,3	—	1,05	—	—	171,8	16

Примечание. Подчеркнутые числа в столбцах 8 и 9 не являются экстремальными значениями импеданса и активного сопротивления, а являются наибольшими значениями, полученными при испытании образцов соответствующими силами токов, указанными в столбцах.

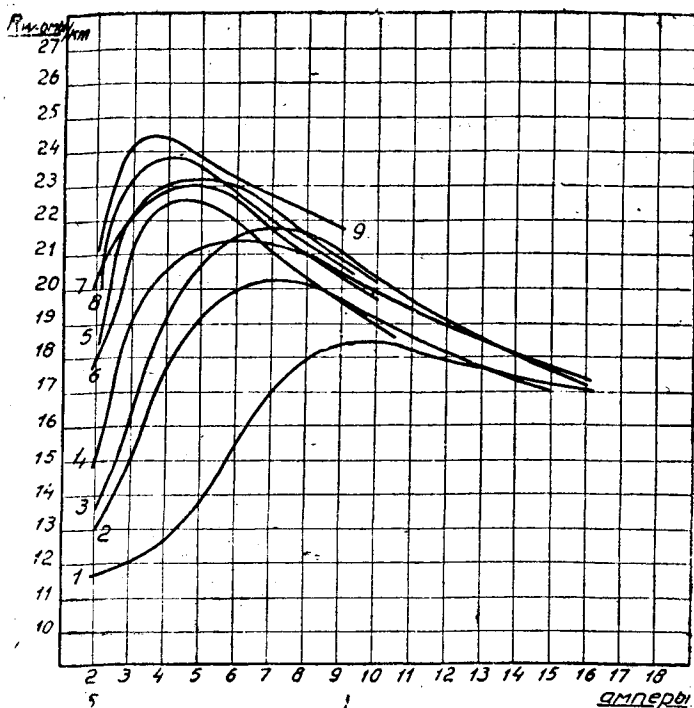


Рис. 3. Зависимость активного сопротивления от силы тока для различных наклепанных образцов 1—9 стали № 1

Структурно наклеп характеризуется степенью деформированности кристаллита (зерна) феррита. На рис. 5, 6 и 7 приведены микроструктуры отожженного, средне и сильно наклепанного образцов. Как видно, кристаллит вытягивается вдоль усилий при протяжке проволоки.

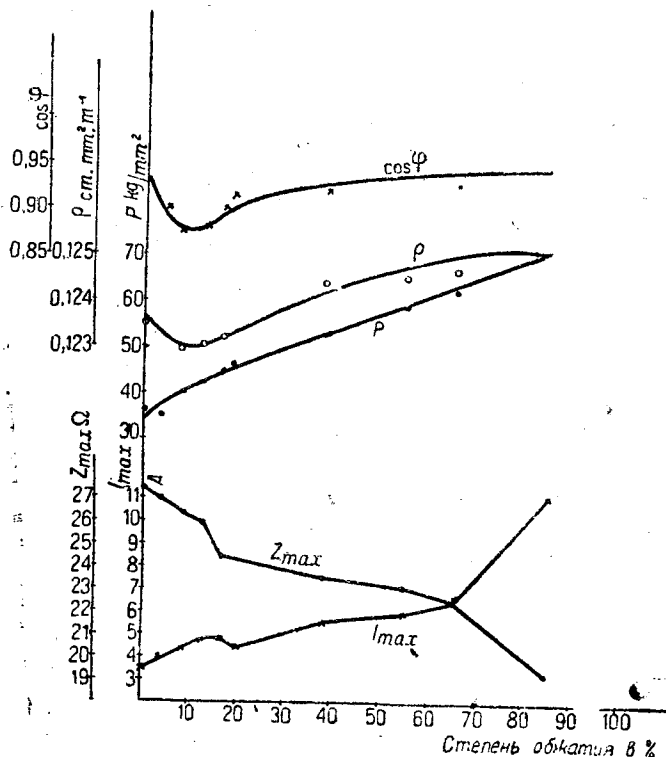


Рис. 4. Влияние наклепа на максимальный импеданс Z_{\max} , его положение I_{\max} , удельное сопротивление ρ , $\cos \varphi$ и коэффициент крепости при разрыве P (сталь № 1)

Влияние углерода. Для изучения влияния состава был взят ряд мартеновских основных сталей с различными содержаниями углерода. Данные по электротехническим испытаниям сопоставлены в табл. 2 и на рис. 8—12. Номер ка-

ждой стали соответствует, грубо, числу десятых проща углерода, содержащегося в стали.

Как видно, отжиг, уничтожая наклеп образца, действует на свойства стальных проволок так же, как и в случае технического железа (по нашим обозначениям сталь № 1). Наки уменьшает отношение максимального импеданса к сопротивлению постоянному току ($\frac{Z_{\max}}{R_g}$) и отношение максимальной активной мощности к сопротивлению постоянному току ($\frac{P_{\max}}{R_g}$)¹⁾, но увеличивает $\cos \varphi$ и омическое сопротивление. В общем электрическая характеристика (Z и R_w) при накле-

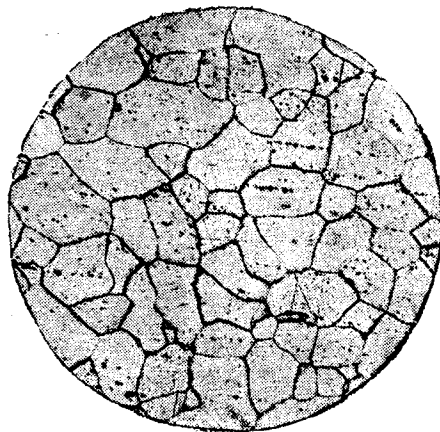


Рис. 5. Образец № 0 стали № 1 (табл. 1) после обжига. Феррит

улучшается, смещаясь к меньшим сопротивлениям; кроме того максимальное сопротивление на кривой $Z = f(I)$ двигается к большим плотностям тока, и сама кривая после $Z = f(I)$ приобретает пологий характер. По сталям № 6 и 8 видно, чем выше температура отжига, тем больше его ухудшающее влияние. Из рис. 10—12 ясно, что повышение углерода в стали сближает свойства наклепанного и отожженного образца. Увеличение содержания углерода в стали действует аналогично наклепу, приближая еще интенсивней импеданс про-

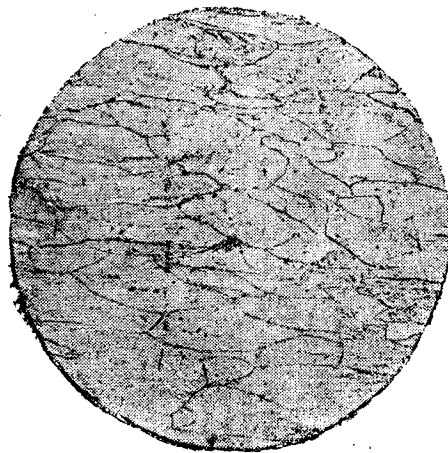


Рис. 6. Образец № 3 стали № 1 (табл. 1), 54,5% обжата. Феррит

локи к сопротивлению постоянному току и $\cos \varphi$ к единице. Однако увеличение содержания углерода ухудшает омическую проводимость материала и поэтому кривая $Z = f(I)$, т. е. называемая электрическая характеристика лежит на более высоком уровне, так как кривые для Z и R_w в зависимости от силы тока I пересекаются с осью ординат на расстоянии начала координат, равном сопротивлению постоянному току (физический смысл этой экстраполяции—приведение к случаю прохождения тока в отсутствие влияния магнитного поля $H = \frac{2I}{R}$). Сопоставление полученных данных для прово-

¹⁾ R_g — сопротивление постоянному току.

диаметром 4 мм приводит к тому выводу, что предельное содержание углерода приблизительно 0,13% (рис. 8, сталь № 2).

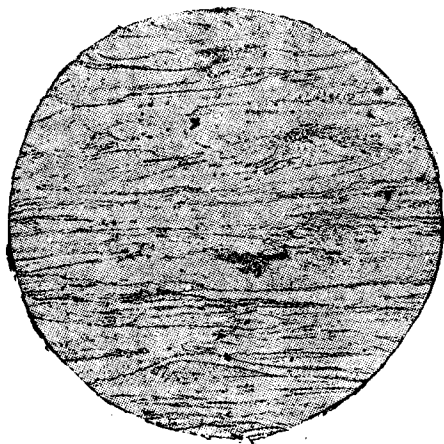


Рис. 7. Образец № 1 стали № 1 (табл. 1), 84% обжата

Наклеп всегда полезен, так как, снижая значительно магнитную проницаемость, он очень мало увеличивает омическое сопротивление и тем самым почти не влияет на начальную ординату электрической характеристики (при $I = 0$). Другими словами, низкое сопротивление постоянному току и малая магнитная проницаемость наилучшим образом сочетаются в малоуглеродистом наклепанном материале. Несколько лучшее поведение при малых нагрузках стали № 1—5 сравнительно со сталью № 1 объясняется ее повышенной крепостью и пониженной проницаемостью под влиянием незначительного количества углерода, превышающего таковое же для стали № 1. Практические соображения, касающиеся удобства прокладки линий, заставляют считать предельным коэффициентом крепости 70—75 kg/mm^2 . Эта цифра фигурирует и в зарубежной литературе, что будет указано в дальнейшем. Техническими свойствами, таким образом, четырехмиллиметрового железного провода будут: содержание С до 0,15%, обычные содержания кремния, марганца, серы и фосфора, коэффициент крепости при разрыве $p = 70\text{--}75 \text{ kg/mm}^2$, $Z_{\text{max}} = 18,5\text{--}19,5 \text{ }\Omega/\text{km}$ при среднем $\cos \varphi$ самого провода, равном 0,95. Полученные выводы легли в основу дальнейшего исследования проволок диаметров 3, 5, 6 мм.

Провода диаметрами 3, 5 и 6 мм

На основании сделанных выводов для провода диаметром 4 мм образцы проводов диаметрами 3, 5 и 6 мм были изготовлены из малоуглеродистого материала. Степени обжатия были выбраны 70—90%. Все протяжки попрежнему были произведены на обычных тянущих барабанах.

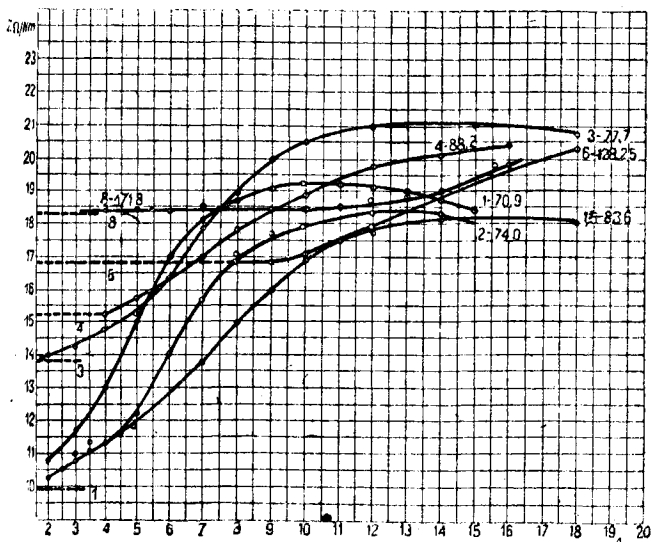


Рис. 8. Электрические характеристики для наклепанных образцов диаметром 4 мм из сталей с различным содержанием углерода. Индексы обозначают номер стали и коэффициент крепости. Пунктирные горизонтальные линии, проведенные на уровне сопротивления постоянному току

На рис. 13 приведены данные испытаний. Полученные данные еще раз подтверждают выводы, сделанные относительно влияния на свойства проводов. Следует отметить хорошую устойчивость импеданса и активного сопротивления для образ-

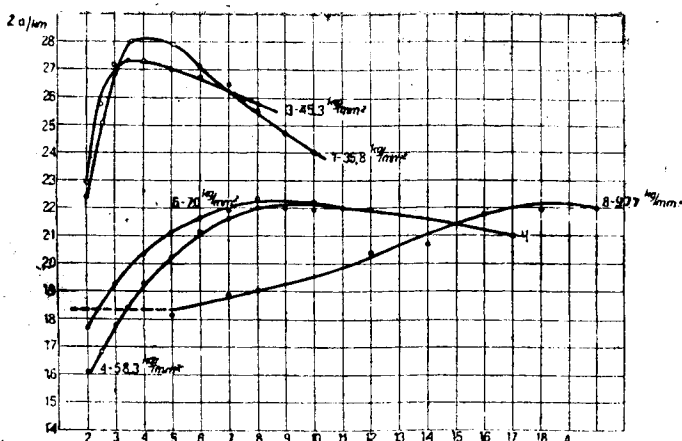


Рис. 9. То же, что на рис. 8, но для отожженных образцов

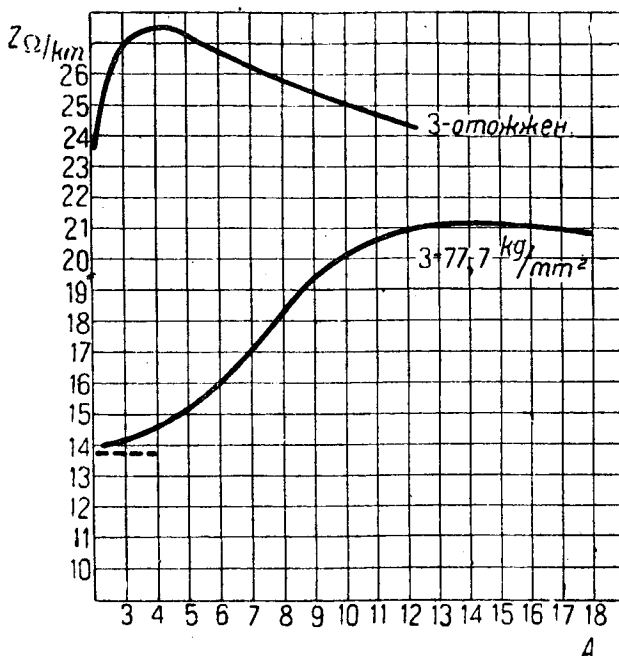


Рис. 10. Электрические характеристики четырехмиллиметровых образцов стали № 3 в отожженном и наклепанном состояниях

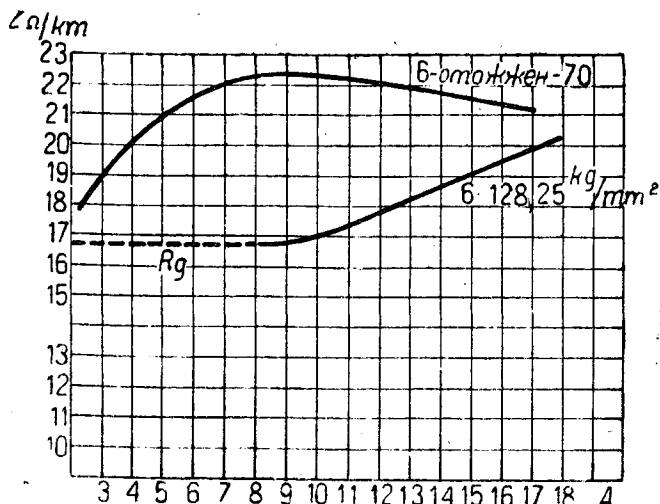


Рис. 11. Электрические характеристики четырехмиллиметровых образцов стали № 6 в отожженном и наклепанном состояниях

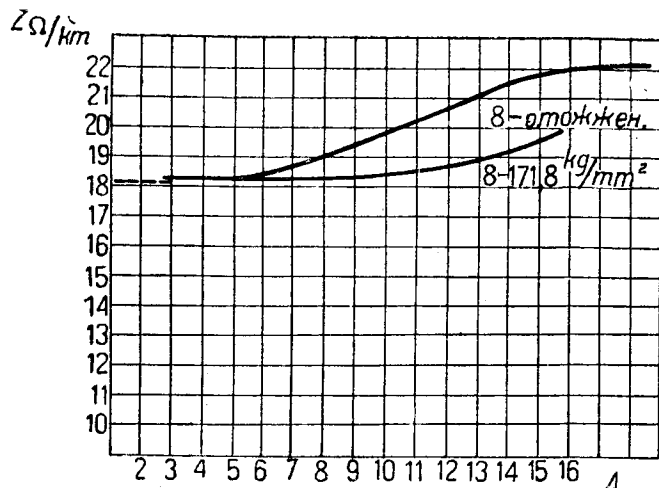


Рис. 12. Электрические характеристики четырехмиллиметровых образцов стали № 8 в отожженном и наклепанном состояниях

цов близких механических свойств. Например, для пятимиллиметрового образца Z_{\max} колеблется между 14,7 и 15,5, $R_{w\max}$ — между 14,0 и 14,5 Ω при изменении коэффициента крепости от 75,5 до 80,0 kg/mm^2 . Это облегчает техническую приемку проводов по составу и механической крепости с достаточной гарантией электротехнических свойств.

Сопоставление проводов различных диаметров (3, 4, 5 и 6 мм) с коэффициентом крепости около 70 kg/mm^2 (табл. 3 и рис. 13) приводят к следующим выводам: увеличение диаметра провода при постоянной его крепости приводит к увеличению $\frac{Z_{\max}}{R_g}$ и $\frac{R_{w\max}}{R_g}$ и уменьшению $\cos \varphi$. Из рис. 14 видно, что $\frac{Z_{\max}}{R_g}$ растет при увеличении сечения провода прямолинейно.

Сравнение полученных результатов с зарубежными данными

Указанный нами предельный коэффициент крепости $p = 70 \text{ kg/mm}^2$ вполне совпадает с принятым в германском производстве железных электротехнических проводов ¹⁾. Эта крепость соответствует наилучшим электротехническим свойствам сплошного железного провода также и в английской работе Вальтона ²⁾.

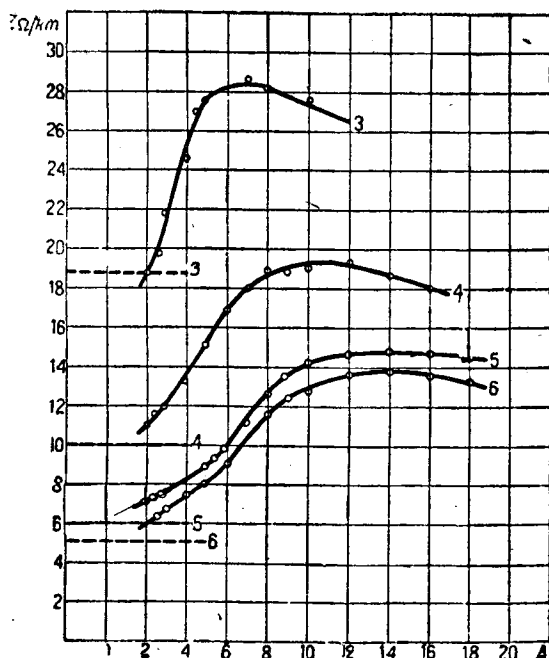


Рис. 13. Электрические характеристики железных отожженных проводов диаметром 3, 4, 5 и 6 мм с коэффициентом крепости около 70 kg/mm^2

¹⁾ „СЭТ“ т. 3, отд. 19, стр. 12.

²⁾ „JIEE“, 1928, 66, 382, 1965.

На рис. 14 сопоставлены полные сопротивления наших разцов с коэффициентом крепости около 70 kg/mm^2 и германских семижильных проводов той же крепости. Кривые a и b представляют собою импеданс при нагрузке 0,7 А mm^2 в зависимости от сечения провода. Кривая a (для наших образцов) в начале спускается круто, а затем, начиная с сечения

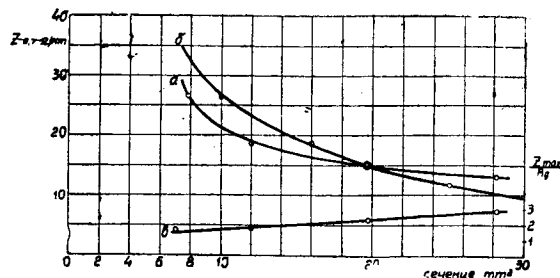


Рис. 14. Зависимость импеданса при плотности тока 0,7 A/mm^2 и отношения $\frac{Z_{\max}}{R_g}$ от поперечного сечения провода по нашим и немецким данным: кривая a — по данным настоящего исследования, кривая b — по данным германского сортаamenta, кривая c — $\frac{Z_{\max}}{R_g}$

20 mm^2 , переходит в прямолинейный пологий участок. Очевидно, что, начиная с сечения 20 mm^2 и выше, провод должен быть скрученным из отдельных тонких жил. Кривая (для немецких семижильных проводов) пересекает кривую как раз при сечении провода 20 mm^2 . Как видно, величина импеданса, полученные в данной работе, для проводов диаметром до 5 мм меньше, чем для проводов германского производства.

Кроме величин, характеризующих провода германского производства, интересно также привести для сравнения данные немецких исследований. На рис. 15 сопоставлены величины $\frac{R_w - R_g}{R_g} \cdot 100\%$ для наших проводов 3, 4, 5 и 6 мм и для проводов из чистейшего железа H_{000} , описанных

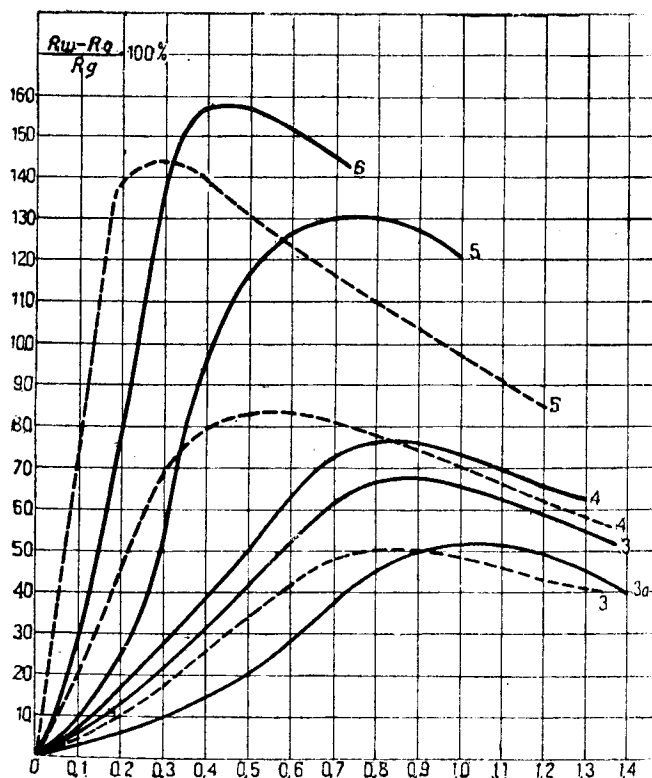


Рис. 15. Зависимость $\frac{R_w - R_g}{R_g} \cdot 100\%$ от плотности тока по немецким данным (пунктирные кривые) и собственным исследованиям (сплошные кривые). Все кривые соответствуют железным образцам с коэффициентом крепости 70 kg/mm^2 , кроме кривой 3а для образца крепостью 78,5 kg/mm^2

ых инж. Деттмаром³⁾. Как видно, сопоставление говорит в пользу наших образцов. Деттмаром приводятся также и образцы, по своим качествам превосходящие исследованные нами. Эти образцы были изготовлены из технического малоуглеродистого железа с проводимостью $7,3 \text{ } \Omega/\text{мм}^2 \text{ м}$ и коэффициентом крепости $70 \text{ kg}/\text{мм}^2$. Эти цифры Деттмар считает характерными для наилучшего технического провода в сетях переменного тока.

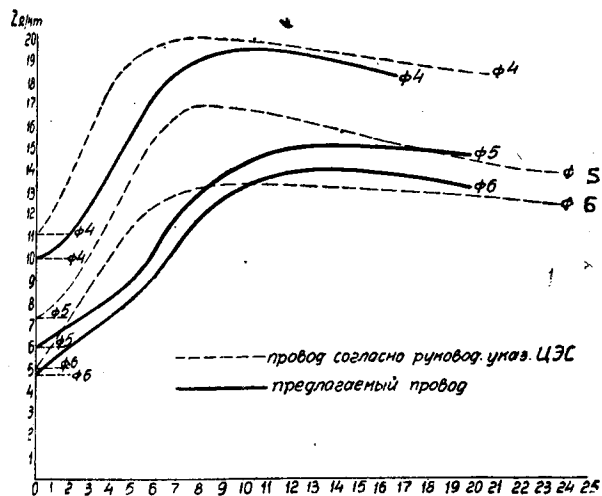
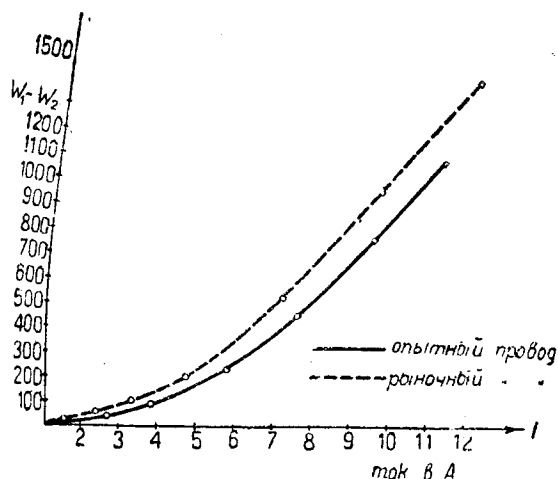


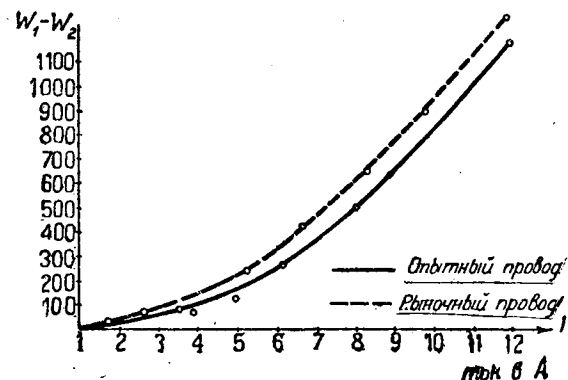
Рис. 16

В нашем исследовании имеется провод примерно с такой же проводимостью ($7,6 \text{ } \Omega/\text{мм}^2 \text{ м}$ — сталь № 2) и крепостью, доказавшей наилучшие в нашем исследовании свойства (рис. 8). Провод же из стали № 1 с проводимостью $8,0 \text{ } \Omega/\text{мм}^2 \text{ м}$ при той же самой крепости дает несколько худшие результаты, так как он изготовлен из слишком чистого по углероду (0,07%) железа с очень высокой проникаемостью. Снижение проводимости железа без значительного снижения прочности осуществляется введением углерода в количестве 0,10—0,15%, что предусмотрено в проекте предлагаемого далее стандарта. Кроме того, в проекте оговорено содержание кремния, повышающего омическое сопротивление железа не более 0,2%. Обычно это содержание кремния в малоуглеродистом железе не превосходит, что определяется условиями варки этого сорта в мартеновской печи. Данные табл. 3 и рис. 13 могут быть приняты для расчета линий, если железные провода для переменного тока будут производиться по специальным требованиям электротехнической промышленности.

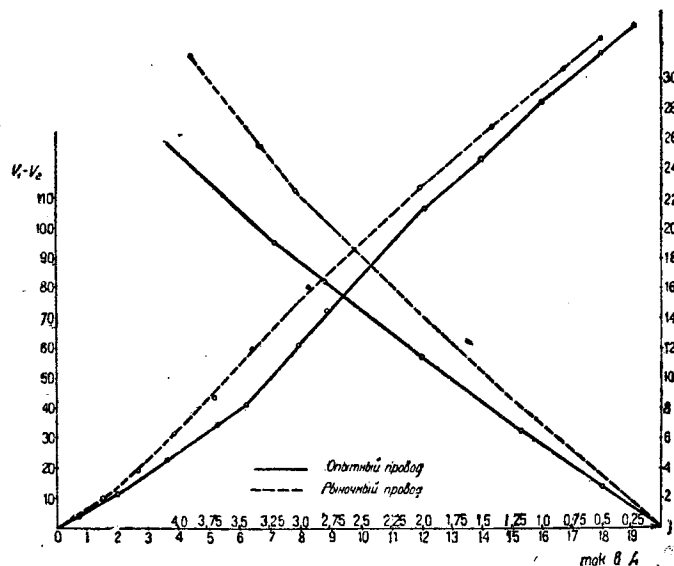
Рис. 17. Потеря мощности в ваттах, нагрузка индуктивная; $\cos \varphi = 0,8$

Так как все приведенные выше опыты относились к небольшим отрезкам провода длиной около 1 м, то представляло значительный интерес произвести испытание в хозяйственном масштабе.

Для этого была использована линия, сооруженная для нужд Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства (в Тимирязевской академии)⁴⁾. Испытуемая линия была двухпроводной с проводами диаметром 4 мм. При этом на одних и тех же столбах были смонтированы две линии — одна из специального провода диаметром 4 мм, изготовленного согласно приведенному ниже способу, а другая из случайного рыночного провода. Специальный провод был

Рис. 18. Потеря мощности в ваттах, нагрузка безындукционная; $\cos \varphi = 1$

изготовлен на заводе „Пролетарский труд“ в Москве, под наблюдением авторов, из соответствующего сорта стали, причем протяжка без промежуточного отжига из катанки диаметром 11 мм. Несколько увеличенный диаметр катанки против размеров, предлагаемых авторами ниже, обусловил также и больший наклеп провода в сравнении с предлагаемым. Действительно, произведенное в лаборатории МИМЭСХ испытание провода на разрыв дало коэффициент прочности на разрыв около $80 \text{ kg}/\text{мм}^2$ вместо $70\text{—}75 \text{ kg}/\text{мм}^2$. Испытание на разрыв рыночного (сравнительного) провода дало прочность около $55 \text{ kg}/\text{мм}^2$, вместо максимальных $44 \text{ kg}/\text{мм}^2$, согласно нормам. Указанное обстоятельство заставило ожидать от обоих проводов несколько более благоприятного эффекта, чем это предполагалось по расчету, по приведенным кривым рис. 16. Предположения эти до некоторой степени оправдались, о чем будет сказано ниже.

Рис. 19. Потеря напряжения в вольтах, нагрузка безындукционная; $\cos \varphi = 1$

Обе линии были смонтированы таким образом, что оба конца каждой из них были введены на испытательную станцию. Длина каждой линии была около $2 \times 277 \text{ м}$. Линия питалась генератором переменного тока 150 kVA при напряжениях от 80 до 200 В у генератора. Нагрузка производилась ламповым реостатом с параллельно включенной реактивной катушкой с регулируемым реактансом. Приборы были при-

³⁾ ETZ, № 4, 1915, стр. 44.

Таблица

Характеристики проводов из технического железа диаметром 3, 4, 5, 6 мм с коэффициентом крепости около kg/mm^2

№ стали и содержание углерода в %	№ образца	Диаметр образца мм	Обжатие в % или термобработка	Сечение мм ²	Удельное сопротивление $\Omega/mm^2 m$	На 1 км			Z_{max} R_g	$R_{w max}$ R_g	Средний $\cos \varphi$	Сила тока соответственно Z_{max} I_{max} А	Коэффициент крепости при разрыве P kg/mm^2	Импульсная токовая нагрузка А/мм ²
						Сопротивление постоянному току Ω	Импеданс Z_{max} Ω	Активное сопротивление $R_{w max}$ Ω						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
№ 1 0,07% С	2	3,03	80	7,22	0,123	17,05	28,6	28,1	1,68	1,65	0,98	6,5	69,7	27
№ 1 0,07% С	1	3,90	84,0	11,95	0,125	10,45	19,2	18,4	1,84	1,76	0,95	11,0	70,9	10,5
№ А 0,08% С	3	5,03	83,5	19,85	0,120	6,05	14,9	14,0	2,46	2,31	0,95	14,0	75,5	14
№ 2 0,116% С	1	5,98	72,0	28,20	0,137	4,86	13,9	12,7	2,86	2,61	0,92	14,0	70,7	13

Таблица

Сравнительная стоимость оборудования 1 км низковольтной и высоковольтной воздушных линий, выполненных нормальным оцинкованным проводом или специальным железным проводом

Название работ	Провод $\varnothing 3 \times 4$ мм			Провод $\varnothing 3 \times 5$ мм			Провод $\varnothing 3 \times 6$ мм		
	Провод железный нормальный	Провод железный специальный	Превышение или уменьшение против норм	Провод железный нормальный	Провод железный специальный	Превышение или уменьшение против норм	Провод железный нормальный	Провод железный специальный	Превышение или уменьшение против норм
НИЗКОВОЛЬТНЫЕ ЛИНИИ ПО НЕЗАСЕЛЕННОЙ МЕСТНОСТИ									
Рабсила									
Строительная часть									
Электрическая часть									
Итого									
Материалы									
Строительная часть									
Электрическая часть									
Итого									
Всего									
ВЫСОВОЛЬТНЫЕ ЛИНИИ 6 000 V НЕЗАСЕЛЕННОЙ МЕСТНОСТИ									
Рабочая сила									
Строительная часть									
Электрическая часть									
Итого									
Материал									
Строительная часть									
Электрическая часть									
Итого									
Всего									

Примечание. При определении сравнительной стоимости оборудования линий нормальным железным проводом сравнению со специальным железным проводом принималась: а) стоимость материала: специальный железный провод на 30% дороже нормального железного провода; б) стоимость рабочей силы: рабочая сила специального железного провода на 30% дороже рабочей силы с нормальным железным проводом.

использованы прецизионные Siemens-Halske. Для упрощения манипуляций и большей точности замеров был применен рубящий переключатель, позволявший переключать обмотки напряжений одних и тех же приборов к началу и концу линии. Вольтметров было применено два: одним замерялось падение напряжения в линии ($\frac{IZ}{2}$), а другим—потеря напряжения в начале линии до конца ($V_1 - V_2$). Частота переменного тока поддерживалась равной строго 50 периодов. Результаты опытов сведены в диаграммы рис. 17—20. Как видно из кривых, среднее значение „выигрыше“ на потере напряжения и мощности при переходе от случайного рыночного провода к специальному приблизительно равно 25%, что является весьма значительным.

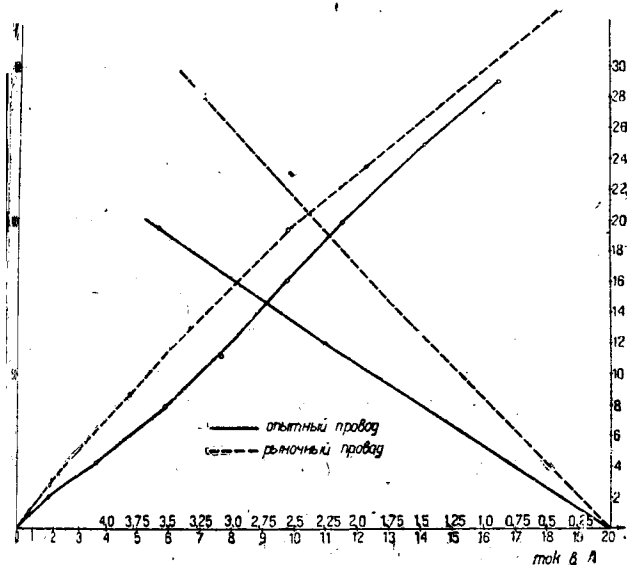


рис. 20. Падение напряжения в вольтах, нагрузка индуктивная; $\cos \varphi = 0,8$

Переходя к вопросу о монтаже линий с предлагаемым проводом, необходимо иметь в виду, что в тех случаях, когда длина пролета не фиксирована какими-либо побочными данными (как, например, расстоянием между вводами в доме), то обычно имеет место в высоковольтных линиях,—представляется возможным значительно увеличить длину пролета. Действительно, коэффициент крепости обычного железного стержневого провода согласно техническим условиям НКПТ, НКПТС, а также нормам ЦЭС равен 44 kg/mm^2 . Исследованный же тип проводов вследствие значительного наклепа дает соответственно 70 kg/mm^2 (см. в конце проект стандарта). Меньшая упругости и коэффициент температурного удлинения проводов предлагаемого типа почти не отличается от соответствующих чисел, даваемых „нормами“ ЦЭС для обычного провода. Поскольку при прочих равных условиях величина пролета пропорциональна корню квадратному из коэффициента крепости, постольку рассматриваемый тип провода позволяет увеличить длину пролета, приблизительно на 12,7%.

Указанная возможность увеличения длины пролета представляет сама по себе значительную экономическую выгоду в отношении строительной стоимости линий. Правда, здесь необходимо учесть некоторое удорожание монтажа вследствие большей жесткости специального провода и возможности прогиба опор и арматуры при натяжке частично ослабляющее выгоды от возможного удлинения пролета. Провести какой-либо из них не было хронометраж по монтажу линий при описанных опытах в МИЭСХ не представлялось возможным. Однако, если принять во внимание, что монтаж „специальных“ проводов при прочих равных условиях на 30% дороже монтажа обычных проводов, то мы получим довольно верное соотношение стоимостей, дающее некоторую перестраховку. Стоимость проводов специального типа согласно калькуляции завода „Пролетарский труд“ превышает стоимость обычных стержневых проводов не более чем на 34%. (Калькуляция произведена применительно к проводу диаметром 4 мм; для проводов больших диаметров вследствие меньших обжатий при протяжке можно ожидать еще более благоприятных показателей в отношении цены.) Причем, как видно из всего вышесказанного, изготовление проводов предлагаемого типа никаких технологических трудностей не представляет и

не может лечь дополнительной нагрузкой на нашу металлопроизводительность.

В табл. 4 приведены сравнительные стоимости 1 км линий, включая электрооборудование, столбы с установкой (по ценам Московской области), монтаж и социальные расходы по заработной плате (соцстрах и пр.) для типичных линий с железными проводами.

Как видно из приведенной таблицы, стоимость 1 км линии напряжением 600 В со специальным проводом обходится благодаря увеличению пролета даже дешевле таких же линий с обычным проводом. Для линий низкого напряжения, где пролет фиксирован не механической прочностью провода, а средним расстоянием между проводами, этого удешевления нет. Необходимо оговориться, что увеличение пролетов, допускаемое новым типом провода, потребует, конечно, некоторых специальных приемов при монтаже для компенсации усилившейся нагрузки на арматуру концевых или анкерных опор.

Для срачивания проводов авторы рекомендуют так называемую „британскую пайку“. Согласно опытам проф. П. А. Флоренского, „британская пайка“ с заливкой третником, оловом или свинцом дает прочность сродка не менее таковой же в целом месте. Замечания „руководящих указаний“ о том, что при подобной пайке произойдет отжиг провода и, следовательно, потеря его механической прочности не оправдываются опытом, так как рекристаллизация наклепанного металла и изменение его механических свойств начинается при температуре около 550°C , т. е. при температуре, значительно превосходящей температуру плавления третника или олова. Конечно, при срачивании требуется некоторая осторожность, так как неумелый монтаж может привести к отжигу.

Методы же сварки для проводов рассматриваемого типа безусловно исключаются.

Что касается общеэкономических преимуществ, которые может дать предлагаемый провод, то здесь необходимо отметить два момента. Во-первых, возможность экономии меди (и алюминия) и, во-вторых, строительную и эксплуатационную экономию в той области, где до сих пор применялись железные провода, т. е. независимо от уменьшения расхода меди.

Для решения того и другого вопроса в распоряжении авторов имелись материалы, касающиеся только электрификации сельского хозяйства. Однако полученные выводы можно распространить и на другие электрифицируемые отрасли народного хозяйства при наличии соответствующих исходных данных, и результаты расчетов в процентном отношении получаются, очевидно, подобные же полученным авторами.

Так как свойства железных проводов зависят от плотности тока, то для приближенных расчетов мы исходим из некоторой средней плотности тока (из осторожности взяты меньшие цифры) по ряду проектов сельскохозяйственных сетей за 1926—1931 гг. Именно приняты плотности тока для проводов: диаметром 4 мм— $0,25 \text{ A/mm}^2$, 5 мм— $0,1 \text{ A/mm}^2$ и 6 мм— $0,11 \text{ A/mm}^2$.

Сравнительный экономический расчет приурочен авторами к 1932 г. и второй пятилетке. При этом исходными данными служили намечаемые по плану расходы меди и железа разных сечений и соответствующие им длины линий. Исходя из этого, в табличных данных исчислено возможное уменьшение строительной (начальной) стоимости линий. Для определения полной годичной экономии учтено уменьшение расходов на амортизацию и текущий ремонт для линий (в среднем 6%) и уменьшение потерь энергии. Последнее определялось для двух возможных случаев: для минимального годового коэффициента пользования линиями по расчетному максимуму 500 час. и минимальной стоимости энергии 5 коп. за 1 kWh, а также среднему коэффициенту пользования 1000 час. и средней стоимости энергии в условиях сельскохозяйственной электрификации 10 коп. за 1 kWh. Активное сопротивление определялось для вышеуказанных плотностей тока по кривым рис. 15 для специального провода и данным инж. Детмара (подобные же результаты для обычного провода дают кривые инж. Ю. В. Скобелыцина и проф. В. С. Кулебакина).

Результаты расчетов сведены в табл. 5 и 6. Из приведенных в нижней строке таблиц цифр полной годовой экономии, нижние цифры дают вероятный размер экономии, а верхние—минимально возможный размер ее.

Что касается приблизительной экономии меди вследствие применения провода специального типа, то здесь, как и выше, указать более или менее точные цифры не представляется возможным.

Произведенные сравнительные подсчеты по ряду проектов с введением в расчет обычного специального проводов позволяют ожидать экономии меди около 5%.

В общей форме этот вопрос может быть решен приблизительно таким образом. При указанных выше средних плотно-

Таблица

Материал провода	Высокое напряжение			Итоги	Низкое напряжение			Общий
Диаметр провода в мм	Ø 4	Ø 5	Ø 6	—	Ø 4	Ø 5	Ø 6	—
Вес в т	225	1 800	115	2 140	115	930	60	1 100
Длина линий в км	725	3 760	165	—	375	1 940	85	—
Уменьшение (—) или увеличение (+) строительной стоимости в рублях	— 52 500	— 92 500	— 1 500	— 146 500	+ 5 400	+ 61 000	+ 7 200	+ 73 600
Годовое увеличение (+) или уменьшение (—) отчислений в рублях	— 3 100	— 5 500	— 90	— 9 500	+ 300	+ 3 600	+ 450	+ 4 350
Годовая экономия энергии в рублях при 500 час. и 5 коп. за 1 kWh 1 000 час. и 10 коп. за 1 kWh	1 900 7 600	5 600 22 500	150 500	— 7 650 — 30 500	— 1 000 — 3 900	— 2 900 — 11 500	— 70 — 250	— 3 970 — 15 650
Полная годовая экономия в рублях при 500 час. и 5 коп. за 1 kWh 1 000 час. и 10 коп. за 1 kWh	—	—	—	— 17 150 — 40 000	—	—	—	+ 380 — 11 300

Примечание. (—) означает экономию, а (+) перерасход.

Таблица

Материал провода	Высокое напряжение			Итоги	Низкое напряжение			Итоги	Общий итог
Диаметр провода в мм	Ø 4	Ø 5	Ø 6	—	Ø 4	Ø 5	Ø 6	—	—
Вес в т	4 600	36 800	4 600	—	3 000	24 000	3 000	—	—
Длина линий в км	14 800	77 000	6 600	—	9 700	50 000	3 800	—	—
Уменьшение (—) или увеличение (+) строительной стоимости в рублях	— 107 000	— 1 900 000	— 62 000	— 3 032 000	+ 46 000	+ 3 280 000	+ 320 000	+ 3 460 000	+ 428 000
Годовое увеличение (+) или уменьшение (—) отчислений в рублях	— 64 000	— 114 000	— 3 700	— 181 700	+ 28 000	+ 197 000	+ 19 200	+ 244 200	+ 62 500
Годовая экономия энергии в рублях при 500 час. и 5 коп. за 1 kWh 1 000 час. и 10 коп. за 1 kWh	— 38 800 — 158 000	— 116 000 — 460 000	— 5 300 — 10 600	— 160 100 — 628 600	— 25 000 — 102 000	— 75 000 — 300 000	— 3 000 — 12 200	— 103 000 — 414 200	— 263 100 — 1 042 800
Полная годовая экономия в рублях при 500 час. и 5 коп. за 1 kWh 1 000 коп. и 10 к. за 1 kWh	—	—	—	— 341 800 — 801 300	—	—	—	+ 141 200 — 170 000	— 200 100 — 980 900

Примечание. Знак (—) означает экономию, а знак (+) перерасход.

тока, импеданс проводов диаметром 6 мм в случае специального провода равен приблизительно 6,4 Ω/km и обычного 8,4 Ω/km , т. е. на 30% больше. Для проводов диаметром 1 мм получаются соответственно числа 6,9 и 8,6 Ω/km , т. е. разницей приблизительно 20%.

Как показывают расчеты сетей и как о том можно предположить а priori, экономия меди может явиться результатом расширения области применения проводов диаметром 6 мм и части 5 мм. Полагаем, что вследствие уменьшения импеданса на 25—30% область применения этих проводов расширится примерно в этих же пределах. Из осторожности принимаем расширение области для железных проводов (диаметр 6 мм) не более 20%. При этом для линий высокого напряжения экономится медь 10 mm^2 , а для низкого 6 mm^2 .

Принимая во внимание предполагаемые расходы проводниковой меди и железа в сельском хозяйстве на 1932 г. и на вторую пятилетку, получаем в результате расчетов возможную экономию меди в 1932 г. около 4,4%, или 286 т, и на вторую пятилетку около 3%, или 4 000 т.

Все приведенные выше расчеты являются, конечно, весьма приближенными, но учитывая то, что они исходят из наименее благоприятных предположений, можно судить о вполне реальной и значительной экономии, вносимой в народное хозяйство предлагаемым типом провода.

Дальнейшей экономии надлежит ожидать от применения многожильных железных проводов, детальное исследование которых является насущной задачей.

Детальные расчеты, сделанные авторами для проекта электрификации садово-виноградного хозяйства в районе Черноморского побережья Кавказа вполне подтвердили вышеприведенные экономические расчеты.

В результате описанных исследований предлагается тип многожильного железного провода для установки переменного тока, который должен удовлетворять данным табл. 7.

Механическая обработка при этом должна производиться путем протяжки без промежуточных отжигов из отожженной катушки указанных в таблице диаметров.

Что касается остальных коэффициентов, характерных для описанного провода, то, согласно произведенным испытаниям проводов, удовлетворяющих данным вышеприведенной таблицы, их можно принять равными следующим величинам: 1) температурный коэффициент сопротивления равен 4,63, 10^{-3} , 2) модуль упругости 18 500 = 19 000 kg/cm^2 , 3) коэффициент температурного давления равен 9,6, 10^{-6} .

На диаграмме рис. 16 приведены необходимые для расчетов кривые зависимости $Z \Omega/\text{km}$ от силы тока. При этом для сравнения пунктиром показаны соответствующие кривые, построенные по ланым «Руководящих указаний по применению железных проводов в установках сильного тока», одобренных ЦЭС (изд. 1931 г.).

Что касается способов электрического расчета линий на потерю напряжения, то согласно изложенному выше мы для практики считаем при $\cos \varphi$ в пределах 1,0—0,8 вполне достаточным пользование известной формулой: $e = CLIZ$, где $C = 2$ в линиях однофазного и $\sqrt{3}$ — в линиях трехфазного тока, I — сила тока в амперах, L — длина линий в километрах, Z — импеданс в омах на километр¹⁾.

Для расчетов на нагревание сил на потерю мощности можно исходить из кривых рис. 15, дающих зависимость между плотностью тока (средней по сечению) и отношением приращения активного сопротивления переменному току (50 циклов) к сопротивлению при постоянном токе.

Примемка проводов предлагаемого типа также весьма проста. Так как определение импеданса при разных силах тока довольно затруднительно, то в данном случае достаточно ограничиться испытаниями: а) содержание углерода, которое должно удовлетворить табл. 10, б) коэффициент крепости — не менее 70 kg/mm^2 и в) сопротивление постоянному току — не более 130—135 $\Omega/\text{km mm}^2$.

При затруднительности произвести первое испытание возможно ограничиться двумя последними испытаниями, дающими достаточную гарантию в качествах провода.

Таблица 7

Диаметр провода mm^2	Заготовка перед протяжкой. Диаметр катушки mm	Состав металла в %					Временное сопротивление на разрыв kg/mm^2	Сопротивление постоянному току $\Omega/\text{km mm}^2$	Максимальный импеданс переменного тока при 50 периодах Ω/km	Средний $\cos \varphi$
		C	Si	Mn	S	P				
3.	6,8—7,0	0,10—0,15	До 0,20	До 0,5	До 0,05	До 0,05	70—75	Не более 135	28—30	0,98
4.	9,5—10,0	0,10—0,15	До 0,20	До 0,5	До 0,05	До 0,05	70—75	135	19—20	0,95
5.	11—11,5	0,10—0,15	До 0,20	До 0,5	До 0,05	До 0,05	70—75	135	14,5—15,5	0,94
6.	11,5—12,0	0,10—0,15	До 0,20	До 0,5	До 0,05	До 0,05	67—73	135	13,5—14,5	0,92

О расчете проводов постоянного тока

Д. И. Марьяновский
Москва

В настоящей статье автор пытается разрешить задачу о расчете проводов на минимум материала в самом общем виде для случая, когда нагрузка вдоль провода задана некоторой функцией расстояния рассматриваемой точки от точки питания.

Задача решена, во-первых, для открытого провода, питаемого с одной стороны, и, во-вторых, для провода, питаемого с двух сторон.

Решение задачи состояло в том, чтобы по заданному закону распределения нагрузки вдоль провода, а также по заданным значениям либо потери мощности либо падения напряжения найти закон изменения сечения провода. Кроме того, для замкнутого провода попутно решался вопрос о нахождении наилучшей точки токораздела. Необходимо заметить, что получающиеся при этом формулы и выводы обладают наибольшей общностью.

Положим, что нам дан провод длиной a , питаемый с одной стороны (рис. 1). Пусть нагрузка вдоль провода изменяется по закону, определяемому функцией $\psi(x)$, считая начало координат в точке питания. Требуется найти закон изменения сечений при условии, чтобы потеря мощности в одном проводе не превышала P ватт.

Если ординаты кривой, изображающей функцию $\psi(x)$ на рис. 1, представляют собой значения тока, потребляемого на единицу длины провода в рассматриваемой точке, то ток, текущий в точке E , измеряется площадью $DECB$ и выражается интегралом

$$\int_x^a \psi(x) dx.$$

Пусть искомый закон изменения сечений выражается функцией $\varphi(x)$, тогда потеря мощности в проводе на протяжении dx будет:

$$\frac{1}{\sigma} \left[\int_x^a \psi(x) dx \right]^2 \frac{dx}{\varphi(x)},$$

где σ — удельная проводимость материала провода.

Потеря мощности от точки питания до конца провода, как было указано выше, равна P , а потому условие, которому подчиняется искомая функция $\varphi(x)$ может быть представлено в виде:

$$\int_0^a \left[\int_x^a \psi(x) dx \right]^2 \frac{dx}{\varphi(x)} = \sigma P. \quad (1)$$

¹⁾ Опыт в МИМЭСХ вполне подтверждает пригодность этой формулы.

Задача сводится к определению функции $\varphi(x)$ так, чтобы интеграл $\int_0^a \varphi(x) dx$ имел наименьшее значение и чтобы было соблюдено равенство (1).

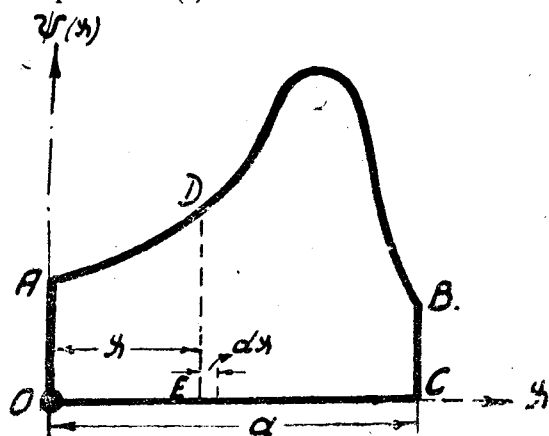


Рис. 1

Введем произвольный параметр h и, умножив на него обе части уравнения (1), составим первую вариацию определенного интеграла

$$\int_0^a \left\{ \varphi(x) + \frac{h}{\varphi(x)} \left[\int_x^a \varphi(x) dx \right]^2 \right\} dx.$$

Из вариационного исчисления известно, что нахождение вида функции $y = \varphi(x)$ из условия, что определенный интеграл $\int_{x_1}^{x_2} F(y, y', x) dx$ приобретает либо максимум либо минимум, приводит к такому уравнению:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dF}{dy'} \right) = \frac{dF}{dy},$$

которое, вообще говоря, есть дифференциальное уравнение второго порядка вида:

$$\frac{d^2 F}{dx dy'} + \frac{d^2 F}{dy dy'} y' + \frac{d^2 F}{dy'^2} y'' = \frac{dF}{dy}.$$

Однако поскольку подинтегральное выражение, т. е. функция F от y не зависит, то искомая функция $y = \varphi(x)$ определяется из уравнения:

$$\frac{dF}{dy} = 0.$$

Таким образом, для того чтобы решить задачу, необходимо от подинтегрального выражения взять производную по функции $y = \varphi(x)$ и приравнять ее нулю. Проведем это и воспользуемся равенством (1), получим:

$$\varphi(x) = \sqrt{h} \int_x^a \varphi(x) dx, \quad (2)$$

$$\sqrt{h} = \frac{1}{\sigma P} \int_0^a \int_x^a \varphi(x) dx dx. \quad (3)$$

Из уравнения (2) следует, что отношение силы тока к сечению, т. е. плотность тока в любой точке провода, должна быть постоянной величиной. Закон изменения сечения провода вдоль его длины окончательно может быть представлен так:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma P} \int_0^a \int_x^a \varphi(x) dx dx \int_x^a \varphi(x) dx. \quad (4)$$

Пример 1. Пусть нагрузка вдоль провода задана функцией

$$\psi(x) = i \sin \frac{\pi x}{a},$$

где a — длина провода, i — значение тока, потребляемого на единицу длины провода в точке, для которой $x = \frac{a}{2}$.

Закон изменения сечения будет:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \frac{1}{\sigma P} \int_0^a \int_x^a i \sin \frac{\pi x}{a} dx dx \int_x^a i \sin \frac{\pi x}{a} dx = \\ &= \frac{a}{\sigma P} \left(\frac{ai}{\pi} \right)^2 \left(1 + \cos \frac{\pi x}{a} \right). \end{aligned}$$

Объем материала привода выразится при этом так:

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^a \varphi(x) dx = \frac{a}{\sigma P} \left(\frac{ai}{\pi} \right)^2 \int_0^a \left(1 + \cos \frac{\pi x}{a} \right) dx = \\ &= \frac{1}{\sigma P} \left(\frac{a^2 i}{\pi} \right)^2. \end{aligned}$$

Решим теперь такую же задачу, т. е. найдем закон изменения сечения для провода, изображенного на рис. 1, при условии, чтобы падение напряжения до конца провода не превышало eV . Рассуждая так же, как и в предыдущей задаче, найдем, что падение напряжения на протяжении dx выра-

$$\frac{1}{\sigma} \left[\int_x^a \psi(x) dx \right] \frac{dx}{\varphi(x)}.$$

Полная потеря напряжения от точки питания до конца провода, как было указано выше, равна eV , а потому величине, которому подчиняется искомая функция $\varphi(x)$, может быть представлено в таком виде:

$$\int_0^a \left[\int_x^a \psi(x) dx \right] \frac{dx}{\varphi(x)} = \sigma e.$$

Как и выше, искомая функция $\varphi(x)$ должна быть найдена при условии, чтобы интеграл $\int_0^a \varphi(x) dx$ имел наименьшее значение и чтобы соблюдалось равенство (5).

Вводя параметр h , составим первую вариацию выра-

$$\int_0^a \left[\varphi(x) + \frac{h}{\varphi(x)} \int_x^a \psi(x) dx \right] dx$$

и приравняв ее нулю, найдем:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \sqrt{h} \left[\int_x^a \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} \\ \sqrt{h} &= \frac{1}{\sigma e} \int_0^a \left[\int_x^a \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx. \end{aligned}$$

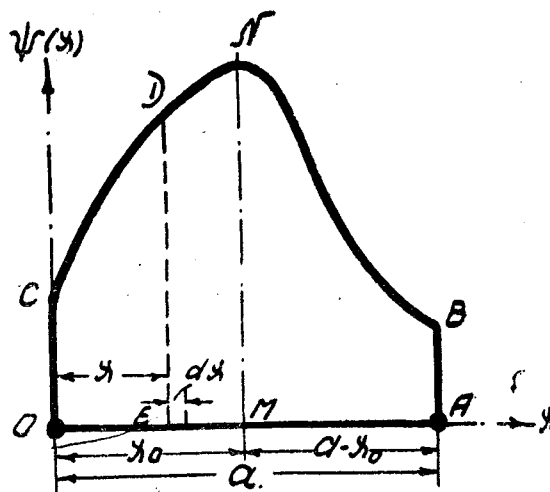


Рис. 2

Из уравнения (6) видно, что каков бы ни был закон изменения нагрузки вдоль провода, отношение корня квадрата из силы тока в данной точке к сечению провода в этой точке должно быть постоянной величиной. Искомый закон изменения сечения провода выразится так:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma e} \int_0^a \left[\int_x^a \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \left[\int_x^a \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Пример 2. Пусть нагрузка вдоль провода длиной a задана функцией $\psi(x) = ix$, где i — значение тока, потребляемого на единицу длины провода в точке, для которой $x = 1$. Закон изменения сечения:

$$1/e = \frac{1}{\sigma e} \int_0^a \left[\int_x^a ix \, dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \left[\int_x^a ix \, dx \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\pi}{8} \frac{a^2 i}{\sigma e} \sqrt{a^2 - x^2}.$$

Объем материала провода:

$$Q = \int_0^a \varphi(x) \, dx = \frac{\pi}{8} \frac{a^2 i}{\sigma e} \int_0^a \sqrt{a^2 - x^2} \, dx = \frac{\pi^2}{32} \frac{a^4 i}{\sigma e}.$$

Перейдем теперь к решению тех же задач для линии, питаемой с двух сторон. Прежде всего необходимо заметить, что кроме закона, по которому изменяются сечения, подлежит определению и точка токораздела, т. е. точка M (рис. 2). По-

ложим, что требуется найти минимум интеграла $\int_0^a \varphi(x) \, dx$, который может быть представлен так:

$$\int_0^a \varphi(x) \, dx = \int_0^{x_0} \varphi(x) \, dx + \int_{x_0}^a \varphi(x) \, dx. \quad (9)$$

Пусть потеря мощности в одном проводе равна P и пусть напряжения питательных пунктов (точки O и A) равны между собой.

Токи, текущие по бесконечно-малым участкам dx , в промежутках OM и AM выразятся соответственно через:

$$\int_x^{x_0} \psi(x) \, dx$$

$$\int_x^a \psi(x) \, dx.$$

Потеря мощности и падение напряжения на участке dx в промежутке OM могут быть представлены так:

$$\frac{1}{\sigma} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \right]^2 \frac{dx}{\varphi(x)}$$

$$\frac{1}{\sigma} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \right] \frac{dx}{\varphi(x)},$$

в промежутке AM соответственно через:

$$\frac{1}{\sigma} \left[\int_x^a \psi(x) \, dx \right]^2 \frac{dx}{\varphi(x)}$$

$$\frac{1}{\sigma} \left[\int_x^a \psi(x) \, dx \right] \frac{dx}{\varphi(x)}.$$

Условие, выражающее, что общая потеря мощности в проводе равна P , будет:

$$\int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \right]^2 \frac{dx}{\varphi(x)} + \int_{x_0}^a \left[\int_x^a \psi(x) \, dx \right]^2 \frac{dx}{\varphi(x)} = \sigma P. \quad (10)$$

Равенство падений напряжения до точки токораздела выразится так:

$$\int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \right] \frac{dx}{\varphi(x)} = \int_{x_0}^a \left[\int_x^a \psi(x) \, dx \right] \frac{dx}{\varphi(x)}. \quad (11)$$

Необходимо заметить, что падение напряжений от точек питания до точки токораздела могут быть представлены для промежутков OM и AM соответственно через:

$$\frac{1}{\sigma} \int_0^{x_0} \left[\psi(x) \int_0^x \frac{dx}{\varphi(x)} \right] dx$$

$$\frac{1}{\sigma} \int_{x_0}^a \left[\psi(x) \int_x^a \frac{dx}{\varphi(x)} \right] dx.$$

Таким образом могут быть написаны следующие равенства:

$$\int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \right] \frac{dx}{\varphi(x)} = \int_0^{x_0} \left[\psi(x) \int_0^x \frac{dx}{\varphi(x)} \right] dx,$$

$$\int_{x_0}^a \left[\int_x^a \psi(x) \, dx \right] \frac{dx}{\varphi(x)} = \int_{x_0}^a \left[\psi(x) \int_x^a \frac{dx}{\varphi(x)} \right] dx.$$

Эти соотношения могут быть выделены, впрочем, и чисто аналитически, как частные случаи равенства Дирихле.

Для решения поставленной задачи отбросим сначала равенство (11) и найдем минимум значения интеграла $\int_0^a \varphi(x) \, dx$ только при наличии равенства (10) и при условии, что значение x_0 не изменяется.

Умножим обе части уравнения (10) на произвольный параметр h и составим первую вариацию выражения:

$$\int_0^{x_0} \left\{ \varphi(x) + \frac{h}{\varphi(x)} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \right]^2 \right\} dx + \int_{x_0}^a \left\{ \varphi(x) + \frac{h}{\varphi(x)} \left[\int_x^a \psi(x) \, dx \right]^2 \right\} dx.$$

Приравняв ее нулю, найдем искомые значения функции $\varphi(x)$ для значений x в интервалах от x_0 до a и от x_0 до 0 .

Необходимо заметить, что полученные таким образом значения функции будут зависеть не только от x , но и от x_0 , которое, как было указано выше, при составлении первой вариации мы принимали не изменяющимся, а потому искомую функцию обозначим через $\varphi(x, x_0)$.

Эта функция при $0 < x < x_0$ имеет вид:

$$\varphi(x, x_0) = \sqrt{h} \int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \quad (12)$$

и при $x_0 < x < a$

$$\varphi(x, x_0) = \sqrt{h} \int_{x_0}^x \psi(x) \, dx. \quad (13)$$

Можно доказать, что решение, выраженное равенствами (12) и (13), дает действительно минимум. Поставив значения $\varphi(x, x_0)$, определяемые из уравнений (12) и (13), в уравнение (10), получим:

$$\sqrt{h} = \frac{1}{\sigma P} \left[\int_0^{x_0} \int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \, dx + \int_{x_0}^a \int_{x_0}^x \psi(x) \, dx \, dx \right]. \quad (14)$$

Постараемся теперь найти x_0 . Для этого выразим объем провода, т. е. $\int_0^a \varphi(x, x_0) \, dx$ через x_0 , от этого выражения возьмем производную по x_0 и приравняем ее нулю. Уравнения (12) и (13) можно представить при $0 < x < x_0$ в таком виде:

$$\int_0^{x_0} \varphi(x, x_0) \, dx = \sqrt{h} \int_0^{x_0} \int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \, dx \quad (15)$$

и при $x_0 < x < a$

$$\int_{x_0}^a \varphi(x, x_0) \, dx = \sqrt{h} \int_{x_0}^a \int_{x_0}^x \psi(x) \, dx \, dx. \quad (16)$$

Сложив почленно уравнения (15) и (16) и воспользовавшись уравнением (14), найдем:

$$\int_0^a \varphi(x, x_0) \, dx = \frac{1}{\sigma P} \left[\int_0^{x_0} \int_x^{x_0} \psi(x) \, dx \, dx + \int_{x_0}^a \int_{x_0}^x \psi(x) \, dx \, dx \right]. \quad (17)$$

Если взять производную по x_0 от правой части этого уравнения²⁾ и приравнять ее нулю, то мы получим значение $x_0 = \frac{a}{2}$, при котором интеграл $\int_0^a \varphi(x, x_0) \, dx$ имеет минимум.

Это значение в совокупности со значениями $\varphi(x, x_0)$, определяемыми из уравнений (12) и (13), обращает уравнение (11) в тождество. Таким образом $x_0 = \frac{a}{2}$, с одной стороны, обращая в нуль первую производную правой части уравнения (17), а с другой стороны, удовлетворяя уравнению (11), является единственным решением поставленной задачи и показывает, что точка токораздела должна делить расстояние между питательными пунктами пополам и совершенно не зависит от вида функции $\psi(x)$, т. е. от распределения нагрузки вдоль провода.

²⁾ Для этого нужно воспользоваться формулой дифференцирования определенного интеграла по параметру.

Окончательно закон изменения сечений вдоль провода можно представить такими уравнениями:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma P} \left[\int_0^{\frac{a}{2}} \int_x^{\frac{a}{2}} \psi(x) dx dx + \int_{\frac{a}{2}}^x \int_x^x \psi(x) dx dx \right] \int_x^{\frac{a}{2}} \psi(x) dx, \quad (18)$$

при $0 < x < \frac{a}{2}$ и

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma P} \left[\int_0^{\frac{a}{2}} \int_x^{\frac{a}{2}} \psi(x) dx dx + \int_{\frac{a}{2}}^x \int_x^x \psi(x) dx dx \right] \int_x^{\frac{a}{2}} \psi(x) dx, \quad (19)$$

при $\frac{a}{2} < x < a$.

Пример 3. Нагрузка вдоль провода задана функцией $\psi(x) = i \sin \frac{\pi x}{a}$, где значения a и i те же, что и в примере 1.

Как было доказано, $x_0 = \frac{a}{2}$ для любого вида функции $\psi(x)$; таким образом закон изменения сечения провода при $0 \leq x < \frac{a}{2}$ будет:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma P} \left[\int_0^{\frac{a}{2}} \int_x^{\frac{a}{2}} i \sin \frac{\pi x}{a} dx dx + \int_{\frac{a}{2}}^x \int_x^x i \sin \frac{\pi x}{a} dx dx \right] \int_x^{\frac{a}{2}} i \sin \frac{\pi x}{a} dx = \frac{2i^2}{\sigma P} \frac{a^3}{\pi^3} \cos \frac{\pi x}{a},$$

а при $\frac{a}{2} < x < a$

$$\varphi(x) = -\frac{2i^2}{\sigma P} \frac{a^3}{\pi^3} \cos \frac{\pi x}{a}.$$

Объем материала провода выразится так:

$$Q = \frac{1}{\sigma P} \left[\int_0^{\frac{a}{2}} \int_x^{\frac{a}{2}} i \sin \frac{\pi x}{a} dx dx + \int_{\frac{a}{2}}^x \int_x^x i \sin \frac{\pi x}{a} dx dx \right]^2 = \frac{4i^2}{\sigma P} \frac{a^4}{\pi^4}.$$

Решим, наконец, задачу, аналогичную предыдущей (рис. 2), с той лишь разницей, что задана нам будет не потеря мощности, а падение напряжения от питательных пунктов до точки токораздела. Полагая, как и выше, что напряжения питательных пунктов равны между собой, задаемся падением напряжения равным e . Ищем, далее, вид функции $\varphi(x)$ при условии, чтобы интеграл $\int_0^a \varphi(x) dx$ имел наименьшее значение и чтобы, кроме того, функция $\varphi(x)$ подчинялась следующим двум условиям:

$$\int_0^{\frac{a}{2}} \left[\frac{1}{\varphi(x)} \int_x^{\frac{a}{2}} \psi(x) dx \right] dx = \sigma e, \quad (20)$$

$$\int_{\frac{a}{2}}^a \left[\frac{1}{\varphi(x)} \int_x^x \psi(x) dx \right] dx = \sigma e. \quad (21)$$

Умножим обе части уравнений (20) и (21) соответственно на параметры h и l и составим первую вариацию выражения:

$$\int_0^{\frac{a}{2}} \left[\varphi(x) + \frac{h}{\varphi(x)} \int_x^{\frac{a}{2}} \psi(x) dx \right] dx + \int_{\frac{a}{2}}^a \left[\varphi(x) + \frac{l}{\varphi(x)} \int_x^x \psi(x) dx \right] dx$$

Приравняв ее нулю и полагая, как и прежде, что и функция зависит не только от x , но и от x_0 , найдем:

$$\varphi(x, x_0) = \sqrt{h} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}}$$

при $0 < x < x_0$ и

$$\varphi(x, x_0) = \sqrt{l} \left[\int_{x_0}^x \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}}$$

при $x_0 < x < a$.

Можно доказать, что это решение дает действительно минимум рассматриваемого интеграла. Подставив значения $\varphi(x)$ из уравнений (22) и (23) в уравнения (20) и (21), найдем

$$\sqrt{h} = \frac{1}{\sigma e} \int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx$$

и

$$\sqrt{l} = \frac{1}{\sigma e} \int_{x_0}^a \left[\int_{x_0}^x \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx.$$

Постараемся теперь выразить объем провода, т. е. $\int_0^a \varphi(x, x_0) dx$ через x_0 . Для этого представим уравнения (22) и (23) в виде:

$$\int_0^{x_0} \varphi(x, x_0) dx = \sqrt{h} \int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx,$$

$$\int_{x_0}^a \varphi(x, x_0) dx = \sqrt{l} \int_{x_0}^a \left[\int_{x_0}^x \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx.$$

Сложив почленно уравнения (26) и (27) и воспользовавшись значениями \sqrt{h} и \sqrt{l} из равенств (24) и (25), найдем:

$$\int_0^a \varphi(x, x_0) dx = \frac{1}{\sigma e} \left\{ \int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \right\}^2 + \frac{1}{\sigma e} \left\{ \int_{x_0}^a \left[\int_{x_0}^x \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \right\}^2.$$

Взяв производную от правой части этого уравнения и приравняв ее нулю, получим уравнение:

$$\int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} \psi(x) dx \right]^{-\frac{1}{2}} dx = \int_{x_0}^a \left[\int_{x_0}^x \psi(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \int_{x_0}^a \left[\int_{x_0}^x \psi(x) dx \right]^{-\frac{1}{2}} dx.$$

Если закон распределения нагрузки, т. е. функция $\psi(x)$ известна, то из уравнения (29) может быть найдено значение x_0 . Таким образом решение поставленной задачи заключается в уравнениях (22) и (23) при условии, что \sqrt{h} и \sqrt{l} определяются из уравнений (24) и (25). Значение x_0 может быть найдено из уравнения (29).

Пример 4. Нагрузка вдоль провода длиной a задана функцией $\psi(x) = ix$ (см. пример 2). Точка токораздела, при которой объем материала провода будет минимальный, определяется из уравнения

$$\int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} ix dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} ix dx \right]^{-\frac{1}{2}} dx = \int_{x_0}^a \left[\int_{x_0}^x ix dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \int_{x_0}^a \left[\int_{x_0}^x ix dx \right]^{-\frac{1}{2}} dx,$$

которое после интегрирования принимает вид

$$\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 = \left\{ \frac{a}{x_0} \sqrt{\left(\frac{a}{x_0}\right)^2 - 1} - \ln \left[\frac{a}{x_0} + \sqrt{\left(\frac{a}{x_0}\right)^2 - 1} \right] \right\} \ln \left[\frac{a}{x_0} + \sqrt{\left(\frac{a}{x_0}\right)^2 - 1} \right].$$

Корнем этого уравнения будет $x_0 = 0,516 a$. При этом закон изменения сечения провода в интервале $0 < x < x_0$ выразится:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma e} \int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} ix \, dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \left[\int_x^{x_0} ix \, dx \right]^{\frac{1}{2}} = 0,105 \frac{a^2 i}{\sigma e} \sqrt{0,266 a^2 - x^2},$$

а при $x_0 < x < a$

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma e} \int_{x_0}^a \left[\int_x^x ix \, dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \left[\int_x^x ix \, dx \right]^{\frac{1}{2}} = 0,129 \frac{a^2 i}{\sigma e} \sqrt{x^2 - 0,266 a^2}.$$

Объем материала провода:

$$Q = \frac{1}{\sigma e} \left\{ \int_0^{x_0} \left[\int_x^{x_0} ix \, dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \right\}^2 + \frac{1}{\sigma e} \left\{ \int_{x_0}^a \left[\int_x^x ix \, dx \right]^{\frac{1}{2}} dx \right\}^2 = 0,0552 \frac{a^4 i}{\sigma e}.$$

Существуют некоторые виды функции $\psi(x)$, при которых корень уравнения (29) равен $\frac{a}{2}$, т. е. точка токораздела делит пополам расстояние между питательными пунктами. В качестве примера приведем два вида таких функций:

1 кривая, определяемая функцией $\psi(x)$, симметрична относительно оси, уравнение которой $x = \frac{a}{2}$;

II—значение функции $\psi(x)$ в интервале от 0 до $\frac{a}{2}$ в k раз более или менее значений этой же функции в интервале от $\frac{a}{2}$ до a .

В заключение считаю своим приятным долгом выразить глубокую благодарность Н. Н. Боголюбову, который дал мне ряд ценных указаний, касающихся математической стороны затрагиваемого вопроса и доказательств некоторых положений, в этой статье не приведенных.

НОВОЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

К вопросу о механическом расчете шин¹⁾

А. Зингерман
Ленэнергострой

Выбор шин в закрытых распределительных устройствах обычно производится по нагреву рабочим током с последующей проверкой на термическую и динамическую устойчивость при коротком замыкании. В тех системах, где токи короткого замыкания сравнительно невелики, первый фактор—нагрев шин рабочим током—является определяющим в их выборе. Наоборот, в системах с большими токами короткого замыкания в выборе шин превалирующее значение может иметь термическая или динамическая устойчивость.

Если для увеличения термической устойчивости шин нет иного пути кроме увеличения сечения шин, т. е. увеличения количества затрачиваемого материала, то увеличение динамической устойчивости подчас возможно без излишней затраты материала,—применением чисто конструктивных приемов. Поэтому механический расчет шин дает оценку не только выбора сечения шин, но и общей шинной конструкции.

Механический расчет шин состоит из определения силы взаимодействия, максимального прогиба и напряжения в металле. В сложных шинах, состоящих из нескольких полос, отдельные полосы будут подвергаться взаимодействию от фазных токов и от токов одной и той же фазы, протекающих в отдельных полосах. Напряжения от этих двух сил будут в одних полосах вычитаться, а в других складываться. Очевидно, что в последнем случае получатся максимальные напряжения, которые и подлежат определению.

1. Определение силы взаимодействия

а) Коэффициент формы шины. Сила взаимодействия между двумя токоведущими проводниками определяется формулой Био-Савара;

$$P_1 = 2,04 I_1 I_2 \frac{L}{s} 10^{-8} \text{ kg}, \quad (1)$$

где I_1 и I_2 —амплитуды тока в проводниках, и здесь $l = a I_m$, а I_m —амплитуда симметричной составляющей тока короткого замыкания, a —коэффициент импульса;

L —длина проводника; здесь—расстояние между опорами (в сантиметрах);

s —расстояние между осями проводников (в сантиметрах).

Формула Био-Савара в таком виде верна только для проводников круглого или кольцевого сечения. Сила взаимодей-

ствия между прямоугольными проводниками может быть выражена следующим образом:

$$P = 2,04 k I_1 I_2 \frac{L}{s} 10^{-8} \text{ kg}, \quad (2)$$

где k —коэффициент, учитывающий формулу сечения проводника.

Первое выражение для коэффициента k в общем виде было выведено Dwight [6]:

$$k = \frac{s}{b_2 h_2} \left\{ 2h \left[(s+b)^2 - \frac{h^2}{3} \right] \arctg \frac{h}{s+b} + 2h \left[(s-b)^2 - \frac{h^2}{3} \right] \arctg \frac{h}{s-b} - 4h \left(s^2 - \frac{h^2}{3} \right) \arctg \frac{h}{s} + (s+b) \left[h^2 - \frac{(s+b)^2}{3} \right] \ln \left[\frac{(s+b)^2 + h^2}{s^2} \right] + (s-b) \left[h^2 - \frac{(s-b)^2}{3} \right] \ln \left[\frac{(s-b)^2 + h^2}{s^2} \right] - 2s \left(h^2 - \frac{s^2}{3} \right) \lg \frac{s^2 + h^2}{s^2} + \frac{2}{3} (s+b)^3 \ln \frac{s+b}{s} + \frac{2}{3} (s-b)^3 \ln \frac{s-b}{s} \right\}. \quad (3)$$

Значения s , b и h видны из рис. 1.

Пользование столь сложной формулой крайне неудобно, поэтому Dwight были построены кривые для k в зависимости от $\frac{s-b}{h+b}$ и для разных значений $\frac{b}{h}$ (рис. 1).

Для частных случаев, когда $b = 0$,

$$k = \frac{2s}{h} \arctg \frac{h}{s} - \frac{s^2}{h^2} \ln \left(1 + \frac{h^2}{s^2} \right) \quad (4)$$

и при $h = 0$

$$k = \frac{s}{h^2} \left[(s+b) \ln \left(1 + \frac{b}{s} \right) + (s-b) \cdot \ln \left(1 - \frac{b}{s} \right) \right]. \quad (5)$$

Этим формулам соответствуют две предельные кривые рис. 1.

Последние две формулы независимо от Dwight были выведены Романовским [18]. Для этих же двух случаев фирмой ASEA даются обратные кривые, т. е. значения $\frac{1}{k}$ [2]. Формула (4) была также выведена Biermans¹⁾.

¹⁾ В выводе формулы (4) Biermans исходил из энергетического баланса системы. В выражении для электромагнитной энергии Biermans была пропущена двойка в знаменателе, вследствие чего в формуле Biermans имеется лишняя двойка [3, 4].

¹⁾ Доклад, сделанный в ЦЭС на заседании комиссии по определению стандартного типа подстанций на 1932 г.

Из кривых рис. 1 видно, что при $\frac{s-b}{h+b} = 2$ коэффициент k

отличается от единицы максимума на 5%. При $\frac{s-b}{h+b} = 2,5+3$ максимальная разница составляет $1,6+2,5\%$. Практически разница будет еще меньше, так как для союзных стандартов шин отношение $\frac{b}{h} \ll 0,1$. В сложных шинах для определения k с достаточной степенью точности можно принимать весь ток сосредоточенным в одной из средних полос.

Формулы для k не учитывают влияние скин-эффекта. Они были выведены в предположении одинаковой плотности тока по всему сечению шины. Влияние скин-эффекта, как видно из рис. 2, может иметь большое значение, порядка $8-10\%$. Однако учет влияния скин-эффекта и эффекта близости (proximity-effect) весьма затруднителен и может быть определен только экспериментальным путем.

б) Учет распределения токов в отдельных полосах. Работы Clair [5], Papst [7] и особенно обстоятельная работа Швейкхагена [18] показали, что ток, протекающий в отдельных полосах одной и той же фазы, неодинаков. На рис. 3 дана диаграмма токов в трехполосной шине однофазной системы. Из диаграммы видно, что ток во внешней полосе со стороны обратного провода составляет 50% полного тока, а в средней полосе всего только 13%.

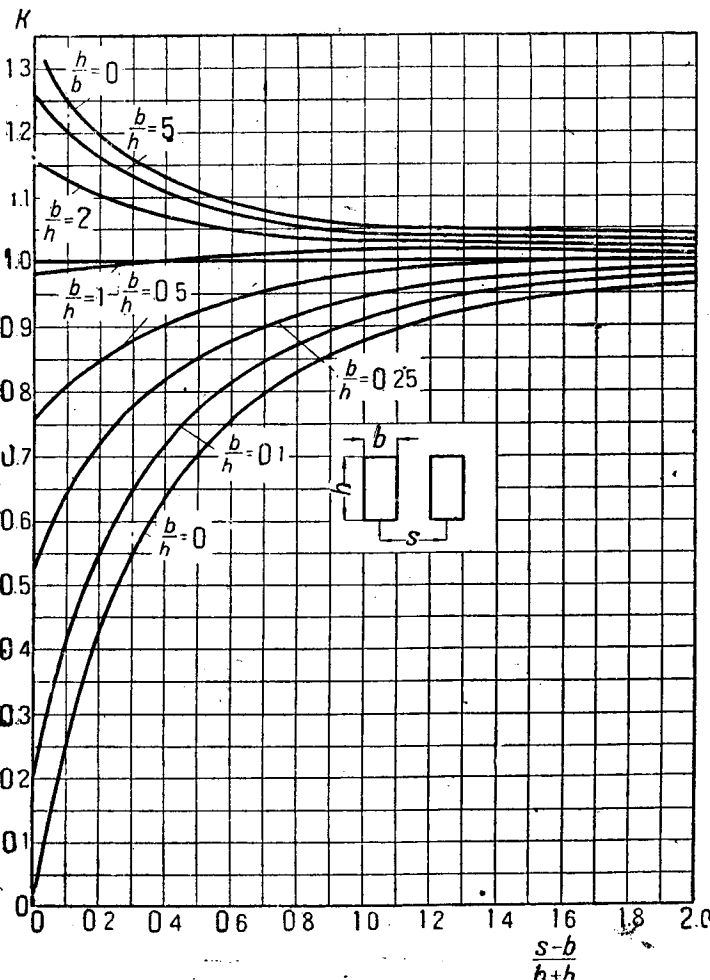


Рис. 1.

Покажем на частных примерах, как отражается неравномерное распределение токов на величину усилия между шинами. В трехфазной системе при расположении шин ребром друг к другу (рис. 4) влияние соседней фазы не будет отражаться на распределении токов в полосах, а будет только увеличивать неравномерность плотности тока в полосах. При таком расположении фаз можно поэтому принимать распределение тока в полосах таким же, как и в однофазной системе. Тогда ток во внешних полосах будет равен 44%, в средней — 13%. Если полосы не скреплены между собой прокладками, то сила взаи-

модействия между фазой А и внешней полосой фазы В будет:

$$P = 2,04 \text{ kI} \cdot 0,44 I \frac{L}{s} 10^{-8} = A \cdot 0,44 I^2 \text{ kg.}$$

Для средней полосы

$$P = A \cdot 0,13 I^2 \text{ kg.}$$

При равномерном распределении тока в полосах или жестком соединении полос между собой усилие, приходящееся на каждую полосу,

$$P = A \cdot 0,33 I^2 \text{ kg.}$$

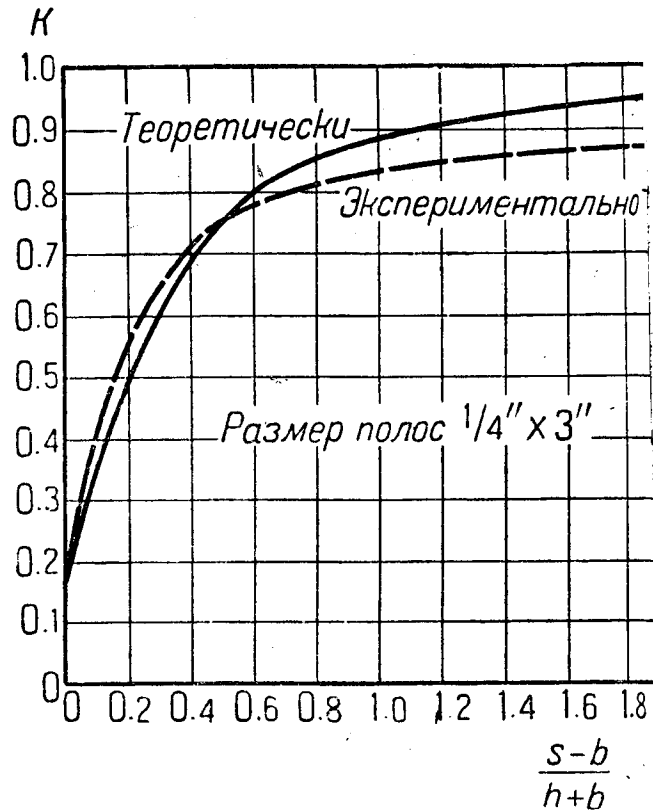


Рис. 2.

Как видно из примера, неравномерное распределение тока в полосах в такой же степени сказывается на распределении усилий на отдельные полосы. В приведенном примере внешние полосы перегружаются более чем на 30%. Жесткое соединение полос между собой в механическом отношении здесь совершенно компенсирует неравномерное распределение тока в полосах. Проверка достаточной жесткости соединения полос будет показана ниже.

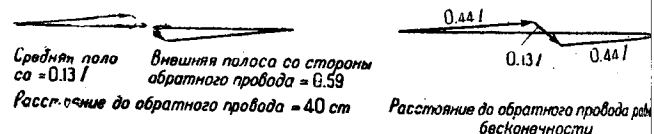


Рис. 3. Распределение тока в полосах трехполосной шины однофазной системы.

Рассмотрим второй пример: четырехполосные шины размером $4 \times 100 \times 10$ мм расположены плашмя друг к другу (рис. 5). Распределение тока в этой системе будет более благоприятное, чем в трехполосной шине. Если принять распределение токов, показанное на рис. 5, то сила взаимодействия между полосами 4 и 3 будет

$$P = 2,04 - 0,42 (0,4 I \cdot 0,1 I) \frac{L}{2} 10^{-8} = 0,0172 I^2 L 10^{-8} \text{ kg}$$

между полосами 4 и 2, а также 4 и 1

$$P = 2,04 - 0,51 (0,4 I \cdot 0,1 I) \frac{L}{4} 10^{-8} = 0,0104 I^2 L 10^{-8} \text{ kg}$$

$$P = 2,04 \cdot 0,75 (0,4 I \cdot 0,4 I) \frac{L}{6} 10^{-8} = 0,048 I^2 L 10^{-8} \text{ kg}$$

и общее усилие на полосу 4

$$P = (0,0172 + 0,0104 + 0,0408) I^2 L 10^{-8} \approx 0,0684 I^2 L 10^{-8} \text{ kg}$$

При равномерном распределении тока общее усилие на полосу 4

$$P = 2,04 (0,25I)^2 \left(\frac{0,42}{2} + \frac{0,51}{4} + \frac{0,75}{6} \right) L \cdot 10^{-8} = 0,059 I^2 L \cdot 10^{-8} \text{ kg.}$$

Вследствие неравномерного распределения тока полоса 4 перегружается на 16% от взаимодействия между полосами и дополнительно на 15% от взаимодействия между фазами. Если жестким соединением полос можно избежать усилие от взаимодействия между фазами и в этом случае равномерно распределить на все полосы, то устранить перегрузку внешних полос от взаимодействия между полосами можно только равномерным распределением тока. Здесь будет уместно указать, что последнее может быть достигнуто применением соответствующих конструкций шинодержателей. В подтверждение этого приведем результаты одного из опытов Швейкхагена.

В однофазной системе без обратного провода применение шинодержателя с замкнутым магнитным контуром вокруг шин дало в средней полосе 13% тока, шинодержателя с открытым магнитным контуром дало в средней полосе около 16%, шинодержателя из диамагнитного материала дало в средней полосе 20%.

Применением шинодержателей с замкнутым магнитным контуром только вокруг внешних полос или иным расположением полос (как, например, показано на рис. 6) можно достигнуть еще более благоприятного распределения тока в полосах.

Таким образом при определении силы взаимодействия между фазами для многополосных шин с жестким соединением

$$I_1 = I_2.$$

При определении усилий между полосами одной и той же фазы или усилием между фазами для шин, полосы которых не соединены между собой, необходимо учитывать распределение токов в полосах.

2. Определение прогиба шины

Определение прогиба шины будет целиком зависеть от решения вопроса о том, работает ли шина как гибкая нить, или как жесткая балка. Инж. В. Л. Иносовым [16] была сделана попытка производить расчет шин как гибкую нить.

Не касаясь сейчас ряда спорных положений, имеющих в статье, остановим сперва наше внимание на чисто математических ошибках, допущенных автором.

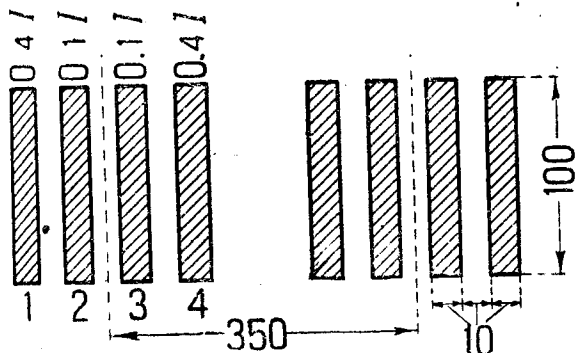


Рис. 5.

Для определения стрелы провеса и напряжения в шине при статической нагрузке инж. Иносов дает следующие формулы:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{3q L^4}{64 \omega E}} \text{ см,}$$

$$\sigma_g = \sqrt[3]{\frac{q^2 L^2}{24 \omega^2 E}} \text{ kg/cm}^2$$

где Y_c —стрела провеса, q —вес единицы длины шины, L —расстояние между опорными точками (пролет), ω —поперечное сечение шины, E —модуль упругости, σ_g —напряжение (механическое).

При динамической нагрузке

$$Y_g = \sqrt[3]{\frac{12 q L^4}{64 \omega E}} \text{ см,}$$

$$\sigma_g = \sqrt[3]{\frac{16 q^2 L^2}{24 \omega^2 E}} \text{ kg/cm}^2.$$

Это дает основание инж. Иносову сделать вывод, что при динамической нагрузке стрела провеса возрастает по сравнению

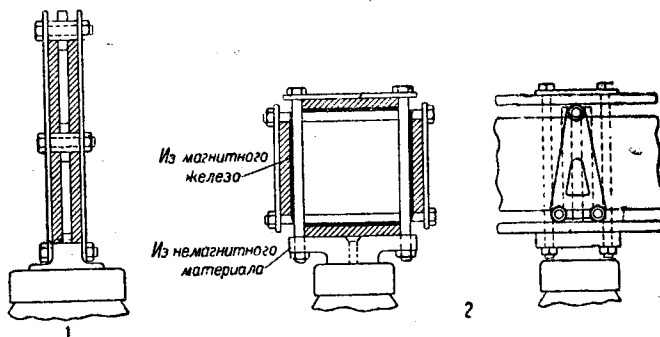


Рис. 6. 1—расположение полос в виде кажущегося полого квадрата; 2—расположение полос в виде полого квадрата.

нию со стрелой при статической нагрузке в $\sqrt[3]{4} = 1,58$ раз, а напряжение в $\sqrt[3]{16} = 2,52$ раза. Однако, если исправить арифметическую ошибку, допущенную автором в последней формуле, то напряжение в шине при динамической нагрузке будет

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{q^2 L^2}{96 \omega^2 E}} \text{ kg/cm}^2.$$

В то время как стрела провеса при динамической нагрузке увеличивается в 1,58 раза, напряжение, как видим, уменьшается в то же число раз.

Этот вывод опрокидывает все дальнейшие рассуждения инж. Иносова. Однако это не должно явиться неожиданностью, так как основное уравнение гибкой нити, дающее соотношение между натяжением и стрелой провеса будет

$$Y = \frac{q L^2}{8P},$$

т. е. натяжение, а следовательно, и напряжение будут обратно пропорциональны стреле провеса.

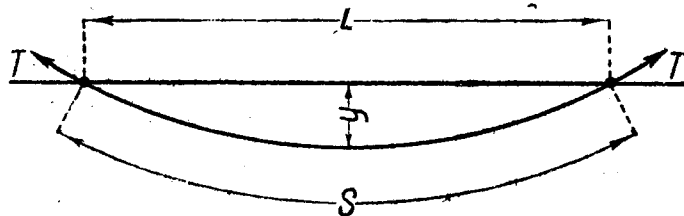


Рис. 7.

Чтобы объяснить парадоксальное с точки зрения выводов инж. Иносова явление, достаточно вспомнить, что разность между длиной нити s (рис. 7) и величиной пролета в L есть результат действительно большей длины подвешиваемой нити. Таким образом $s-L$ не есть растяжение нити, как это положил в основу своих выводов инж. Иносов. Понятно, что при увеличении длины нити s стрела провеса увеличивается, а натяжение и напряжения уменьшаются. Из выводов инж. Иносова следует наоборот: чем больше стрела провеса, тем больше должно было бы быть растяжение, и тем больше, следовательно, будут напряжения. Этого совершенно достаточно для заключения о полной непригодности примененного инж. Иносовым метода для расчета шин.

Продлим еще несколько наш анализ. Из основного уравнения гибкой нити следует, что при стреле провеса, равной

нулю, натяжение и напряжение нити теоретически равны бесконечности. Если мы с этим результатом подойдем к шине, то окажется, что тогда, когда шина не испытывает никаких электродинамических усилий, напряжения в ней очень велики, и они станут меньше как только эти усилия и обуславливаемый ими прогиб появятся.

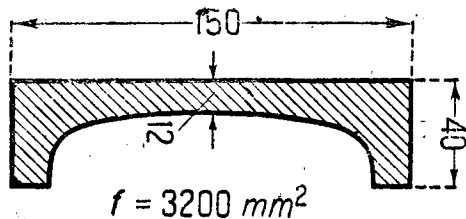


Рис. 8.

Основная предпосылка существования гибкой нити—это наличие внешнего натяжения Γ , приложенного к нити (рис. 7). Ничего подобного в шине не имеет места (все крайние изоляторы должны были бы, конечно, сломаться при спокойном или даже нагруженном состоянии шины).

Наличие прогибов у шин небольшой жесткости при спокойном состоянии (это может иметь место и у балок большой жесткости при соответственно больших пролетах) вызывается собственным весом шины, а не разностью между действительной длиной шины и величиной пролета. Прогиб жестких балок, обуславливающий растянутые и сжатые волокна в балке, не следует смешивать с провесом нити, вызывающим работу всего сечения нити исключительно на растяжение.

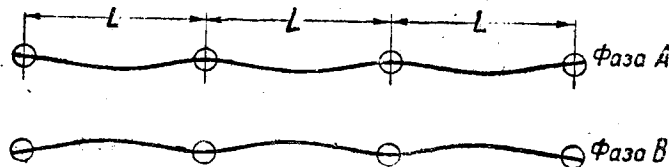


Рис. 9.

Не касаясь дальнейших методологических ошибок инж. Иносова, мы этим ограничим анализ этой статьи, так как этого совершенно достаточно, чтобы дать ответ на вышепоставленный вопрос. В заключение приведем только ряд мнений различных авторов и фирм по данному вопросу.

Британская алюминиевая компания [1] (The British Aluminium Company) и независимо от нее Германская алюминиевая компания [19] (VAM) предлагают рассчитывать поставляемые ими шины, как жесткую балку. Последняя фирма для увеличения жесткости шин вырабатывает также шины коробчатого сечения (рис. 8).

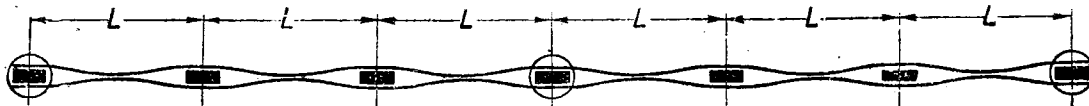


Рис. 10.

Фирмы SSW, AEG [8] и ASEA [1] рассчитывают шины, как жесткую балку. Шуриг (Schurig) [9] и [10] и Танберг (Tanberg) [12], представители: первый—фирмы GEC, а второй—Westinghouse, хотя и не касаются вопроса о расчете шин, однако расчет изоляторов производят, считая шину жесткой балкой. Напомним, что американцы употребляют шины толщиной почти исключительно в $1/4$ ". Бирманс [14] и Вудруф (Woodruff) [14] производят исследования шин, считая ее жесткой балкой. Вальтер [15] инж. фирмы SSW также рассчитывает шину, как жесткую балку. Наконец, испытания шин на изгиб, проведенные в Ленинграде в лабораториях Путьского Технологического и Института металлов, показали, что даже наименее жесткая из всех подвергшихся испытанию шин (алюминиевая сечением 50×60 мм) при пролете между опорами 50 см работала плашмя на изгиб, как балка, свободно лежащая на опорах.

Так как за исключением статьи инж. Иносова мы в литературе нигде не встречаем попыток рассматривать шину как гибкую нить, то мы считаем правильным производить механический расчет шин как жесткой балки.

Нет никакого основания, независимо от конструкции шинодержателей, при двух и большем числе пролетов считать шину свободно опертой, как это делает фирма SSW. Действительно, с каждой стороны промежуточной опоры шины будут подвержены действию равномерной нагрузки, поэтому свободный поворот шины на опоре может иметь место только в крайних опорах (рис. 9).

В зависимости от конструкции шинодержателей шина будет работать либо как неразрезная многоопорная балка (шина-держатель „Электроаппарата“ ПШ), либо как балка, жестко заделанная.

В первом случае наибольший изгибающий момент имеет место у предпоследней опоры и равен

$$M_0 = \frac{PL^2}{10} \text{ кг/см}$$

при трех и больше пролетах (l —длина пролета в сантиметрах).

В случае жесткого закрепления шины на опорах максимальный изгибающий момент

$$M_0 = \frac{PL^2}{12} \text{ кг/см}.$$

Максимальный изгибающий момент отдельных полюсов одной и той же фазы при их взаимодействии между собой зависит от того, как скреплены полюсы между собой. Если полюсы в пролетах скреплены между собой прокладками, то здесь имеются все условия жесткого закрепления шины на опорах (рис. 10). Максимальный момент будет определяться формулой (7); при отсутствии прокладок (рис. 11) момент будет зависеть, как и в случае междуполюсного взаимодействия, от конструкции шинодержателя.

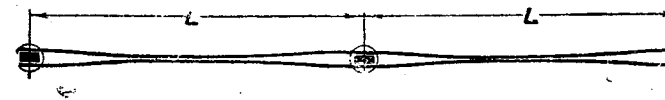


Рис. 11.

Формулы (6) и (7) дают выражение для максимального изгибающего момента при постоянной статической нагрузке. Сила взаимодействия между шинами является, как известно, периодической. Прогиб шин под действием любой силы может быть разложен по нормальной функции (рис. 12):

$$y = q_1 X_1 + q_2 X_2 + q_3 X_3 + \dots = \sum q_i X_i, \quad (8)$$

где q_i определяется частным решением дифференциального уравнения [20]:

$$a_i q_i'' + c_i q_i = Q_i; \quad (9)$$

Q_i —есть обобщенная сила:

$$Q_i = b_i P,$$

где P —сила взаимодействия между шинами.

Исследование колебаний шины с жестко закрепленными концами, произведенное проф. Николаи, показало, что главные колебания шины нечетного порядка, причем

$$a_i = \frac{G}{g} \cos h^2 m_i \cos^2 m_i;$$

$$b_i = \frac{2L}{m_i} \cos h m_i \sin m_i;$$

$$c_i = \frac{EI}{L^3} (2m_i)^4 \cos h^2 m_i \cos^2 m_i;$$

$$X_i = \cos h m_i \cos \frac{m_i x}{l} - \cos m_i \cos h \frac{m_i x}{l};$$

$$m_1 = 2,365; m_3 = 5,498; m_5 = 8,639.$$

Здесь G —вес всей шины.

$$L = 2l.$$

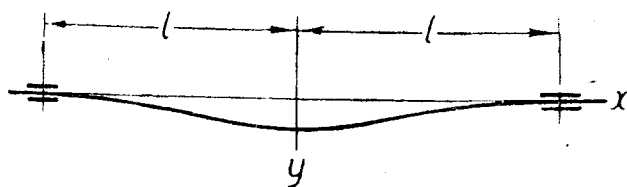


Рис. 12.

Если пренебречь затуханием симметричной составляющей, то полная сила тока короткого замыкания приближенно будет

$$I = I_0 (\cos \omega t - e^{-\alpha t})^2$$

и сила взаимодействия между шинами

$$P = k (\cos \omega t - e^{-\alpha t})^2.$$

Тогда

$$q_i = \frac{b_i}{p_i^2 a_i} - k \left\{ \frac{1}{2} + \frac{p_i^2}{p_i^2 + 4\alpha^2} l^{-2\alpha t} + \frac{p_i^2}{2(p_i^2 - 4\omega^2)} \cos \omega 2t + \left[\frac{(p_i + \omega)p_i}{(p_i + \omega)^2 + \alpha^2} + \frac{(p_i - \omega)p_i}{(p_i - \omega)^2 + \alpha^2} - \frac{p_i^2}{2(p_i^2 - 4\omega^2)} - \frac{p_i^2}{p_i^2 + 4\alpha^2} - \frac{1}{2} \right] \cos p_i t + \left[\frac{p_i}{(p_i + \omega)^2 + \alpha^2} + \frac{p_i}{(p_i - \omega)^2 + \alpha^2} - \frac{2p_i}{p_i^2 + 4\alpha^2} \right] \sin p_i t - \left[\frac{(p_i + \omega)p_i}{(p_i + \omega)^2 + \alpha^2} + \frac{(p_i - \omega)p_i}{(p_i - \omega)^2 + \alpha^2} \right] e^{-\alpha t} \cos \omega t - \left[\frac{p_i}{(p_i + \omega)^2 + \alpha^2} - \frac{p_i}{(p_i - \omega)^2 + \alpha^2} \right] \alpha e^{-\alpha t} \sin \omega t \} = \frac{b_i}{p_i^2 a_i} k \vartheta.$$

Здесь через ϑ обозначено выражение, стоящее в фигурных скобках, а

$$p_i = \sqrt{\frac{c_i}{a_i}} = (2m_i)^2 \sqrt{\frac{EI_g}{GL^3}}.$$

Подсчеты показывают, что в расчет следует принимать только основные колебания шины. Уже третья гармоника, как видно из рис. 13, 14 и 15, составляет менее 1% от основных колебаний.

Если шина подвержена действию постоянной статической нагрузки P_c , то частное решение дифференциального уравнения (9) даст для обобщенной координаты выражение

$$q_c = \frac{b}{p^2 a} P_c.$$

Для сравнений примем величину статической нагрузки, равной наибольшему значению силы взаимодействия.

Наибольшее значение силы взаимодействия будет, как известно, через полпериода и оно будет равно по абсолютной величине

$$P_c = k (\cos \omega t - e^{-\alpha t})^2_{t=0,01} = k (1 + e^{-0,01 \alpha})^2 = k \alpha^2,$$

причем

$$\alpha = 1 + e^{-0,01 \alpha}$$

есть коэффициент импульса. Отношение

$$\frac{q}{q_c} = \frac{\vartheta}{\alpha^2} = n$$

даст увеличение амплитуды прогиба вследствие действия колебательной силы.

Отсюда окончательное выражение для максимального изгибающего момента:

$$M_g = n M_c. \quad (11)$$

Выражение для ϑ показывает, что наибольшую амплитуду шина приобретает через некоторое время после начала короткого замыкания. Это время зависит от частоты свободных колебаний шины и равно от 0,25 до 2 ÷ 2,5 периодов.

Дальше будет показано, что

$$p = 2\pi c,$$

где c — частота свободных колебаний шины.

Тогда n может быть представлено как функция от c при постоянных ω и α . На рис. 16 даны кривые максимальных величин для n в зависимости от частоты свободных колебаний шин для двух крайних значений α и для тока с частотой в 50 пер/сек. Крайним значениям соответствуют импульсы тока в 1,775 и 1,27. Подсчеты, произведенные в ленинградском отделении Энергостроя, показали, что первое значение импульса тока следует принимать при расчетах генераторных шин и шин высокого напряжения собственных нужд, второе — при расчетах шин низкого напряжения собственных нужд станций или шин удаленных подстанций.

Из кривых видно, что при равенстве частоты свободных колебаний шины с частотой силы, т. е. с двойной частотой тока, имеет место полный резонанс, а при равенстве частоты свободных колебаний шины с частотой тока — частичный резонанс.

Теоретически амплитуда колебаний при полном резонансе равна бесконечности, практически с учетом затухания колебаний амплитуда бесконечных значений не достигает. Не только полного, но и частичного резонанса следует избегать, так как он может привести к нарушению правильной работы шин (нарушение соединений, закреплений шины может привести к перекристаллизации материала).

Для учета увеличения прогиба шины фирма ASEA в своих расчетах пользуется кривыми, подобными кривым, данным на рис. 16. Кривые ASEA построены для других значений α .

Формулы для определения частоты свободных колебаний шины были выведены рядом исследователей, физиками и техниками независимо друг от друга. Физики (Хвольсон и Себек) исходили из скорости распространения звука в стержне и для частоты свободных колебаний предложили формулу:

$$c = \frac{m^2 v}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{I}{\omega}}. \quad (12)$$

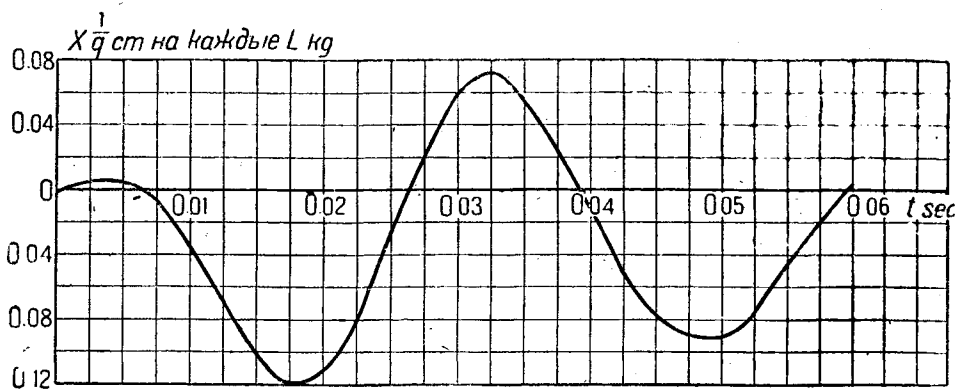


Рис. 13. Прогиб шины с частотой свободных колебаний 30 пер/сек от действия тока короткого замыкания с коэффициентом импульса $\alpha = 1,775$. 1-я гармоника. L — пролет между опорами в сантиметрах, q — вес 1 см шины в килограммах.

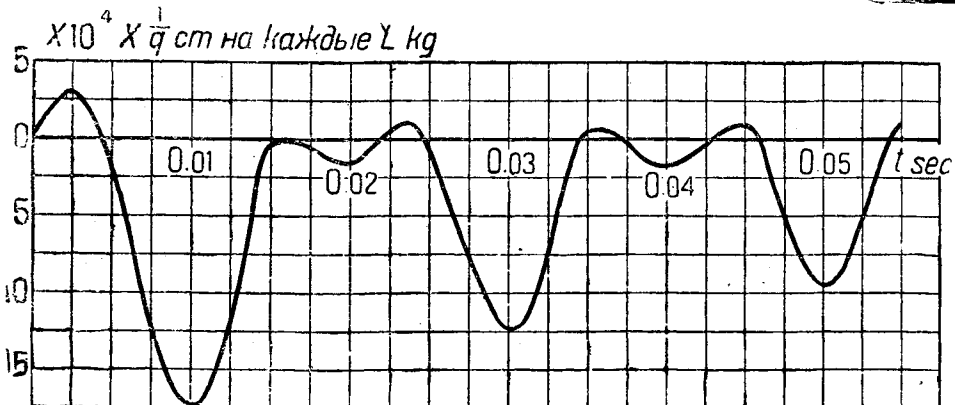


Рис. 14. Прогиб шины с частотой свободных колебаний 30 пер/сек от действия тока короткого замыкания с коэффициентом импульса $\alpha = 1,77$. 3-я гармоника. L — пролет между опорами в сантиметрах, q — вес 1 см шины в килограммах.

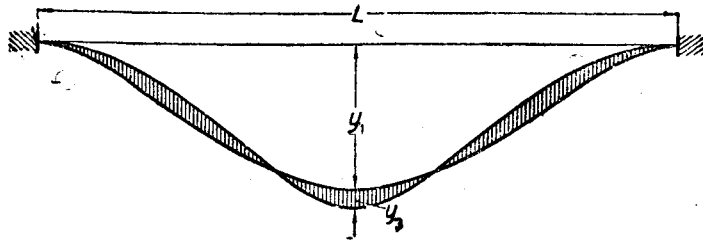


Рис. 15. Прогиб алюминиевой шины 100×10 мм, положенной плашмя, с жестко-закрепленными концами. $y_1 = 4,5$ см на каждые 130 кг усилий при коротком замыкании, $y_2 = 1,33$ см на каждые 130 кг постоянной нагрузки, $y_3 = 0,62 \cdot 10^{-2}$ см на каждые 1,30 кг усилий при коротком замыкании, $y_4 = 0,18 \cdot 10^{-2}$ см на каждые 130 кг постоянной нагрузки, $y = 1300$ мм,

Техники (Biermans [4] и Woodruff [14]) вывод формулы обосновали на дифференциальном уравнении движения. Формула, предложенная техниками, имеет вид:

$$c = \beta \sqrt{\frac{EI_g}{L^4 \gamma \omega}} \quad (13)$$

В обеих формулах приняты следующие обозначения:

- c —частота свободных колебаний;
- m —коэффициент основных колебаний (для жестко закрепленной балки $m = 4,73$, для свободно опертой $m = 3,15$);
- v —скорость распространения звука (для меди $v = 3,55 \cdot 10^8$ см/сек; для алюминия $v = 5,05 \cdot 10^8$ см/сек);
- I —момент инерции шины (см⁴);
- L —длина пролета (см);
- ω —поперечное сечение шины (см²);
- E —модуль упругости шины (кг/см²);
- γ —удельная плотность (для меди $\gamma = 8,9$; для алюминия $\gamma = 2,7$);
- g —ускорение свободно падающего тела ($g = 981$ см);
- β —коэффициент, зависящий от характера закрепления шины (для жестко заделанной $\beta = 112$, для свободно опертой $\beta = 49,9$).

Нетрудно показать, что обе формулы совершенно идентичны. Действительно, если ρ —масса 1 см длины шины в килограммах, то

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{Eg \cdot 1000}{\gamma}}$$

$$c = \frac{m^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg \cdot 1000}{L^4 \gamma \omega}}$$

Для балки жестко закрепленной

$$c = \frac{22,4}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg \cdot 1000}{L^4 \gamma \omega}} = 112 \sqrt{\frac{EIg}{L^4 \gamma \omega}} \quad (13a)$$

В сложных шинах с скрепленными полосами момент инерции I определяется как у сложной балки по формуле (22a) или (22b).

Формулы для частоты свободных колебаний шины выведены в предположении абсолютно жестких опор.

Шины на опорных изоляторах представляют собой систему с более или менее упругими опорами. Становится интересным выяснить, как будет влиять упругость опор на частоту свободных колебаний шины. Для этого воспользуемся приближенным методом.

Предварительно, для выяснения величины погрешности приближенного метода, определим этим методом частоту свободных колебаний шины, считая опоры абсолютно жесткими. Допустим, что под действием некоторой силы шина пришла в колебательное движение (рис. 17). Тогда в любой момент сумма потенциальной и кинетической энергии шины должна быть постоянна. Потери на внутреннее и внешнее сопротивление пренебрегаем.

Определим сначала кинетическую энергию шины. Если примем, что изогнутая ось шины будет такая же, как и статической нагрузке, тогда

$$Y = \frac{GL^3}{16EI} \left(\frac{x^2}{L^2} - \frac{4x^3}{3L^3} \right),$$

$$Y_m = \frac{GL^3}{192EI}$$

и

$$Y = 12 Y_m \left(\frac{x^2}{L^2} - \frac{4x^3}{3L^3} \right),$$

где G —вес одного пролета шин.

Выражение для кинетической энергии будет:

$$\begin{aligned} 2 \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{a}{2g} Y^2 dx &= \frac{144g}{g} Y_m^2 \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{x^2}{L^2} - \frac{4x^3}{3L^3} \right)^2 dx = \\ &= \frac{13}{35} \frac{GY_m^2}{2g}. \end{aligned}$$

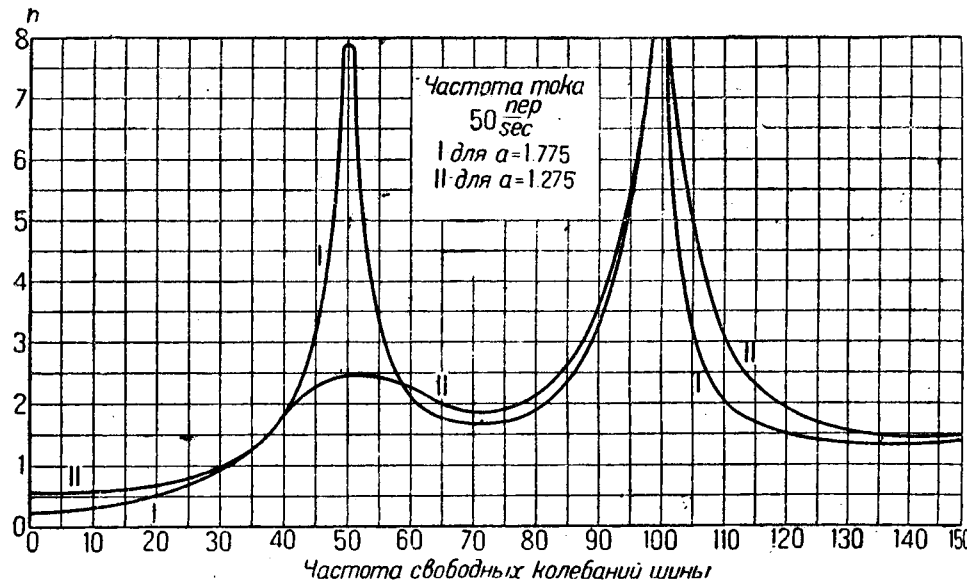


Рис. 16. Кривые увеличения прогиба шины в зависимости от частоты свободных колебаний шины.

Кинетическая энергия шины будет такая же, как кинетическая энергия упругой нити с сосредоточенным посреди весом:

$$G' = \frac{13}{35} G;$$

G' есть эквивалентный вес шины.

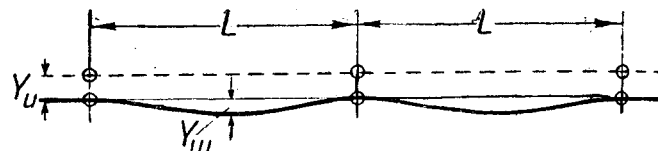


Рис. 17.

Потенциальная энергия изогнутой шины будет

$$\frac{Py}{2} = \frac{192EIy^2}{2L^3}.$$

Тогда

$$\frac{G'}{2g} \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \frac{192EIy^2}{2L^3} = \text{const.} \quad (14)$$

Дифференцируя последнее уравнение, получим уравнение движения шины:

$$\frac{G'}{g} \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{192EI}{L^3} y = 0$$

или, введя обозначение

$$\frac{192EIg}{G'L^3} = k^2,$$

$$Y'' + k^2 Y = 0. \quad (15)$$

Общий интеграл этого дифференциального уравнения будет

$$Y = A \cos kt + B \sin kt.$$

Постоянные интегрирования определяются из конечных условий. При $Y' = 0$;

$$t = \pi \text{ и } B = 0,$$

при $t = 0$;

$$Y = Y_m \text{ и } A = Y_m,$$

тогда

$$Y = Y_m \cos kt.$$

Шина совершает синусоидальные колебания с амплитудой Y_m и частотой

$$c = \frac{k}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{192EIg}{G'L^3}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{192}{13} \frac{EIg \cdot 1000}{\gamma \omega L^4}} = \\ = \frac{22,6}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg \cdot 1000}{\gamma \omega L^4}}.$$

Сравнивая с точным выражением для c (13а), находим, что погрешность менее 1%.

Рассмотрим теперь систему шин с упругими изоляторами на абсолютно жестком основании (рис. 15) и составим по-прежнему дифференциальное уравнение энергии всей системы.

$$\frac{G'_u}{2g} \left(\frac{dY_u}{dt} \right)^2 + \frac{a_u Y_u^2}{2} + \\ + \frac{G'_u}{2g} \left(\frac{dY_u}{dt} \right)^2 + \frac{a_u Y_u^2}{2} = \text{const.} \quad (17)$$

Здесь

$$a_u = \frac{192 F_u I_u}{L^3}, \quad a_u = \frac{13 E_u I_u}{L^3 u}.$$

G'_u и G_u — эквивалентный вес шины и изолятора.

Приняв для простоты, что отношение прогибов шин и изоляторов будет обратно пропорционально их жесткостям

$$\frac{Y_u}{Y_m} = \frac{a_m}{a_u},$$

и вставив отсюда значение Y_u в уравнение (17), получим:

$$\frac{G'_m}{2g} \left[\left(1 + \frac{a_m}{a_u} \right)^2 + \frac{G'_u a_m^2}{G'_m a_u^2} \right] \left(\frac{dY_m}{dt} \right)^2 + \dots + \\ + \frac{a_m}{2} \left(1 + \frac{a_m}{a_u} \right) Y_m^2 = \text{const.}$$

Дифференцирование даст уравнение движения шины

$$Y''_m \times k^2_{2u} Y = 0, \quad (18)$$

причем

$$k_{2u} = \frac{a_u \left(1 + \frac{a_m}{a_u} \right)}{\frac{G'_m}{g} \left[\left(1 + \frac{a_m}{a_u} \right)^2 + \frac{G'_u a_m^2}{G'_m a_u^2} \right]}.$$

Сравнивая уравнение (18) с (15), находим, что частота свободных колебаний шины, подобно (16), будет:

$$c = \frac{k_{2u}}{2\pi} = c_u \sqrt{\frac{1 + \frac{a_m}{a_u}}{\left(1 + \frac{a_m}{a_u} \right)^2 + \frac{c_m a_m}{c_u a_u}}} = \mu c_u. \quad (19)$$

Если изоляторы будут абсолютно жесткими, то из формулы (19) следует, что $\mu = 1$. При любом другом соотношении между жесткостью изолятора и шины всегда $\mu < 1$.

Упругость изоляторов уменьшает, таким образом, частоту свободных колебаний шин.

Приближенные теоретические подсчеты дают для изоляторов ВЭО группы ОА на 3 ÷ 10 кВ частоту свободных колебаний порядка $c_u = 250 + 500$ и $a_u = 1850 + 3150$. Частота свободных колебаний шин колеблется от 10 до 150 и $a_m = 0,1$ до 400. Таким образом для самого неблагоприятного случая изоляторы уменьшают частоту свободных колебаний шин приблизительно на 10%.

3. Определение напряжений в шине

а) Шина состоит из одной полосы. Напряжения (механические) в шине будут

$$\sigma = \frac{M_{\text{доф}}}{W} \text{ кг/см}^2, \quad (20)$$

где $M_{\text{доф}}$ — максимальный изгибающий момент от действия токов в фазах,

W — момент сопротивления шины.

б) Сложная шина состоит из нескольких нескрепленных между собой полос. В этом случае каждая полоса будет работать самостоятельно. Напряжения в каждой полосе будут арифметически суммироваться из напряжений, вызываемых взаимодействием токов в разных фазах, и напряжений, вызываемых взаимодействием токов в полосах одной и той же фазы. Первые напряжения подсчитываются по рис. 20, причем $M_{\text{доф}}$ — максимальный изгибающий момент наиболее погруженной (внешней) полосы.

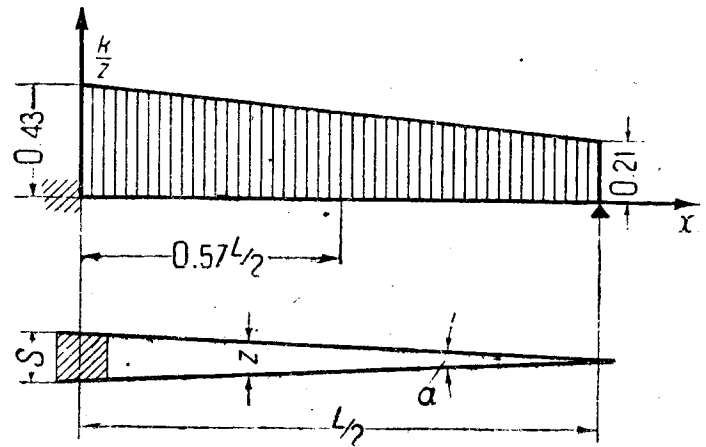


Рис. 18.

Что касается вторых напряжений, вызываемых взаимодействием токов в полосах, то их определение вызывает разногласие. Существует мнение, что напряжения от действия токов в полосах не могут превышать определенной величины.

Прогиб полос от взаимодействия токов при коротком замыкании может происходить только до их соприкосновения. Соприкосновение полос в середине пролета создает им подпорку и уменьшает пролет вдвое. Вследствие инерции нарастание прогиба не поспевает за силой, и в момент соприкосновения полос величина силы должна значительно уменьшиться. Под влиянием этих двух причин соприкосновение полос ограничивает наибольший возможный прогиб и этим определяет наибольшие возможные напряжения в полосе от взаимодействия токов в них.

Математический анализ вопроса, однако, не подтверждает этого мнения.

Рассмотрим двухполосную шину размером $2 \times 100 \times 10$ мм и пролетом $L = 130$ см, показанную на фиг. 11. Если импульс тока короткого замыкания $I = 100\,000$ А, то сила взаимодействия между полосами

$$P_c = 2,04 (0,5 I)^2 k \frac{L}{s} 10^{-8} =$$

$$= 2,04 \cdot 0,25 \cdot 10^{10} \cdot 0,4 \frac{130}{2} 10^{-8} = 1\,320 \text{ кг.}$$

Частота свободных колебаний полосы

$$c = 112 \sqrt{\frac{EI_g}{\gamma \omega L^4}} = 112 \sqrt{\frac{0,65 \cdot 10^6 \cdot 0,83 \cdot 981}{2 \cdot 7 \cdot 10 \cdot 130^4}} \approx 30.$$

Изоляторы принимаем абсолютно жесткими, тогда

$$P_g = n P_c = 1,08 \cdot 1\,320 = 1\,425 \text{ кг.}$$

Максимальный прогиб под действием силы P_g

$$F_{gm} = \frac{P_g L^3}{384 EI} = \frac{1\,425 \cdot 130^3}{384 \cdot 0,65 \cdot 10^6 \cdot 0,83} = 14,9 \text{ см.}$$

Кривая прогиба полосы в зависимости от времени действия силы дана на рис. 13. Кривая показывает, что полоса достигает максимального прогиба приблизительно через $\frac{3}{4}$ периода.

да. Прогиб в 0,5 см полоса получит через $\frac{3}{8}$ периода, т. е. соприкосновение полос произойдет ранее достижения силы своего максимума (через полпериода).

Дальнейшее поведение полосы можно легко выяснить, если пренебречь ускорением, которое полоса имеет в момент соприкосновения (этим условия только облегчаются).

Допустим, что к началу действия силы полоса уже имела подпор в середине пролета.

Тогда сила взаимодействия между полосами на единицу длины будет (рис. 18)

$$P_c = 2,04 \cdot 0,25 \cdot 10^2 \frac{k}{Z} = 51 \frac{k}{Z} \text{ г/см.}$$

Отношение $\frac{k}{Z}$ является величиной переменной. На рис. 18 дана кривая $\frac{k}{Z} = f(\delta)$, причем при построении кривой было принято для простоты, что изогнутая ось полосы представляет собой прямую и $\cos \alpha = 1$.

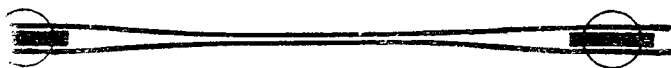


Рис. 19.

Кривая $\frac{k}{Z}$ имеет очень слабый изгиб и в дальнейших подсчетах принята за прямую; площадь, образуемая ею, дает распределение нагрузки на полосу.

Максимальный изгибающий момент, расположенный на расстоянии $\sim 0,57 \frac{L}{2}$, будет:

$$F_{gm} = \frac{n P_c L^4}{185 E I} + \frac{n P''_c L^4}{209,6 F I} = \frac{65 \cdot 51}{0,65 \cdot 10^6 \cdot 0,83} \left(\frac{0,21}{125} + \frac{0,11}{209,6} \right) = 2,8 \text{ см.}$$

Частота свободных колебаний подпертой полосы

$$c = 116 \text{ и } n = 1.$$

Сила, действующая на полосу $P_y = 1080 \text{ кг}$, и прогиб, вызываемый ею, столь велики, что соприкосновение полос не ограничится только одной точкой. Дальнейшее соприкосновение полос будет, очевидно, распространяться вдоль по полосам, начиная от первой точки. На испытательной станции одной из крупных германских электротехнических фирм такое явление действительно наблюдалось — полосы шины имели форму, показанную на рис. 19.

Таким образом нет пока никакого основания предполагать, что напряжения в полосах от действия токов, протекающих в них, не могут превысить критических значений.

Суммарные напряжения в полосах будут:

$$\sigma = \frac{M_{\text{дф}}}{W_1} + \frac{M_{\text{гн}}}{W_2}. \quad (21)$$

Здесь $M_{\text{гн}}$ — максимальный изгибающий момент от действия токов, протекающих по полосам, W_1 и W_2 — момент сопротивления полос относительно осей, перпендикулярных к направлению сил.

с) Сложные шины с несколькими скрепленными между собой полосами (рис. 20). Каждая полоса в сложной балке будет работать, как часть балки, под влиянием взаимодействия между фазами и самостоятельно под влиянием взаимодействия с другими полосами той же фазы. Если шины разных фаз расположены друг к другу плашмя (рис. 21, фазы А и В), то, так как полосы обладают даже при небольших пролетах некоторой гибкостью, во внешних полосах будут волокна, работающие и на изгиб и на растяжение. Однако, если обеспечить достаточную жесткость шины, как балки, то можно с некоторым приближением считать, что шина работает, как сложная балка. Этим объясняется, почему эта точка зрения придерживается в своих расчетах и фирма SSW.

Достаточная жесткость сложных шин при расположении шин разных фаз друг к другу ребром диктуется необходимостью распределить нагрузку поровну на все полосы. Та образом наибольшие напряжения будут определяться (рис. 22) здесь W_1 — момент сопротивления шины как сложной балки.

При расположении фаз по типу А и В (рис. 21):

$$W_1 = \frac{2 I_1}{H}; I_1 = n I_0 + \Sigma \omega a^2.$$

I_0 — момент сопротивления полосы относительно оси, проходящей через свой центр тяжести;

n — количество полос;

ω — площадь поперечного сечения полосы;

a — расстояние от оси, проходящей через центр тяжести каждой полосы до оси шины.

При расположении фаз по типу В и С:

$$W_1 = n W_0, W_0 = \frac{b h^2}{6}. \quad (22)$$

W_2 — момент сопротивления каждой полосы.

$$W_2 = \frac{b h_2^2}{6}.$$

При любом количестве равных расстояний между прокладками и при $l_1 > l_2$ наиболее опасным является сечение у одного изолятора. При $l_1 < l_2$ напряжения следует проверять для каждого пролета. Изгибающий момент $M_{\text{дф}}$ в середине пролета будет в два раза меньше, чем у концов.

д) Проверка жесткости шины. В случае расположения шин друг к другу плашмя проверка жесткости шин производится на касательные усилия и на прогиб полосы.

При прогибе шины полосы стремятся сдвинуться друг относительно друга. Возникающие при этом касательные усилия

$$P_t = \frac{Q}{L I_1} \left(\frac{H^2}{4} - Z^2 \right).$$

Q — прерывающая сила в данном сечении.

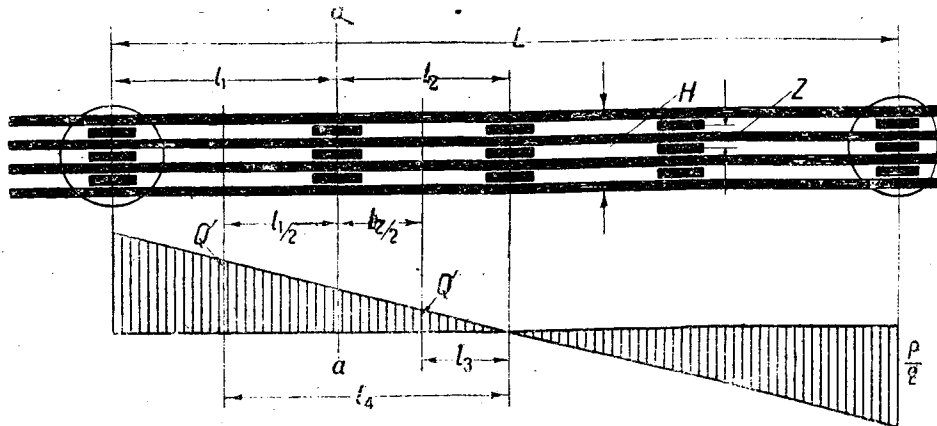


Рис. 20. Эпюра прерывающих сил

Остальные обозначения видны из рис. 20.

Болты в сечении $a-a$ должны выдержать срезающее усилие

$$T = \frac{P'_t + P''_t l_1 + l_2 h}{2} = \frac{P (l_1 + l_2) (l_3 + l_4) (H^2 - 4 z^2) h}{32 I Z}. \quad (23)$$

Вследствие редкого и непродолжительного действия короткого замыкания могут быть допускаемы на срез болтов перенапряжения в 30 ÷ 50% (диаметр дыр для болтов должен быть не более, чем на 0,5 мм диаметра болта).

Проверка на прогиб. Максимальный прогиб внешних полос от действия токов в полосах

$$F_{gm} = \frac{n P Z^3}{384 E I_0} \text{ см} \quad (24)$$

по отношению к расстоянию между полосами не должен превышать нескольких процентов.

Расположение шин ребром друг к другу. Усилия, стремящиеся срезать болты, будут, очевидно, равно разности усилия от взаимодействия внешней и средней полосы с другими фазами. Это усилие будет пропорционально току во внешней и в средней полосах.

Срезающие усилия, испытываемые каждым болтом, будут пропорциональны прогибу полосы в данном сечении. Наибольшие усилия будут испытывать болты в середине пролета. Если обозначить разность усилий в полосах через P_p и отношение прогибов крайних болтов к максимальному прогибу через φ , то срезающие усилия на средние болты будут (рис. 20):

$$P_c = \frac{P_p}{1 + \Sigma \varphi} \quad (26)$$

$$\varphi = 16 \left(\frac{x^2}{L^2} - 2 \frac{x^3}{l^3} + \frac{x^4}{L^4} \right). \quad (27)$$

где x —расстояние от опоры до болта.

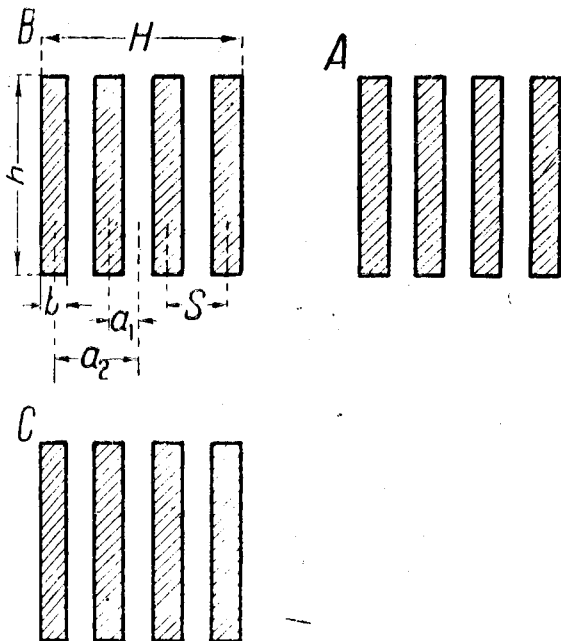


Рис. 21

Формула (26) показывает, что проверку жесткости шин при их расположении ребром друг к другу производить излишне. Действительно, если P_p будет равно даже 1000 kg, то и тогда достаточен один болт диаметром в $1/2$ ".

е) Расположение фаз. Рассмотрим, как влияет на величину напряжений в шинах расположение фаз. В дальнейшем мы будем сравнивать напряжения в шинах трехфазных систем, показанных в таблице, при уравновешенном трехфазном токе с напряжениями при однофазном токе, протекающем по двум фазам. Амплитуда тока и расстояние между фазами в обоих случаях приняты одинаковыми. При трехфазном уравновешенном токе усилия, а следовательно, и напряжения в шинах круглого сечения будут равны или меньше, чем при однофазном [8], [18]. В шинах прямоугольного сечения напряжения от действия трехфазного тока могут быть и больше, чем при однофазном.

Рассмотрим систему, расположенную по вершинам треугольника (рис. 22).

$$\begin{aligned} \sigma_{3\phi} &= \sigma_b + \sigma_a' + \sigma_a'' = \frac{kP_b}{W_b} + \frac{kP_a}{W_b} \cos \alpha + \\ &+ \frac{kP_a}{W_a} \sin \alpha = \frac{kP_b}{W_b} [\sin \omega t \sin (\omega t - 120) + \\ &+ \beta_a \sin \omega t \sin (\omega t - 240) + \beta_b \gamma \sin \omega t \sin (\omega t - 240)], \end{aligned}$$

$$\beta_a = \frac{P_a}{P_b} \cos \alpha,$$

$$\beta_b = \frac{P_a}{P_b} \sin \alpha,$$

$$\gamma = \frac{W_b}{W_a}$$

в однополюсных шинах

$$\gamma = \frac{b}{h}$$

или

$$\begin{aligned} \sigma_{3\phi} &= \frac{kP_b}{W_b} [\sin \omega t \sin (\omega t - 120) + (\beta_a + \\ &+ \beta_b \gamma) \sin \omega t \sin (\omega t - 240)] = \frac{1}{4} [1 + \beta_a + \beta_b \gamma] \cos 2 \omega t - 1 - \\ &- (1 - \beta_a - \beta_b \gamma) \sqrt{3} \sin 2 \omega t - (1 + \beta_a + \beta_b \gamma) \frac{P_b}{W_b} = \\ &= p \frac{kP_b}{W_b} \end{aligned}$$

и

$$p = \frac{1}{4} [(1 + \beta_a + \beta_b \gamma) \cos 2 \omega t - (1 - \beta_a - \beta_b \gamma) \sqrt{3} \sin 2 \omega t - (1 + \beta_a + \beta_b \gamma)].$$

Найдем максимум функции.

$$\frac{dp}{dt} = (1 + \beta_a + \beta_b \gamma) \sin 2 \omega t + (1 - \beta_a - \beta_b \gamma) \sqrt{3} \cos 2 \omega t;$$

$$\operatorname{tg} 2 \omega t = \frac{\beta_a + \beta_b \gamma - 1}{\beta_a + \beta_b \gamma + 1} \sqrt{3}.$$

При однофазном токе наибольшие напряжения получатся, если ток будет протекать по фазам 1 и 2:

$$\sigma_{1\phi} = \frac{kP_b}{W_b}$$

и отношение

$$\frac{\sigma_{3\phi}}{\sigma_{1\phi}} = p$$

или

$$\sigma_{3\phi} P \sigma_{1\phi} \quad (28)$$

дает величину напряжений при трехфазном уравновешенном токе в зависимости от расположения фаз, выраженную через напряжения при однофазном токе.

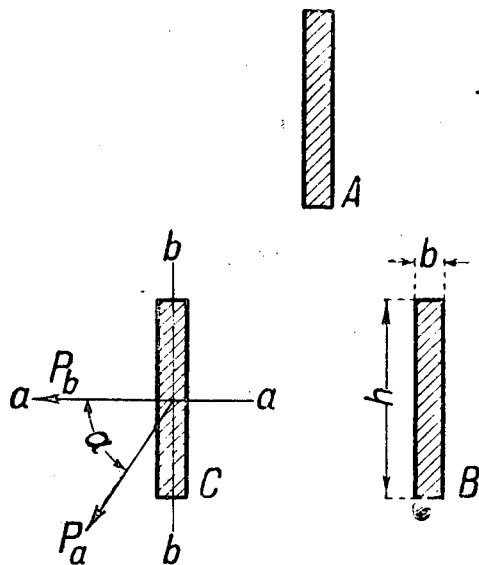
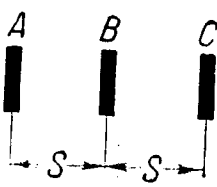
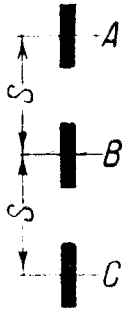
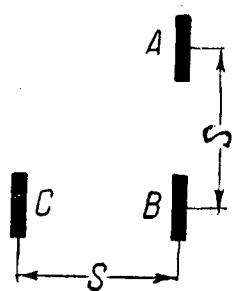
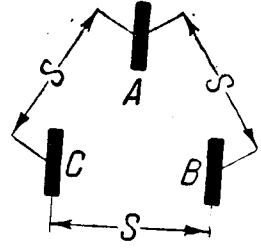


Рис. 22

В приводимой таблице рассматриваются различные часто принятые на практике трехфазные системы.

Кривые для P в зависимости от γ для различных систем даны на рис. 23. Как видно из кривых, только при расположении фаз по системе IV напряжения от действия трехфазного уравновешенного тока могут быть больше.

г) Допускаемые напряжения при коротком замыкании. Определяемые выше максимальные напряжения в шинах кратковременны и весьма редки. При коротких замыканиях в шинах могут быть допущены перенапряжения, не вызывающие, однако, остаточных деформаций. Следовательно, допускаемыми напряжениями в шинах от действия токов короткого замыкания следует принимать предел упругости шинного материала. В частности алюминий, как известно, не следует закону Гука и не имеет по существу предела упругости. Под пределом упругости для алюминия обычно принимают усилие, при котором остаточные деформации не превышают 0,2%. Уменьшение допускаемого напряжения для алюминия ниже условного предела упругости не имеет никаких оснований.

Расположение фаз	Параметры системы	P и $\lg 2 \omega t$
	шина C $\alpha = 0$ $W_a = W_b$ $k_b = 2 k_a$	$\beta_a = 0,5$ $\beta_b = 0$ $\gamma = 1$ $\omega t = 75^\circ$ $P = 0,808$
	шина B $\alpha = 0$ $W_a = W_b$ $k_b = k_a$	$\beta_a = 1$ $\beta_b = 0$ $\gamma = 1$ $\omega t = 90^\circ$ $P = 1$
	шина C $\alpha = 90^\circ$ $W_a = W_b$ $k_b = 2 k_a$	$\beta_a = 0$ $\beta_b = 0,5$ $\gamma = 1$ $\omega t = 75^\circ$ $P = 0,808$
	шина B $\alpha = 90^\circ$ $W_a = W_b$ $k_b = k_a$	$\beta_a = 0$ $\beta_b = 1$ $\gamma = 1$ $\omega t = 90^\circ$ $P = 1$
	шина C $\alpha = 45^\circ$ $k_b = \sqrt{2} k_a$	$\beta_a = 0,5$ $\beta_b = 0,5$ $\lg 2 \omega t = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 3} \sqrt{3}$ $P = \frac{1}{8} [(3 + \gamma) \cos 2 \omega t - (1 - \gamma) \sqrt{3} \sin 2 \omega t - (3 + \gamma)]$
	шина B $\alpha = 90^\circ$ $k_b = k_a$	$\beta_a = 0$ $\beta_b = 1$ $\lg 2 \omega t = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \sqrt{3}$ $P = \frac{1}{4} [(1 + \gamma) \cos 2 \omega t - (1 - \gamma) \sqrt{3} \sin 2 \omega t - (1 - \gamma)]$
	шина C $\alpha = 60^\circ$ $k_b = k_a$	$\beta_a = 0,5$ $\beta_b = 0,5 \sqrt{3}$ $\lg 2 \omega t = \frac{\sqrt{3} \gamma - 1}{\sqrt{3} \gamma + 3} \sqrt{3}$ $P = \frac{1}{8} [(3 + \sqrt{3} \gamma) \cos 2 \omega t - (1 - \sqrt{3} \gamma) \sin 2 \omega t - (3 + \sqrt{3} \gamma)]$
	шина A	$P < 0,866$

Испытания, сделанные в лабораториях Института металлов, Технологическом и Путейском, дают предел упругости на изгиб для полутвердого алюминия холодной прокатки в среднем $6,5 \div 7 \text{ kg/mm}^2$. Предел упругости для меди можно принять в среднем $12 \div 14 \text{ kg/mm}^2$. Этими цифрами можно пользоваться до получения более исчерпывающих и точных данных. Снижения допускаемых напряжений в шинах из-за нагрева их при коротком замыкании производить не следует вследствие несовпадения во времени максимального прогиба с максимальным нагревом.

4. Расчет изоляторов

Если на работу шин свойства принятых в нашей практике изоляторов оказывают сравнительно малое влияние и учет этого влияния в расчете шин может быть практически с достаточной степенью точности произведен методом, предложенным нами выше, то расчет изоляторов требует отдельного

теоретического и, главным образом, экспериментального исследования.

Единственное теоретическое исследование по вопросу расчета изоляторов Schurig и Sayre [9, 10] содержит крупную ошибку и является неверным. Дело в том, что основное дифференциальное уравнение Шурига

$$M_b \left(\frac{d^2 Y_s}{dt^2} + \frac{d^2 Y_b}{dt^2} \right) + S_b Y_b = F$$

$$M_s \frac{d^2 Y_s}{dt^2} + S_s Y_s = S_b Y_b,$$

на котором базируются все выводы авторов, составлено неправильно.

В этих уравнениях приняты следующие обозначения:

M_b — эквивалентная масса шин,
 M_s — эквивалентная масса изолятора и часть шин, касавшейся им в движении,

S_b и S_s —сила, создающая у шины и изолятора единицу прогиба,
 Y_b и Y_s —прогиб шины и изолятора,
 F —сила, действующая на шину в одном пролете.
 Действительно, если мы будем считать шину абсолютно жесткой, т. е. примем $Y_b = 0$, тогда

$$M_b \frac{d^2 Y_s}{dt^2} = F.$$

Вся сила идет по преодолению инерции шины. Если теперь умножим обе части равенства на $\frac{dY_s}{dt}$:

$$M_b \frac{d^2 Y_s}{dt^2} \frac{dY_s}{dt} = F \frac{dY_s}{dt}$$

или

$$\frac{M_b}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{dY_s}{dt} \right)^2 = \frac{d}{dt} \left[\frac{M_b}{2} \left(\frac{dY_s}{dt} \right)^2 \right] = \frac{d}{dt} (F Y_s),$$

т. е. вся работа, произведенная силой, переходит исключительно в кинетическую энергию движущейся шины. А, где источник кинетической и потенциальной энергии изоляторов?

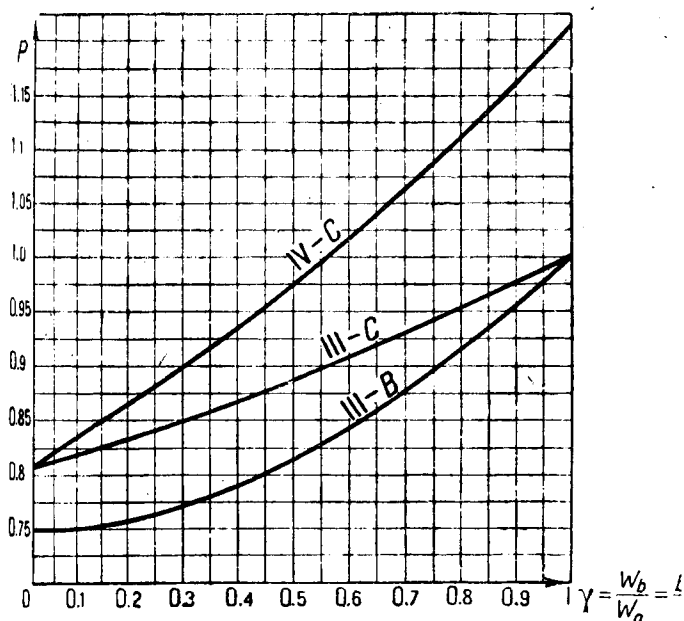


Рис 23

Далее, решение первых двух уравнений относительно Y_s и Y_b дает:

$$\frac{d^4 Y_s}{dt^4} + \left[\frac{S_b}{M_b} + \frac{S_s}{M_s} + \frac{S_b}{M_s} \right] \frac{d^2 Y_s}{dt^2} + \frac{S_b S_s}{M_b M_s} Y_s = \frac{S_b}{M_b M_s} F;$$

$$\frac{d^4 Y_b}{dt^4} + \left[\frac{S_b}{M_b} + \frac{S_s}{M_s} + \frac{S_b}{M_s} \right] \frac{d^2 Y_b}{dt^2} + \frac{S_b S_s}{M_b M_s} Y_b = \frac{S_s}{M_b M_s} F.$$

Последние два уравнения отличаются только последним членом. Это значит, что в любой шинной конструкции при любых шинах и любых изоляторах согласно выводам Шурига частота свободных колебаний шин будет равна частоте свободных колебаний изоляторов. В действительности дифференциальное уравнение энергии системы будет:

$$\frac{M_b}{2} \left(\frac{dY_s}{dt} + \frac{dY_b}{dt} \right)^2 + \frac{S_b Y_b^2}{2} + \frac{M_s}{2} \left(\frac{dY_s}{dt} \right)^2 + \frac{S_s Y_s^2}{2} = F(Y_s + Y_b).$$

Заменяв в этом выражении прогиб шины через прогиб изолятора и взяв затем производную по времени, получим дифференциальное уравнение движения. Решение этого уравнения даст выражение для колебаний изолятора.

Упругие шины на упругих изоляторах представляют собой систему с двумя степенями свободы. Более точное решение может быть получено при помощи общих уравнений Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i.$$

Все последующие работы по этому вопросу Specht^[11], Tanberg^[12], базирующиеся на работах Шурига, не лишены поэтому той же ошибки. Имеющаяся в русской литературе статья о расчете шин инж. Б. И. Розенберга^[16], являясь по существу переделанием второй статьи Шурига^[10], кроме ошибки последнего содержит еще целый ряд других ошибок, допущенных автором. Выведенные Шуригом коэффициенты для расчета изоляторов применяются инж. Розенбергом в расчете шин (?).

Предложенная инж. Розенбергом кривая этих коэффициентов не может быть рекомендована для пользования, так как составление средней кривой для любых систем из кривых Шурига, верных только для конкретных частных случаев, методологически неправильно.

Представление о работе сложной шины у автора неверное. Неверна также формула, предложенная инж. Розенбергом для подсчета момента инерции сложной шины.

Мы этим ограничили рассмотрение вопроса о расчете изоляторов, так как ему следует посвятить отдельную и самостоятельную работу. Мы сочли нужным здесь дать краткий анализ имеющейся по данному вопросу литературы оттого, что часто, смешивая расчет шин с расчетом изоляторов, широко пользуются материалом, в котором имеется ряд ошибок.

Библиография

1. Aluminium Busbars and Connections, The Britisch Aluminium Company, 1930.
2. ASEA, „Överströmmar och deras Vermingar“, Hanbok 15, 1928.
3. Biermans, Gefahren der Kurzschlussströme in Hochspannungsnetzen, „AEG-Mittel.“ № 7, 1926.
4. Biermans, О механических усилиях, возникающих от мгновенных токов короткого замыкания синхронных машин, „Arch. für El.“, т. IX, 1920.
5. Clair, Способности к нагрузке 60-периодных шин для сильных токов, „J. A. I. E. E.“ № 1, 1926.
6. Dwight, Repulsion between strap Conductors, „E. W.“ 15, Sept. 1917.
7. Papst, Допустимая нагрузка полых проводников, „E. J.“, июль 1931.
8. Robinson, Magnetic-Mechanical Loads on Busbar „J. A. I. E. E.“, октябрь 1923.
9. Schuring and Sayre, Mechanical Stresses in Busbar Supports during shortcircuits, „J. A. I. E. E.“, апрель 1925.
10. Schuring, Frick and Sayre, Practical Calculation of short-circuit Stresses in Supports for Straight parallel Bar, Conductors, „GER“ № 8, 1926.
11. Specht, Упрощенный способ подсчета усилий в шинных конструкциях, „GER“, август 1928.
12. Tanberg, Stresses in Bus-Supports, „E. J.“, октябрь 1927.
13. Schweikhagen, Исследования относительно вытеснения тока в шинах прямоугольного сечения, „Arch. für El.“, январь 1927.
14. Woodruff, Discussion on the natural frequency of Busbars, „J. A. I. E. E.“, 1923.
15. Вольфен, Электрические станции трехфазного тока, ГНТИ, 1931.
16. Иносов, О расчете шин на механическую прочность, „Электрич. станции“, № 8.
17. Розенберг, Электродинамические усилия в шинах, вызываемых токами короткого замыкания, „Электричество“ № 3, 1931.
18. Романовский, Об электродинамическом взаимодействии между токоведущими системами, „Вестник электротехники“, № 5—6, 1931.
19. Schmidt, Применение алюминия в распределительных устройствах. Перевод из Hauszeitschrift der VAW и d. Ersverk. A. G. für Aluminium апрель 1930, изд. Ловзо, 1931.
20. Тимашенко С. П., Теория колебаний в инженерном деле, ГНТИ, 1932.

СТАВИМ НА ОБСУЖДЕНИЕ

Некоторые вопросы проектирования сложных электрических систем

М. Л. Элькин и Р. Ю. Малая
Теплоэлектропроект, Москва

Плановая электрификация нашей страны и невиданные для капитализма масштабы строительства приводят к созданию таких электрических систем, которые капитализму не по плечу и где первое слово в мировой технике будет принадлежать нам. Поэтому при разработке конкретных проектов сложных электрических систем возникает ряд проблем, ставящих вопросы совершенно заново и потому требующих общего принципиального решения, на основе которого уже можно было бы решить вопрос о данной частной системе.

Таковы вопросы резерва и ревизии машин систем, допустимых колебаний напряжения и экономического $\cos \varphi$.

Вопросы резерва. Решение вопроса о резерве системы предопределяется рядом принципиальных установок, которых сейчас нет в виде обоснованного стройного целого и которые должны быть руководящими. Эти установки должны дать ответ на следующие вопросы: какое число одновременных аварий машин и линий передач принимать в зависимости от числа агрегатов системы и их мощности?

Всякие теоретические соображения по этому вопросу без тщательного учета опыта и систематизации статического материала, разбросанного по разным ведомствам и литературным источникам, не будут иметь практической ценности, а между тем бесперебойная работа системы с установленной мощностью в несколько миллионов киловатт при наличии намечаемых к установке агрегатов в 100 и 200 mW является делом первостепенной народнохозяйственной важности.

Точно так же наличие лишних резервов, без которых можно было бы обойтись с малым ущербом для надежности, чревато большими излишними капиталовложениями.

Второй вопрос принципиального порядка — допускаются ли поперечные связи между разными агрегатами, т. е. будет ли резервной единицей жесткая система котел-турбогенератор-трансформатор и даже линия передачи, как предлагают некоторые, или отдельные части такой системы смогут быть переключаемы на другую систему? Очевидно, что и это обстоятельство будет определять мощность и стоимость резерва.

Наконец, третий вопрос, теснейшим образом связанный с техническими требованиями, представляемыми к резерву — допустимо ли содержание резерва на тэц и гидростанциях и в каких принципиальных случаях?

В отношении технических требований, представляемых к резерву, нет полной ясности и единой точки зрения. Если по условиям устойчивой параллельной работы станции желательно иметь резерв распределенным по всем машинам за счет

их недогрузки, что предполагает нормальную работу с максимальным коэффициентом полезного действия на мощности ниже номинальной, то еще спорно, будет ли при этом обеспечена необходимая гибкость и мобильность в переброске резерва на аварийные участки системы. Кроме того в этом случае исключена возможность объединения резерва двух смежных электрических разделенных систем и снижение общей мощности ем за счет такого объединения.

Что резерв на тепловых станциях должен быть крутящимся — это не вызывает никаких сомнений, так как в противном случае при аварии имел бы место большие убытки в народном хозяйстве за счет перерыва энергоснабжения на время перегрева и пуска резервного агрегата.

Что же касается того, быть ли резерву в недогруженных машинах или работать ему вхолостую и несинхронизированно, то возражение против холостой его работы с точки зрения устойчивости параллельной работы могут отпасть при надлежащем развитии техники автоматической синхронизации и загрузки агрегатов. В этом случае от резерва требовалось бы быстро (в течение нескольких минут) взять на себя всю нагрузку с тем, чтобы на время перерыва в подаче энергии отключались относительно маловажные потребители, прекращение питания которых на несколько минут не наносит большого ущерба народному хозяйству. Вполне мыслимо даже автоматическое отключение таких относительно маловажных потребителей специальными реле.

С точки зрения допущения холостой работы теплового резерва большой интерес представляет содержание резерва на гидростанциях. Тогда как на пуск и полную нагрузку паротурбоагрегат при горячем котле требуется длительное время (порядка получаса, так как турбину надо предварительно прогреть), гидротурбоагрегат может в течение нескольких минут с положением покоя взять на себя полную нагрузку.

Таким образом тепловой резерв, чтобы быть практически быстродействующим, должен быть во всяком случае крутящимся, что ведет к потерям холостого хода в котлах и машинах, тогда как гидрорезерв является практически быстродействующим, будучи в положении покоя и не вызывая никаких потерь.

В этом свете при благоприятных условиях регулирования стока представлялось бы выгодным иметь на гидростанции специальные резервные агрегаты, а в бассейне регулирования — неприкосновенную призму воды, срабатываемую лишь при необходимости работы резервных агрегатов.

Большого удорожания гидростанции такое добавление агрегатов не вызвало бы, и притом это удорожание окупилось бы за счет ликвидации потерь холостого хода теплового резерва. Во всяком случае этот вопрос заслуживает рассмотрения, так как с точки зрения гибкости и мо-

бильности резерва и в особенности мобильности его на станции, разделяющей электрически две или несколько систем, все же представляется желательным часть резерва иметь готовой к работе на любую систему, т. е. не связанной ни с одной из них.

Что касается содержания резерва тэц, то для турбин с противодавлением это совершенно исключено, так как имеем в этом случае жестко принужденный режим электрической выработки. Для турбин же с конденсационными хвостами это мыслимо и в особенности для турбин, работающих с отбором пара на отопление. В этом случае представляется возможным летом держать резерв на тэц, с тем, что либо агрегаты тэц будут работать вхолостую, либо на неэкономичном коэффициенте полезного действия вследствие отсутствия тепловой нагрузки.

При допущении холостой работы резерва получается выгодное сочетание тэц с гидростанциями: летом, когда часть агрегатов тэц бездействует за отсутствием тепловой нагрузки, резерв содержится на тэц, если технические условия допускают работу теплофикационных агрегатов без тепловой нагрузки. Зимой же, когда за отсутствием достаточного количества воды бездействует часть гидротурбоагрегатов, резерв содержится на гидростанциях за счет создания неприкосновенной призмы воды в бассейне регулирования, как это было указано выше.

Из всего сказанного очевидно, что невозможно делать выводы по конкретной системе, не имея твердой принципиальной установки в указанных вопросах.

Ревизия. Решение вопроса о ревизии машин системы помимо всего прочего точно так же предопределяется допущением поперечных связей и требует систематизации статистического материала такого порядка: как часто приходится ревизовать машины и котлы и их отдельные части, каков характер и продолжительность этих ревизий в зависимости от мощности машин и т. д.

Для несуществующих сейчас у нас, но предполагаемых к установке во второй пятилетке агрегатов в 100 и 200 мW придется решать эти вопросы предположительно, базирясь, очевидно, на немногочисленном иностранном опыте для таких агрегатов. В проектируемых на конец второй пятилетки системах, несомненно, будет рационально иметь специальную службу ревизии со специализировавшимся на ревизиях ремонтным персоналом, перебрасываемым к месту ревизии.

Наличие такой службы позволит быстро производить ревизию и даст возможность сократить ревизионные резервы до минимума.

В таких объединениях как Могэс, ленинградский „Электроток“, Донбассток и др. уже сейчас может оказаться целесообразным создание специальной службы ревизии, так как в настоящее время ремонтный персонал, с одной стороны, отвлекается на другие работы, а с другой, не имеет надлежащей квалификации для производства капитальных ревизий. Все это удлиняет сроки ревизии и утяжеляет и без того напряженную в настоящее время работу объединений.

В целях выяснения действительных минимально возможных сроков ревизии агрегатов, на кото-

рых можно было бы базироваться в проектировках следует под ответственность руководителей упомянутых крупных объединений создать специальные бригады по ревизиям, перебрасывая их на надлежащие станции. По истечении примерно года работы таких бригад имела бы полная картина действительных минимально возможных сроков ревизии агрегатов, что подведет солидную базу под проектировки со всеми вытекающими отсюда выгодами.

При выборе агрегатов для станции следует учитывать то обстоятельство, что интересы ревизии на относительно мелких станциях, ревизируемых крупными, диктуют мелкие агрегаты, так как в этом случае условия передачи энергии на эти станции облегчаются, и линии передачи и подстанции получают дешевле. Интересы же нормальной работы таких станций требуют крупных агрегатов. Наивыгоднейшее сочетание единичных агрегатов в системе может быть определено лишь в конкретном проекте, но с безусловным учетом интересов ревизии.

Допускаемые колебания напряжения и экономический $\cos \varphi$. В настоящее время принимается, что потребителю гарантирована доброкачественная энергия при колебаниях напряжения на шинах $6,3 \text{ kV} \pm 2,5\%$ в нормальном режиме. В аварийном режиме допускаются колебания $\pm 5\%$. Считать, однако, эти нормы за неизменные нельзя, так как допускаемые колебания напряжения определяются характером потребителя, а в наших условиях потребитель имеет резко выраженный характер (мощные центры металлургии, машиностроения, химии и т. д.), что позволяет произвести подробные исследования и сделать доброкачественные выводы о допускаемых колебаниях напряжения.

В целом ряде случаев может оказаться возможным допущение больших пределов колебания напряжения, что даст большой экономический эффект (экономия в регулирующих устройствах и т. д.). Тесно связан с вопросами допустимых колебаний напряжения вопрос об экономическом $\cos \varphi$ системы и месте и способа его компенсации. Решение этого вопроса первостепенной народнохозяйственной важности, включая в себе вопросы экономического $\cos \varphi$ отдельных частей системы (станций, генераторов, трансформаторов и сетей высокого и низкого напряжения) и их наивыгоднейшего сочетания в системе, диктует определенные установки электромашиностроению как в части экономического $\cos \varphi$ у генераторов, так и в части компенсирующих устройств.

Ориентироваться ли на синхронные компенсаторы или асинхронные или регулируемые под нагрузкой трансформаторы (перед ВЭО следует поставить задачу разработать конструкцию автоматически регулируемого под нагрузкой трансформатора),—все это в настоящий момент представляется совершенно неясным, тем более что асинхронные компенсаторы в нашей практике мало известны.

За всеми этими устройствами есть ряд общеизвестных преимуществ и недостатков, и выяснение вопроса о разумной пропорции между ними

в наших условиях представляет задачу не последней важности.

В наших проектировках обычно принимают, что компенсация $\cos \varphi$ до 0,8 осуществляется на шинах 6,3 kV, а с 0,8 и выше—в системе 100 и 200 kV. Так как наибольшая доля потерь имеет место в сетях низкого напряжения, то наибольшего экономического эффекта следует ожидать при компенсации на низком напряжении и при этом компенсации статическими конденсаторами, массовое изготовление которых приведет к их удешевлению и сделает их экономичными. На долю же высокого напряжения следовало бы оставить ту долю компенсации, которая связана с регулировкой напряжения. Так как в настоящее время вопрос об экономической степени компенсации представляется весьма неясным, то в практике проектирования мощность компенсаторов выбирается по условиям баланса реактивных мощностей и по условиям допущенных колебаний напряжения, причем очень часто мощность, достаточная по одному условию, недостаточна по другому.

Как видно из всего сказанного выше, все поставленные вопросы достаточно сложны и требуют специального и принципиального исследования. Если с неопределенностью в указанных вопросах можно еще мириться при перспективном проектировании сложных систем, то она станет совершенно нетерпимой, когда придется

составлять технические проекты, а такое проектирование не за горами.

Мы полагаем, что вся работа по исследованию указанных вопросов должна быть срочно начата ВЭИ и институтом энергетики и электрификации Энергоцентра, причем ВЭИ должен заняться вопросами регулирующих устройств и техническими проблемами резервирования, как они были поставлены, а ИЭЭ—вопросами экономического соотношения допустимых колебаний напряжения (под руководством ИЭЭ последним вопросом должны заняться рационализаторские тресты союзных объединений, как Оргхим, Оргэнерго, Оргметалл, Оргтекстиль и т. д.), а также систематизацией материала по авариям и ревизии. В отношении резерва и ревизии следует немедленно заняться обработкой материалов аварий и ревизий систем Могэс, „Электроток“, „Донбассток“ и других систем с классификацией аварии по характеру их, причинам, последствиям и мероприятиям по их устранению и с указанием мощности и характера применяемого в этих системах резерва в том разрезе, как это было разобрано выше.

Для исследования поставленных вопросов должны быть заданы определенные сроки с тем чтобы уже в недалеком будущем можно было базироваться в проектировках не на произвольных допущениях, а на обоснованных и подтвержденных авторитетными органами выводах.

О речных направлениях единой высоковольтной сети

Д. М. Айзенберг
Киевский ин-т
Промэнергетики

В условиях планового социалистического хозяйства проблема использования мощных речных артерий должна быть поставлена и ставится комплексно, т. е. в плоскости одновременного разрешения ряда тесно связанных друг с другом проблем, а именно: 1) улучшение водного транспорта—магистрализация рек, 2) мелиорация и ирригация земельных площадей, тяготеющих к речному бассейну, 3) использование гидроэнергетических ресурсов, 4) улучшение условий водоснабжения отдельных районов и 5) создание улучшенных условий для железнодорожного транспорта. Кроме того, при разрешении „гидропроблем“ принимаются во внимание интересы рыбного хозяйства, климата и пр.

В последнее время в разрезе 2-й пятилетки и генплана электрификации по нашему мнению должна приобрести большой интерес и актуальность проблема создания речных энергетических систем. В связи с мощным развитием гидроэлектростроительства, предусматриваемого на 2-е пятилетие (доведение мощности гидроэлектростанций от 1 до 5—6 млн. kW в течение 2-й пятилетки), а также в связи с расширением существующих и сооружением новых тепловых электростанций, располагаемых, главным образом, у мощных рек, должна быть поставлена во весь рост проблема соединения всех электрических стан-

ций одной речной системы высоковольтной линией.

Таким образом реки должны быть одним из важнейших факторов единой высоковольтной сети.

Проблемы Большой Волги точно так же, как проблема Большого Днепра и в будущем Ангары ставится пока без учета этого важнейшего звена.

Между тем, на примере Днепра можно легко установить необходимость и целесообразность немедленной постановки проблемы Днепровской энергетической системы.

В самом деле, по линии Днепра по второму пятилетнему плану и генплану электрификации будем иметь следующие мощности (в киловаттах см. табл. на стр. 759).

Таким образом при учете только одних станций расположенных в непосредственной близости от линии Днепра, получается по 25 объектам суммарная мощность в несколько миллионов киловатт. Если же учесть мощность станций, отстоящих в расстоянии порядка 150 km от линии Днепра а также тех, соединения которых с Днепровской системой производится уже в настоящее время (Кривой Рог, Донбасс, Звенигородка, Яготин, электростанции Западной области и БССР), то мощность Днепровской системы может достигнуть величины порядка 8—10 млн. kW.

	1937 г.	Генплан
Херсонская рэс	37 000	250 000
Каховская гэс	60 000	60 000
Никопольская гэс	60 000	60 000
Днепровская гэс	558 000	558 000
Запорожская тэц	100 000	100 000
Днепропетровская рэс—тэц	70 000	70 000
Каменская рэс	196 000	250 000
Каменская гэс	100 000	100 000
Александровская рэс	100 000	200 000
Мишуринская гэс	—	75 000
Кременчугская тэц	50 000	50 000
Кременчугская гэс	—	80 000
Чигиринская гэс	—	60 000
Черкасская гэс	—	50 000
Черкасская тэц	12 000	24 000
Переяславская гэс	—	150 000
Киевская рэс—тэц	71 000	150 000
Вышегородская гэс	—	150 000
Замглайская рэс	50 000	100 000
Гомельская рэс	75 000	175 000
Быховская рэс	75 000	175 000
Могилевская тэц	12 000	12 000
Оршанская гэс (Кобелянские пороги)	—	20 000
Осиновская рэс (Белгрэс)	80 000	80 000
Жоленская тэц	24 000	60 000
Итого	1 730 000	2 924 000

Совершенно очевидно, что соединение Днепровской системы высоковольтной линией меридиального направления (несколько ломаного характера) общим протяжением в 2 000 км будет весьма целесообразно.

Аналогичное положение имеет место и на Волге.

Направление речных магистральных высоковольтных линий должно оказать решающее влияние на генеральную схему единой высоковольтной сети, в особенности на конфигурацию высоковольтной сети отдельных районов.

На основании приведенного выше варианта создания Днепровской энергетической системы устанавливается, что на протяжении порядка, как указано выше, 2 000 км (очти по трассе) расположены 25 мощных электрических станций при среднем расстоянии между двумя соседними станциями 100—150 км. Таким образом создание Днепровской энергетической системы сопряжено с осуществлением высоковольтной сверхмагистральной линии—важнейшей части будущей единой высоковольтной сети СССР.

Необходимо под углом зрения целесообразности создания речных энергетических систем обсудить вопрос о схеме единой высоковольтной сети, с одной стороны, а также расширить постановку проблем комплексного использования речных артерий (Большая Волга и Большой Днепр)—с другой.

Х Р О Н И К А

Вопросы метеорологии и линии передач

В октябре с. г. Всесоюзное бюро по высоковольтным передачам намечает созыв совещания по метеорологическим вопросам, связанным с проектировкой и эксплуатацией высоковольтных линий электропередачи.

Оrientировочная программа совещания следующая:

1. Роль и задачи метеорологии в связи с механическими и электрическими требованиями, предъявляемыми при проектировке и эксплуатации высоковольтных линий электропередачи (П. П. Виноградов и А. М. Залесский).
2. Метеорологические данные, принимаемые при проектировке линий электропередачи (А. В. Мартынов и А. К. Торопов).
3. Современное состояние вопроса долгосрочных предсказаний температуры воздуха, силы ветра, времени и мощности гололеда (Главная геофизическая обсерватория).
4. Организация своевременных сообщений эксплуатирующим организациям о метеорологических данных.
5. Деление территорий СССР на районы, подверженные воздействию тех или иных характерных метеорологических факторов (НКС, НКПС, Энергоинститут А. Н. и т. д.).

6. Вызываемая метеорологическими явлениями вибрация проводов и ее вредное влияние на линии электропередачи (А. П. Виноградов).

7. Современное состояние вопроса об атмосферном электричестве (о природе молнии) [В. Ф. Миткевич, Энергоинститут А. Н. (Стрельман)].

8. Организация наблюдений над явлениями атмосферного электричества на линиях электропередачи (ВЭИ, ЛЭФИ, Энергоинститут А. Н. и эксплуатационные организации).

а) О регистрации ударов молнии и перенапряжений.

б) Измерение токов молнии.

9. Влияние геофизических факторов на поражаемость мест молнией (Шателен, Богоявленский и Стрельман).

10. Современное состояние и перспективы развития исследований воздействия метеорологических факторов на линии электропередачи (Мартынов, Торопов и др.).

11. Обсуждение проекта типовой станции для исследования метеорологических явлений, связанного с задачами проектирования и эксплуатации линий электропередачи.

12. Вопросы изысканий трассы линий электропередачи в зависимости от метеорологических условий (Гидроэлектропроект).

Всесоюзный электротехнический институт

Отдел высоких напряжений

Раздельное выключение фаз и однофазный резерв

В лаборатории высоковольтных сетей бригадой под руководством инж. П. И. Сазанова и инж. С. А. Лебедева проведена работа по исследованию раздельного выключения фаз. При двойных линиях выключение лишь поврежденных фаз дает значительное повышение надежности работы в смысле регулирования и устойчивости. Устройство резервной фазы с автоматическим переключением дает возможность получить надежную работу при одинарных линиях и экономию материала.

Кинетика возбуждения синхронных машин

В лаборатории автоматических выключателей под руководством проф. В. С. Кулебакина закончена работа по изучению процессов возбуждения синхронных электрических машин с целью выявления основных факторов, влияющих на скорость нарастания напряжения. Эта работа тесно связана с разрешением проблемы автоматического регулирования, а также поддержания статической и динамической устойчивости параллельно работающих синхронных систем, сделаны выводы относительно основных требований, которым должны удовлетворять возбудители синхронных машин (генераторов и конденсаторов). В ближайшее время эти теоретические исследования предполагается проверить на крупных электрических машинах.

Исследование быстродействующих автоматических регуляторов

В лаборатории автоматических регуляторов под руководством проф. В. С. Кулебакина закончена работа по исследованию регуляторов Тиррелля (АКД и ДЕС), Броун-Бовери, Сименса, Метро-Виккерса и Фусса. Разработана теория действия этих регуляторов и отдельных их частей, составлены инструкции по настройке, закончено лабораторное исследование по испытанию регуляторов на машинах. Исследование переносится в эксплуатационные условия. Регуляторы предполагается установить на станциях Могэс. На основании теоретических и экспериментальных исследований выяснены наиболее характерные особенности рабочего процесса автоматических регуляторов. Результаты исследования могут быть использованы для расчетов и для правильного подбора основных параметров регуляторов к электрическим машинам.

Использование земли в качестве третьего провода трехфазной системы

Закончен первый этап комплексной работы, проведенной под руководством проф. Л. И. Сиротинского, по выяснению условий работы трехфазной линии передачи в случае замены третьего провода землей. Проанализированы вопросы коррозии, влияния на провода связи, падения напряжения и асимметрии в нормальном режиме работы и условия работы заземлителей такой системы. Работа передана Главэнерго.

Исследование реактанцев синхронных генераторов

В лаборатории коротких замыканий под руководством инж. Д. А. Городского проводится работа по исследованию реактанцев генераторов. Законченные к настоящему времени три этапа работы дают возможность заключить, что применявшиеся до сего времени методы определения реактанцев не дают желаемого результата. Так метод Фаллу дает, оказывается, не то иное, как реактанц обратной последовательности, метод Толвинского и Ефремова—реактанц нулевой последовательности и метод Каппа—среднее арифметическое между ними. Реактанц прямой последовательности меняется, как оказывается, от мгновенного своего значения до установившегося, которое обычно больше мгновенного, причем процесс этот заканчивается в течение всего нескольких периодов. Найден также теоретический метод определения кривой изменения э. д. с. генератора при коротком замыкании по времени в зависимости от данных генератора и с учетом его насыщения, даваемого характеристикой холостого хода.

Масляные выключатели с камерами масляного дутья (Oil Blast Breaker)

По заданию Могэс в лаборатории коммутационной аппаратуры инж. А. М. Дубининим и инж. Б. М. Иоффе под руководством инж. И. С. Палицына произведено исследование принципа

гашения электрических дуг в выключателях струею масла. В результате лабораторных исследований были построены меры для одного из масляников (типа BBC) на 30 kV и повышения его разрывной мощности. В июне в сети были произведены испытания на отключение мощностей короткого замыкания, показавшие эффективность этого приема для указанной цели, хотя окончательное применение его избранного типа выключателей потребует еще некоторой работы. В настоящее время лабораторией (инж. А. Я. Блов) разработаны новые конструкции для масляного дутья (решетки), которые должны показать еще большую эффективность. Эти решетки предполагается использовать для увеличения разрывной мощности выключателей Могэс (SSW) 115 kV и на 1 млн. kVA разрывной мощности.

Каскадные трансформаторы напряжения 110—220 В

В трансформаторной лаборатории проведена работа побору типа и расчетам нового каскадного трансформатора напряжения до 220 kV. В ближайшее время Электропрот приступает к производству первых опытных образцов. Но трансформаторы дадут большую экономию в расходах материала, так как их вес значительно меньше веса нормальных конструкций, применяемых в настоящее время. Судя по нашим данным, трансформаторы обещают быть весьма удобными при перенапряжениях.

Исследование каскадного трансформатора тока типа Коха и Штерцеля

В трансформаторной лаборатории бригадой под руководством П. Н. Чусова закончена работа по исследованию каскадного трансформатора тока типа Коха и Штерцеля на 110 kV. Этот трансформатор состоит из трех фарфоровых элементов, внутри которых помещены обмотки. Фарфоровые элементы имеют очень сложную форму, что, вероятно, при производстве их вызывает большой процент брака. Трансформатор имеет небольшую мощность—60—VA в классе мощности F. Коэффициент сверхтока при полной нагрузке оказался равным примерно 10, что является недостаточным для современных нужд. В сравнении с другими типами трансформаторов на высокие напряжения исследуемый тип имеет одно преимущество, а именно—отсутствие в его конструкции горючих веществ. Недостатками же его являются: а) увеличенный вес железа и меди, вызываемый наличием лишнего трансформатора (каскада), например, в общем весе между 45 kg—вес полезной меди (которая необходима в любом трансформаторе) составляет только 15,7 kg, т. е. 35%. Кроме того, трансформатор расходует железа на 40—50 kg больше, чем другие типы (полезный вес—19%), б) этот тип трансформатора не может быть построен на более высокие напряжения.

Техпрот ВЭИ

А. П. Привмаковский

БИБЛИОГРАФИЯ

RÜDENBERG., передача больших мощностей на далекие расстояния

(Elektrische Hochleistungsübertragung auf weite Entfernung), Verlag J. Springer, Berlin, 1932

Строительство единой высоковольтной сети Союза, к сооружению отдельных звеньев которой будет приступлено в самые ближайшие годы, потребует разрешения ряда сложнейших технических вопросов. В разрешении этих проблем наша техническая и научная мысль будет опираться на весь арсенал знаний, которыми располагает мировая техника.

В связи с этим внимательное наблюдение за мировым книжным рынком и выбор из него всего того, что является наиболее ценным для использования советским строительством, является весьма ответственной задачей.

В этом отношении рецензируемая книга выгодно отличается от ряда ей подобных, по-серьезному ставя ряд крупных теоретических и практических проблем, связанных с передачей энергии на большое расстояние. Ясно, что она страдает буржуазной ограниченностью, не позволяющей автору ставить эти проблемы под углом зрения единого энергетического хозяйства, так как эти проблемы поставлены в условиях нашего социалистического хозяйства. Следует также отметить, что на

циональную ограниченность авторов издания, не исполняющих в своих работах богатейшего опыта других стран области строительства и эксплуатации электрических сетей систем.

Авторы уделяют большое внимание проектам Оливье Биеля, об осуществлении которых вряд ли может мечтать временная буржуазная Европа, переживающая вместе со всем капиталистическим миром жестокий экономический кризис.

В соответствии с этой неправильной общей ориентировкой авторов, совершенно неприемлемыми для нас являются и методологические установки при разрешении отдельных технико-экономических вопросов. Эти установки насквозь проникнуты духом капиталистических отношений и должны быть нами целиком отмечены.

Касааясь общего содержания рецензируемого издания, следует отметить, что здесь впервые охвачены вопросы не только узко сетевой области, но всей системы в целом, свехные поэтому и с работой машин и трансформаторов, регулирования системы, компенсации и пр.

В соответствии с этим здесь рассмотрены следующие вопросы:

1. Проблемы передачи энергии переменного тока. По этому вопросу представлены две статьи: об общей работе системы и о работе систем линий переменного тока—Рис

ри специальная статья о теории длинных линий—Поляузен.

Вопросы работы системы в целом. Эта область охвачена тремя статьями: поведение машин и трансформаторов—Мандля, регулирование и компенсация линий передачи—Фридендера и регулирование электрических станций при совместной работе—Рашеля.

Далее идет статья Пилоти, сравнивающая экономичность машин при постоянном и переменном токе.

Наконец, статья Маттиаса, посвященная вопросам борьбы с перенапряжениями.

Что касается статьи Рюденберга, то она является вводной, ставит некоторые принципиальные вопросы в области передачи больших мощностей. Основной в данном случае является попытка абстрактной трактовки проблемы электризации, как проблемы чисто технической, в отрыве от капиталистических производственных отношений, сковывающих производительные силы.

Убедительными покажутся советскому читателю рассуждения проф. Рюденберга о европейской высоковольтной сети. Эти технические предпосылки для ее осуществления давно были, однако путь к этому осуществлению лежит только через ряд пролетарских революций, которые должны превратить Европу капиталистическую в Европу социалистическую. Что касается остальной части статьи Рюденберга, то она содержит ряд общих положений о работе линий, поведения станций при совместной работе, в свое время уже освещенных, иным образом, в советской и иностранной периодической печати.

Какого же рода сводную работу по теоретическим вопросам длинных линий представляет собой статья Поляузена. Сущность этих двух статей заключается именно в том, что они дают систематизированную сводку отдельных разрозненных материалов, появлявшихся от времени до времени в периодической печати, облегчая тем самым работу проектных и эксплуатационных работников.

Интерес представляют собой, несомненно, статьи, относящиеся к работе системы в целом. Здесь особого внимания заслуживает работа Мандля, трактующая проблемы устойчивости системы и те требования, которые в связи с этим должны быть предъявлены к генераторам и трансформаторам. Автор подробно рассматривает поведение машин при работе на слож-

ную сеть, вопросы регулирования, роль машин при авариях и задачи проектирования машин и трансформаторов для работы на сложную сеть.

Следующая работа из этого цикла—статья Фридендера, трактующая вопросы компенсации и регулирования линий, и, наконец, работа Рашеля о регулировании станций при совместной работе. Обе эти статьи содержат ряд интересных положений, касающихся вопросов распределения активной и реактивной мощности в системе, влияния нестационарных явлений, графические расчеты компенсирующих устройств и управление ими, с одной стороны, и с другой—вопросов практического регулирования системы, различных способов регулирования напряжения и рассмотрение специальных аппаратов для регулирования работы системы, а также вопросов регулирования при аварийных режимах. Обе эти статьи имеют ценность для разрабатываемых в СССР проектов больших систем, где они, несомненно, будут использованы.

Следующей, весьма интересной по своей значимости и новизне работой является статья Пилоти об экономическом сравнении передачи энергии при постоянном и переменном токе. Здесь подробно трактуется проблема экономичности передачи энергии вообще и дается ряд кривых, характеризующих величины потерь при передаче энергии различными системами тока, а также целый ряд других показателей, сравнивающих передачи энергии при переменном токе, напряжением 400 kV и постоянном токе напряжением 660 kV. Начатая в СССР борьба за скорейшее осуществление передачи энергии постоянным током сумеет использовать те отдельные положения, которые приведены в этой работе.

Что касается статьи проф. Маттиаса, то она представляет собой обзорную работу состояния борьбы с перенапряжениями в высоковольтных сетях.

Таким образом книга в целом заслуживает внимания и критического изучения со стороны советского читателя, и следует пожелать ее скорейшего появления на русском языке.

Одновременно желательно скорейшее появление аналогичной оригинальной работы советских техников, где были бы проанализированы опыт и задачи советской техники в этой области и освещены достигнутые успехи в разработке единой высоковольтной сети.

М. Цейтлин

ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ

Защита от молнии. „Electrician“, январь 1932, стр. 7.

В некоторых местностях Франции, подверженных очень сильным грозам, наблюдались не только частые повреждения аппаратуры и линий передач, но и несчастные случаи с людьми, так как перенапряжения распространялись также и на распределительной сети, наблюдались случаи пробоя между обмотками трансформаторов и, таким образом, переход напряжения линии передачи на низковольтную сеть.

В связи с этим целый ряд организаций (министерство лесов, почтовое ведомство, инженерные и научные общества и организации, геологическая разведка и т. д.) провели работу по выявлению местности, подверженных грозовым явлениям.

Одновременно регламентировались и правила ввода и установки приборов у потребителей, а именно: все приборы разрядники маслянки, плавкие предохранители должны быть установлены как можно ближе к вводу напряжения и как можно дальше от мест постоянного пребывания людей и от проходов. Все эти приборы должны быть установлены в помещениях, имеющих достаточную изоляцию от земли, чтобы люди не могли коснуться аппаратов, стоя на проводящем полу; в противном случае все открытые части аппаратуры должны быть достаточно изолированы (покрыты изоляцией) и расположены так, чтобы их можно было коснуться или штангой или же став на изолирующую подставку.

В местах, где помещение не может быть достаточно сухим и т. д. запрещено иметь открытыми какие бы то ни было металлические части приборов.

К. Стефанов

7. F. UNTERBUSCH. Асбестовые провода „Нептун“—Felten und Guilleaume Rundschau, № 9, 1931 г., стр. 373.

Известной германской кабельной фирмой Felten und Guilleaume Carlswerk A. G. (Köln-Mülheim) выпускаются провода марки Нептун для высокох нагревов. Их изоля-

ция изготавливается из весьма точно распушенного асбеста, волокно которого наматывается равномерным слоем перпендикулярно к медной проволоке. Асбест пропитывается высококачественным лаком. Изоляция отличается высокой электрической, тепловой и механической прочностью. Изготавливаются провода с диаметром меди 0,5—5,0 мм и толщиной слоя изоляции 0,15—0,5 мм, а также провода прямоугольного сечения для обмоток и шнуры. Приводим сравнительные данные для провода „Нептун“ и для медного провода с хлопчатобумажной обмоткой (для того и другого провода диаметр меди равен 1,0 мм, а диаметр провода с изоляцией 1,3 мм).

	„Нептун“	Хлопчатобумажная изоляция, просушенная
Сопротивление до нагрузки, в мегамах	150	3
То же после нагрузки током 50 А (обугливание хлопчатобумажной обмотки)	150	0
То же после нагрузки током 60 А (красное каление меди)	35	0
Пробойное напряжение до нагрузки, в вольтах	550	500
То же после нагрузки до красного каления меди	460	0

Сравнительные подсчеты показывают, что проволока из оксидированного алюминия для обмоток оказывается выгоднее проволоки „Нептун“ лишь для малых сечений (диаметр

менее 0,5 mm); при более значительных диаметрах выгоднее в случае высоких нагревов брать медную проволоку с асбестовой изоляцией¹⁾.

Б. Тареев

ROUWENHOVEN U. LANGWORHTU. Электрический удар живых организмов, El. Engn, июнь, 1931 г, стр. 406—409

Разрушение тканей живого организма является основной причиной опасности для жизни при поражениях токов. Авторами статьи были поставлены опыты с целью выяснить влияние расположения контактов (пути тока) на поражаемость крыс. Всего было подвержено эксперименту 102 крысы, при напряжении источника тока 1 000 V в течение двух секунд: половина этого количества животных поражена переменным током, половина — постоянным.

Контакт между телом животного и электродом выполнялся особо тщательно и смачивался раствором соли.

Если после опыта животное не обнаруживало склонности к произвольному дыханию — производилось искусственное дыхание по методу Schaefer. Опыты проведены при следующих положениях контактов: 1) голова-хвост, 2) правая передняя

¹⁾ Весьма вероятно, что это утверждение объясняется коммерческими соображениями фирмы, не производящей окисляемых проводов.

АННОТАЦИИ

А. А. АНАНЬЕВ, С. Г. СЕДЫХ, В. С. ШАМОНИН. Проблема использования энергии ветра в СССР. „Эл-во“ № 14, 1932, стр. 716.

В статье отмечается огромное народнохозяйственное значение в общем энергобалансе страны использования ветра в особенности при условии включения ветроэлектростанций в общую высоковольтную сеть, так и для целей ирригации, водоснабжения, помола муки и в строительном и лесопильном деле.

Н. Ф. РАКУШЕВ. Скользящие клеммы для стальной-алюминиевых проводов. „Эл-во“, № 14, 1932, стр. 718

В статье рассматривается возможность применения скользящих клемм для подвески стальной-алюминиевых проводов, причем вносится предложение замены металла деревом как с точки зрения экономии металла, так и улучшения работы клеммы в отношении уменьшения износа провода.

Н. БОГОРОДИЦКИЙ и И. МАЙГЕЛЬДИНОВ. О методах пропитки дерева для применения его как изолирующего материала. „Эл-во“, 1932, № 14, стр. 722

В статье приводятся результаты исследования различных методов обработки дерева для применения его в качестве изоляционного материала и влияния этих способов обработки на свойства древесины в отношении пробивного напряжения и влагостойкости.

Л. Н. БОГОЯВЛЕНСКИЙ и А. Г. СТРОЛЬМАН. Грозные ряды и метод исследования влияния их на линии передач. „Эл-во“, № 14, 1932, стр. 726

В статье рассматривается вопрос о влиянии прямых и не прямых ударов молнии в линию передачи и приведено сопоставление методов изучения признаков поражаемости местности молнией — американского и геофизического. Ввиду большей простоты и скорости получения результатов геофизический метод, по мнению авторов, имеет преимущества.

В. В. УСОВ. Механических свойствах проводникового алюминия. „Эл-во“, № 14, 1932, стр. 797.

В статье рассматриваются механические свойства алюминия при нагреве (сопротивление разрыву, твердость и относительное удлинение) и поведение алюминия в отношении механических свойств после отжига. Даются сводки результатов по иностранному источникам, по которым возможно ориентироваться в поведении алюминиевых проводников как в условиях длительных нагревов, так и в условиях короткого замыкания.

нога-хвост, 3) левая передняя нога-хвост, 4) две передних 5) две задних ноги и 6) передняя нога — задняя нога.

На основании опытов авторами сделаны следующие выводы: во-первых, постоянный ток при напряжении 1 000 V опасен для крыс, чем переменный того же эффективного напряжения, независимо от пути тока, во-вторых, шансы на выживание к жизни наибольшие, когда мозг не лежит на пути тока, в-третьих, поражение менее значительно, если путь лежит от хвоста к левой передней ноге, нежели к правой, в-четвертых, если главный путь тока не включает мозг, а лишь хребет или нервы, управляющие дыханием, животное в большинстве случаев, дышит и проявляет активность в течение нескольких минут после опыта, в-пятых, обнаружено, при поражении наступает временный паралич дыхания для лизованных либо в спинном мозгу, либо в *per vi vagi* в зависимости от пути тока. Для отдыха после потрясения необходимо некоторое время; если в течение этого времени организм в состоянии будет поддерживать жизнь — выздоровление животного возможно. Если естественное дыхание после опыта восстановилось, все же нельзя быть уверенным в том, что животное на пути к полному выздоровлению, и в-шестых ожоги тканей постоянным током более серьезны, чем при переменном током того же эффективного значения.

О. Тип

П. П. БЕНАР и Б. Г. ЛИВШИЦ. Сплошные железные провода для переменного тока, „Эл-во“, 1932 г., № 14 стр.

Авторами произведено исследование электрических свойств сплошных железных проводов в зависимости от их химического состава и механической их обработки. Установлено, что наиболее выгодное содержание углерода и степень обжата, на основании лабораторных опытов и опытов в хозяйственном масштабе установлена возможность значительной экономии меди в случае применения железного провода предлагаемыми авторами типа.

Д. М. МАРЬЯНОВСКИЙ. О расчете проводов постоянного тока, „Эл-во“, 1932, № 14, стр. 741

В статье приводятся теоретические обоснования расчета проводов постоянного тока на минимум материала в самом общем виде для случая, когда нагрузка вдоль провода задается некоторой функцией расстояния рассматриваемой точки от источника питания, причем задача решается для вариантов одностороннего и двухстороннего питания.

А. ЗИНГЕРМАН. К вопросу о механическом расчете проводов. „Эл-во“, № 14, 1932, стр. 745

В статье излагается теория и расчет шин на механические взаимодействия их при коротких замыканиях. Отмечая в статье ряд других работ в этой области, автор предостерегает от многочисленных и грубых ошибок, допущенных в некоторых из этих работ. К статье приложена обширная библиография по затронутому вопросу.

М. Л. ЭЛЬКИНД и Р. Ю. МАЛАЯ. Некоторые вопросы проектирования сложных электрических систем, „Эл-во“, 1932, стр. 756

Отмечая отсутствие научной и опытной базы под такими проблемными вопросами проектирования крупных электрических установок, как вопросы резерва, колебаний напряжений, экономического состава и ревизии машин, авторы предлагают ряд крупных объединений по производству электрической энергии и научным организациям немедленно заняться этими проблемами, что должно положить конец пользованию несостоятельными по их мнению, данными при проектировании.

Д. И. АЙЗЕНБЕРГ. О речных направлениях единой высоковольтной сети, „Эл-во“, № 14, 1932, стр. 758

В заметке автор выдвигает вопрос о речных энергетических системах и необходимости учета этого фактора при решении всей проблемы комплексного использования речных артерий (улучшение водного транспорта, мелководия и ирригация, использование гидроресурсов, водоснабжение и т. д.), так и при решении вопросов проектирования единой высоковольтной сети.

ОПТИ—ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Техред Г. Андреев

РЕДКОЛЛЕГИЯ: Е. С. Азатков, В. И. Вейд, В. Н. Глазнов, М. И. Грановская, Я. А. Климовский, Н. С. Палидин, М. И. Рубинштейн, Н. А. Сазонов, М. А. Шателен, Я. Н. Шпильрейн

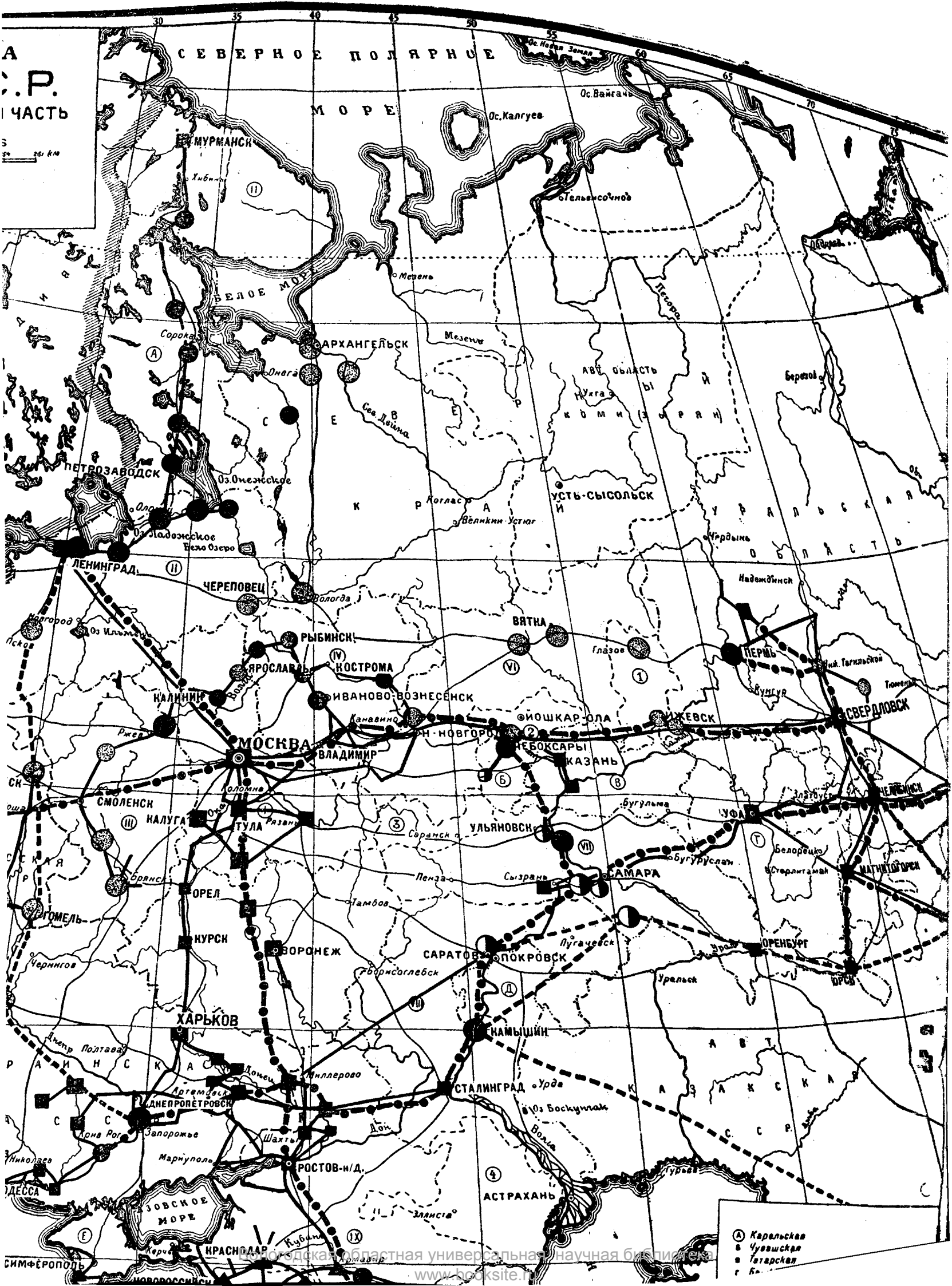
ОТВ РЕДАКТОР Я. А. Алимовский.

Сдано в набор 9/VII. Подписано к печати 28/VII. Бумага 62×94. Печатных листов 5,6 Печатных знаков в листе 78 800

Уполн. Главд. Б—22546

Москва, 9-я типография Мосообполитограф, Юшков пер., 10

Зак. 3449. Тираж 120



ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1932 год на журнал:

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРОМОНТЕР

Ежемесячный орган Всесоюзного Электротехнического Обединения ВЭО

ГОД ИЗДАНИЯ 10-й

Задачи журнала: освещение вопросов монтажа и применения электротехнического оборудования в промышленности, на транспорте и в строительстве социалистического быта. Популяризация знаний в области электротехники сильных токов. (Отдел учебы). Освещение вопросов плановой электрификации. Информация о достижениях союзной электропромышленности. Информация о новостях иностранной техники в области электрификации и фильмоточной промышленности.

Журнал рассчитан на электромонтеров, студентов и ИТР.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год	5 р.
на 6 мес.	2 р. 50 к.
на 3 мес.	1 р. 25 к.
Отдельный номер — 50 к.	

В целях установления постоянного контакта с многотысячной аудиторией своих читателей и выявления пожеланий читательской массы

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

„ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРОМОНТЕР“

обращается с просьбой ко всем читателям присылать свои отзывы о каждом очередном номере журнала (по адресу: Москва, Ильинка, Ипатьевский пер., д. 2, редакции журнала „Электрификация и электромонтер“). Для облегчения систематизации отзывов редакция просит составлять их по следующему образцу:

- 1) Отзыв о журнале № _____
- 2) Какие недостатки вами замечены _____
- 3) Какие статьи считаете интересными и почему _____
- 4) Ваши пожелания для дальнейших номеров _____
- 5) Ваша профессия или квалификация _____

Т.г. читатели! На основе ваших отзывов редакция получит возможность учитывать ваши пожелания в области подбора материала, метода изложения, создания новых отделов и т. д. В тесном общении со всем коллективом читателей—электромонтеров, студентов, ИТР—залог подлинной массовости научно-популярного журнала „Электрификация и электромонтер“.

РЕДАКЦИЯ

ИМАЕТСЯ ПОДПИСКА НА 1932 ГОД
НА ЖУРНАЛ

ЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ СТРУКЦИЯ И НАУКА

ВЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

по постановлению ЦК ВКП(б) о техпропаганде)

„СО-РЕ-НА“

выходит полетными книгами 10 раз в год.

„СО-РЕ-НА“

издается органом Научно-исследовательского сектора и сектора технической пропаганды ВСНХ СССР.

„СО-РЕ-НА“

рассчитан на научных работников, инженеров, хозяйственников, преподавателей и студентов вузов и втузов

„СО-РЕ-НА“

издается при ближайшем участии наиболее крупных ученых, инженеров, хозяйственников и экономистов СССР. В журнале будут также даваться статьи выдающихся иностранных ученых.

„СО-РЕ-НА“

помещает статьи руководящего характера, статьи по внедрению диалектического материализма в естественные и технические науки, теоретические статьи по всем общим дисциплинам, статьи по боевым вопросам современной техники, по организации научно-исследовательского и технического труда и т. п.

„СО-РЕ-НА“

освещает главные основные проблемы и достижения зарубежной научной и технической мысли.

„СО-РЕ-НА“

содержит помимо отдела статей, также отделы: Обзоры и рефераты. „Работа научно-исследовательских институтов СССР“. „Библиография русская и иностранная“. „Хроника СССР и заграницы“, деятельность НИС и техпропа ВСНХ.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год—15 р., на 6 мес.—7 р. 50 к. Отдельный номер—2 р.

НОВЫЙ ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЖУРНАЛ

„ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ“

(МЕТОДИКА И ПРАКТИКА)

Орган сектора производственно-технической пропаганды ВСНХ СССР

ЖУРНАЛ СТАВЛТ СВОЕЙ ЗАДАЧЕЙ:

Дать информационным органам нашей промышленности правильную установку работы, в соответствии с директивами партии о техпропаганде.

Дать инструктивный и методический материал по линии организации работы технических библиотек, групп технической информации и ячеек обмена опытом.

Организовать на страницах журнала обмен опытом в области этой работы. Поставить на широкое обсуждение спорные вопросы и новые предложения. Информировать читателя о формах и методах технической пропаганды на заводе.

Освещать новейшие советские и иностранные издания по вопросам техни.-информационной работы. Держать читателя в курсе техинформработы, проводимой в отдельных отраслях промышленности.

ЖУРНАЛ РАССЧИТАН

на работников органов технической информации, групп по обмену опытом и работников технических библиотек. Журнал представляет также интерес и для инж.-техн. работников нашей промышленности.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год 15 р.,
на 6 мес. 7 р. 50 к.
на 3 мес. 3 р. 75 к.

Цена отдельного номера—1 р. 50 к.

Подписка принимается во всех отделениях и магазинах Книгоцентра ОГНЗа, его уполномоченными и на почте