

КУЙБЫШЕВСКИЙ
УЗЕЛ СООРУЖЕНИЙ



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

11

1937

ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО



Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.bbooksite.ru

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ГОД ИЗДАНИЯ 58-й

11

1937
июнь

Орган Главэнергопрома, Главэнерго НКТП и Энергетического института Академии наук СССР
Адрес редакции: Москва, Бол. Калужская, дом 67. Энергетический ин-т, I этаж, комн. 144; тел. В 5-32-79
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Передовая. К обсуждению проблем III пятилетки в области электрификации	1
С. А. Кукель-Краевский — Некоторые вопросы планирования энергоснабжения и задачи ликвидации последствий вредительства	3
Горев А. А. — Возможности современной электропередачи	7
Вульф А. А. — Устойчивость параллельной работы сверхдальних электропередач	14
Жданов П. С. — Статическая устойчивость протяженных систем электропередачи	20
Брук И. С. — Об определении статической устойчивости синхронной машины	28
Чаплыгин А. В. — Куйбышевский гидроэнергетический узел	29
Черданцев И. А. — Проблемы теории электромагнитного поля в электротехнике в прошлом и настоящем	37
Акопян А. А. — Погрешности при измерении высокого напряжения с помощью конденсаторной втулки	41
Кузнецов Б. Г. — Два века русской электротехнической мысли	45
На обложке — Куйбышевский гидроэнергетический узел сооружений на Волге	

К обсуждению проблем III пятилетки в области электрификации

ПО РЕШЕНИЮ правительства к 1 июля с. г. должен быть составлен план III пятилетки СССР. Весь советский народ участвует в обсуждении великих задач социалистического строительства в III пятилетке. Только в нашей стране, стране Сталинской Конституции и подлинного демократизма, возможно активное участие самых широких масс рабочих, крестьян и трудовой интеллигенции в обсуждении и разработке государственного плана.

Электрификация является одним из важнейших частков всего государственного плана СССР. «Коммунизм есть советская власть плюс электрификация всей страны» — это гениальное определение Ленина служит путеводной звездой нашему социалистическому строительству со времен великого ленинско-сталинского плана ГОЭЛРО.

Агентами японо-немецкого фашизма, троцкистами и бухаринско-рыковскими двурушниками, нанесен сильнейший вред развитию нашего народного хозяйства. Враги народа, свившие настоящее гнездо в органах и предприятиях энергохозяйства и электропромышленности, затормозили рост электрификации СССР. Систематически снижали ввод новых мощностей на электростанциях,

растягивали строительство важнейших объектов на несколько лет, распыляли и омертвляли средства, создавали всяческие диспропорции, срывали технический прогресс электропромышленности (в особенности, электромашиностроения и высоковольтного аппаратостроения), разрушали защиту электросистем, множили аварийность и т. п. Политическая слепота, идиотская беспечность и ротозейство руководителей Главэнерго (т. Ловин) и Главэнергопрома (т. Филимонов), сопровождаемые зажимом самокритики, очковитательством и подхалимством, — содействовали троцкистским бандам в их шпионской, вредительской и диверсантской деятельности.

Наш журнал тоже оказался далеко не на высоте поставленных перед ним задач освещения путей технического прогресса и технической политики в области электрификации, не содействовал развитию большевистской самокритики в среде советской научно-инженерной общественности, допустил выступления на своих страницах и к участию в редакции некоторых разоблаченных впоследствии врагов народа.

Разработка плана III пятилетки в области электрификации требует прежде всего ответа на во-

прос, как выполнены задачи II пятилетки, и учета всех узких мест и недостатков в электроэнергетике СССР.

Вспомним, как определил задачи электрификации Союза XVII съезд ВКП(б) в своей резолюции по докладу тт. В. М. Молотова и В. В. Куйбышева о втором пятилетнем плане:

«Создать новую энергетическую базу для завершения реконструкции всех отраслей народного хозяйства и образовать во всех энергетических узлах резервы мощностей, обеспечивающие бесперебойное электроснабжение народного хозяйства. Завершить в основном электрификацию промышленности широчайшим использованием новейших электроемких методов производства во всех отраслях промышленности, особенно в металлургии и химии (рост потребления энергии электроемкими производствами более чем в 9 раз), широким развитием электрификации транспорта и постепенным внедрением электроэнергии в производственные процессы сельского хозяйства. Шире развернуть теплофикацию промышленности и крупных городов. Продолжать линию на более широкое использование для электроснабжения местных видов топлива — углей Подмосковского бассейна, Урала, Восточной Сибири, Средней Азии, торфа и сланцев — и особенно гидроэнергетических ресурсов. Завершить во второй пятилетке кольцевание районных станций в пределах районов и начать межрайонное кольцевание станций с созданием уже во втором пятилетии крупнейшей в мире системы электроснабжения (Донбасс — Приднепровье с выработкой 9 млрд. квт/ч в год). Развернуть газификацию торфа и сланцев».

Как видно из этого, образование резервов мощностей во всех энергетических узлах здесь было выдвинуто среди других важных задач в качестве первоочередной задачи.

И с этой весьма важной с точки зрения обороны страны задачей, вследствие вредительской деятельности врагов народа, наше энергохозяйство во II пятилетке не справилось: вместо резервов мы имеем в большинстве электросистем дефицит мощностей.

Печатаемая ниже статья т. С. А. Кукель-Краевского более подробно останавливается на некоторых вопросах планирования энергоснабжения в связи с ликвидацией последствий вредительства и, в частности, на проблеме резервов в

энергохозяйстве. С. А. Кукель-Краевский ставит вопрос о необходимом сочетании в наших условиях задач использования мощностей установленного оборудования и создания резервов в электросистемах. В нашей энергетической литературе (в том числе и в журнале «Электричество») не находила нужного отражения и серьезнейшая задача создания резервов, не была борьба за резервы.

Первостепенным делом III пятилетки в области электрификации должна стать ликвидация этого прорыва в нашем энергохозяйстве.

Помещением ряда статей (тт. А. А. Горева, П. Жданова, И. С. Брука, А. В. Чаплыгина), связанных с созданием одного из крупнейших звеньев единой электроэнергетической системы Союза — Куйбышевская гидростанция—Мосэнерго — журнал «Электричество» открывает обсуждение проблемы III пятилетки.

Дискуссия, имевшая место в марте с. г. в группе энергетики Академии наук СССР, затрагивает основные вопросы интерконнекции этих двух узлов. Значение правильного выбора параметров схем грандиозной линии электропередачи видны не только из цифры общей мощности объединенных систем — 3600 MVA, но еще больше из того, что эта линия явится звеном высоковольтной сети Европейской части СССР. Правильно определение стандарта напряжений (300 или 380 kV), схемы передачи (блочная или замкнутая), наиболее технически и экономически выгодное решение о компенсации реактивной мощности и т. п. имеют большое значение с точки зрения дальнейшего развития нашей социалистической электрификации. Кроме этого в журнале намечается поставить на обсуждение также проблемы преобразования электроэнергии на высоком напряжении, использования подземных кабелей высокого напряжения для передачи больших мощностей, выбора рода тока и стандарта напряжений для дальнейшей электрификации ж. д., и ряд других важных проблем нашего электроэнергетического фронта.

Редакция обращается ко всем научным работникам и инженерам электроэнергетического хозяйства с просьбой принять активное участие в этом обсуждении как путем инициативной постановки вопросов, так и путем критики обсуждаемых предложений.

которые вопросы планирования энергоснабжения и задачи ликвидации последствий вредительства

С. А. Кукель-Краевский

Энергетический институт Академии наук СССР

I

ПРАКТИЧЕСКИ решающим критерием выполнения плана энергоснабжения у нас до сих пор считается по совершенно неуместной аналогии с другими отраслями промышленности годовая выработка электроэнергии (именно выработка, включая иногда чрезмерно большое потребление на собственные нужды электростанций и потери в электросетях).

Между тем выполнение именно такого показателя, как годовая выработка электроэнергии, вообще не может служить решающим критерием для оценки работы энергохозяйства.

Это можно иллюстрировать следующим примером. В 1936 году электростанции системы Главэнерго перевыполнили план на 700 млн. kWh.

Хотя эта величина и превышает во много раз киловаттчасы, недополученные потребителями из-за аварий в электросистемах, однако этими авариями нанесен народному хозяйству большой ущерб. Таким образом за перевыполнением показателя годовой выработки электроэнергии скрывается, как за ширмой, аварийность электросистем.

Величина 700 млн. kWh составляет только около 1% от суммы собственных расходов систем и потерь в сетях.

Если бы системы Главэнерго увеличили собственные расходы, они значительно повысили бы перевыполнение плана. Наоборот, если бы они снизили их, основной показатель их хозяйственной деятельности ухудшился бы.

Потребление энергии является показателем хозяйственной деятельности всего комплекса потребителей, но не самой энергосистемы.

Почему, несмотря на вопиющие отставания от выполнения плана электростроительства, план выработки электроэнергии систематически перевыполнялся? Исключительно потому, что почти во всех районах промышленные потребители уплотнили свои графики потребления. Они делали это путем лучшего использования своего электрооборудования, либо вследствие регулирования графиков электропотребления со стороны энергосистем. Если бы ввод мощностей был больше, энергосистемы не отказывали бы в присоединении и лимитировали бы потребителей, — план был перевыполнен больше.

Знание годовой продукции электроэнергии главным показателем хозяйственной деятельности электростанций способствует очковтирательству.

В то время, как руководители Главэнерго в газетах и статьях хвастались перевыполнением плана выработки электроэнергии, они скромно считали о том, что выработка тепловой энергии вследствие безобразнейшей затяжки развития теплофикации была значительно ниже плана. Уже в 1936 году годовой план выполнен и по выработке теплоэнергии. Но это было следствием

того, что годовой план был задан в размере всего только 5,0 млн. MCal вместо 7,5 млн. MCal на тот же 1936 год по пятилетнему плану. Нетрудно выполнить годовой план, когда он задается равным $\frac{2}{3}$ от предусмотренного тем самым пятилетним планом, который по показателям промышленности НКТП в целом выполнен досрочно.

Кроме того значительная часть тепла, отпущенная потребителям системами Главэнерго, получена путем прямого отпуска из котлов без пропуска через турбины (в частности, и на многих чисто конденсационных станциях). Отпускать пар прямо из котлов, когда это возможно без ущерба для электроснабжения, весьма полезно. Но нельзя считать его наравне с тем паром, который, будучи пропущен через турбины до отпуска потребителю, выработал электроэнергию с очень малым дополнительным расходом топлива. Неправильное по существу суммирование пара, отданного потребителям непосредственно из котлов от тэц, с паром, полученным из отбора турбин, является не простой ошибкой в построении баланса, а имеет более далеко идущие последствия. Во-первых, искажается картина развития теплофикации и умаляются ее результаты, а, во-вторых, что хуже, при составлении планов теплофикации часто заранее проектируют более или менее значительный часовой отпуск пара прямо из котлов. Это значит преувеличивать необходимую для теплофикации городов дорогую котельную мощность высокого давления в целях выполнения такой функции, которую с тем же успехом выполняют значительно более дешевые котельные низкого давления, к. п. д. которых в настоящее время может быть не ниже, чем к. п. д. котельных тэц.

В 1937 году предполагается получить от станций Главэнерго около 6 млн. MCal тепла отборного пара. На базе этих 6 млн. MCal отпущенного тепла можно выработать в настоящее время около 1,2 млрд. kWh электроэнергии из 28 млрд. kWh, вырабатываемых по плану 1937 года на станциях Главэнерго, что составляет только 4,3%. Такой незначительный результат внедрения теплофикации за 6 лет, истекших после постановления ЦК ВКП(б) о развитии теплофикации, является следствием целого ряда причин, из которых отметим основные.

а) Резкое недовыполнение плана электростроительства против пятилетнего плана отразилось в первую очередь на числе введенных за пятилетие, именно, теплофикационных агрегатов, которые уже теперь занимают по количеству первое место в планах электрификации.

б) Отставание строительства тепловых сетей от строительства тэц приводит к тому, что даже установленные уже теплофикационные агрегаты зачастую вынуждены работать по конденсационному режиму, давая в результате вместо ожидавшейся экономии в расходе топлива значительный

перерасход по сравнению с районными конденсационными электростанциями.

в) Дискредитация теплофикации непродуманным и нелепым ее выполнением: строятся московские тэц с целью снизить расход топлива и перевести теплоснабжение Москвы на местное топливо, а между тем задерживается развитие тепловых сетей и переход на теплофикационный режим. На Сталинской тэц это продолжалось целый год. При конденсационном же режиме получается не экономия, а перерасход топлива по сравнению с вариантом получения той же энергии от районной конденсационной станции. Задерживается очистка газов от золы и серы, в результате чего та же Сталинская тэц работает не на подмосковном угле, а на дальнепривозном донецком и, работая даже на нем, нарушает требования санитарии и гигиены города. Теплоснабжение центрального района Москвы от станции им. Смидовича — 1 МГЭС, работающей на мазуте, тоже противоречит основным принципам теплофикации.

Всем известная история затяжки строительства Фрунзенской тэц в Москве и Кировской в Ленинграде является ярким примером несоответствия оперативного планирования Главэнерго основным установкам XVII партсъезда в области электрификации и вместе с тем демонстрирует вопиющую бесхозяйственность.

Отмеченные выше крупные недостатки являются результатом, с одной стороны, вредительства разоблаченных теперь врагов народа, троцкистов контрреволюционеров, свивших свое змеиное гнездо в энергетике, и, с другой стороны, беспечности и политической слепоты людей, которым партия и правительство доверили руководство энергохозяйством.

При этом оценка сложнейшей деятельности электроснабжающей промышленности по одному показателю выполнения плана выработки электроэнергии являлась великолепной ширмой, скрывающей плохое состояние важнейшей отрасли народного хозяйства.

Эта ширма должна быть убрана. Надо впредь судить о деятельности электроснабжающей промышленности прежде всего по тому, насколько полно удовлетворены все возможные потребители электроэнергии и тепла и насколько обеспечены им непрерывность электро- и теплоснабжения.

II

Кроме неправильного выбора показателей для оценки деятельности энергосистем, имеется еще одна вредная ширма, скрывающая истинное положение дела.

Это преувеличенное значение, которое придают такому показателю как, так называемое, число часов использования оборудования, связанное непосредственно с опаснейшей недооценкой проблемы резерва в энергоснабжении.

Число часов использования — по существу неправильный термин. Оборудование может работать все 8760 h в год, но если оно при этом будет загружено в среднем только наполовину, то каждый киловатт вырабатывает не физический предел 8760 kWh в год, а половину его — 4380 kWh. Показатель распространенной неправильной терми-

ние имеет 4380 h использования, тогда как используется оно на самом деле 8760 h. Правильнее: избежание ошибочных толкований выражать показатель использования в виде числа kWh продукции, получаемой от одного киловатта произведенной мощности, подобно тому как на транспорте пользуются показателем тонно-километр на километр.

Для наиболее экономичных станций и при работающих на местном топливе надо стремиться дойти до физически допустимого предела использования установленной мощности (у нас есть станции, дающие свыше 7000 kWh на kW). Но для менее экономичных и, в особенности, для работающих на привозном мазуте станций надо этот показатель иметь возможно меньшим. И та энергосистема, которая сумела увеличить показатель использования базисных станций на местном топливе за счет снижения такого же показателя у тепловых, работающих на нефти, показала хорошую работу диспетчерской службы в этом отношении.

Между тем у нас показатель использования считается основным для оценки деятельности всех станций. Были попытки, в частности, по инициативе Энергетического института Академии наук совместно с 1 Московской Государственной электростанцией им. Смидовича изменить это положение, но дело потонуло в Главке.

Надо различать показатель нагрузки¹ и показатель использования. То что в энергохозяйстве СССР показатель нагрузки больше, чем в капиталистических странах, действительно характеризует более рациональное потребление электроэнергии и является несомненным преимуществом нашей плановой социалистической системы. Отношение показателя нагрузки к показателю использования представляет собой коэффициент резерва. Он больше единицы на долю резервной мощности, считая от той мощности, которая нужна для покрытия максимума нагрузки.

В наших крупных системах показатель использования иногда равен показателю нагрузки, что указывает на отсутствие резерва.

К повышению показателя использования, конечно, надо стремиться, но отнюдь не за счет отказа от резервов, необходимых энергохозяйству.

Мероприятиями для повышения использования оборудования должны быть:

- повышение показателя нагрузки, в частности путем применения потребителей — регуляторов нагрузки, что у нас еще далеко не достаточно развито;
- сокращение сроков ремонта и ревизии;
- укрупнение и объединение систем;
- полная ликвидация аварийности и аварийного простоя оборудования.

Несмотря на то, что одной из главных задач второго пятилетнего плана в области энергетики по решению партии и правительства была поставлена именно задача обеспечить промышленные районы резервной мощностью, а также развить внутрирайонные и межрайонные связи, наше энергохозяйство подошло к концу пятилетки с

¹ Показатель нагрузки представляет собой число ватт-часов, полученных в среднем от киловатта установленной мощности, фактически участвовавшей в покрытии максимума нагрузки (с учетом резерва).

ньшим резервом, чем имело вначале, и практически почти повсеместно резерв равен нулю, нормальная производственная мощность часто же меньше, чем максимум нагрузки, покрываемый за счет усиленной форсировки оборудования. Если правильно оценивать положение, то надо было сказать: энергоснабжающая промышленность не выполнила важнейших заданий пятилетнего плана, а выполнение физического объема продукции электроэнергии зачастую сопровождалось понижением качества электроэнергии (частота и напряжение).

Создание необходимых резервов — такое дело, которое может быть осуществлено только через 2—3 года после того, как за него серьезно возьмутся и полностью обеспечат энергохозяйство необходимыми денежными и материальными ресурсами.

Между тем отсутствие резервов — чрезвычайно серьезный недостаток наших энергосистем.

Если сопоставить электрохозяйство Германии и СССР, то при почти равной годовой выработке электроэнергии у нас мощность электроцентрализованной почти вдвое меньше, чем в Германии. Если исключим из рассмотрения в последней ряд мелких изношенных станций, то все же окажется, что потенциальные возможности расширения электрообеспечения у Германии гораздо больше, чем у нас.

Этот факт, конечно, не раз вставал перед энергетиками и неэнергетиками, задумывающимися над вопросами обороноспособности нашего хозяйства. О враги и люди, большие идиотской болезнью беспечности, утешали сомневающимися следующими корнями неверными рассуждениями: если понадобится усилить электроснабжение промышленности, будем выключать коммунальных потребителей, закрывать «конфетные» фабрики. Но коммунальное электропотребление вследствие пока еще слабого развития электрификации быта у нас относительно мало, в особенности в таких промышленных центрах, как Донбасс, Баку, Горький, Урал и др., и снижение этого потребления не сможет выводить большую мощность. Что же касается «конфетных» фабрик, то их электрооборудование очевидно будет использовано в промышленности. У нас до сего времени никем не установлено, какой резерв необходимо предусматривать при планировании энергоснабжения. Если подойти к вопросу теоретически, следовало бы иметь энергосистеме не менее трех резервных агрегатов в крупнейшего размера: один на случай аварийного выхода из строя, второй для обеспечения планово-предупредительного ремонта, третий для обеспечения потребителей возможности повысить потребление в промежутки времени между пиками новых мощностей в систему. Если благодаря стахановской работе по ремонту и ревизии настоящее время в большинстве систем сезонный овал потребности достаточен для вывода агрегатов, то для этих систем достаточно как теоретический минимум два агрегата в резерве. Но все же многих промышленных районах сезонного провала в графике нагрузки нет вообще или он слишком мал и потому нужно иметь не менее трех агрегатов.

На практике же пока система мала, она просто может иметь достаточного резерва. Если, на

пример, система состоит из одной станции в 100 MW в четырех агрегатах, то один из них должен быть в резерве, т. е. резерв составляет $\frac{1}{3}$ от максимальной нагрузки, а все же пока происходит ремонт и ревизия, станция остается вовсе без резерва.

Наоборот, если система имеет около 30 агрегатов, примерно, одинаковой мощности, она может иметь три резервных в то время, как ее процент резерва около 10. При еще большей мощности системы можно было бы иметь еще меньший % резерва. Однако мы считаем, что при планировании даже крупных изолированных систем не следует допускать меньший, чем 10%-ный резерв для того, чтобы обеспечить возможность промышленности перевыполнять планы без помехи со стороны энергетики: суммарная присоединенная мощность моторов и других приемников тока всегда превышает мощность электростанций, вместе взятых. Следовательно, потребитель всегда имеет потенциальную возможность повысить спрос на электрическую мощность без дополнительной установки приемников тока.

Однако даже 10%-ный резерв очень крупных систем не обеспечит надежность электроснабжения по условиям обороны. Тем не менее возможно все же ограничиться планированием 10%-ного резерва для крупнейших систем при условии одновременного создания межрайонных высоковольтных связей и межрайонных резервов. Объединение систем при таких условиях позволит в случае необходимости временно использовать в районе свободный резерв соседних систем. Итак, основными методами для повышения резерва в наших условиях должны быть: укрупнение систем, позволяющее снизить % необходимого резерва до 10, и объединение систем межрайонными высоковольтными связями, что позволит в случае необходимости резерв одной системы использовать в соседней системе.

Вредительство японо-немецких наемников, контрреволюционеров троцкистов в энергетике привело к тому, что к концу второй пятилетки не созданы необходимые резервы мощности и имеется прорыв в строительстве линий электропередач как внутрирайонных, так и межрайонных. Такое невыполнение основных заданий пятилетки бьет очень сильно по надежности энергоснабжения. Даже такие линии как 110-kV линия, соединяющая Ивановскую систему с Ярославской, которая с относительно очень небольшими затратами позволяла использовать значительную разновременность максимумов нагрузки двух систем и была равноценна примерно 16 MW мощности, надолго отстрочивалась.

Усиление строительства электростанций для создания резервов с одновременным интенсивным строительством линий электропередач внутрирайонных и межрайонных является основным мероприятием для ликвидации последствий вредительства в оперативном планировании электростроительства.

В целом ряде систем (Мосэнерго, Ленэнерго) чрезвычайно изношено кабельное хозяйство и перегружены распределительные сети. Средства на это дело систематически вычеркивались из фондовых планов Главэнерго так же, как средства на

доделки, иногда очень необходимые. Все это — затраты, которые, будучи использованы по назначению, не дают возможности похвастаться эффектными достижениями. Поэтому очковтирателям не хочется их защищать, а врагам легко было их выкидывать из смет.

Необходимо в этой области немедленно добиться коренных изменений.

III

Главэнерго охватывает только часть (хотя и большую) электростанций. Многие станции например, фабрично-заводские тэц, имеющие районное значение, находятся в ведении других главков.

Мы вступили в такой период осуществления электрификации страны, когда повсеместно создаются крупные и сложные по структуре энергосистемы. В таких системах гидростанции являются уже во многих случаях, а в будущем станут повсеместно одним из важнейших элементов системы, работа которых непосредственно влияет на показатели и системы в целом и отдельных паровых электроцентралей. Между тем гидроэнергетика в НКТП отделена от теплоэнергетики довольно прочной стеной, разделяющей различные главки.

В настоящее время мы даже не знаем своих энергосистем. Во многих случаях эти системы состоят из станций, подчиненных совершенно различным ведомствам, и хотя они соединены между собой электрически, но фактически не всегда и не везде работают как одно целое. Главэнерго в своих отчетах дает сведения не о системах в целом, а о той части каждой системы, которая ему подчинена. А между тем результаты деятельности каждой станции зависят от той роли, которая ей отводится в системе в целом. Не станция, а система является хозяйственным комплексом с единым производственным процессом. Рациональное распределение работы между электростанциями системы имеет очень большое влияние на средневзвешенные показатели по системе в целом, которые в сущности в наших условиях и должны являться наиболее важными и интересными. У нас имеются трудности объединения систем в одно целое, которые необходимо изжить: некоторые системы фактически охватывают части различных административных делений и даже союзных республик. Например, часть системы Донбасса расположена в УССР, юго-восточная часть в РСФСР. Это препятствует объединению системы, которое в сущности по хозяйственным соображениям необходимо.

Можно предвидеть, что аналогичные случаи будут встречаться впредь все чаще и чаще. Надо сделать выводы из того положения, что союзная энергетика едина, и не может ее развитие стесняться административным делением обслуживаемой ею территории.

Когда в НКТП выявлялась потребность в проектировании нового крупного промпредприятия, вставал остро вопрос об его снабжении электроэнергией и теплом. Если бы у Главэнерго имелись готовые технико-экономические проекты развития своих систем, включая и «чужие» станции, работающие совместно со станциями Главэнерго, задача решалась бы легко. Но за неимением таких проек-

тов приходилось в самом срочном порядке разрабатывать несколько вариантов, что создавало благоприятную почву для вредительства. В результате — появление маломощных станций на относительно небольшом расстоянии друг от друга и чрезмерное развитие собственных котельных вместо тэц. Можно назвать, например, Пермский район, в котором возникло много предприятий с котельными вместо тэц, несоответствие энергетической базы развитию промышленности в Горьком и др.

Нельзя решать вопросы размещения промышленности без учета энергетики и в «пожарном» порядке. Необходимо иметь заранее подготовленные проекты развития систем. Однако узкоделаяческий подход Главэнерго и планового сектора Наркомата к проектированию препятствовал выделению для этого важного дела необходимым средств.

С 1932 г. из года в год резко снижались расходы Главэнерго на проектирование, изыскания и научно-исследовательские работы. Это вредный результат деляческого подхода, лишивший главок «заделов» для будущего представления о перспективах и научного багажа. Это было очень неудобно для культивирования косности и технического консерватизма, столь характерных для Главэнерго в течение второй пятилетки. Это задержало разрешение вопроса о газоочистке и сероочистке, а следовательно и развитие теплофикации в больших городах. Это задержало разрешение в СССР задачи перехода к подземным высоковольтным кабелям, имеющего оборонное значение, и мы в этом деле резко отстаем от некоторых капиталистических стран.

Необходимо немедленно усилить проектную и научно-исследовательскую работу в области энергоснабжения для скорейшего изжития последствий вредительства и технического консерватизма в энергетике.

* *

Необходимы следующие основные мероприятия.

а) Глубоко продуманная работа по перспективному планированию и проектированию развития систем при обязательном условии тщательного обсуждения этих планов и проектов на местах с участием общественности, потребителей энергии и поставщиков оборудования.

б) Развертывание большевистской самокритики, искоренение всех элементов очковтирательства в оперативном планировании и усиление внимания к подбору и подготовке плановых работников в энергохозяйстве.

в) Устранение ведомственных и административных перегородок в районных электросистемах.

В этой статье далеко не охвачены полностью все основные вопросы, связанные с задачей ликвидации последствий вредительства в планировании энергетике.

При разработке плана III пятилетки электрификации необходимо учесть весь комплекс мероприятий для полной и решительной ликвидации последствий вредительства в планировании энергоснабжения страны.

Возможности современной электропередачи¹

DISTANCE-POWER LIMITS FOR TRANSMISSION LINES OF TO-DAY

А. А. Горев

Ленинградский Индустриальный институт

1. Вопрос о том, каковы возможности современной электропередачи, встал сейчас вплотную перед нашей энергетикой.

Рациональное использование гидроресурсов наших водных артерий, хотя бы только Европейской части Союза, предполагает возможность электропередачи мощностей порядка 1000 MW на расстояния порядка 1000 km. Необходимость подобных передач вытекает из тех общих наметок единой энергетической системы Союза, которые разрабатываются нашими плановыми органами. Такая же проблема конкретно была поставлена при проектировке Куйбышевской гидроэлектростанции: речь шла о передаче 600 MW из Куйбышева в Москву на расстояние 900 km.

Хотя принципиальная возможность таких передач не вызывала сомнений, однако их экономические показатели были далеко не ясны. По мнению Рюденберга² обычная (некомпенсированная) передача мощности, равной натуральной мощности линии, в условиях устойчивости возможна только на расстоянии 200 km. В случае больших расстояний необходимо устройство весьма дорогих и затрудняющих эксплуатацию промежуточных опорных пунктов. Американский опыт не идет дальше передачи Болдер Дам — Лос-Анжелес, где для передачи 235 MW на 430 km применены две цепи напряжением в 287 kV, так что в одну цепь приходится 68% ее натуральной мощности.

Имеющийся материал не давал основания к тому, чтобы считать вопрос о наших будущих передачах высшего порядка экономически разрешенным. Это и побудило нас уделить главное внимание этой проблеме в работе, проведенной по заданию группы энергетики Академии наук СССР.

Мощность, которая может быть передана по данной линии передачи, ограничивается: 1) потерями энергии в ней, 2) необходимостью регулировать напряжение в заданных пределах и устойчивостью параллельной работы системы при авариях. При современном состоянии техники первое ограничение является наиболее жестким; при длинных линиях рабочая мощность передаточного устройства определяется именно требованиями устойчивости.

Назовем рабочую мощность линии, выраженную в долях ее натуральной мощности³ ее *удельной*

рабочей мощностью. Оказывается, что эта характеристика линии передачи, если рабочая мощность выбрана из соображений устойчивости, *практически не зависит от напряжения линии*, являясь функцией от длины линии и реактивных конечных пунктов — генерирующего и принимающего передаваемую энергию.

Это обстоятельство чрезвычайно упрощает исследование вопроса: напряжение линии, как независимая переменная, в выражения для удельной рабочей мощности не войдет.

Отсюда следует, что при заданном расстоянии передача определенной доли натуральной мощности возможна при любом практически применяемом напряжении, при равных технических показателях.

Оптимальное напряжение для данной передачи не зависит от расстояния, а только от передаваемой мощности, причем его выбор диктуется только экономическими соображениями. Например, 400 MW на расстояние 500 km можно передать одной линией при 400 kV, двумя линиями при 282 и четырьмя при 200 kV; технические показатели каждого из этих вариантов будут одинаковы, вопрос о выборе напряжения решается сравнением их стоимости. Повышение напряжения не расширяет возможностей современной передачи в отношении расстояний, напротив, мощность, которая может быть передана на данное расстояние, растет пропорционально квадрату примененного напряжения. Хотя эти общие положения были установлены уже давно, однако отчетливая их формулировка может значительно помочь при ориентировочных проектировках.

Удельная рабочая мощность в первую очередь определяется расстоянием передачи; этот вопрос и является основным в настоящей статье.

Прежде чем решать его, нужно было установить основные предпосылки. При выборе их естественно было ориентироваться на те, которые дают наилучшие условия для работы дальней передачи.

2. Предполагалось, что передаточное устрой-

где P_n — натуральная мощность в MW; U — линейное напряжение в kV и z — волновое сопротивление линии в Ω .

При передаче по идеальной линии — линии без рассеяния энергии, ее натуральной мощности возможен режим, при котором напряжение во всех точках линии постоянно и реактивные мощности как приемного, так и генераторного ее концов равны нулю; исключительные свойства такого режима и послужили основанием тому, чтобы считать мощность, передаваемую в этом режиме, натуральной мощностью линии.

Практически величина z для обычных конструкций линий передачи меняется весьма мало; ее среднее значение равно 400 Ω , так что с хорошей точностью можно считать:

$$P_n = \frac{U^2}{z}, \quad (1)$$

¹ Переработанный для печати доклад автора на Совещании по сверхдальним передачам при группе энергетики Академии наук СССР 2 марта 1937 г.

² "Электрическая передача больших мощностей на далекие расстояния" 1934, стр. 68.

³ Известно, что натуральной мощностью линии называется мощность, связанная с напряжением линии соотношением:

Удольская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ство состоит из понижающего трансформатора, линии передачи, повышающего трансформатора и генератора, причем совокупность этих устройств составляет изолированный блок, приключенный к сети принимающего энергию центра потребления только зажимами понижающего трансформатора; при аварии в какой-либо точке блока весь блок отключается, потерянная при этом мощность компенсируется вращающимся резервом приемной системы.

При передаче несколькими цепями каждая цепь составляет отдельный блок. Этот тип передачи был назван блочным типом в отличие от типа, связанного или резервированного, который характеризуется тем, что при выпадении одной линии или части линии совокупность остальных является достаточной для пропуска номинальной мощности всего передаточного устройства, без выпадения машин из синхронизма.

Ясно, что передача блочного типа должна удовлетворять условию устойчивости параллельной работы при аварии в любой точке системы; однако при аварии в зоне одного из блоков пострадавший блок предполагается выпавшим из синхронизма и отключенным, так что синхронизм должен быть сохранен только между генераторами прочих не пострадавших блоков и генераторами приемной системы; требование сохранения устойчивости параллельной работы генератора и приемной системы при аварии на соединяющей их линии, обязательное для передачи связанного типа, — для блочной передачи не накладывается, что значительно облегчает условия ее работы. На этом основании при расчетах возможностей передачи был принят именно тип блочной передачи. Расчет производился на статическую устойчивость, причем коэффициент запаса статической устойчивости выбирался таким, чтобы при аварии в любой точке системы (но не в зоне блока) была обеспечена и динамическая устойчивость системы.

Выбор запаса статической устойчивости был произведен на базе расчетов динамической устойчивости, сделанных для передачи Куйбышев — Москва. Эти расчеты показали, что система имеет предел статической устойчивости, рассчитанный нижеизложенным методом, при нагрузке в 227 MW на 1 линию напряжением в 300 kV; рабочая нагрузка принята была в 160 MW, что отвечает запасу в 1,41.

Далее, расчетами проф. А. А. Вульфа было показано, что при аварии в любой характерной точке системы, кроме зоны блока, система сохраняет динамическую устойчивость. Авария предполагалась в виде трехполусного к. з.; необходимое время отключения аварийного участка не спускалось ниже 0,2 сек. Поэтому можно считать выбранный для общих расчетов, результаты которых изложены ниже, запас в 1,5 достаточным. Этот запас, разумеется, должен быть прокорректирован дальнейшими подобными расчетами, обработкой эксплуатационных данных и специальными экспериментами; пока автор полагает, что для блочных передач, замыкающихся к системам, снабженным современной быстродействующей защитой, нет оснований к его повышению.

Следует отметить, что большие запасы статической устойчивости диктуются обычно соображениями динамической устойчивости; если потеряния обеспечена, — что достигается для передачи блочного типа при запасе в 1,5, — то остается вопрос о надежной работе передачи при нормальном режиме.

Лучшим показателем такой надежности является величина синхронизирующего момента, действующего на ротор генератора при малых отклонениях его от нормального режима работы, или, точнее, отношение синхронизирующей мощности к мощности в нормальном режиме; это отношение в рассмотренных случаях менялось в зависимости от выбранных значений реактивностей конечных устройств. При типичных значениях этих реактивностей и при том условии, что мощность конечных устройств равна рабочей мощности линии, это отношение, при указанном выше запасе статической устойчивости, оказалось не зависящим от длины линии и равным 0,61, что вполне обеспечивает спокойную работу передачи в нормальном режиме.

Таким образом для выяснения возможностей современной электропередачи был принят блочный тип. При определении максимальной рабочей нагрузки на одну цепь были взяты коэффициенты запаса, обеспечивающие как спокойную работу передачи при нормальном режиме, так и устойчивость системы при любых возможных в системе авариях. При этом предполагалось, что при аварии в зоне одного из блоков пострадавший блок отключается, а потерянная мощность компенсируется вращающимся резервом системы.

3. Устойчивость параллельной работы весьма существенно зависит не только от реактивности самой линии, но и от реактивностей конечных устройств: приемного и генерирующего. В своей упомянутой выше книге Рюденберг считает, что из предельно допустимой, по соображениям динамической устойчивости, суммарной реактивности в 0,66 условных единиц только одна треть приходится на линию, а две трети поровну — на генераторную и приемную станции, и приходит на основании подобных допущений к весьма пессимистическим оценкам возможностей обычных электропередач (см. табл. 10 его книги). Между тем, как в случае передачи Куйбышев — Москва, в большинстве случаев, которые нам будут встречаться при проектировке сверхпередач нашей единой энергетической системы, мы будем иметь дело с примыканием дальних передач к центрам потребления, собственная установленная мощность которых (теплофикация) будет во много раз превышать мощность, передаваемую издалека по одной рабочей цепи передаточного устройства. Таким образом для каждой из дальних передач приемную систему можно было бы считать «шины бесконечной мощности», иначе говоря, такую систему, частота и напряжение которой остаются постоянными при любых колебаниях нагрузки в ней. Однако попытка конкретно реализовать такую «схему примыкания» наталкивается прежде всего на вопрос о токах к. з. Для ограничения приходится секционировать подводящую сверхмощную приемную систему, ограничивая мощность секции и, следовательно, ток к. з. в ней.

реактивности, достаточные для ограничения разрывных мощностей масляных выключателей теми же, на достижение которых можно рассчитывать в ближайшем будущем. Этот вопрос освещен в работах автора и проф. Щедрина, помещенных в группе энергетики Академии 2 марта с. г.

Из этих работ следует, что оптимальной схемой весьма мощной системы, к которой примыкает ряд дальних передач, является принципиальная схема, изображенная на рис. 1.

Генераторы дальних станций G_1 через повышающие трансформаторы T_1 , линию передачи ЛП и понижающие трансформаторы T_2 примыкают к секционным шинам СШ; к этим же шинам присоединены генераторы секции G_2 через трансформаторы T_3 и нагрузка H .

Секции связаны между собой через общие шины ОШ посредством трансформаторов T_4 . В такой схеме при мощности блока в 200 MW и максимальной разрывной мощности масляных выключателей в 3500 MVA общая мощность генераторов одной секции не может быть значительно больше тройной мощности блока—600—650 MW. При таком отношении мощностей секции и блока регулирующий эффект потребителя оказывает еще заметное и неблагоприятное влияние на величину синхронизирующей мощности, действующей на дальний генератор. Поэтому при больших мощностях блока следует, чтобы блок примыкал к двум подсекциям системы, как это показано на рис. 2, где изображена только одна секция системы рис. 1; причем эта секция, так же как и остальные, разбита на две подсекции, так что блоки теперь примыкают к подсекционным шинам ШПС, а не секционным. В такой схеме при мощности блока в 200 MW и максимальной разрывной мощности масляных выключателей в 4000 MVA можно сделать мощность каждой подсекции равной 625 MW, так что суммарная мощность двух подсекций, непосредственно связанных с одним блоком, достигает шестикратной мощности этого последнего.

Такая принципиальная схема и была придана Московскому объединению в проекте передачи Куйбышев — Москва; расчеты статической устойчивости подобной блочной передачи, произведенные с учетом регулирующего эффекта потребителей, показали, что вызываемое им снижение синхронизирующей мощности, действующей на дальний генератор, в такой схеме не превосходит —4%.

Учитывая это влияние в выбранном запасе статической устойчивости, можно в ориентировочных расчетах принимать напряжение на шинах подсекций постоянным, т. е. считать, что блок работает через трансформаторы T_2 на «бесконечные шины». Схема рис. 2 позволяет, кроме того, существенно уменьшить реактивность понижающих трансформаторов T_2 , так как общую их мощность можно увеличить в 1,5—2 раза против равной мощности блока, чтобы полнее использовать линию передачи в случаях работы на одну подсекцию; тогда при одновременной работе на обе подсекции, когда от линии может потребоваться максимальная пропускная способность, реактивность понижающих трансформаторов, отнесенная

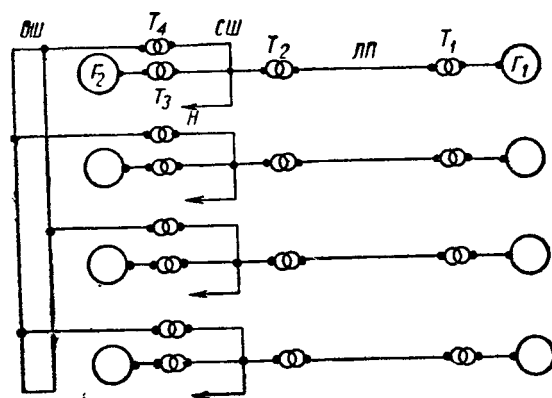


Рис. 1

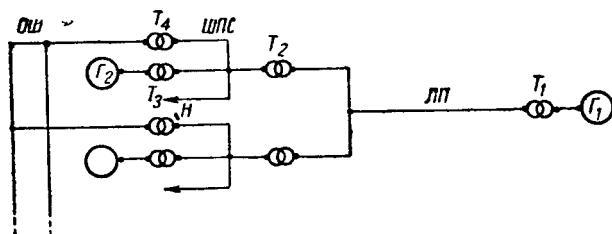


Рис. 2

к рабочей мощности линии, окажется в 1,5—2 раза меньше, что окажет благоприятное влияние на устойчивость.

Из приведенных соображений следует, что схема примыкания блочной линии к сверхмощной приемной системе может быть построена таким образом, чтобы мощность генераторов приемной системы, непосредственно связанных с блоком, настолько превосходила мощность этого последнего, что условия его работы будут близки к условиям работы на бесконечные шины; поэтому при расчете максимальных рабочих нагрузок линий предполагалось, что каждая линия работает через понижающий трансформатор на шины бесконечной мощности. При этом, однако, уменьшение реактивности понижающих трансформаторов, возможное для схемы рис. 2, не учитывалось, что приблизительно компенсировало ту небольшую ошибку, которая получается при таком расчете из-за пренебрежения регулирующим эффектом потребителей. Очевидно, что такое рассмотрение ставит передачу в гораздо более благоприятные условия в отношении устойчивости, чем, например, те, в которых ее рассматривал Рюденберг; однако эти более благоприятные условия вытекают из самого существа тех задач, которые должны быть разрешены применением длинных передач в единой энергетической системе Союза.

4. Реактивность генераторной станции, энергия которой передается по линии, оказывает весьма существенное влияние на пропускную способность блока; выбор параметров генератора может оказать большое влияние на результат.

При сооружении передачи Болдер Дам мощность генераторов была искусственно увеличена, в результате чего реактивности их оказались сниженными, примерно в 1,5 раза, против типичных значений. Расчеты Куйбышевской передачи показали, что при длинных линиях стоимость

самой линии в несколько раз превышает стоимость электрического оборудования конечных пунктов, вследствие чего даже небольшое увеличение рабочей мощности линии может окупить сравнительно крупные добавочные вложения в электрическое оборудование конечных пунктов. Поэтому в проекте передачи Куйбышев—Москва каждая линия передачи напряжением 300 kV, имеющая рабочую мощность в 160 MW, питается двумя генераторами номинальной мощностью по 100 MW или 125 MVA, при типичных собственных значениях реактивностей этих генераторов $x_d = 0,9$, $x_q = 0,6$ и $x_d' = 0,3$; их расчетные реактивности, отнесенные к рабочей мощности блока, оказываются сниженными в $250:160 = 1,56$ раза⁴.

При общем исследовании вопроса о максимально возможных рабочих мощностях линий необходимо было также рассмотреть влияние реактивностей конечных пунктов. Поэтому зависимости удельной рабочей мощности одной цепи от длины линии были определены для нескольких значений этих реактивностей.

Реактивности, отнесенные к собственной мощности, были взяты одинаковыми во всех случаях и равными для трансформаторов 0,12 условных единиц для генераторов:

$$x_d = 0,9; \quad x_q = 0,6; \quad x_d' = 0,3.$$

Далее был введен вспомогательный параметр χ , равный отношению реактивностей конечных устройств на базе натуральной мощности линии к собственным значениям их реактивностей; если предположить, что машины и трансформаторы будут нормального типа, обратная величина $1:\chi$ дает отношение мощности конечных устройств в мегавольтамперах к натуральной мощности линии в мегаваттах. Расчеты были произведены для следующих значений этого параметра:

$$\chi = 0,5 \quad 0,67 \quad 1 \quad 1,5 \quad \text{и} \quad 2;$$

$$1:\chi = 2 \quad 1,5 \quad 1 \quad 0,67 \quad \text{и} \quad 0,5.$$

На приводимом ниже рис. 6 построены кривые, дающие зависимость удельной рабочей мощности от $1:\chi$ для линий различной длины. Эти кривые показывают, как можно было заранее предвидеть, что увеличение мощности конечных аппаратов (т. е. уменьшение их реактивности) оказывает сильное влияние на величину удельной рабочей мощности одной цепи только при сравнительно коротких линиях. По мере увеличения длины линии это влияние уменьшается.

Синхронизирующая мощность в нормальном режиме, отнесенная к натуральной мощности

⁴ При передаче на шины подсекций 160 MW генераторы должны, с учетом потерь при передаче, отпускать 176 MW при $\cos \varphi = 0,93$, таким образом один генератор мог бы иметь мощность в 88 MW и соответственно 95 MVA. Принятый в проекте агрегат при пониженном во время паводка напоре развивает только 90 MW, таким образом механические характеристики агрегата взяты без запаса; напротив, в электрические характеристики генератора введен значительный запас (125 вместо 95 MVA), вызывающий указанное снижение реактивностей. Такой же запас введен и в повышающие трансформаторы. Понижающие трансформаторы имеют мощность каждый по 165 MVA при работе на две подстанции, реактивность их снижается почти вдвое.

линии, возрастает вместе с ростом $1:\chi$, одна при этом растет и мощность машины, так что отношение синхронизирующей мощности и мощности машины не только не увеличивается, но наоборот, несколько уменьшается.

Это исследование не дало, таким образом, определенных указаний в отношении выбора оптимальных значений реактивностей. Повидимому, некоторый избыток мощности конечных аппаратов по отношению к рабочей мощности найдет себе экономическое оправдание вследствие увеличения рабочей мощности; построенные кривые дают возможность решать такого рода вопросы в отдельных конкретных случаях.

Для получения общей характеристики по построенным кривым, интерполируя, была построена пунктирная кривая (см. ниже рис. 4), которая отвечает тому случаю, когда мощность конечных аппаратов в мегавольтамперах каждый раз равна рабочей мощности линии передачи в мегаваттах, причем собственные реактивности имеют приведенные выше типичные значения. Так как в действительности некоторый запас в мощности конечных аппаратов всегда будет иметь место, хотя бы уже потому, что коэффициент мощности будет меньше единицы, — эта пунктирная кривая содержит некоторый, впрочем для больших длин линий весьма небольшой, запас.

5. При длинных линиях, кроме их большой реактивности, весьма неблагоприятное влияние на устойчивость оказывает быстро растущий вместе с длиной линии емкостной эффект. Если привести линию без потерь к П-образной схеме замещения, то она изобразится простой реактивностью величиной $\sin \beta l$ с емкостными шунтами по концам, проводимостью по $\text{tg} \frac{\beta l}{2}$ каждый⁵.

Линия с понижающим трансформатором, реактивность которого, отнесенная к натуральной мощности линии, — x_T будет иметь реактивность

$$x_1 = \sin \beta l + x_T \cos \beta l,$$

а шунты:

на приемном конце

$$y_2 = \text{tg} \frac{\beta l}{2} \frac{1}{1 + x_T \text{tg} \beta l},$$

на генераторном

$$y_1 = \text{tg} \frac{\beta l}{2} \frac{1 + x_T \text{tg} \beta l}{1 + x_T \text{tg} \beta l}.$$

Для линии длиной в 1000 km $\text{tg} \frac{\beta l}{2} = 0,577$, а для линии в 1500 km он достигает 1.

При работе с мощностями, меньшими натуральной, что имеет место при очень длинных линиях (практически при $l > 500$ km), режим постоянных напряжений на концах линии требует отставшей мощности на приемном конце линии при всех нагрузках.

В схемах, которые мы рассматривали выше, эта отставшая мощность может быть взята от потребителя, причем эффект емкостного шунта приемного конца скажется только на улучшении $\cos \varphi$ генераторов приемной системы; таким

⁵ $\beta = 0,06$: l — длина линии в km

образом емкостной шунт приемного конца оказывает только благоприятное влияние на работу системы. Напротив, емкостной шунт генераторного конца увеличивает угол сдвига ротора и уменьшает потребное для генератора возбуждение, т. е. ухудшает условия устойчивости. Кроме того, в тех случаях, когда продольная реактивность генерирующей системы ($x_d + x_T$) больше $\operatorname{ctg} \beta l$, он вызывает явление самовозбуждения генератора, т. е. не позволяет плавно подыти напряжение на линии. По этим соображениям вместе с некоторыми другими, о которых будет сказано дальше, было предположено как в Куйбышевском проекте, так и в излагаемом общем исследовании компенсировать емкостной шунт генераторного конца линии статическим реактором, подключаемым непосредственно к проводам в начале линии. Таким образом, строго говоря, наше исследование относится к линиям частичной компенсации емкостного эффекта. Однако такая компенсация настолько проста и дешева, что ее применение для длинных линий не может вызвать возражений и не усложняет, напротив, существенно упрощает эксплуатацию. Проверочные подсчеты показали, что удельная рабочая мощность линии 1000 км, допустимая по условиям статической устойчивости, снижается при отключении реактора с 0,638 до 0,553, т. е. на 13,3%, а синхронизирующая мощность падает при рабочей нагрузке с 0,638 до 0,280 натуральной мощности — на 28%. На основании этих соображений во всех случаях было предположено, что к зажимам повышающего трансформатора подключен статический реактор, индуктивная проводимость которого как раз компенсирует проводимость емкостного шунта генераторного конца линии.

6. При расчете устойчивости *блочной передачи*, как это было указано выше, требования устойчивости при авариях существенно облегчаются, как как в наиболее трудном случае — авария на линии — генератор, питающий эту линию, отключается. Поэтому требования, предъявляемые устойчивости в нормальном режиме, или требования статической устойчивости, могли получить существенное, а может быть и решающее значение. Между тем применявшаяся до сего времени методология расчетов статической устойчивости придавала понятию статической устойчивости преимущественно вспомогательный характер, исходя примерно из следующего рассуждения: если между углом ротора, при котором машина выпадает из синхронизма, и его рабочим углом имеется достаточный угловой интервал, то есть основания полагать, что при большинстве динамических нарушений режима машина не успеет выйти из этого предела за время, пока нарушение не будет ликвидировано. Поэтому запас статической устойчивости, выраженный в угловой мере (или как отношение предельной мощности к рабочей), являлся одновременно и общим показателем динамической устойчивости и показателем устойчивости вообще. При этом предельная мощность определялась при постоянном токе цепи возбуждения, отвечающем нормальному рабочему режиму.

Самый предел статической устойчивости, оп-

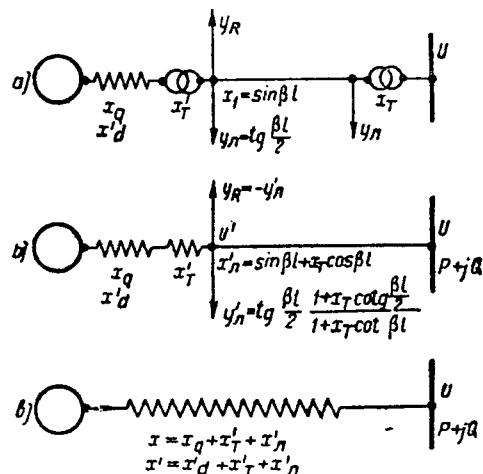


Рис. 3

ределялся, как то значение передаваемой мощности, при котором производная от мощности по углу, взятая при постоянном токе в контуре возбуждения, обращается в нуль. Эта методология не дает указаний на степень статической устойчивости машины в рабочем режиме, так как упомянутая выше производная не равна реальной синхронизирующей мощности, действующей на вал ротора в рабочем режиме установки, при малых возмущениях этого последнего. С точки зрения общей характеристики устойчивости системы, подсчитанный таким образом предел статической устойчивости также не характерен, так как он зависит от тока возбуждения в нормальном режиме, который может быть выбран произвольно. Поэтому предел этот характеризует не столько систему, сколько выбранный режим ее работы, и в том предположении, обычно не соответствующем действительности, что при всяком росте нагрузки свыше этого режима регуляторы возбуждения перестают действовать.

В настоящих расчетах синхронизирующая мощность определялась как производная от мощности машины по углу ротора в *предположении постоянства магнитного потока, сцепленного с контуром возбуждения*, а не при постоянстве тока этого контура. При типичных значениях постоянных времени контура возбуждения современных больших машин (5—7 сек) и при периодах колебания ротора, в условиях, близких к нормальной работе, порядка 1 сек, магнитный поток ротора, связанный с контуром возбуждения, меняется чрезвычайно мало, поэтому истинная синхронизирующая мощность весьма близка к той, которую она имела бы при постоянстве магнитного потока.

Для схемы рис. 3, б, к которой приводится блочная передача, питающая крупный центр потребления, при полной компенсации емкостного шунта генераторного конца линии и при учете его на приемном конце в общей реактивной мощности, необходимой для регулирования напряжения, выражение для синхронизирующей мощности, действующей на вал ротора в предположении постоянства напряжения на шинах приемной системы и постоянства магнитного

потока, связанного с контуром ротора, получает такой вид:

$$S = \frac{U^2}{\bar{X}} - Q + \left(\frac{1}{\bar{X}'} - \frac{1}{\bar{X}} \right) U^2 \frac{P^2}{P^2 + \left(\frac{U^2}{\bar{X}} - Q \right)^2}. \quad (2)$$

$P + jQ$ — комплекс мощности на приемном конце линии.

Q — определяется из равенства:

$$Q = \frac{U^2}{x_A'} - \sqrt{\left(\frac{U^2}{x_A'} \right)^2 - P^2}, \quad (3)$$

при соблюдении которого при всех нагрузках P напряжение в начале линии U' и напряжение на шинах приемной системы U будут постоянными и равными друг другу.

Здесь:

$$\begin{aligned} X &= x_q + x_T' + x_A'; \\ X' &= x_d' + x_T' + x_A'; \\ x_A' &= \sin \beta l + x_T \cos \beta l, \end{aligned}$$

а значения реактивностей ясны из рис. 3. Разделив уравнение (2) на P и исключив Q , получим такой результат:

$$\begin{aligned} \frac{S}{P} &= \frac{U^2}{Px_A'} \left(\frac{x_A'}{\bar{X}} - 1 \right) + \sqrt{\left(U^2 \frac{X'}{x_A'} \right)^2 - 1} + \\ &+ \frac{U^2}{Px_A'} \left(\frac{x_A'}{\bar{X}'} - \frac{x_A'}{\bar{X}} \right) \frac{1}{1 + \left[\frac{U^2}{Px_A'} \left(\frac{x_A'}{\bar{X}} - 1 \right) + \sqrt{\left(U^2 \frac{X'}{x_A'} \right)^2 - 1} \right]^2} \end{aligned}$$

Выше было сказано, что для собственных значений реактивностей конечных устройств были приняты постоянные, не зависящие от длины линии и ее напряжения, типичные значения:

$$\begin{aligned} x_{T1} &= x_{T1}' = 0,12; \quad x_{d1} = 0,9; \\ x_{q1} &= 0,6; \quad x_{d1}' = 0,3. \end{aligned}$$

Если предположить далее, что во всех случаях установленная мощность конечных устройств

$$P_y = kP,$$

где k — постоянный коэффициент, то, например, реактивность x_q , отнесенная к установленной мощности, будет:

$$x_q = \frac{x_{q1}}{P_y} = \frac{x_{q1}}{kP},$$

откуда

$$Px_q = \frac{x_{q1}}{k} = \text{const.}$$

Если взять $Px_A' = \text{const}$, то получим, что

$$\frac{x_q'}{x_A'} = \text{const}; \quad \frac{x_d'}{x_A'} = \text{const}; \quad \frac{x_T'}{x_A'} = \text{const}.$$

Следовательно, $\frac{x_A'}{\bar{X}}$ и $\frac{x_A'}{\bar{X}'}$ будут также постоянными, не зависящими ни от длины линии, ни от ее напряжения. Уравнение (4) можно теперь написать так:

$$\frac{S}{P} = F(W),$$

где $W = Px_A'$. Задавшись некоторой величиной $S:P$ («показателем статической устойчивости системы в ее рабочем режиме»), найдем соответствующее значение W , скажем W_1 . Зависимость рабочей мощности от длины линии определяет тогда уравнением

$$Px_A' = W_1$$

или

$$P = \frac{W_1}{\sin \beta l + x_T \cos \beta l}.$$

Замечая, что в выражение $F(W)$ длина линии не входит, решим уравнение:

$$F(W) = 0.$$

Пусть W_0 — его корень. Разрешим теперь уравнение (5) относительно W :

$$W = f\left(\frac{S}{P}\right).$$

Ни W , ни W_0 не зависят от l , поэтому их отношение

$$\frac{W_0}{W} = \varphi\left(\frac{S}{P}\right)$$

также от l не зависит.

Аналогично, как и для W_1 , положим:

$$W_0 = P_0 x_A'.$$

Значения P_0 будут различны для различных l . Это будут те мощности, при которых $S=0$, т. е. так называемые пределы статической устойчивости; отношение

$$\eta = \frac{W_0}{W} = \frac{P_0}{P}$$

является запасом статической устойчивости.

Таким образом

$$\eta = \varphi\left(\frac{S}{P}\right). \quad (7)$$

Иначе говоря, при постоянных собственных значениях реактивностей конечных аппаратов и при том условии, что установленная мощность выбирается каждый раз пропорционально рабочей мощности линии, запас статической устойчивости есть функция только от отношения $S:P$ — показателя степени статической устойчивости системы в рабочем режиме⁶.

При произведенных расчетах значение η было выбрано равным 1,5; этому значению запаса отвечает при указанных выше собственных реактивностях и при $k=1$ значение $S:P=0,61$, что вполне обеспечивает спокойную устойчивую работу установки в рабочем режиме. Что же касается устойчивости системы в случаях возможных конечных нарушений режима, включая аварии, то расчет динамической устойчивости, типичной для интересующих нас случаев передачи Куйбышев — Москва, показал, что при запасах статической устойчивости в 1,41 динамическая устойчивость системы обеспечена при любых трехфазных авариях продолжительностью более 0,2 sec.

7. Основные результаты расчетов приведены на рис. 4, 5 и 6.

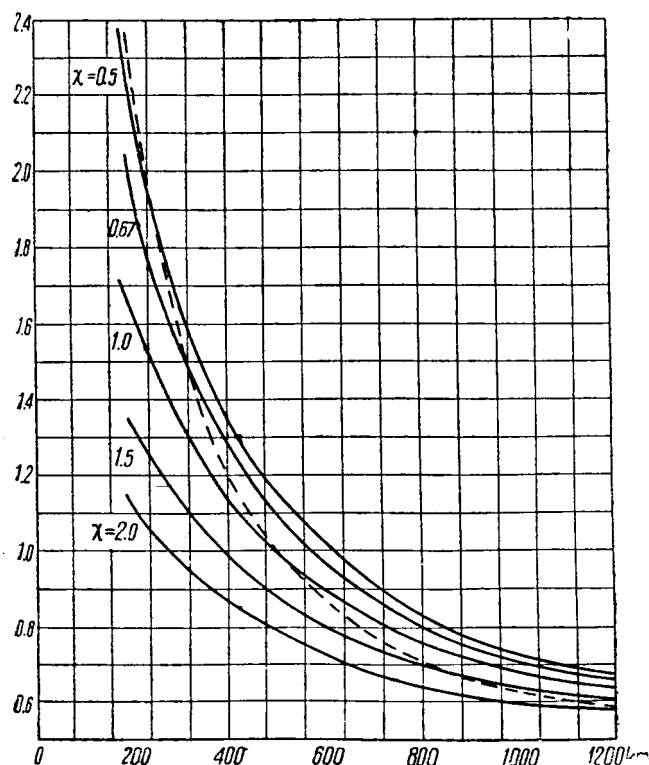


Рис. 4. Удельная рабочая мощность в зависимости от длины линии. χ — отношение реактивностей конечных устройств к типичным их значениям

Рис. 4 дает значения удельной рабочей мощности стандартных трехфазных линий в функции от длины передачи. Пять сплошных кривых этого рисунка отвечают различным значениям реактивностей конечных устройств; при $\chi=1$ эти реактивности, отнесенные к натуральной мощности линии, имеют указанные выше типичные значения; при иных значениях χ , надписанных на рисунке, эти реактивности меняются пропорционально χ .

Пунктирная кривая этого рисунка относится к случаю, подробно разобранному выше: предполагается, что установленная мощность конечных аппаратов каждый раз равна рабочей мощности линии, причем собственные значения их реактивностей прежние. Для всех кривых этого рисунка $\eta=1.5$; отношение $S:P$ для сплошных кривых меняется, но для пунктирной кривой постоянно и равно 0,61. Эта последняя кривая приводит к такой таблице:

Длина линии в км	200	400	600	800	1000	1200
Удельная рабочая мощность одной цепи в долях на- туральной . . .	2,35	1,21	0,87	0,71	0,62	0,59

Из сравнения с табл. 10 упомянутой книги Рюденберга следует, что блочная передача с компенсированной емкостью, питающая крупный центр потребления при оптимальной схеме при-
мыкания, способна пропускать значительно боль-

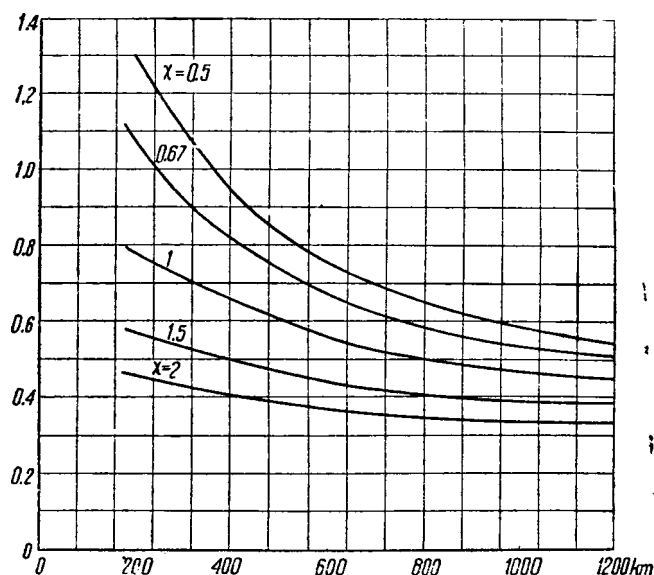


Рис. 5. Синхронизирующая мощность в зависимости от длины линии

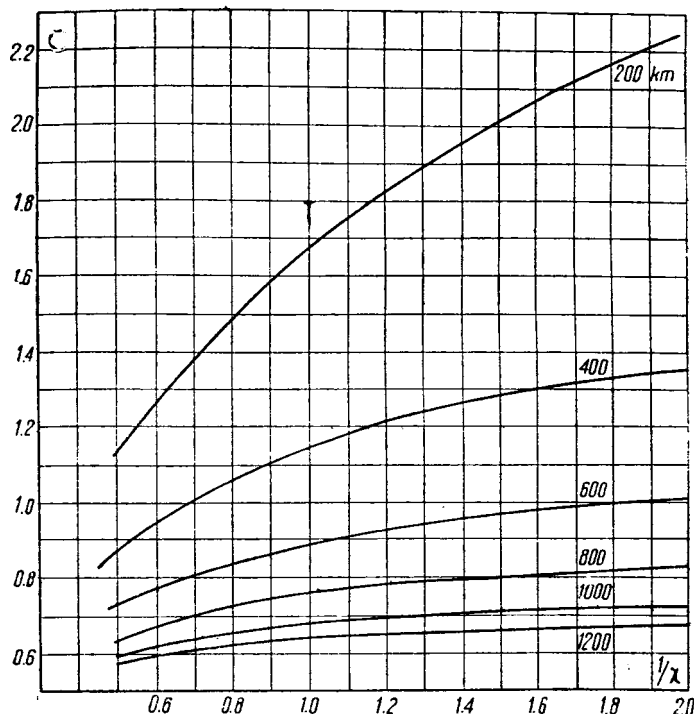


Рис. 6. Зависимость удельной рабочей мощности от установленной мощности генерирующего агрегата в долях натуральной мощности ($1:\chi$)

шие мощности в условиях нормальной эксплуатации, чем те, которые Рюденберг оценивал как предельные (для некомпенсированных передач). Так, по Рюденбергу натуральная мощность линии может быть передана всего на 200 км, тогда как из наших расчетов следует, что передача натуральной мощности возможна на расстоянии до 500 км.

Рис. 5 дает значения синхронизирующей мощности S , отнесенные к натуральной мощности линии, для различных значений коэффициента χ в функции от длины линии; вместе с рис. 4 он дает возможность вычислить показатель статиче-

ской устойчивости $S:P$ для любых значений χ и длины линии.

На рис. 6 показано влияние реактивности конечных аппаратов на удельную рабочую мощность линий различной длины. Рисунок позволяет быстро определить наивыгоднейшее значение установленной их мощности для данной передачи. Приведенные кривые рис. 4, 5 и 6 вместе с таблицей натуральных мощностей линии в функции их напряжения дают возможность быстро ориентироваться в вопросах интерконнекции удаленных друг от друга систем при тех условиях, что такая интерконнекция может быть осуществлена посредством передач блочного типа и что схемы коммутации связываемых систем удовлетворяют некоторым условиям, изложенным выше.

В этих условиях по заданной длине линии и графику рис. 4 сразу находится удельная рабочая мощность одной цепи; затем, по найденной удельной рабочей мощности и заданной мощности всего передаточного устройства находится ряд возможных вариантов решения задачи, характеризующихся различными напряжениями и отвечающими этим напряжениям числами цепей. Выбор оптимального варианта, наивыгоднейшего напряжения передачи, должен производиться, как указано было уже выше, на основании экономических соображений.

В настоящей статье мы ограничились рассмотрением тех возможностей, которые дает обычная трехфазная передача. Единственным техническим нововведением является применение статических реакторов на генераторном конце линии; их осуществление не должно представлять крупных затруднений.

Не нужно, однако, забывать, что основным моментом, ограничивающим рабочую мощность длинных линий, является не столько емкостной эффект, сколько величина их индуктивности. Компенсация ее дает радикальное решение вопроса о дальней передаче, позволяя, примерно удвоить рабочие мощности линий.

Одновременно с работой автора инж. Л. Е. Машкилейсон представил работу, посвященную исследованию тех трудностей, которые могут представиться при применении для компенсации индуктивности последовательно включенных статических конденсаторов. Л. Е. Машкилейсон показал, что эти трудности могут быть разрешены сравнительно просто. Таким образом применение электропередач этого типа упирается в настоящее время только в отсутствие статических конденсаторов, разработанных с той же степенью совершенства, какой за последние десятилетия достиг, например, современный высоковольтный трансформатор.

Устойчивость параллельной работы сверхдальних электропередач

PARALLEL OPERATION STABILITY OF EXTRA-LONG TRANSMISSION LINES

А. А. Вульф

Ленинградский индустриальный институт

ОСНОВНЫМ фактором, ограничивающим дальность передачи электрической энергии, является устойчивость параллельной работы.

Анализ мероприятий, которыми эта устойчивость может быть повышена, показывает, что проблема предотвращения потери устойчивости от аварийного толчка нагрузки в основном может считаться уже разрешенной. Действительно, сокращение длительности аварии до 0,05—0,10 sec, введение в нейтраль реактивного и если нужно небольшого активного сопротивления низводит размеры этого толчка до величин, значительно более низких, чем те, которые получают в результате отключения аварийного участка сети.

Кроме того, аварийное изменение режима при большой длине линии в большинстве случаев само по себе слабее изменения режима при отключении одной из цепей такой линии. Сказанное может быть иллюстрировано диаграммой рис. 1, дающей коэффициент уменьшения синхронной связи для линии длиной 1000 km в зависимости от места аварии.

Под этим коэффициентом здесь понимается отношение эквивалентной реактивности сети при нормальном режиме к ее величине после нарушения этого режима. Мы видим, что только трехполосные и небольшая часть двухполосных к. з. могут (да и то при неучете, как это имело место в данном случае, потеря) обусловить в рассматриваемой системе более сильное искажение режима, чем отключение цепи. Что же касается однополосных замыканий, то значительная часть их даже вообще не должна вызывать неустойчивости системы.

Более серьезные затруднения представляют устранение последствий послеаварийного изменения режима, и вопрос

устранения послеаварийного толчка пока еще полного разрешения не получил. Наконец, при очень большой длине линии серьезное значение приобретает вопрос статической устойчивости нормального режима, при малых длинах обычно игнорируемый.

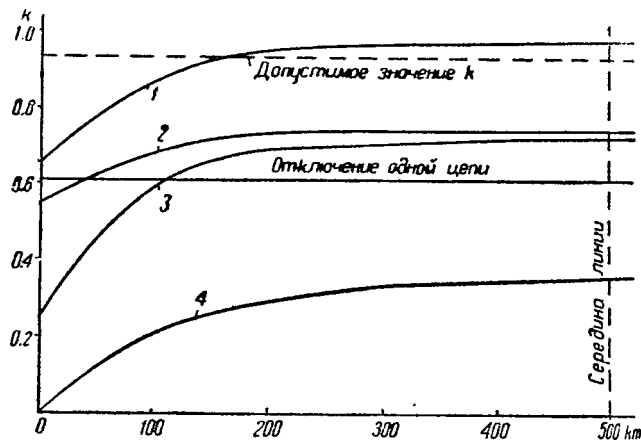


Рис. 1. Зависимость коэффициента уменьшения связи от места аварии на линии
однополосное к. з., 2 — двухполосное; 3 — двухполосное на земле; 4 — трехполосное к. з.

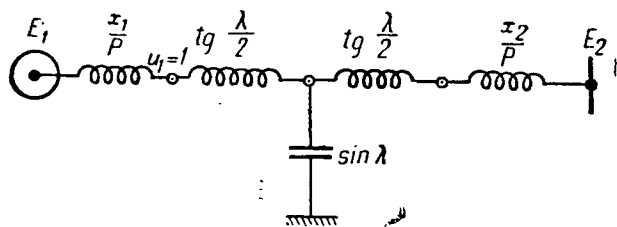


Рис. 4. Расчетная схема электропередачи

Концевые сопротивления, представляющие реактивность генераторов и трансформаторов, обслуживающих линию, при условии постоянства отношения их активной нагрузки p к установленной мощности p_y (что можно назвать коэффициентом использования установленной мощности) могут быть представлены как

$$X_1 = \frac{x_1}{p} \quad \text{и} \quad X_2 = \frac{x_2}{p} \quad (5)$$

для отправного и приемного концевых устройств.

Расчетная схема, использованная в данном случае, показана на рис. 4.

Величина нарушения режима работы, вызываемого отключением цепи, может быть, как сказано выше, характеризована коэффициентом уменьшения синхронной связи k , равным отношению доаварийной эквивалентной реактивности сети X_0 к послеаварийной ее величине X_0' .

Обращаясь к схеме рис. 4 и используя общеизвестную формулу перехода от T -к Π -схеме (или от звезды к треугольнику):

$$z_{12} = z_1 + z_2 + z_1 z_2 y_0, \quad (6)$$

мы можем, опуская промежуточные элементарные преобразования, найти, что

$$X_0 = \frac{x_1 + x_2}{p} \cos \lambda + \left(1 - \frac{x_1 x_2}{p^2}\right) \sin \lambda. \quad (7)$$

Послеаварийный режим характеризуется удвоением приходящейся на одну цепь мощности оборудования. Поэтому значение X_0' может быть получено заменой в выражении (7) величины p на $2p$ и умножением правой его части на 2. Следовательно,

$$X_0' = \frac{x_1 + x_2}{p} \cos \lambda + \left(2 - \frac{x_1 x_2}{2p^2}\right) \sin \lambda, \quad (8)$$

а коэффициент уменьшения связи

$$k = \frac{(x_1 + x_2) \operatorname{ctg} \lambda + \left(p + \frac{x_1 x_2}{p}\right)}{(x_1 + x_2) \operatorname{ctg} \lambda + \left(2p + \frac{x_1 x_2}{2p}\right)}. \quad (9)$$

Предельная дальность устойчивой передачи по двухцепной линии. Расчет предельного режима сводится к следующим операциям:

а) Определяем для какого-либо значения p зависимость коэффициента k от волновой длины линии λ .

б) Находим отвечающие полученным значениям k предельные значения начального сдвига фаз между приложенными по концам системы напряжениями или э. д. с., при которых изменение режима, характеризуемое данным значением k , не вызывает потери синхронизма.

в) Сравнивая, наконец, эти допустимые значения угла θ_d с его фактическим значением θ_0 , отвечающим данной нагрузке, находим предельную дальность передачи, удовлетворяющую условию $\theta_d = \theta_0$.

Повторяя подобный расчет для нескольких разных значений нагрузки p , можем построить зависимость допустимых нагрузок p_d от длины линии λ , имеющую вид, подобный показанному на рис. 5.

Полученная зависимость $p_d = f(\lambda)$ характеризуется следующими интересными свойствами. При малых длинах линии она в первом приближении удовлетворяет условию

$$p_d \lambda = \text{const}. \quad (10)$$

С увеличением длины линии эта зависимость нарушается,

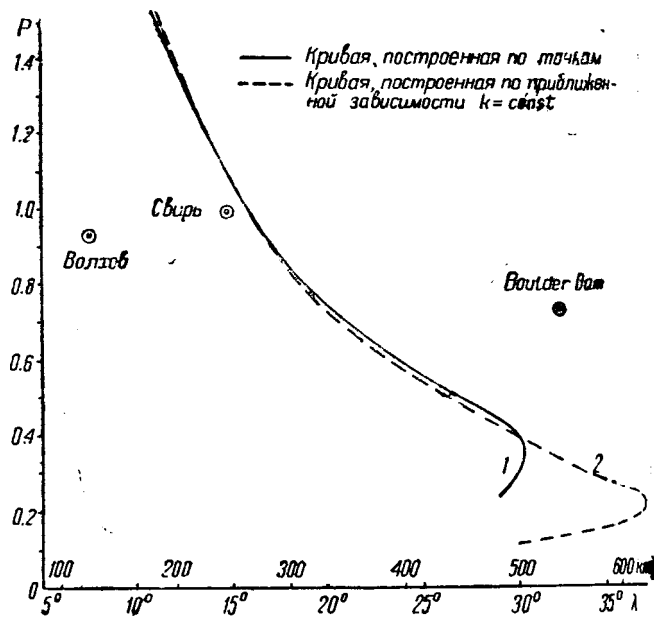


Рис. 5. Предельная дальность устойчивой передачи по двухцепной линии

и значения p_d убывают быстрее, чем по гиперболы зависимости. При длине линии около 30° , или 500 км, кривая допустимых нагрузок показывает перегиб и возвращается к началу кривой. Это указывает, что устойчивая передача энергии на большие расстояния, не прибегая к некоторым мерам, о которых будет ниже, невозможна. Причина указанного нарушения обратной пропорциональности между допустимой нагрузкой и длиной линии и существование предела дальности передачи вообще является следствием неблагоприятного влияния емкостной проводимости линии на работу концевых устройств.

Каково практическое значение полученного результата? Предельно-устойчивая дальность передачи натуральной нагрузки (которая обычно близка к экономически оптимальной ее величине) составляет около 265 км.

Далее для освещения этого вопроса могут служить нанесенные на диаграмму рис. 5 три точки, характеризующие условия работы следующих электропередач: 1) Волховской (в первоначальном исполнении) — передача 56 MW на расстояние 130 км при напряжении 110 кВ; 2) Свирской (при полном развитии) — 240 MW на расстоянии 250 км при напряжении 220 кВ; 3) Boulder Dam — передача до 300 MW на эквивалентное расстояние 540 км (полученное в результате пересчета истинной длины 450 км при частоте 60 Hz в частоту 50 Hz) при напряжении 287 кВ.

Первые две точки, характеризующие условия работы типичных для своих напряжений электропередач, лежат в зоне устойчивых режимов, тогда как третья, ответственная за исключительную по дальности и напряжению передачу, далеко выходит за пределы этой зоны. Это является хорошим показателем того, что техника передачи энергии в настоящее время только подходит к тому этапу развития, для которого вопросы устойчивости будут играть исключительно важную роль.

Построение зависимости $p_d = f(\lambda)$ по точкам представляет известные технические трудности. Объем работы может быть чрезвычайно сокращен, если использовать указанное выше свойство приближенного (при наличии искажающего влияния емкости) подобия режимов, удовлетворяющих этой зависимости. Задаваясь, например, условием постоянства величины сдвига фазы θ_0 или, что проще, постоянства коэффициента k , мы можем определить предельную дальность для одного частного значения нагрузки, например, для натуральной p_n , и найти затем предельные длины для остальных нагрузок простым пересчетом. Для последней цели удобно решить уравнение (9) относительно $\operatorname{ctg} \lambda$:

$$\operatorname{ctg} \lambda = \frac{p^2 (2k - 1) + x_1 x_2 (1 - 0,5 k)}{p (1 - k) (x_1 + x_2)}.$$

Полученная таким образом кривая нанесена в пределах $p = (0,5 \div 1,5) p_N$ пунктиром на рис. 5. Сличение ее с кривой, полученной по точкам, показывает достаточную практическую точность такого упрощенного решения задачи.

Основные принципы компенсации параметров линии. Существование предела дальности передачи обусловлено взаимным взаимодействием между параметрами линии и концевых устройств. Естественно искать радикального решения задачи в воздействии на эти параметры либо уменьшением относительных их величин либо введением в систему передачи особых компенсирующих устройств. Первое сопровождается искажением нормальной конструкции оборудования электропередачи и не может не сопровождаться большими экономическими невыгодами. Поэтому интересно рассмотреть те возможности, которые может дать принцип компенсации. Эта компенсация может быть осуществлена чрезвычайно разнообразными способами. На рис. 6 в качестве примера представлено несколько простейших схем компенсации параметров линии передачи.

Обращаясь, например, к рис. 6, а, видим, что полная компенсация продольного сопротивления линии будет иметь место при

$$X_0 = 2x_a + x_a^2 y_b = 0, \quad (12)$$

т. е. когда

$$x_a = 0 \quad \text{или} \quad x_a = -\frac{2}{y_b}. \quad (13)$$

Первое может иметь место при включении по концам линии конденсаторов, обладающих емкостным сопротивлением

$$x' = x_c = \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} \quad (14)$$

(продольная емкостная компенсация), второе же — при включении по концам линии реакторов с индуктивным сопротивлением

$$x' = x_L = \frac{2}{\sin \lambda} - \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} = \operatorname{ctg} \frac{\lambda}{2} \quad (15)$$

(продольная индуктивная компенсация).

Переходя к рис. 6, б, мы видим, что компенсация емкостной проводимости требует включения параллельных реакторов с индуктивной проводимостью

$$y' = y_L = \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} \quad (16)$$

Наконец, комбинированная компенсация самоиндукции емкости линии может быть осуществлена, как показано на рис. 6, в, за счет одновременного включения по концам линии продольной емкости с сопротивлением

$$x' = x_c = 0,5 \sin \lambda \quad (17)$$

и параллельной самоиндукции проводимости

$$y' = y_L = \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} \quad (18)$$

Не останавливаясь на более сложных схемах, отметим, что разрешение проблемы компенсации параметров линии или всей электропередачи в целом зависит от возможности создания мощных устройств, обладающих емкостным эффектом (статические конденсаторы, продольные синхронные и асинхронные компенсаторы). Практическое воплощение этой идеи в будущем вполне реально, и перспективны, открываемые ею, громады. Однако в настоящее время мы таких устройств еще не имеем.

Настоящая работа ставит себе целью исследование дальности передачи при осуществлении только тех мер повышения устойчивости, которые в настоящее время уже можно считать практически освоенными или бесспорно реальными. Поэтому ниже рассматривается только индуктивная компенсация и, в частности, только параллельная компенсация емкости линии, не вызывающая сомнений в отношении поведения системы при нормальном и аварийных режимах.

Компенсация емкостной проводимости. Идея компенсации емкостной проводимости линии параллельно включенными реакторами не нова. Возможность использования ее для повышения устойчивости указывалась в литературе еще неоднократно [3, 4]. Автор также предлагал ее еще в 1927 г.

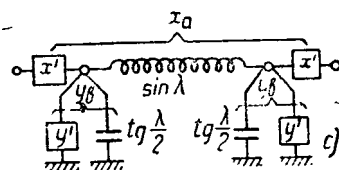
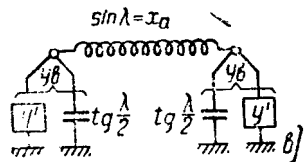
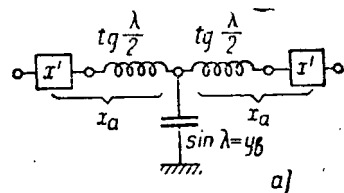


Рис. 6. Простейшие схемы компенсации параметров линии

для повышения устойчивости и улучшения режима холостого хода свирской установки. Однако пока мы имели дело с линиями умеренной длины, относящимися к зоне достаточной устойчивости рис. 5, эта мера не имела практического значения, и она приобрела реальный интерес лишь в связи с проблемой сверхдальных передач.

Впервые в таком аспекте автору пришлось выдвинуть ее в 1935 г. в связи с проблемой передачи энергии при частоте 100 Hz.

Тогда же им была подвергнута совместно с инж. Н. Н. Крачковским, А. И. Прохоровым и П. Е. Шпиром проверка и практическая ее значимость [2, части II и III].

Несмотря на ряд возникавших возражений как при рассмотрении вопроса устойчивости при 100 Hz, так и при проектировании Куйбышевской электропередачи автору удалось показать целесообразность применения этой меры для сверхдальных передач, улучшающей не только условия устойчивости, но и условия нормального режима таких систем. Надо, однако, заметить, что компенсация одной только емкостной проводимости не решает проблемы устойчивости сверхдальней передачи полностью. Анализ показывает, что значение ее даже более ограничено, чем это кажется на первый взгляд, так она дает наилучший эффект при мало рентабельных нагрузках, лежащих ниже половины натуральной. Однако пока проблема полной компенсации параметров линии не получит практического разрешения, компенсация емкости останется полезным и действенным средством увеличения дальности передачи, тем более, что, помимо улучшения условий устойчивости, она может быть, как сказано, полезна и с других точек зрения.

Как всякая параллельно включенная индуктивная нагрузка, реактор увеличивает устойчивость всей установки в целом. Его влияние объясняется тем, что рост индуктивной нагрузки увеличивает при неизменности активных нагрузок значение приложенных к сети э. д. с. и уменьшает взаимные сдвиги фаз этих э. д. с.

Это влияние реактора благотворно с точки зрения как статической, так и динамической устойчивости. Оно тем значительнее, чем больше мощность реактора по сравнению с мощностью оборудования концевых устройств и чем больше реактивность этого оборудования.

Имея в виду, что с увеличением длины линии допустимая ее нагрузка падает, а необходимая мощность реактора, компенсирующего емкостную ее проводимость, растет, следует признать, что реактор должен иметь преимущественное значение для длинных и сверхдлинных линий.

Влияние реактора может быть благоприятным и для нормального режима длинной линии. Если нагрузки ее ниже

натуральной, то концевые устройства линии загружены упреждающей реактивной мощностью. В этом типичном для сверхдальней передачи случае реактор улучшает коэффициент мощности приемных устройств. Следует указать, однако, что реакторы в начале и конце линии будут находиться в неординарных условиях.

Реактор на генераторном конце линии создает генераторам индуктивную нагрузку. Это в известных пределах, определяемых соображениями экономики и использования установленной мощности, особых препятствий не встречает. Приемный же конец системы бывает, как правило, перегружен индуктивной нагрузкой и без реактора, притом настолько, что ее приходится компенсировать по экономическим соображениям. Поэтому установка здесь реакторов в громадном большинстве случаев только заставила бы увеличить мощность синхронных компенсаторов. К этому надо прибавить, что величина эквивалентной реактивности приемного конца системы передачи энергии, как правило, значительно меньше таковой для отправного ее конца. Следовательно, влияние реактора приемного конца на устойчивость должно быть много ниже, чем реактора отправного конца. Эти соображения указывают, что установка реактора на приемном конце вообще нежелательна. Исключение составляют лишь линии с реверсивной работой, для питания которых из приемной сети выделяется часть мощности ее машин, соответствующая нагрузке линии.

Установка реактора в конце линии может оказаться желательной для устранения эффекта Ферранти, который может быть на длинной линии недопустимо резко выражен при отключении ее на приемном конце. Наконец, при нагрузке линии ниже натуральной напряжение в середине ее может оказаться значительно выше, чем по концам линии.

В случае недопустимости такого повышения напряжения может оказаться полезной установка реакторов не только по концам линии, но и в середине ее.

Соображения холостого хода и синхронизации говорят тоже за желательность применения компенсаторов емкостной нагрузки, создаваемой длинной линией. Так например, эта нагрузка для Волховской станции составляет 6 MVA на цепь; для Свирской — порядка 32 MVA; Куйбышевской (по проекту, предусматривающему передачу на 850 км при напряжении 300 kV) — порядка 200 MVA на цепь. Зарядка таких линий и условия синхронизации могут представить большие трудности, также устраняемые реакторами.

Переходя к вопросу о практическом осуществлении реактора, следует указать, что компенсировать емкостную проводимость линии может любая параллельно включенная проводимость. Она может быть создана различными способами, например, в виде третьей обмотки трансформатора, на которую дана нужная индуктивная нагрузка, или в виде

трансформатора с ненормально большим током намагничивания. Удобнее всего, однако, чтобы это был специальный реактор, устанавливаемый на высоковольтной стороне конечных подстанций или лучше в начале линии, составляя с ней одно целое. Число реакторов в этом случае должно быть равно числу цепей линии¹.

Подводя итог сказанному, можно сформулировать следующие основные положения для практического осуществления принципа компенсации емкостной нагрузки линии посредством реактора:

1. Реакторы устанавливаются по одному на цепь в начале линии и составляют оперативно со своей цепью одно общее целое.

2. Мощность реактора выбирается из расчета наибольшей допустимой компенсации, при которой генераторы отправной станции имеют допустимое значение отстающего коэффициента мощности.

Предельная дальность устойчивой передачи по компенсированной линии. По соображениям чисто расчетного характера ниже рассматривается поведение системы при полной двухсторонней компенсации емкости линии. Это впрочем по влиянию на устойчивость достаточно близко к указанной выше оптимальной схеме компенсации.

Для показа влияния реактора на устойчивость ниже приводятся результаты расчета для схемы, легшей в основу построения рис. 5. Коэффициент уменьшения связи компенсированной линии определяется выражением:

$$k = \frac{(x_1 + x_2) + p \sin \lambda}{(x_1 + x_2) + 2p \sin \lambda}, \quad (1)$$

вытекающим из рассмотрения схемы рис. 4 при устранении проводимостей по концам линии, откуда

$$p \sin \lambda = (x_1 + x_2) \frac{(1 - k)}{(2k - 1)}. \quad (20)$$

Выражение (20) дает условие подобия предельно устойчивых режимов компенсированной линии.

Зная значение коэффициента k для одной какой-либо нагрузки, можно, пользуясь выражением (20), определить всю зависимость $p_d = f(\lambda)$ для любой нагрузки. Результат подобного расчета показан на рис. 7, на котором для сравнения нанесена также кривая 1 рис. 5. Сопоставление обеих кривых позволяет сделать следующие замечания.

1. Применение реактора увеличивает дальность передачи при всех нагрузках, однако его влияние тем больше, чем меньше нагрузка.

2. Теоретически применение реактора устраняет существование предела дальности передачи. Не устраняя, однако, ограничения предела нагрузок линии ее индуктивным сопротивлением, реактор не разрешает проблему передачи в целом. Действительно, не говоря уже о размерах реактора и допустимости режима линии, это потребовало бы применения таких высоких напряжений, которые в настоящее время не освоены, или привело бы к заведомо неэкономическому решению проблемы.

3. В пределах экономически целесообразных нагрузок $p = (1,5 \div 0,5) p_N$, как видно из диаграммы рис. 7, применение реактора увеличивает дальность передачи на $25 \div 35,5\%$.

Полагая, что в среднем нагрузка очень длинных линий будет иметь величину порядка $0,70 \div 0,75$ натуральной, можем сказать, что применение реактора в качестве единственной меры для повышения устойчивости увеличит дальность устойчивой передачи примерно на 20%.

Возможности дальнейшего увеличения предельных дальностей передачи. Все вышесказанное позволяет сказать, что применение реактора на сверхдальних линиях может оказаться полезным с самых различных точек зрения, но что увеличение дальности передачи за счет компенсации емкости нельзя признать достаточным для тех масштабов передач, которые мыслятся при создании ЕВС.

Можно указать на следующие дополнительные возможности разрешения этой задачи. Первая возможность заключается в увеличении устойчивости линии передачи с цепями, соединенными в параллель, либо за счет уменьшения сил толчков, нарушающих ее работу, либо за счет увеличения сопротивления системы этим толчкам до такого предела.

¹ При соблюдении этих условий компенсатор будет уменьшать сдвиг фазы и в трансформаторе. Выключаясь одновременно с обслуживаемой им цепью, реактор уменьшит величину толчка.

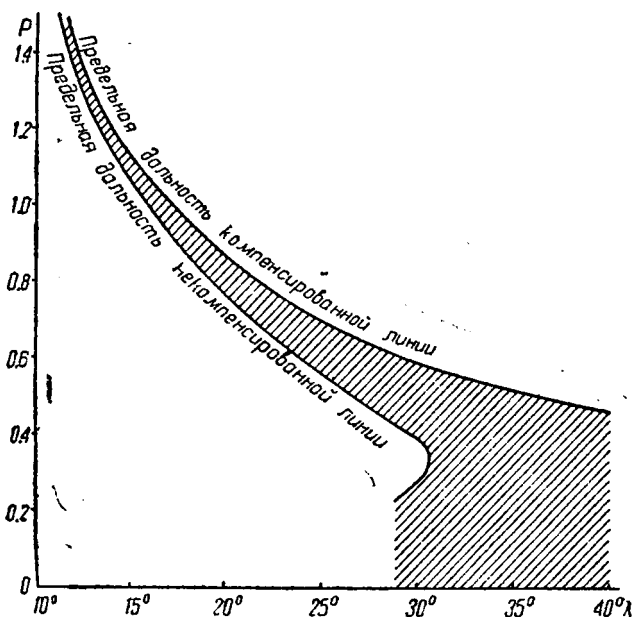


Рис. 7. Сравнение предельной дальности устойчивой передачи по компенсированной и некомпенсированной линиям

она сохраняла устойчивость при всех могущих иметь нарушениях режима.

Вторая возможность заключается в отказе от связи между линиями цепями линии передачи как на отправном, так и на приемном конце, т. е. в разобщении электропередачи на независимых «блоках», связанных только через приемную сеть².

Сравнивая в детальное сравнение «связанного» и «блочного» типа передачи, отметим лишь их основные особенности.

Блочная передача должна быть, конечно, не только стабильно устойчивой в условиях нормального режима, но обладать еще некоторым запасом устойчивости.

Как всякое отключение цепи все равно должно иметь своим выходом соответствующего блока из работы вне зависимости от устойчивости системы в целом, то блочная передача может обладать пониженной степенью устойчивости, достаточной лишь, чтобы отключение одного блока не вызвало отключения остальных и чтобы электропередача сохраняла устойчивость при любых нарушениях режима приемной сети.

Связанная передача, помимо удовлетворения этому последнему требованию, должна обладать еще достаточной степенью устойчивости при нарушениях работы линии, ибо всякая линия в линии может иметь следствием потерю устойчивости всей системой.

Поэтому предельная нагрузка связанной системы не может быть выше, чем для блочной, а в случае недостаточной устойчивости в отношении случайных нарушений работы этот предел может оказаться для связанной системы значительно ниже, чем для блочной.

Возвращаясь к вопросу о предельной дальности передачи, обратимся прежде всего к рассмотрению общего для блочной и связанной системы предела, обуславливаемого нарушениями работы приемной сети. К сожалению, пока еще никаких практических данных для установления критерия устойчивости в этих условиях. Можно указать, однако, весьма детальное обследование устойчивости передачи в бышев — Москва при различных нарушениях режима московской сети, произведенное автором в процессе проектирования этой электропередачи, Ленгидэп показало достаточность при передаче около 0,70 p_N на расстояние 850 км. В расчетной схеме, принятой в настоящей работе, это соответствует коэффициенту устойчивости 1,20 при определении его по переходной реактивности генератора³.

Принимая эту цифру за исходную, изображаем отвечающую этому условию кривую 1 рис. 8 предельно допустимых значений для блочной системы. На той же диаграмме кривая 2 представляет дальность передачи с компенсированной цепью по связанной двухцепной линии.

Рассмотрение этих кривых подтверждает необходимость целесообразности поисков мер для дальнейшего увеличения устойчивости связанной передачи. Автору представляется несомненным, что эти поиски, если исключить вопрос компенсации индуктивного сопротивления линии, прежде всего должны быть направлены в сторону секционирования линии с целью уменьшения силы толчка, вызываемого отключением одной из ее цепей⁴. Это секционирование может быть либо за счет деления линии на селективно отключаемые участки — поперечное секционирование — либо за счет увеличения числа цепей — продольное секционирование. Если обозначить число переключательных постов, делящих линию, через m , а число ее цепей через n , то выражение

Идея такой блочной передачи, возникшая при проектировании бышевской передачи у ряда работников Ленгидэп, совпадает, в сущности с принципом «синхронизации через реактор», примененным в нью-йоркской городской сети [5]. Под коэффициентом устойчивости здесь подразумевается отношение максимальной возможной нагрузки системы p_{max} к нормальной величине p . Так как при принятых исходных данных расчета

$$p = p_{max} \sin \theta_0,$$

коэффициент устойчивости μ представляет величину

$$\mu = \sec \theta_0. \quad (21)$$

Практическая полезность этой меры показана на примере установки Boulder Dam [6].

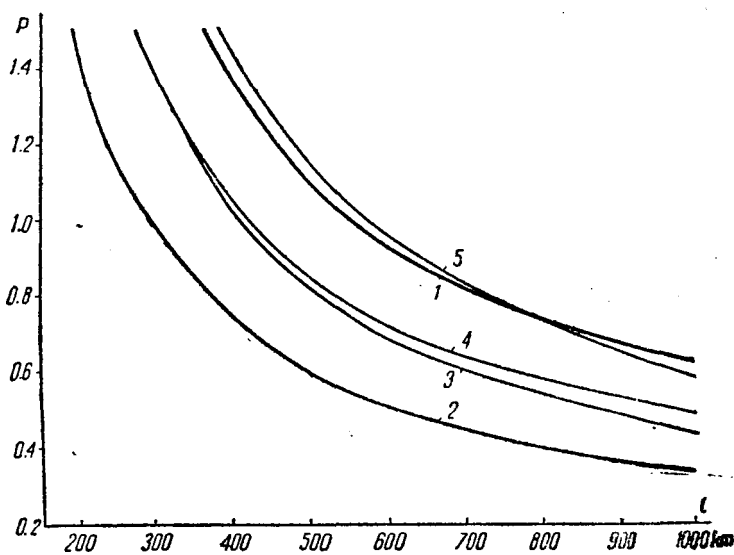


Рис. 8. Предельная дальность передачи при блочной и связанной системах

1 — блочная передача, коэффициент устойчивости 1,20, 2 — связанная двухцепная линия, 3 — 2 цепи и 1 переключательный пост, 4 — 3 цепи без постов, 5 — 3 цепи и 1 переключательный пост

для коэффициента уменьшения связи для случая отключения одного участка цепи будет иметь вид:

$$k = \frac{(x_1 + x_2) + p(m+1) \sin \frac{\lambda}{m+1}}{(x_1 + x_2) + p \left(m + \frac{n}{n-1} \right) \sin \frac{\lambda}{m+1}}. \quad (22)$$

Это выражение получено в предположении компенсации емкости не только по концам линии, но и на переключательных постах. Для иллюстрации диаграмма рис. 8 дополнена кривыми, рассчитанными по выражению (22) для следующих случаев передачи: по двум цепям и при одном poste (кривая 3), по трем цепям без постов (кривая 4), по трем цепям и при одном poste (кривая 5). Мы видим, что предельная дальность передачи в последнем случае для блочной и связанной системы получается практически одинаковой.

Если согласиться с выбором в качестве критерия устойчивости связанной передачи способность ее сохранять устойчивость при послеаварийном отключении одной цепи или ее участка, то задачу «подтягивания» связанной системы до уровня устойчивости блочковой при помощи секционирования линии можно считать решенной. При этом надо указать, что технические ресурсы для возможного дальнейшего повышения устойчивости связанной системы остались еще далеко не исчерпанными. Прежде всего надо указать на возможность использования сопротивлений Бергвалла, включаемых одновременно с отключением аварийного участка сети, что может оказаться весьма дешевой и довольно эффективной мерой⁵.

Некоторое улучшение условий нормального режима может быть получено, как показано в проекте установки Boulder Dam, за счет снижения реактивностей концевых устройств. Наконец, применение ударного возбуждения для генераторов передающей станции также может дать заметное увеличение устойчивости после аварийного режима. Все эти соображения говорят о том, что даже если бы нам пришлось считаться со значительным увеличением нарушения режима за счет неучитывающегося аварийного толчка, то и в этом случае задача обеспечения связанной системы необходимой степенью устойчивости не была бы технически неразрешимой.

Таким образом вопрос выбора того или иного типа передачи переносится в основном в плоскость экономики. Не-

⁵ Следует отметить, что для гидроэлектростанций эти сопротивления легко можно было бы осуществить в форме водяных резисторов.

достаточность мер, повышающих устойчивость, или их дороговизна могут сделать в ряде случаев, как это показывает проект передачи Куйбышев — Москва, применение блоковой системы вполне целесообразным. При наличии свободного резерва в приемной сети блоковая система передачи, безусловно, дешевле связанной. С другой стороны, предпочтительность ее при недостатке резерва, особенно в случае небольшой относительной мощности приемной сети, требует проверки. При выборе той или иной системы передачи в таких случаях нужно иметь в виду, что при блоковой системе необходимо резервировать мощность по крайней мере одного блока, при связанной же надо учесть стоимость мер по повышению устойчивости. Кроме того, желательнее, чтобы она обладала несколько большим, чем блоковая, коэффициентом устойчивости, в расчете на то, чтобы после отключения одного элемента электропередачи связанная система имела коэффициент устойчивости не меньший, чем приемлемый для блоковой системы. Вопрос экономики автор предполагает осветить в отдельной работе.

Достаточны ли полученные размеры предельных передач для осуществления крупных межрайонных связей? Для некоторого освещения этого вопроса может служить следующая таблица, составленная на основе данных диаграммы рис. 8.

Из рассмотрения ее мы видим, что во всяком случае технические возможности для развития устойчивых электропередач связанного типа довольно значительны. Хотя будущее принадлежит, несомненно, более экономичным средствам разрешения проблемы сверхдальней устойчивой передачи электроэнергии, приведенные данные говорят, что даже то, чем мы, безусловно, уже располагаем, в значительной степени технически разрешает эту задачу.

Литература

1. Сборник под ред. Р. Рюденберга. Электрическая передача больших мощностей на далекие расстояния.
2. Отчет бригады, работавшей по заданию комиссии и СТО. Проблемы передачи энергии при частоте 100 Hz (материалы комиссии СТО).
3. E. Clarke, Steady state stability in transmission systems. Tr. AIEE, Febr. 1926, p. 22.
4. W. A. Merriam and H. K. Arnold, Some factors affecting stability. El. Eng., Mai 1931.

Таблица напряжений, необходимых для передачи энергии на большие расстояния по связанной системе

Длина линии в km				
	400	600	800	1000
Нагрузка линии в MW				
200	232	280	316	348
	194	241	275	303
	157	193	214	237
	137	167	190	214
400	329	396	—	—
	275	340	388	—
	223	272	303	—
	194	236	268	—
600	—	—	—	—
	336	418	—	—
	273	334	372	—
	237	290	328	—
800	—	—	—	—
	383	—	—	—
	315	386	429	—
	272	335	380	—

Примечание. Цифры таблицы дают напряжение в кВ для четырех схем передачи: двухцепная линия без постов, двухцепная линия с одним постом, трехцепная линия без постов, трехцепная линия с одним постом.

5. A. H. Kehoe, Synchronized at the load, p. I. A fundamental plan of power supply. Tr. AIEE, Oct. 1929, p. 100.
6. A. A. Kroneberg and M. Macferran, Power limits 220 kV transmission lines. El. Eng., Nov. 1933.

Статическая устойчивость протяженных систем электропередачи

ON STATIC STABILITY LONG-DISTANCE TRANSMISSION SYSTEM

П. С. Жданов

ВЭИ

ИССЛЕДОВАНИЕ практических возможностей передачи энергии на большие расстояния в связи с проектом Куйбышевской гЭС привело к довольно неожиданному выводу об исключительном значении проблемы статической устойчивости, тогда как в существующих системах умеренной длины наибольшие трудности создавали нарушения динамической устойчивости, а не статической¹. Лишь в последнее время пришлось столкнуться с большими затруднениями в отношении статической устойчивости и в одной из существующих 220-kV систем.

Вытекающая отсюда необходимость уточнения методов исследования статической устойчивости привела к принципиальным разногласиям в связи с выдвигаемой отдельными специалистами предпосылкой постоянства э. д. с. за переходным реактансом машины.

Эта предпосылка нам представляется ни в какой мере не обоснованной и совершенно не приемлемой.

Критерием устойчивости рабочего режима машины явля-

ется знак избыточного момента на валу при бесконечно малом виртуальном перемещении ротора (рассматривается не носительное движение).

При этом относительная скорость машины в новом положении ротора, когда определяется избыточный момент, должна быть принята равной нулю, так как рассматривается перемещение, происходящее вне времени. Но тогда очевидно, что ток возбуждения, зависящий от угла лишь при посредстве скорости, а вместе с ним и э. д. с. холостого хода должны остаться теми же, что и в первоначальном режиме, и исследование устойчивости сводится к определению знака производной мощности по углу при постоянстве э. д. с. холостого хода.

Это положение можно достаточно строго обосновать, следуя характер движения при малом возмущении, приводящем к возникновению малой скорости и перемещения.

Развиваемая машиной мощность может быть выражена в зависимости от э. д. с. холостого хода E_d и угла δ в виде функции $P_{E_d'}$ так и в зависимости от э. д. с. за переходным реактансом E_d' и того же угла δ в виде $P_{E_d''}$.

¹ За исключением специфических случаев нарушения статической устойчивости нагрузки, на которых мы остановимся в дальнейшем.

В простейшем случае работы машины с цилиндрическим тором на шины бесконечной мощности эта мощность определяется так:

$$\left. \begin{aligned} P_{E_d} &= \frac{E_d U}{x_d} \sin \delta; \\ P_{E_d'} &= \frac{E_d' U}{x_d'} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{x_d' - x_d}{x_d' x_d} \sin 2\delta, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$P_{E_d} = P_{E_d'}$. Это одна и та же мощность, но выраженная через E_d или E_d' .

Уравнения (3), (4) и (5) дают:

$$\Delta E_d = T_{d_0} \frac{\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial \delta} \right)_{E_d' = E_{d_0}}}{\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial E_d'} \right)_{E_d' = E_{d_0}}} \dot{\delta} + \frac{T_{d_0} M}{\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial E_d'} \right)_{E_d' = E_{d_0}}} \ddot{\delta}. \quad (6)$$

Подставляя (6) и (4) в (2), получаем уравнение, определяющее изменение угла при малом возмущении:

$$T_{d_0} M \frac{\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial E_d} \right)_{E_d = E_{d_0}}}{\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial E_d'} \right)_{E_d' = E_{d_0}}} \ddot{\delta} + M \ddot{\delta} + T_{d_0} \left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial \delta} \right)_{E_d' = E_{d_0}} \dot{\delta} + \left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial \delta} \right)_{E_d = E_{d_0}} \delta = 0. \quad (7)$$

Рассматривая малые изменения э. д. с. и угла ΔE_d , $\Delta E_d'$ в области около E_{d_0} , E_{d_0}' и δ_0 , можно написать следующие выражения для колебаний мощности:

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial E_d} \right)_{E_d = E_{d_0}} \Delta E_d + \left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial \delta} \right)_{E_d = E_{d_0}} \Delta \delta; \quad (2)$$

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial E_d'} \right)_{E_d' = E_{d_0}} \Delta E_d' + \left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial \delta} \right)_{E_d' = E_{d_0}} \Delta \delta. \quad (3)$$

Частные производные в этих уравнениях являются постоянными коэффициентами.

Если мощность турбины остается неизменной, то колебания мощности ΔP представляют собой избыток мощности и избыточный момент), определяющий величину ускорения:

$$-\Delta P = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M \ddot{\delta}, \quad (4)$$

M — постоянная инерции.

Электродвижущие силы E_d и E_d' связаны между собой следующим известным соотношением²:

$$\frac{dE_d'}{dt} = - \frac{E_d - E_{d_0}}{T_{d_0}}. \quad (5)$$

Характер движения, определяемого уравнением (7), можно исследовать с помощью критерия Гурвица. Колебания затухают (машина статически устойчива), если коэффициенты уравнения (7), приводящего к характеристическому уравнению вида

$$a_0 z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3 = 0,$$

удовлетворяют соотношениям:

$$P_1 > 0; \quad \left| \frac{P_1}{P_3} \right| > 0;$$

$$\begin{vmatrix} P_1 & 1 & 0 \\ P_3 & P_2 & P_1 \\ 0 & 0 & P_3 \end{vmatrix} > 0, \quad \text{где } P_n = \frac{a_n}{a_0}.$$

При

$$T_{d_0} M \frac{\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial E_d} \right)_{E_d = E_{d_0}}}{\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial E_d'} \right)_{E_d' = E_{d_0}}} > 0 \quad (8)$$

должны быть удовлетворены следующие неравенства:

$$M > 0; \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial \delta} \right)_{E_d = E_{d_0}} > 0; \quad (10)$$

$$\left| \frac{T_{d_0} M \frac{\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial E_d} \right)_{E_d = E_{d_0}}}{\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial E_d'} \right)_{E_d' = E_{d_0}}}}{\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial \delta} \right)_{E_d' = E_{d_0}}} \right| > 0. \quad (11)$$

Таким образом условие $\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial \delta}\right)_{E_d=E_{d_0}} > 0$, т. е. положительный знак производной мощности по углу при постоянстве э. д. с. холостого хода E_{d_0} является необходимым признаком устойчивости. Вместе с тем признак

$\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial \delta}\right)_{E_d'=E_{d_0}'}$, базирующийся на постоянстве э. д. с. за переходным реактанцем E_{d_0}' , недостаточен для суждения об устойчивости, и, следовательно, предпосылка постоянства E_{d_0}' в расчетах статической устойчивости должна быть отвергнута.

Практически признак $\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial \delta}\right)_{E_d=E_{d_0}} > 0$ не только необходим, но и достаточен. Он и является единственным критерием статической устойчивости генератора или станции.

Действительно, в простейшем случае с помощью уравнений (1) можно получить следующие выражения для коэффициентов уравнения (7):

$$T_{d_0} M \frac{\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial E_d}\right)_{E_d=E_{d_0}}}{\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial E_d'}\right)_{E_d'=E_{d_0}'}} = T_{d_0} M \frac{x_d'}{x_d};$$

$$T_{d_0} \left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial \delta}\right)_{E_d'=E_{d_0}'} \frac{\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial E_d}\right)_{E_d=E_{d_0}}}{\left(\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial E_d'}\right)_{E_d'=E_{d_0}'}} = T_{d_0} \frac{E_{d_0}' U}{x_d} \cos \delta_0 + T_{d_0} U^2 \frac{x_d' - x_d}{x_d^2} \cos 2\delta_0;$$

$$\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial \delta}\right)_{E_d=E_{d_0}} = \frac{E_{d_0}' U}{x_d} \cos \delta_0.$$

При этом условия (8), (9) и (11) удовлетворяются при любых значениях δ_0 , тогда как условие (10) удовлетворяется лишь при $\cos \delta_0 > 0$, т. е. при $\delta_0 < 90^\circ$.

С. А. Лебедев показал, что при углах, несколько больших 90°

$$\left(\frac{\partial P_{E_d}}{\partial \delta} < 0, \text{ но } \frac{\partial P_{E_d'}}{\partial \delta} > 0\right)$$

решение уравнения движения имеет вид:

$$\Delta \delta = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 \sin (\beta t + \varphi) e^{\alpha_2 t}, \quad (12)$$

где $\alpha_1 > 0$ и $\alpha_2 < 0$.

В этом случае возникают синусоидальные колебания с затухающей амплитудой, но среднее значение угла непрерывно возрастает (рис. 1), и, следовательно, машина неустойчива.

Следует отметить, что при известных условиях амплитуда и период первых циклов синусоидальных затухающих колебаний достаточно близки к таковым, определяемым в предположении $E_d' = \text{const}$, однако направление изменения среднего значения угла может быть установлено лишь при $E_d = \text{const}$.

Существование затухающих синусоидальных колебаний при нарастающем среднем значении угла еще раз подтвер-

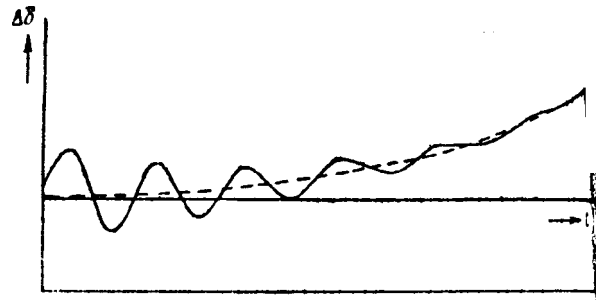


Рис. 1

дает недостаточность предпосылки $E_d' = \text{const}$ (позволяя судить лишь о возможности возникновения синусоидальных колебаний).

Небезынтересно отметить, что подобный режим, при котором несколько отличных начальных условиях, был получен нами в 1933 г. при экспериментах с турбогенератором 10 000 kW; 6,6 kV; $\cos \varphi = 0,6$ на В. г. с. Ленэнерго (рис. 2).

Режим работы генератора был нарушен внезапным увеличением реактанта, связывавшего генератор с сетью большой мощности. При этом возникли синусоидальные колебания, затухшие на 8 или 9 сек, однако на 16 сек машина все же выпала из синхронизма в результате медленного плавного возрастания угла (далее машина была синхронизирована закрытием регулирующих клапанов турбины руки).

Критерий $\frac{\partial P_{E_d}}{\partial \delta} > 0$, т. е. $\frac{dP}{d\delta}$ при $E_d = \text{const}$, справедлив и при наличии автоматических регуляторов напря-

жения, ограничивая область внутренней устойчивости машины. В этой области в лучшем случае возможен так называемый режим искусственной устойчивости, сопровождаемый прерывными колебаниями ротора, а следовательно, токи и напряжения и мощности, амплитуда которых зависит от времени возбуждения и генератора. Подобный режим, абсолютно не исследованный и никогда не осуществленный на практике, разумеется, ни в какой мере не может служить

для обоснования критерия $\frac{\partial P_{E_d'}}{\partial \delta} > 0$, хотя в дальнейшем

и не исключена возможность осуществления режима искусственной устойчивости в практически приемлемой форме.

В настоящих условиях влияние регуляторов напряжения отражается лишь на внешней характеристике мощности в зависимости от угла (рис. 3), при построении которой напряжение, контролируемое регулятором, может быть принято постоянным. Однако устойчивость машины не определяется производной мощности по углу, взятой из внешней характеристики. В каждой точке этой характеристики устойчивость должна быть проверена вычислением производной при постоянстве E_d (и переменном напряжении).

В точке, где эта производная равна нулю, достигнуто предельное значение мощности (внутренний пределности).

Отношение максимальной мощности к номинальной характеризует степень или запас устойчивости. Отсутствие его в отношении статических нарушений устойчивости рас-

8 Например, с помощью электронных регуляторов напряжения, обладающих весьма высокой чувствительностью

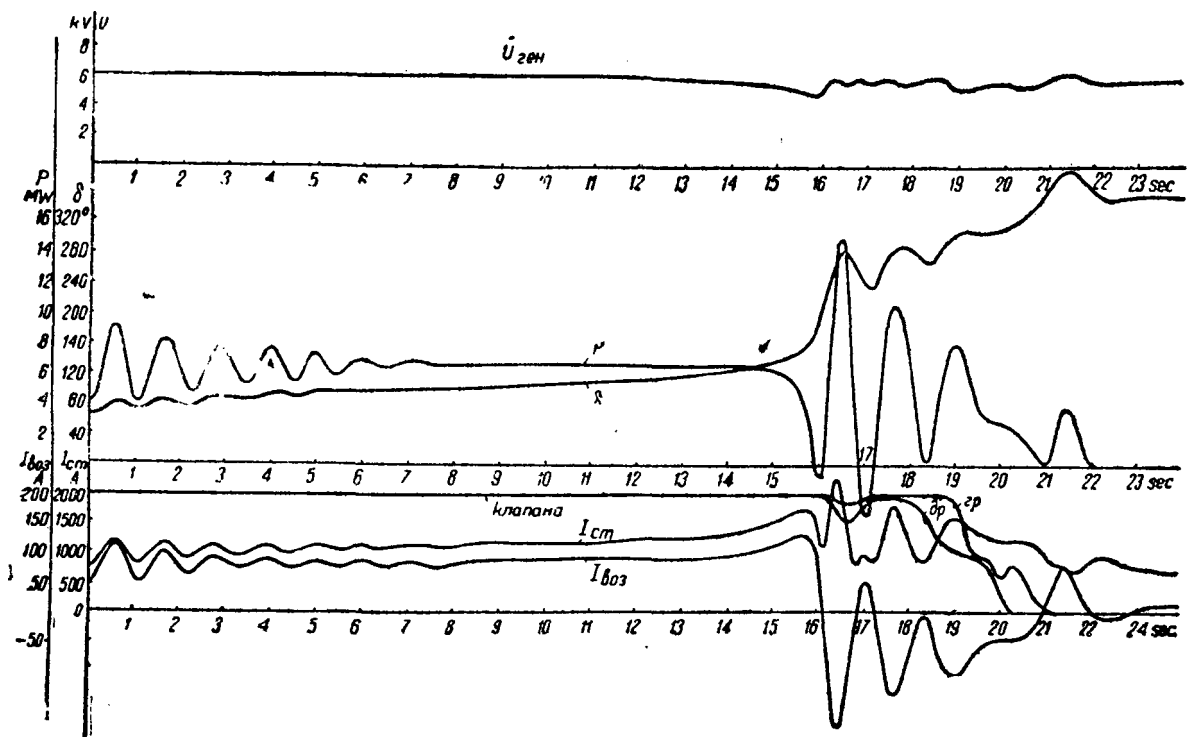


Рис. 2

риваемого вида в наших системах не позволяет установить действительно необходимую величину минимальных запасов устойчивости, однако можно думать, что в нормальном режиме достаточен внутренний предел мощности порядка 135—140%.

В аварийных режимах, например, при выходе цепи, естественно, могут быть допущены меньшие цифры.

Предел мощности заметно понижается, если мощность приемника соизмерима с мощностью системы передачи. Помимо того, как мы увидим в дальнейшем, при этом возникает совершенно новая проблема статической устойчивости нагрузки.

При работе двух станций конечной мощности на общую нагрузку, вообще говоря, признаком устойчивости является неравенство $\alpha < 0$, где α — относительное ускорение (разность абсолютных ускорений обеих станций), возникающее при малом приращении угла δ между роторами станций.

Это неравенство легко приводится к виду:

$$\frac{1}{M_1} \frac{dP_1}{d\delta} - \frac{1}{M_2} \frac{dP_2}{d\delta} > 0, \quad (13)$$

где M_1 и M_2 — постоянные инерции обеих станций.

Однако практически возможность устойчивой работы в области $\frac{dP_1}{d\delta} < 0$ при соблюдении условия (13) сомнительна. Хотя увеличение угла и связано здесь с появлением избыточных моментов, стремящихся уменьшить угол, однако так как оба момента положительны, частота системы возрастает, и вызываемое этим изменение параметров нагрузки, а также возможное вмешательство регуляторов турбин могут привести к нарушению устойчивости. Поэтому систему можно считать, безусловно, устойчивой лишь при условии

$$\frac{dP_1}{d\delta} > 0; \quad (14)$$

где P_1 — мощность удаленной станции.

При вычислении производной $\frac{dP_1}{d\delta}$ необходимо учесть снижение напряжения приемника, зависящее от так называемых статических характеристик нагрузки, которые должны

быть заданы в виде производных $\frac{dP}{dU}$ и $\frac{dQ}{dU}$.

Изменение угла δ между э. д. с. станций влечет за собой изменение как величины, так и фазы напряжения на нагрузке.

Выражая мощность станций в зависимости от U и δ_1 или δ_2 , где δ_1 и δ_2 — углы между э. д. с. станций и напряжением нагрузки, можно написать:

$$\frac{dP_1}{dU} = \frac{\partial P_1}{\partial U} + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} \frac{d\delta_1}{dU}.$$

Полагая $\delta = \delta_1 - \delta_2$, находим:

$$\frac{dP_1}{dU} = \frac{dP_1}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dU} = \frac{dP_1}{d\delta} \left(\frac{d\delta_1}{dU} - \frac{d\delta_2}{dU} \right),$$

откуда

$$\frac{dP_1}{d\delta} = \frac{\frac{\partial P_1}{\partial U} + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} \frac{d\delta_1}{dU}}{\frac{d\delta_1}{dU} - \frac{d\delta_2}{dU}}. \quad (14a)$$

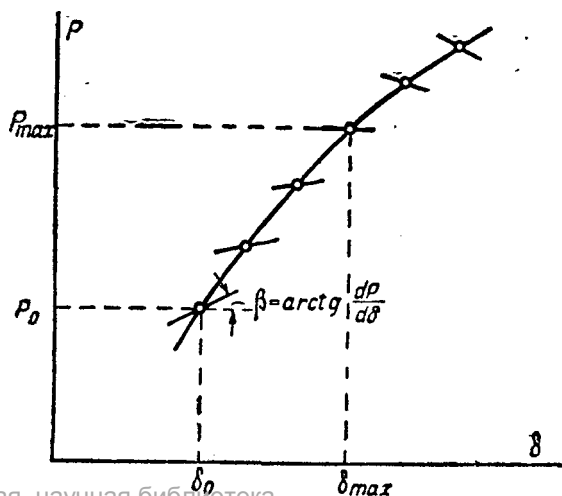


Рис. 3

Производные $\frac{d\delta_1}{dU}$ и $\frac{d\delta_2}{dU}$ определяются из уравнений:

$$\frac{dP_1}{dU} + \frac{dP_2}{dU} = \frac{dP_N}{dU};$$

$$\frac{dQ_1}{dU} + \frac{dQ_2}{dU} = \frac{dQ_N}{dU},$$

дающих:

$$\frac{d\delta_1}{dU} = \frac{\begin{vmatrix} A & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \\ B & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \end{vmatrix}}; \quad \frac{d\delta_2}{dU} = \frac{\begin{vmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & A \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & B \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \end{vmatrix}} \quad (15)$$

где

$$A = \frac{dP_N}{dU} - \left(\frac{\partial P_1}{\partial U} + \frac{\partial P_2}{\partial U} \right); \quad B = \frac{dQ_N}{dU} - \left(\frac{\partial Q_1}{\partial U} + \frac{\partial Q_2}{\partial U} \right).$$

Однако этим исследование статической устойчивости системы в целом не исчерпывается. Остается открытым вопрос об устойчивости работы асинхронных двигателей, представляющих обычно основную часть нагрузки.

Сначала мы рассмотрим простейший случай работы одного синхронного генератора, питающего асинхронный двигатель с постоянным моментом сопротивления.

Известно, что критерием устойчивости работы такого

двигателя является неравенство $\frac{dT}{ds} > 0$, где T — вращающий момент и s — скольжение. В известной схеме замещения асинхронного двигателя (рис. 4, а) вращающий момент равен активной мощности P_k в точке k . Относя реактивности схемы замещения двигателя к импедансу сети и генератора (рис. 4, б), условие устойчивости работы двигателя можно написать в виде:

$$\frac{dP_k}{ds} > 0. \quad (16)$$

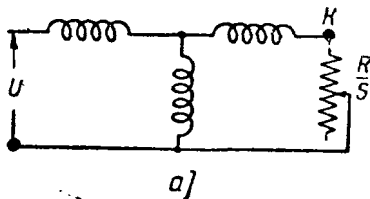
Эта производная, определяемая при постоянстве э. д. с. холостого хода генератора $E_d = \text{const}$, всегда меньше, нежели при постоянстве клеммового напряжения двигателя, чем и обуславливается возможность неустойчивости двигателя даже при неполной нагрузке его.

Мощность P_k является функцией напряжения в точке k и скольжения s и, следовательно,

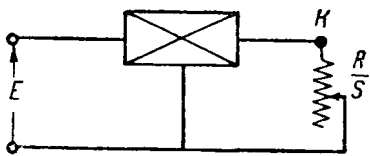
$$\frac{dP_k}{ds} = \frac{\partial P_k}{\partial s} + \frac{\partial P_k}{\partial U_k} \frac{dU_k}{ds}. \quad (17)$$

Точно так же

$$\frac{dP_k}{dU_k} = \frac{\partial P_k}{\partial U_k} + \frac{\partial P_k}{\partial s} \frac{ds}{dU_k}$$



а)



б)

Рис. 4

или

$$\frac{ds}{dU_k} = \frac{\frac{\partial P_k}{\partial U_k} - \frac{\partial P_k}{\partial U_k}}{\frac{\partial P_k}{\partial s}},$$

что вместе с (17) дает:

$$\frac{dP_k}{ds} = \frac{\partial P_k}{\partial s} \frac{\frac{\partial P_k}{\partial U_k}}{\frac{\partial P_k}{\partial U_k} - \frac{\partial P_k}{\partial U_k}}, \quad (18)$$

где $\frac{\partial P_k}{\partial s}$ равно, очевидно, $\frac{U_k^2}{R}$ и $\frac{\partial P_k}{\partial U_k} = \frac{2P_k}{U_k}$.

Производная $\frac{dP_k}{dU_k}$, определяющая изменение активной мощности в точке k в зависимости от напряжения в этой точке, при постоянстве э. д. с. генератора равна:

$$\frac{dP_k}{dU_k} = \frac{\partial P_k}{\partial U_k} + \frac{\partial P_k}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dU_k}, \quad (19)$$

где δ — угол между э. д. с. E и напряжением U_k .

Принимая во внимание, что реактивная мощность в точке k равна нулю, т. е.

$$\frac{dQ_k}{dU_k} = \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} + \frac{\partial Q_k}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dU_k} = 0,$$

можно получить:

$$\frac{d\delta}{dU_k} = - \frac{\frac{\partial Q_k}{\partial U_k}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}}$$

и следовательно:

$$\frac{dP_k}{dU_k} = \frac{\partial P_k}{\partial U_k} - \frac{\frac{\partial P_k}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial U_k}. \quad (20)$$

Таким образом режим работы двигателя можно считать устойчивым, если

$$\frac{dP_k}{ds} = \frac{U_k^2}{R} - \frac{\frac{\partial P_k}{\partial U_k}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} > 0. \quad (21)$$

Зависимость $\frac{dP_k}{ds}$ от $\frac{dP_k}{dU_k}$ представлена на рис. 5. Усло-

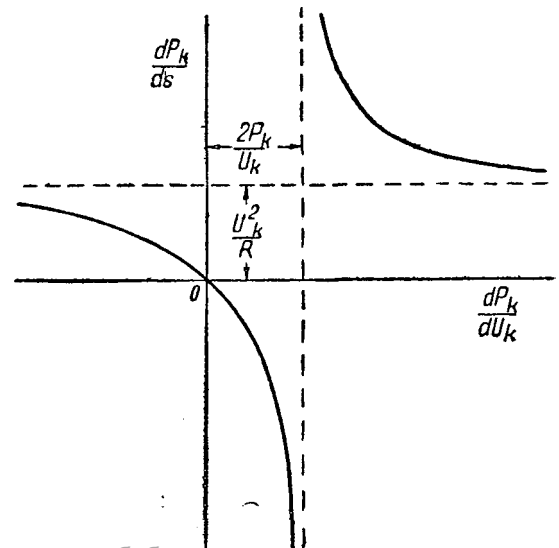


Рис. 5

$\frac{dP_k}{ds} > 0$ выполняется, вообще говоря, при

$$\frac{dP_k}{dU_k} < 0 \text{ и } \frac{dP_k}{dU_k} > \frac{2P_k}{U_k}.$$

Одно из этих неравенств не представляет интереса, так можно показать, что оно возможно лишь при отрицательных P_k . Следовательно, условие $\frac{dP_k}{ds} > 0$ равносильно

$$\frac{dP_k}{dU_k} = \frac{\partial P_k}{\partial U_k} - \frac{\frac{\partial P_k}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} < 0. \quad (22)$$

Рассмотрим теперь режим, возникающий при изменении E , предполагая, что мощность P_k остается постоянной. При этом:

$$\frac{dP_k}{dU_k} = \frac{\partial P_k}{\partial U_k} + \frac{\partial P_k}{\partial E} \frac{dE}{dU_k} + \frac{\partial P_k}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dU_k} = 0 \quad (23)$$

Из того,

$$\frac{dQ_k}{dU_k} = \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} + \frac{\partial Q_k}{\partial E} \frac{dE}{dU_k} + \frac{\partial Q_k}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dU_k} = 0$$

$$\frac{d\delta}{dU_k} = \frac{-\frac{\partial Q_k}{\partial U_k} - \frac{\partial Q_k}{\partial E} \frac{dE}{dU_k}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}},$$

вместе с (23) дает:

$$\left(\frac{\partial P_k}{\partial E} - \frac{\frac{\partial P_k}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial E} \right) \frac{dE}{dU_k} + \left(\frac{\partial P_k}{\partial U_k} - \frac{\frac{\partial P_k}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} \right) = 0,$$

или

$$\frac{\partial P_k}{\partial U_k} - \frac{\frac{\partial P_k}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} = - \left(\frac{\partial P_k}{\partial E} - \frac{\frac{\partial P_k}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial E} \right) \frac{dE}{dU_k}.$$

Из соотношения позволяет написать неравенство (22) в виде:

$$\left(\frac{\partial P_k}{\partial E} - \frac{\frac{\partial P_k}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial E} \right) \frac{dE}{dU_k} > 0, \quad (24)$$

так как $\frac{\partial P_k}{\partial E} - \frac{\frac{\partial P_k}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial E}$ всегда больше нуля⁴, то прак-

тически в качестве критерия устойчивости работы двигателя может быть принято неравенство:

$$\frac{dE}{dU_k} > 0. \quad (25)$$

Из критерия, предложенный Р. М. Кантор, весьма удобен с точки зрения, что производную можно вычислять не по напряжению U_k в точке k , а по любому промежуточному значению (6 кВ; 30, 100 кВ) и при этом воспользоваться известными статическими характеристиками нагрузки. Следовательно, обозначая промежуточное напряжение U , можно написать:

$$\frac{dF}{dU_k} = \frac{dE}{dU} \frac{dU}{dU_k}.$$

$\frac{\frac{\partial P_k}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_k}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_k}{\partial E} = \frac{U_k}{z_{E_k} \sin(\delta + \alpha_{E_k})}$, где z_{E_k} — взаимный импеданс между э. д. с. E и напряжением U_k .

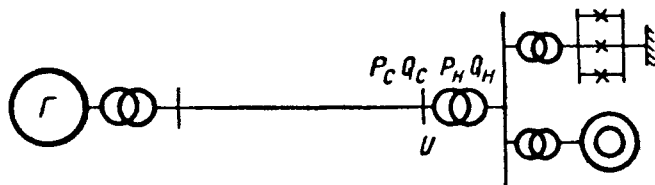


Рис. 6

где $\frac{dU}{dU_k}$ всегда положительно в области $\frac{dE}{dU_k} > 0$, так как если E и U_k одновременно возрастают (или уменьшаются), то любое промежуточное напряжение неизбежно также возрастает (или уменьшается).

Таким образом критерием статической устойчивости двигателей в схеме, изображенной на рис. 6, может, например, служить условие $\frac{dE}{dU} > 0$, где U — напряжение на полосах приемной подстанции.

Производная $\frac{dE}{dU}$ должна быть вычислена при условии

$$\frac{dP_C}{dU} = \frac{dP_M}{dU} \text{ и } \frac{dQ_C}{dU} = \frac{dQ_M}{dU},$$

где $\frac{dP_M}{dU}$ и $\frac{dQ_M}{dU}$ — заданные статические характеристики комплексной нагрузки; P_C и Q_C — активная и реактивная мощность станции.

$$\frac{dP_C}{dU} = \frac{\partial P_C}{\partial U} + \frac{\partial P_C}{\partial E} \frac{dE}{dU} + \frac{\partial P_C}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dU} = \frac{dP_M}{dU};$$

$$\frac{dQ_C}{dU} = \frac{\partial Q_C}{\partial U} + \frac{\partial Q_C}{\partial E} \frac{dE}{dU} + \frac{\partial Q_C}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dU} = \frac{dQ_M}{dU},$$

откуда

$$\frac{dE}{dU} = \frac{\frac{dP_M}{dU} - \frac{\partial P_C}{\partial U} - \frac{\frac{\partial P_C}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_C}{\partial \delta}} \left(\frac{dQ_M}{dU} - \frac{\partial Q_C}{\partial U} \right)}{\frac{\partial P_C}{\partial E} - \frac{\frac{\partial P_C}{\partial \delta}}{\frac{\partial Q_C}{\partial \delta}} \frac{\partial Q_C}{\partial E}}. \quad (26)$$

Легко убедиться, что условие $\frac{dE}{dU} > 0$ равносильно $\frac{dP_M}{dU} - \frac{dP_C}{dU} > 0$ при $E = \text{const}$ и $\frac{dQ_M}{dU} = \frac{dQ_C}{dU}$ или $\frac{dQ_M}{dU} - \frac{dQ_C}{dU} > 0$ при $E = \text{const}$ и $\frac{dP_M}{dU} = \frac{dP_C}{dU}$.

При работе нескольких машин или станций на общую нагрузку, P_C и Q_C следует рассматривать как ΣP_C и ΣQ_C при неизменных углах между э. д. с. (поскольку постоянные инерции станций значительно больше, нежели у двигателей).

Условие $\frac{dQ_M}{dU} - \frac{dQ_C}{dU} > 0$ было использовано К. А. Смирновым⁵ для объяснения так называемой неустойчивости или лавины напряжения, представляющей собой в сущности не что иное, как опрокидывание двигателей. Естественно, катастрофическое падение напряжения, вызываемое прогрессивным уменьшением скорости двигателей, приводит к выпадению из синхронизма станций, и вся система расстраивается. Именно такого рода нарушения статической устойчивости характерны для наших систем, где приходится сталкиваться со значительными посадками напряжения в часы максимума нагрузки.

Вместе с напряжением уменьшается и производная $\frac{dE}{dU}$, пока при некотором критическом значении напряжения она не перейдет через нуль (рис. 7). Критическое напряжение довольно близко к нормальному. Уже при снижении напря-

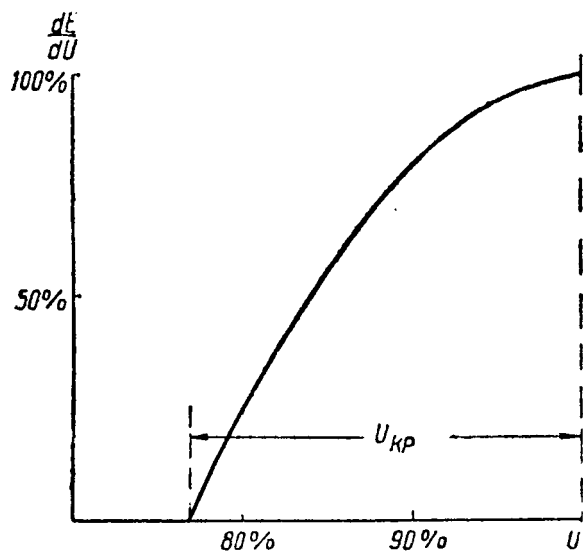


Рис. 7

жения на 15—20% возникает опасность опрокидывания двигателей.

Вопрос устойчивости работы двигателей тесно связан с выдвигаемой в настоящее время блочной схемой передачи энергии на большие расстояния. Выход блока наиболее опасен именно с точки зрения устойчивости двигателей приемной системы.

Для схемы, представленной на рис. 8, где мощность блока составляет 10% от суммарной мощности системы и в приемной системе имеется 10%-ный вращающийся резерв, кривая э. д. с. местной станции E_d в зависимости от напряжения U при выходе блока имеет вид, изображенный на рис. 9.

При построении этой кривой были использованы характеристики комплексной нагрузки (рис. 10), отнесенной к напряжению 110 kV и состоящей из двигателей с коэффициентом загрузки 0,6 (80% общей мощности) и освещения (20%). Эти характеристики учитывают также потери во всех промежуточных трансформаторах и наличие синхронных компенсаторов, доводящих $\cos \varphi$ в нормальном режиме до 0,85.

Фактическая величина э. д. с. станции (определяемая из условий нормального режима работы вместе с блоком) равна $E_{d0} = 2,1$. Как видно из рис. 9, эта э. д. с. меньше минимального значения кривой E_d при выходе блока, необходимого при данных характеристиках нагрузки, и, следовательно, устойчивая работа при выходе блока невозможна, т. е. двигатели опрокидываются, несмотря на наличие в системе достаточного вращающего резерва.

Та же кривая показывает, что производная $\frac{dE}{dU}$ при $U = 1$ положительна, т. е. при наличии на станциях приемника автоматических регуляторов напряжения, поднимающих при выходе блока э. д. с. машин и восстанавливающих напряжение, не исключена возможность сохранения устойчивости двигателей. Однако окончательное суждение об устойчивости в этом случае возможно лишь при исследовании протекания процесса изменения скорости двигателей и э. д. с. машин во времени, иными словами, по существу при расчете динамической устойчивости двигателей. При этом следует иметь в виду, что так как приемная система должна быть секционирована, нагрузка секции, питаемой вышедшим блоком, оказывается, несомненно, в худших условиях, нежели нагрузка здоровых секций.

Эти соображения, разумеется, не исключают возможности

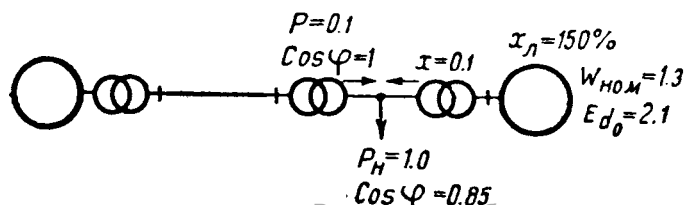


Рис. 8

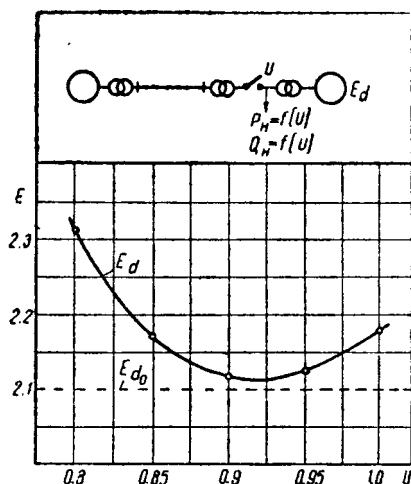


Рис. 9

применения блочной схемы (особенно при напряжении 300 kV, где мощность блоков относительно невелика), но в случае реализации этой схемы, даже в эскизных проектах, без исчерпывающего исследования вопроса устойчивости двигателей нам представляется преждевременной.

Несомненно также, что блочная схема предъявляет повышенные требования в отношении резервной мощности приемной системы.

С точки зрения устойчивости двигателей нормальная блочная схема протяженных систем передачи с полным разрывом линий представляет несомненные преимущества. С другой стороны, и в отношении устойчивости самой системы передачи замкнутая схема по существу лишь незначительно уступает блочной.

Действительно, недостатком замкнутой схемы в отношении статической устойчивости является увеличение реактивной мощности в аварийном режиме при выходе одной из линий. Однако с помощью переключательных постов это увеличение может быть ограничено до такой степени, что практически учитывая возможность уменьшения коэффициентов загрузки в аварийном режиме, замкнутая схема уступает блочной.

При времени выключения к. з. порядка 0,1 сек, которое может быть достигнуто в таких системах без больших трудностей, вопрос динамической устойчивости в замкнутой схеме в значительной мере теряет свою остроту. При наличии переключательных постов он может быть удовлетворительно разрешен с помощью таких относительно простых мероприятий, как увеличение постоянной инерции генераторов, установка импедоров или сопротивлений в нейтральных точках трансформаторов.

Расчеты, произведенные Н. М. Кажданом, показали, что в 300-kV варианте системы Куйбышев — Москва (рис. 11) при замкнутой схеме с тремя переключательными постами можно получить коэффициент запаса статической устойчивости равным 1,39 (аварийный режим) сравнительно с 1,35 для блочной схемы (нормальный режим).

Приемником в этих расчетах являлись шины бесконечной мощности.

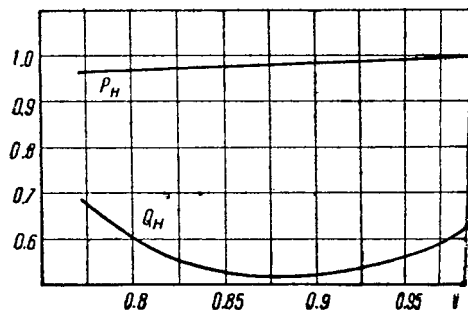


Рис. 10

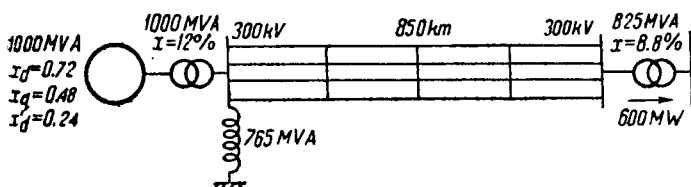


Рис. 11

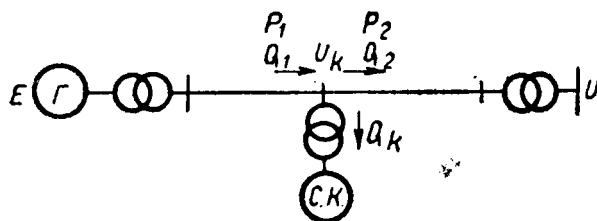


Рис. 12

Минимальное время выключения к. з. (двухполюсное замыкание на землю) путем увеличения постоянной инерции генераторов до 10 сек в этом варианте удалось довести до 0,2 sec.

Принятое увеличение махового момента удорожает генераторы лишь на 7—8%, и в основном удорожание замкнутого варианта сравнительно с блочным сводится к стоимости переключательных постов.

И в замкнутой и в блочной схеме, безусловно, целесообразна установка шунтирующих реакторов на генераторном конце линии, предложенных А. А. Вульф м.

Реакторы не только способствуют повышению устойчивости системы, но и позволяют создать надлежащие синхронизационные режимы, иначе неосуществимые при большой длине линий.

При отсутствии достаточно надежных и совершенных средств промежуточной компенсации шунтирующие реактора, а также всемерное уменьшение реактанцев генераторов и трансформаторов (хотя бы и ценой увеличения их размеров) являются, повидимому, первоочередными мероприятиями для повышения пропускной способности длинных линий.

Известное средство промежуточной компенсации — синхронные конденсаторы по Бауму, как показали расчеты ВЭИ⁶, не могут быть признаны удовлетворительным решением вопроса. Если в отношении динамической устойчивости схема Баума и дает приемлемые результаты (при ударном возбуждении конденсаторов), то в отношении статической устойчивости синхронные конденсаторы, безусловно, мало эффективны.

Влияние конденсатора на устойчивость определяется его регулирующим эффектом $\frac{dQ_k}{dU_k}$. Для рис. 12 с помощью уравнений (14а) и (15) можно получить следующую зависимость синхронизирующей мощности станции от регулирующего эффекта конденсатора:

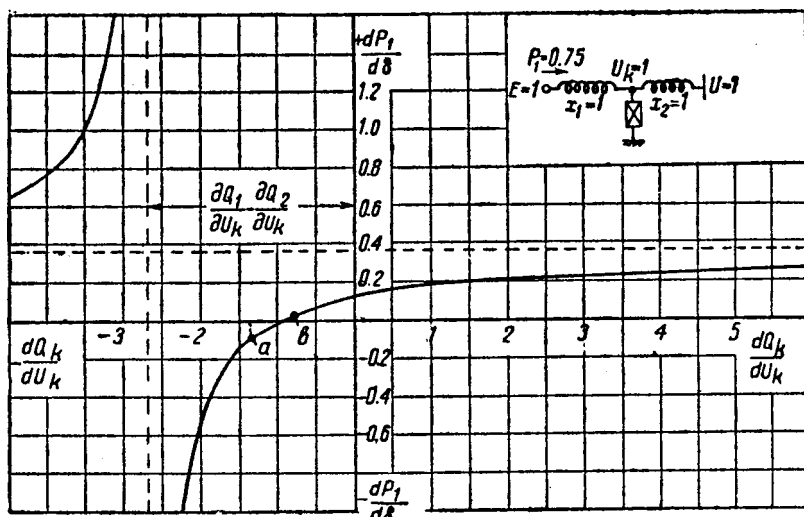


Рис. 13

сатор (например емкость схемы замещения линии передачи), то регулирующий эффект отрицателен (точка а).

Регулирующий эффект промежуточного синхронного конденсатора равен

$$\frac{dQ_k}{dU_k} = \frac{2U_k - E_{ck}}{x_{ck}},$$

где x_{ck} — синхронный реактанс, включая трансформатор.

При $x = 1,75$ конденсатор, работающий во взвешенном режиме ($E_{ck} = U_k = 1$), имеет регулирующий эффект $\frac{dQ_{ck}}{dU_k} = 0,57$, отнесенный к его номинальной мощности.

Эта цифра очень невелика, и включение промежуточного конденсатора на рис. 13 величиной в 130% от передаваемой

$$\frac{dP_1}{d\delta} = \frac{-\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} \frac{\partial P_2}{\partial U_k} \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_2} + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \frac{\partial P_1}{\partial U_k} \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} B}{-\left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} + \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1}\right) \left(\frac{\partial P_2}{\partial U_k} - \frac{\partial P_1}{\partial U_k}\right) + \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right) B}, \quad (27)$$

где

$$B = \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} - \left(\frac{\partial Q_1}{\partial U_k} - \frac{\partial Q_2}{\partial U_k}\right);$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2.$$

Эта зависимость представлена на рис. 13. Левая ветвь кривой, лежащая в области больших отрицательных значений $\frac{dQ_k}{dU_k}$, соответствует режиму, неустойчивому по признаку $\frac{dE}{dU_k} > 0$. Правая же ветвь (где $\frac{dE}{dU_k} > 0$) показывает, что с увеличением регулирующего эффекта синхронизирующая мощность возрастает довольно медленно, стремясь в пределе к некоторому значению, отвечающему условию $U_k = \text{const}$.

Исходный режим на рис. 13 предполагает, что в промежуточной точке отбирается некоторая опережающая реактивная мощность. Если здесь включить статический конден-

в системе активной мощности приводит лишь к незначительному повышению синхронизирующей мощности (точка b) несмотря на большую величину конденсатора.

Медленный рост синхронизирующей мощности с увеличением регулирующего эффекта заставляет заключить, что параллельная промежуточная компенсация вообще мало эффективна с точки зрения устойчивости.

Удовлетворительное решение задачи если и может быть получено, то лишь с помощью насыщенных статических или вращающихся конденсаторов, обладающих весьма высоким регулирующим эффектом. Не исключена также возможность осуществления режима искусственной устойчивости системы путем регулирования возбуждения синхронных конденсаторов с помощью электронных регуляторов напряжения.

Дальнейшие широкие возможности повышения пропускной способности систем передачи сулит последовательная компенсация реактивности линий.

Однако уже сейчас в связи с проектом передачи Куйбышев — Москва можно считать доказанной возможность и рентабельность передачи энергии на расстояние порядка 800—900 км без промежуточной компенсации.

Об определении статической устойчивости синхронной машины

ON STATIC STABILITY DETERMINATION SYNCHRONOUS MACHINE

И. С. Брук

Энергетический институт Академии наук СССР

В работе, доложенной в марте с. г. на заседании группы энергетики Академии наук СССР, А. А. Горев предложил определение статической устойчивости, отличающееся от общепринятого. Именно предлагалось определять статическую устойчивость в предположении, что неизменной является не э. д. с. за синхронным реактанцем (иными словами ток возбуждения), а продольная составляющая э. д. с. за переходным реактанцем. Критерий устойчивости устанавливается при этом из рассмотрения малых отклонений от нормального режима. Режим считается устойчивым, если возможно существование колебательного процесса около положения равновесия при малом отклонении¹.

Второе положение — установление критерия устойчивости — не вызывает возражений. Применяемый обычно метод по существу сводится к тому же, если рассматривать предельный с точки зрения устойчивости режим. Другое дело, если рассматривать поведение машины около положения равновесия, отвечающего режиму, отличному от предельного. В этом случае правильная оценка может быть получена лишь при учете токов, возникающих в обмотке возбуждения вследствие качаний. В этом случае нельзя считать ток возбуждения неизменным.

Но при определении статической устойчивости нас интересует именно предельный режим, т. е. тот, в котором колебания невозможны или, вернее, для которого период собственных колебаний стремится к бесконечности. При этом нет основания считать ток возбуждения изменяющимся, так как процесс выпадения машины из синхронизма вследствие статической неустойчивости теоретически протекает бесконечно медленно.

Приведенные выше соображения касаются, главным образом, качественной стороны явления и основаны на простейшем дифференциальном уравнении малых колебаний:

$$M\Delta\delta'' + T_s\Delta\delta = 0, \quad (1)$$

где M — постоянная инерции машины,
 $\Delta\delta$ — малое отклонение от положения равновесия, определяемое углом δ_0 между вектором э. д. с. за синхронным реактанцем и вектором напряжения сети;
 T_s — синхронизирующий момент для рассматриваемого положения равновесия.

Предельный режим характеризуется значением δ_0 , при котором $T_s = 0$.

При этом частота собственных колебаний $f = \sqrt{\frac{T_s}{M}}$ равна нулю.

Более строгое доказательство можно получить непосредственно из основных уравнений синхронной машины данных Park. Если пренебречь сопротивлением обмотки статора, то при малом отклонении ($\Delta\delta$) от положения равновесия справедливы следующие соотношения:

$$\Delta U_d = -\Delta\phi_q = U \cos \delta_0 \Delta\delta;$$

$$\Delta U_q = \Delta\phi_d = -U \sin \delta_0 \Delta\delta;$$

$$\Delta i_q = \frac{U \sin \delta_0}{x_q(p)} \Delta\delta;$$

$$\Delta i_d = \frac{U \cos \delta_0}{x_d(p)} \Delta\delta;$$

$$\Delta T_a = \phi_{d0} \Delta i_q + \Delta\phi_d i_{q0} - \phi_{q0} \Delta i_d - \Delta\phi_q i_{d0},$$

причем:

$$\phi_{d0} = U \cos \delta_0; \quad \phi_{q0} = -U \sin \delta_0;$$

$$i_{d0} = \frac{U \sin \delta_0}{x_q}; \quad i_{q0} = \frac{E - U \cos \delta_0}{x_d},$$

где U — вектор напряжения сети;

E — э. д. с. холостого хода;

i — ток статора;

ϕ — вектор потокоцеплений;

T_a — момент, действующий на ротор;

$x(p)$ — операторный реактанс;

индекс d — для продольной; индекс q — для поперечной оси, а индекс 0 — для значений, характеризующих положение равновесия. Если определить из приведенных выше уравнений приращение момента ΔT_a при малом отклонении ротора $\Delta\delta$, то для случая машины с гладким ротором и без демпферной обмотки ($x_d = x_q$; $x_q(p) = x_t$) получим следующее операторное выражение:

$$\Delta T_a = \left[\frac{E U \cos \delta_0}{x_d} + U^2 \sin^2 \delta_0 \frac{x_d - x_d(p)}{x_d x_d(p)} \right] \Delta\delta. \quad (2)$$

Уравнение относительного движения ротора представится в следующем виде:

$$Mp^2 \Delta\delta + T_a = \Delta T_a, \quad (3)$$

где ΔT_a — приращение момента первичного двигателя, вращающего генератор.

Заменяя

$$x_d(p) = \frac{x_d' T_0 p + 1}{T_0 p + 1},$$

разомкнутом статоре, получим из (2) и (3) операторное уравнение для $\Delta\delta$ в следующем виде:

В этом случае предельный режим определяется из условия:

$$T_s = 0,$$

$$\Delta\delta = \frac{x_d(x'_d T_0 p + x_d)}{Mx_d x'_d T_0 p^3 + Mx_d^2 p^2 + [E_0 U \cos \delta_0 x'_d + U^2 \sin^2 \delta_0 (x_d - x'_d)] T_0 p + E_0 U \cos \delta_0 x_d} \Delta T_M. \quad (4)$$

Знаменатель в правой части уравнения (4) имеет два комплексно сопряженных корня и один вещественный. При $\delta_0 = \frac{\pi}{2}$, что для машины с гладким ротором характеризует предельный по устойчивости режим (при обычном определении статической устойчивости), вещественный корень равен нулю. При $\delta_0 > \frac{\pi}{2}$ этот корень становится положительным. Из этого с очевидностью вытекает, что отклонение ротора вследствие малого толчка уже не будет ограничено по времени, т. е. машина неустойчива. Если положить, что постоянная времени обмотки ротора $T_0 = \infty$, т. е. предположить, что при всяких отклонениях от положения равновесия остается неизменной продольная э. д. с. за переходным реактанцем, то операторное уравнение (4) примет вид:

$$\Delta\delta = \frac{\Delta T_M}{Mp^2 + \frac{E_0 U \cos \delta_0}{x_d} + U^2 \sin^2 \delta_0 \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d}}. \quad (5)$$

Это уравнение совпадает с дифференциальным уравнением (1), если считать

$$T_s = \frac{E_0 U \cos \delta_0}{x_d} + U^2 \sin^2 \delta_0 \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d}. \quad (6)$$

что, как легко видеть, наступает при значениях $\delta_0 > \frac{\pi}{2}$. А. А. Горев пользовался выражением для синхронизирующего момента, совпадающим с (6), и, естественно, пришел к выводу, что предельный режим лежит в области $\delta_0 > \frac{\pi}{2}$. Однако

из точного (при неучете сопротивления статора) уравнения (4) следует, что как бы ни была велика постоянная времени обмотки ротора при условии, что она все же остается конечной величиной (а в реальной машине это всегда имеет место), предельный режим определяется исключительно условием равенства нулю синхронизирующего момента при неизменной силе тока в цепи возбуждения ($E = E_0$).

Таким образом для предельного режима определяющим является лишь первый член в выражении (6). Для режимов, далеких от предельного, когда период собственных колебаний такого же порядка, как постоянная времени обмотки ротора или меньше, необходимо вводить поправку в определение синхронизирующего момента, учитывающего добавочный ток в обмотке возбуждения. Это обстоятельство, однако, прямого отношения к определению статической устойчивости не имеет.

Куйбышевский гидроэнергетический узел

HYDRO-ELECTRIC POWER SCHEME FOR KUIBISHEV DISTRICT

А. В. Чаплыгин

Гидроэнергопроект

ЗАКОНЧЕННЫЙ в настоящее время и представленный и высшие органы схематический проект Куйбышевского гидроузла в своих основных установках — подпорная отметка, установленная мощность и пр. — связан со схемой реконструкции Волги. При проработке проекта Куйбышевского гидроузла эта схема рассматривалась в концепции проекта «Большой Волги», имеющего целью при помощи соответствующих сооружений использовать в максимальной степени волжскую гидроэнергию, создать глубоководный путь между северными и южными морями и оросить засушливое Заволжье. В проекте Большой Волги ведущими приняты энергетические задачи, решение которых дает наибольший народно-хозяйственный эффект. Транспортные задачи

решаются попутно. Ирригационные задачи совместно с энергетическими и транспортными возникают на нижнем участке Волги.

Технический замысел проекта Большой Волги заключается в том, что на Волге, от Рыбинска до Сталинграда, и на Каме создаются в подходящих местах, на расстоянии 400—600 km друг от друга плотины высотой 20—30 m, образующие на всем протяжении реки подпертые бьефы, являющиеся громадными водохранилищами, регулирующими режим реки в энергетических целях и одновременно образующими глубоководный путь. При плотинах устраиваются мощные гидростанции и шлюзы для пропуска судов.

Такую реконструкцию Волги прежде всего предполагается провести на собственно волжском



Эскиз общего вида будущей плотины Куйбышевской гЭС на Волге

русле — от Рыбинска до Сталинграда, так как здесь находится основная масса мощности и энергии реки, сосредоточен основной волжский грузооборот и расположены засушливые территории, подлежащие орошению.

На главных притоках Волги — Каме и Оке — сначала должны быть сооружены гидроузлы в верховьях, так как они ближе всего к первоочередным потребителям, и их сооружение вследствие зарегулирования стока обеспечивает судоходную глубину на нижних участках этих рек до Волги.

Основными принципами реконструкции Волги приняты следующие.

Реконструкция должна осуществляться высоконапорными гидроэнергетическими узлами с напором, лимитируемым условиями затопления и геологическими. Разбивка на бьефы должна быть произведена так, чтобы каждый вышележащий узел был подперт снизу следующим гидроузлом. Этим обеспечивается возможность суточного регулирования мощности ГЭС в навигационный период и необходимые для транспорта глубины.

Гидроузлы должны, по возможности, располагаться непосредственно ниже впадения крупных притоков, чтобы использовать максимум стока и иметь максимум объема водохранилища.

Крупные центры населения и промышленности во избежание большого затопления должны оказываться в хвостовых частях подпора.

Исходя из этих положений, схема Большой Волги принята в составе гидроузлов, показанных в табл. 1.

Таким образом общая мощность основных гидроустановок Большой Волги составит около 10 тыс. MW с годовой отдачей около 50 млн. MWh, что равноценно добыче 25 млн. т условного дальнего привозного топлива или, примерно, 50—60 млн. т местного топлива (торф, бурый уголь, сланцы).

Сопоставляя волжские водно-энергетические ресурсы с другими основными энергоресурсами нашей страны, можно отметить, что в 1936 г. Донбасс дал 75 млн. т, Кузбасс — 17 млн. т и Подмосковный бассейн — 7 млн. т угля.

Мощные волжские гидростанции являются опорными центрами, регулирующими режим работы огромных электросистем районов, энергетически тяготеющих к Волге. Электросистемы Центрально-

Таблица 1

	Наименование гидроузла	Отметки НПГ	Мощность MW	Выработка энергии млн. MWh
	р. Волга			
1	Иваньковский	124,00	30	} 0,45
2	Угличский	113,00	100	
3	Рыбинский	102,00	330	
4	Василевский	87,00	400	
5	Чебоксарский	72,00	700	3,80
6	Куйбышевский	54,00	3300	15,00
7	Камышинский	23,00	1920	11,20
8	Сталинградский	0,00	700	4,00
	Итого	—	7480	36,83
	р. Кама			
9	Тюлькинский	145,00	700	3,50
10	Пермский	107,00	500	2,20
11	Сокологорский	72,00	900	4,78
	Итого	—	2100	10,48
	р. Ока			
12	Калужский	142	150	0,50
13	Коломенский	117	100	0,40
	Итого	—	250	0,90
	Всего	—	9830	48,26

Примечание. Отметки подпора намечены из условия обеспечения в нижнем бьефе глубины около 7 м, необходимой для транспорта и суточного регулирования. В процессе дальнейших исследований они могут несколько измениться. Местоположение Сталинградского гидроузла условно ввиду недостаточности исследовательских данных принято в районе Красноармейска в начале волго-ахтубинской поймы.

ышленного, Поволжского, Уральского, Центрально-черноземного, Заволжского и Сталинградского районов при помощи линий высоковольтных электропередач, опирающихся на волжские электростанции, будут объединены в единую энергетическую систему Волжского бассейна, соединяющуюся на западе с энергосистемой Большого Днепра и на юге с энергосистемой Северного Кавказа и Каспия.

Волжская энергосистема, обслуживающая территорию около 2,5 млн. км², явится комплексом электростанций и гидроэлектростанций, объединенных линиями электропередач. Ее общая мощность будет порядка 33 тыс. MW и годовая отдача порядка 160 млн. MWh.

Вместе с тем создадутся на всем основном Волго-камском водном пути гарантированные глубины 6—7 м. Этот новый глубоководный путь, пропускающий морские суда, в южной своей части будет иметь выход к столице СССР — Москве — через Угличский гидроузел и канал Волга — Москва.

Реконструированный водный путь на Шексне и в Твери (Мариинская система) даст глубоководный выход в Балтийское и Белое моря, на юге Волго-Донской и Мангышский каналы соединят Волгу с Черным морем.

В нижнем течении Волга вступает в засушливую местность. Здесь ее воды будут использованы для орошения миллионов га, в первую очередь Сыр-Дарьинской параллели, где сосредоточены основные районы страдающей от засухи высокоурожайной пшеницы, а затем и полупустынные пространства юго-каспийской низменности.

Оздоровление системы волжских водохранилищ, уменьшение испарения и осуществление ирригационной проблемы скажется на уменьшении стока Волги в Каспийское море, что позволит обеспечить баланс моря путем дополнительного притока Волги из смежных бассейнов, богатых водой, или уменьшением испаряющей поверхности моря при помощи дамб, изолирующих от Каспия мелководные его заливы.

В общих чертах, представляется будущая Волга.

Осуществление всего этого огромного комплекса мероприятий должно быть увязано с ростом энергетических, ирригационных и транспортных потребностей народного хозяйства. В разрезе энергетических потребностей, являющихся ведущими в проблеме реконструкции Волги, так как в этой области народного хозяйства волжские электростанции дадут наибольший эффект, завершение строительства Большой Волги приурочивается к моменту, когда энергопотребление тяготеющих к ней районов достигнет цифр порядка 160 млн. MWh. Можно предположить, что это будет достигнуто через 20 лет.

Осуществление реконструкции Волги уже началось. Заканчивается строительство канала Волга — Москва. Строятся верхневолжские гидроузлы — Пермский и Угличский, и Пермский гидроузел на Каме. Общая мощность станций этих гидроузлов будет около 950 MW с годовой отдачей около 160 млн. MWh.

Это строительство обеспечит глубоководное соединение Волги с Москвой и Балтийским и Белым морями, обеспечит водоснабжение Москвы, улучшит благодаря зарегулированию стока судоходные условия на самой Волге и облегчит напряженный энергетический баланс Центрально-промышленного и Уральского районов.

Однако, заглядывая вперед, в ближайшее десятилетие, анализируя народнохозяйственные требования к Волге, которые предъявляют последние годы этого десятилетия, надо констатировать, что уже ведущееся строительство на Волге не удовлетворит в достаточной мере эти требования.

Анализ развития промышленного, транспортного и коммунального электропотребления в дефицитных по топливу промышленных районах северной части волжского бассейна показывает, что в Центрально-промышленном, Поволжском и Уральском районах следует ожидать электропотребления в 1942 г. в количестве не менее 28 млн. MWh с максимумом нагрузок около 5 тыс. MW, а в 1947 г. не менее 50 млн. MWh с максимумом около 10 тыс. MW.

Местные топливные базы этих районов, возрастающая до предела, уже не будут в состоянии по-

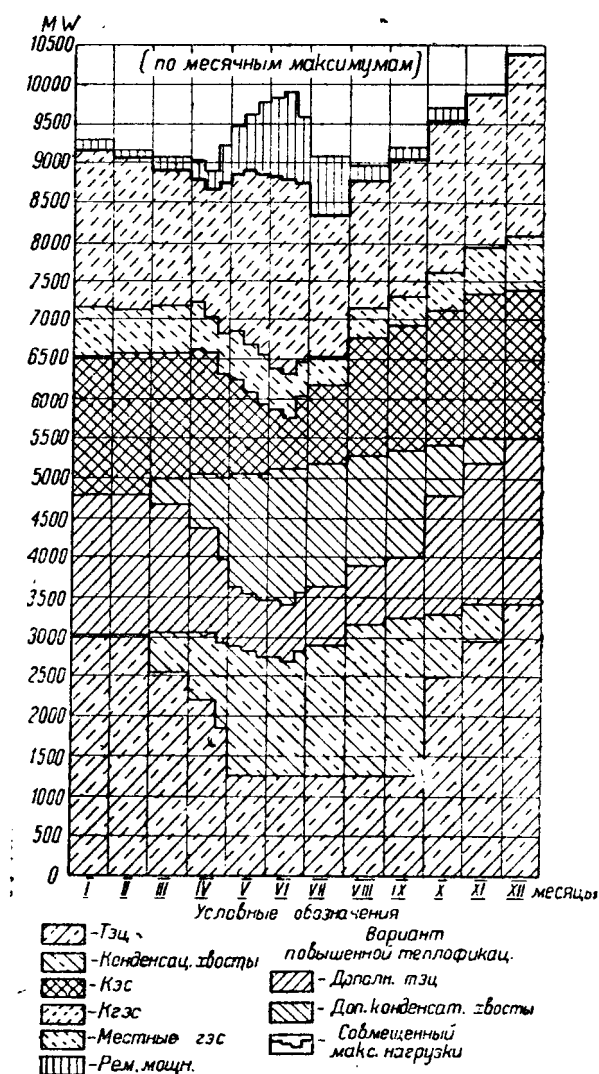


Рис. 1. Баланс мощностей электрических систем ЦПР, Урала и Поволжья в 1947 г.

крыть спрос на топливо. Обострится положение с завозом сюда дальнепривозного топлива. Мощность тепловых электроцентралей, принимая, что все основные промышленные центры и крупные города этих районов будут охвачены централизованным теплоснабжением в пределах технических возможностей, представится возможным довести к 1947 г. не более чем до 3,5—4,0 тыс. MW. Остальные 6 тыс. MW максимума нагрузок лишь в размере 1 тыс. MW будут покрываться строящимися в настоящее время Волжско-Камскими гидростанциями, а 5 тыс. MW, если не будут построены еще новые волжские гидростанции, пришлось бы при все обостряющемся топливном балансе покрывать конденсационными тепловыми электростанциями с их дорогой электроэнергией.

Вывод из сказанного, что в дополнение к строящейся одной тыс. MW необходимо обеспечить ввод в эксплуатацию в течение ближайших 6—10 лет еще не менее 2,0—2,5 тыс. MW волжской гидроэнергии.

Правительством и партией решен вопрос о развитии в Заволжье крупных ирригационных работ в целях борьбы с засухой и обеспечения твердого фонда высококачественной волжской пшеницы. Для этого прежде всего необходимо осуществить орошение в районе заволжских пшеничных посевов между Куйбышевской и Камышинской параллелями.

Так как орошаемые территории расположены высоко над Волгой, то орошение должно быть электромеханическим. Для этого нужна волжская гидростанция с дешевой гидроэнергией.

Волга должна сама поднять свои воды в засушливое Заволжье. Для первой очереди орошения понадобится около 800 MW мощности.

Таким образом волжское гидростроительство в ближайшее десятилетие должно разрешить и задачу дешевого энергоснабжения ирригации Заволжья между Самарской Лукой и Камышинской параллелью.

Третьей задачей является усовершенствование волжского водного пути между рыбинскими шлюзами и будущим Волго-Донским каналом. Обеспечение здесь транзитной глубины не менее 3,5 м

и возможное сокращение пути уменьшат мощность водных перевозок будущего волжского грузооборота, намечаемого на 1947 г. в раз до 120 млн. т, и сделают более эффективным конструируемое Волго-Балтийское соединение, предполагаемое к постройке Волго-Донское.

Все три изложенных основных задачи очередного строительства на Волге разрешатся лучшим образом: мощный гидроэнергетический узел сооружений на Самарской Луке близ Куйбышева (см. рис. на обложке).

Произведенными с 1930 по 1936 гг. обширными изыскательскими, исследовательскими и проектными работами освещены и разрешены все основные вопросы этого крупнейшего волжского сооружения.

Инженерно-геологические изыскания установили, что в районе выбранного под плотину Царевкурганского створа не происходили те мощные тектонические процессы, наличие которых предусмотрено в западной части Луки. Поэтому тектонические разрушения скалы здесь в значительной степени ослаблены. Трещиноватость и каверность известняков связаны лишь с воздействием на скалу денудационных факторов и наблюдаются в верхних частях скального массива. Качество известняков здесь выше многих известняков, на которых построены плотины с большим напором проектируемой на Самарской Луке.

Протяженность скалы на Царевкурганском створе — около 1300 м в левой части створа около 200 м в правой — позволяет разместить на ней все бетонные сооружения — водослив и гидроэлектростанцию.

Средняя часть плотины — песчаная дамба располагается на песках средней плотности, скрепленных на небольшой глубине пластом из плотных глин, являющихся водонепроницаемым экраном под плотинной.

Переволоцкий водораздел в верхней части сложен плотными глинами, по своим качествам вполне допускающим устройство в их глубине деривационных выемок. Нижележащая известково-доломитовая толща допускает основание для шлюзов и здания ГЭС.

Скальные породы, слагающие Луку и Пе

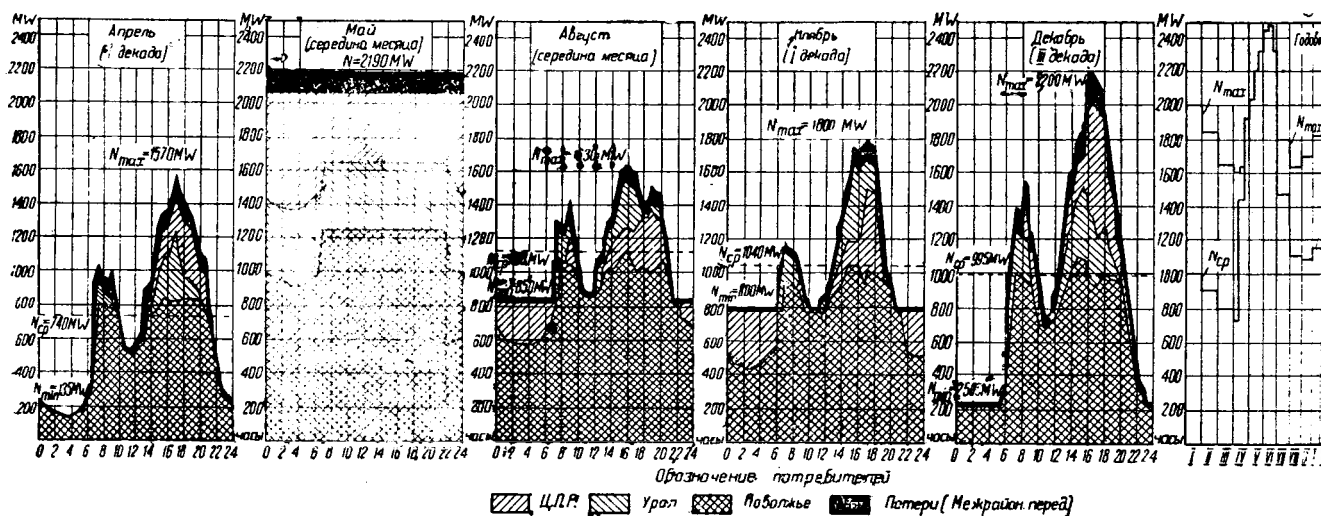


Рис. 2. Режим работ Куйбышевской ГЭС в 1947 г. (по среднемагистральному году)

ский водораздел, мало водопроницаемы, о чем свидетельствует изученный в них режим подземных вод и опытное нагнетание воды. Со стороны будущего водохранилища они прикрыты водонепроницаемым суглинистым покровом. Вследствие большой ширины водораздела и Луки напорный градиент фильтрующихся из водохранилища вод идет весьма невелик, а утечка воды из водохранилища практически неощутима.

В итоге инженерно-геологических исследований установлена несомненная осуществимость в условиях Самарской Луки проектируемых сооружений напором порядка 30 м.

Гидрологические исследования установили, что среднегодовой сток Волги у Царева-кургана равен 50 км^3 с колебаниями от 141 до 363 км^3 . Среднегодовой секундный расход воды составляет ок. $8000 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Весенний паводок проходит обычно с максимумом до 35 тыс. $\text{м}^3/\text{сек}$. Максимальный наблюдаемый расход составлял около 63 тыс. $\text{м}^3/\text{сек}$ и вероятен 1 раз в 200 лет. Один раз в 1000 лет возможен весенний максимум с расходом в 71 тыс. $\text{м}^3/\text{сек}$, и один раз в 10 тыс. лет в 81 тыс. $\text{м}^3/\text{сек}$. Этот расход и принят за расчетный.

Минимальный навигационный расход составляет $300 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Скорость течения Волги в межень в среднем равна $0,6 \text{ м/сек}$ и наибольшая $0,85$, а в обычный паводок, соответственно, $1,6$ и $2,4 \text{ м/сек}$ и в катастрофический она доходит до 3 м/сек .

Размеры льдин при ледоходе в среднем — длина 140 м , ширина — 100 м , толщина — $0,7 \text{ м}$.

Годовой сток взвешенных наносов в среднем равен 22 млн. т .

Будущее водохранилище при подпорной отметке $+54 \text{ м}$ затопит до 500 тыс. га земель около 200 селений и 28 тыс. дворов. Общее количество населения, переселяемого из района затопления, выразится в цифре 130 тыс. чел. сельского и 14000 чел. городского.

Общий ущерб от затопления исчислен в цифре 80 млн. руб. В основном он складывается из стоимости сооружений для защиты от затопления и затопления крупных населенных пунктов (г. Казань) — 130 млн. руб., стоимости сельских строений — 40 млн., промпредприятий — 34, переустройства мостов — 40, переселения — 44 и стоимости восстановления сельскохозяйственных угодий — 240 млн. руб.

Сооружения Куйбышевского гидроузла окажут влияние на рыбное хозяйство Волго-Каспийского моря, так как будет прегражден путь проходным рыбам (осетрам, минюге, белорыбце) к их нерестилищам и изменятся условия заливания паводком пойменных площадей низовьев Волги вследствие захвата части паводка в водохранилище.

Таковы вкратце природные условия, в которых спроектированы гидротехнические сооружения на Самарской Луке.

Отметка подпора в проекте принята $+54 \text{ м}$ при отметке меженного горизонта Волги на Царевокурганском створе около $+23 \text{ м}$.

Эта отметка подпора выбрана, главным образом, по условиям затопления и подтопления Казани. С точки зрения интересов Казани и ее

промышленных предприятий приемлемы либо отметка подпора $+46 \text{ м}$, при которой город и промышленность остаются почти в бытовых условиях, либо отметка $+54 \text{ м}$, при которой большая пойма у Казани покрывается слоем воды не менее 2 м , что обеспечивает должные санитарные условия в районе города и хорошие условия для Казанского порта.

Казань в этом случае окажется непосредственно на берегу Волги.

Промежуточные между $+46$ и 54 отметки подпора, учитывая необходимость некоторой сработки водохранилища в навигационный период, — в санитарном отношении неприемлемы.

В энергетическом отношении отметка $+54 \text{ м}$, конечно, значительно эффективнее, чем отметка $+46 \text{ м}$. Вместе с тем отметка $+54 \text{ м}$ обеспечивает необходимые судоходные глубины в нижнем бьефе верхнего Чебоксарского гидроузла.

Весь комплекс гидроэнергетических сооружений на Луке состоит из двух узлов: руслового на Царевокурганском створе и деривационного на Переволокском водоразделе.

В состав сооружений руслового узла входят бетонный водослив длиной 816 м , две гидростанции — левобережная и правобережная, с общей установленной мощностью $1,4 \text{ тыс. MW}$ и рефулированная из песка глухая часть плотины.

В состав деривационного узла входят — силовой деривационный канал с гидростанцией мощностью $1,1 \text{ тыс. MW}$, судоходный канал с двумя нитками двухкамерных шлюзов и нефтеперекачка.

Судоходные сооружения сконцентрированы на деривационном узле. Этим достигается возможность вести суточное регулирование на плотинных гэс в навигационный период.

Выход из деривационных шлюзов находится в 100 км ниже плотинных гидростанций. Поэтому колебание горизонта, вызываемое суточным регулированием, снижается в районе шлюзов до размера в $10\text{—}15 \text{ см}$ и не мешает судоходству.

Вместе с тем спрямление Луки судоходным деривационным каналом сокращает транзитный путь судов на 135 км , а деривационная гидростанция использует около 3 м дополнительного напора.

Кроме описанной компоновки плотинного узла сооружений, проработан вариант с применением гидростанции типа Кембс, т. е. со сбросом воды и льда через гидростанцию. В этом варианте вся гидростанция располагается на левом берегу.

Установленная мощность гидростанций принята в $2,5 \text{ тыс. MW}$ по следующим соображениям.

Предположено, что гидростанции Самарской Луки будут снабжать энергией промышленность, находящуюся в ее районе, — ирригационную систему Заволжья и, кроме того, по линиям высоковольтных передач дефицитные по топливу Центрально-промышленный, Поволжский и Уральский районы.

Анализ работы гидростанции в энергосистемах этих районов в условном 1947 г. приводит к выводу, что в покрытии их декабрьского максимума она участвует мощностью в $2,2 \text{ тыс. MW}$, а в покрытии максимума октября-ноября мощностью $1,8$, из которых $0,9 \text{ тыс. MW}$ являются пиковыми.

Отсюда получается, что необходима полная мощность гидростанций в $2,3 \text{ тыс. MW}$. Мощность

плотиной гидростанции принята в 1,4 тыс. MW, из которых 0,9 ведут суточное регулирование, а 0,5 тыс. MW — круглосуточную работу.

Таким путем обеспечивается для навигации между г. Куйбышевом и деривационным узлом среднесуточный расход в 3000 м³/sec и минимум в 2400 м³/sec.

Мощность деривационной гидростанции на основании изложенного должна составить 0,9 тыс. MW. В проекте, учитывая аварийный резерв, она принята в 1,1 тыс. MW, в связи с чем общая мощность гидростанции принята 2,5 тыс. MW.

Природные условия не ограничивают возможностей дальнейшего развития деривационной гидростанции. Запроектированная пропускная способность деривационного канала обеспечивает возможность развития ее мощности до 2 тыс. MW.

Расположение водослива вне русла реки, на скале левобережной поймы обуславливает сосредоточение сброса воды из подпертого бьефа в левой его трети.

Скальное основание водосливногo русла безопасно выдержит средние скорости течения в нижнем бьефе водосливногo русла до 1,7 м/sec при обычном паводке и до 2,7 м/sec при катастрофическом паводке.

Для предохранения от подмыва земляной части плотины и берега водосливное русло на протяжении около километра в верхнем и нижнем бьефах ограждено основанными на скале стенками. Условия прохода паводка в водосливном русле были изучены на пространственной модели в масштабе 1/185.

Лабораторные опыты показали, что поток воды в водосливном русле не только не подмывает земляную часть плотины, но, наоборот, откладывает в ее районе песок.

Ввиду тенденции потока прижиматься к левому берегу было изучено лабораторным путем очертание берега, при котором не происходит его подмыва. Это очертание принято в проекте.

Строительство гидроэнергетических сооружений на Самарской Луке потребует выполнения значительных объемов работ.

Первая очередь строительства, в результате которой будет построен плотинный узел сооружений с гидростанцией мощностью 1,4—1,8 тыс. MW, с годовой отдачей свыше 9 млн. MWh, и судоходные сооружения на Переволокском водоразделе, потребует укладки 4,2—4,9 млн. м³ бетона, съема от 18 до 25 млн. м³ скальных грунтов, экскавации 30—35 млн. м³ мягких грунтов и рефулирования около 85 млн. м³ песка.

Вторая очередь работ, в результате которой в эксплуатацию войдет деривационная гидростанция, потребует укладки около 1 млн. м³ бетона, выемки около 15 млн. м³, скалы экскавации 14 млн. м³, мягких грунтов и рефулирования около 10 млн. м³ песка.

Из приведенных цифр видно, что в строительстве Куйбышевского гидроузла значительная роль принадлежит земляным работам, что объясняется расположением всех бетонных сооружений водослива, гидростанций и шлюзов не в реке, а на берегу.

Такое расположение, вызываемое прежде всего условиями основания, позволяет, как уже указы-

валось, основные работы вести вне риска автот паводка и ледохода на столь мощной реке, Волга, и, следовательно, обеспечить отсутствие перерасходов по производству работ и осуществление их в намеченные планом твердые сроки.

Вместе с тем земляные работы, требуя единичных капиталовложений, не вызывают никаких издержек по производству энергии, как такие работы, как, например, снятие Царя Кургана, не нуждаются ни в амортизационныхчислениях, ни в ремонтных, ни в эксплуатационных.

Следующая таблица дает сравнение объемов работ по Куйбышевскому гидроузлу с осуществленными мировыми и советскими стройками (табл. 2).

Таблица 2

Виды работ в млн. м³	Каналы			Гидроэнергетические узлы		
	Панамский	Флоридский	Москва-Волга	Форт-Пек	Гранд-Кули	Куйбышевский
1 Бетонные . .	3,9	—	2,7	0,9	8,4	5,0—6
2 Скальные . .	60,0	103,0	—	0,8	0,6	30,0—40
3 Мягкие грунты	40,0	76,0	146,0	14,0	11,6	44,0—47
4 Рефулирование песка .	90,0	230,0	—	76,0	—	95,0

Приведенные цифры свидетельствуют о том, что Куйбышевский гидроузел, являясь по размерам строительства крупнейшим мировым сооружением, вместе с тем по объему работ не выходит за пределы уже осуществленных. При современном состоянии техники строительства он вполне осуществим в сроки, намеченные планом работ, 6—7 лет.

Капиталовложения в сооружения гидроузла с установленной мощностью 2,5 тыс. MW в ценах 1935 г. определились в 3400 млн. руб., считая ущерб от затопления.

Это дает на установленный киловатт 1360 руб и на 1 kWh выработки 25 коп.

Стоимость производства энергии, относя к энергетике и стоимость судоходных устройств, будет около 0,5 коп. за 1 kWh.

Проведенные дополнительные проектные работы с учетом применения гидростанции типа Кембс, допускающей пропуск воды и льда на турбинах и с использованием грунта выемки водосливногo русла в земляную часть плотины, показали возможность заметного (на 300—350 млн. руб.) удешевления строительства. Так образом в энергетическом отношении Куйбышевский гидроузел является самым эффективным всех гидроузлов Большой Волги.

Исключительная его эффективность определяется не только выработкой большого количества весьма дешевой гидроэнергии, но и особо благоприятными условиями использования его мощности и энергии.

Центральное положение гидроузла между районами ирригации и дефицитными по топливу промышленными районами северной части Волжского бассейна определяет возможность весьма вы-

ой работы гидростанции в энергосистемах этих районов.

Для передачи мощности и энергии Куйбышевского гидроузла в районы потребления в проекте проработана система высоковольтных электропередач, связывающая Куйбышевскую гэс с Центрально-промышленным районом, Поволжским, Уральским и районом ирригации.

Линии электропередач спроектированы применительно к данным американского проекта электропередачи от гидростанции Болдер-Дам на р. Колорадо до г. Лос-Анжелос.

Напряжение около 300 kV, освоенное в этом строительстве, применено и в проекте Куйбышевских электропередач.

Общая характеристика их дается в табл. 3.

Таблица 3

Наименование линий электропередач	Длина km	Передаваемая мощность у потребителя MW	Количество передаваемой энергии тыс. MW	Капиталовложения млн руб.
1 Куйбышев—Москва	850	550	2450	397
2 Куйбышев—Горький	500	225	1000	132
3 Куйбышев—Уфа	450	155	613	68
4 Куйбышев—Урал	700	300	1267	184
5 Куйбышев—Казань	275	180	850	50
6 Куйбышев—Ирригация	175	300	1563	40
7 Куйбышев—Промкомбинат	40	240	1910	25
8 Прочие линии	30—70	640	2327	69
9 Связь между гэс	65	—	—	32
Всего	—	2590	12000	997

Общая проектная стоимость системы электропередач для полного их развития равняется приблизительно одному миллиарду рублей. На 1 kW передаваемой мощности это дает около 400 руб. Средняя стоимость передачи 1 kWh составит 0,8 коп. с колебаниями для различных районов от 0,2 до 1,55 коп.

В проекте предположено, что в 1947 г. Куйбышевская гидростанция будет иметь установленную мощность 2,5 тыс. MW с отдачей около 13,5 млн. MWh. Около 6 млн. MW будут использоваться непосредственно в районе гидростанции на электрооборудование ирригации Заволжья в количестве около 3 млн. MW и столько же на промышленность Куйбышевского района. Остальные 6,0 тыс. MW будут передаваться в Центрально-промышленный, Поволжский, Уральский районы, дефицитные по топливу.

В результате работы Куйбышевской гидростанции на огромные энергетические системы обслуживаемых ею районов они получают от нее до 2700 MW мощности, и, следовательно, эта мощность может быть снята с конденсационных электростанций.

Учитывая мощность на собственные нужды, аварийный резерв и потери, можно считать, что Куйбышевская гидростанция мощностью 2,5 тыс. MW заменит в обслуживаемых ею районах не

менее 3,3 тыс. MW тепловых конденсационных станций.

Капиталовложения в строительство тепловых электростанций такой мощности и в их тепловые базы составят не менее 3,4 млрд. руб., т. е. будут того же порядка, что и капиталовложения в гидроузлы, не считая вложений в электропередачи в сумме около 1 млрд. руб.

Сравнивая два варианта развития энергетического хозяйства рассматриваемых районов: 1) комплекс теплоэлектростанций и конденсационных тепловых электростанций и 2) комплекс теплоэлектростанций Куйбышевской гидростанции с системой электропередач, с минимумом конденсационных электростанций, можно констатировать, что строительство Куйбышевского гидроузла (мощностью в 2,5 тыс. MW) с его системой электропередач потребовало бы капиталовложений около 4—4,5 млрд. руб. против 3,4 млрд. руб. капиталовложений в равноценную мощность электростанций.

Ежегодные расходы по Куйбышевской гэс для выработки 12,5 млн. MWh, отпускаемых потребителю, и по ее линиям электропередач составят 156 млн. руб.

Для замены этих 12,5 MWh тепловые электростанции должны были бы выработать с учетом собственных нужд, увеличения расхода энергии на ирригацию вследствие большей высоты поднятия воды и потерь всего около 14,0 млрд. MWh.

Для этого пришлось бы расходовать ежегодно около 6,4 млн. t условного топлива или около 13,0—16,0 млн. t местного топлива. Годовые издержки производства в этом случае составили бы около 510 млн. руб.

Средневзвешенная стоимость 1 kWh, отпущенного потребителю в варианте тепловых электростанций, выразилась бы в среднем в 4,0 коп. против 1,3 коп. в варианте Куйбышевской гидростанции.

Таким образом участие Куйбышевского гидроузла в развитии энергетического хозяйства рассматриваемых районов вызовет излишек капиталовложений в сумме около одного млрд. руб., но зато будет ежегодно получаться экономия в издержках производства в сумме 350 млн. руб.

Излишек капиталовложений (в том числе и в транспортные сооружения гидроузла) окупится в чрезвычайно короткий срок—3 года, что указывает на весьма высокую эффективность капиталовложений в строительство Куйбышевского гидроузла. Через 3 года после пуска в ход Куйбышевской гидростанции народное хозяйство будет ежегодно иметь экономию в 350 млн. руб. При этом ежегодно будет экономиться свыше 6,4 млн. t условного топлива, страна получит значительный участок единой высоковольтной сети электропередач, что имеет особое народнохозяйственное значение, ирригация Заволжья получит значительно более дешевую энергию, чем сланцевая.

Ирригация Заволжья может быть осуществлена на базе Куйбышевского гидроузла в пределах всей засушливой территории, определенной решениями правительства и партии.

Значение гидроузла для этой проблемы заключается в том, что это отменяет необходимость

возможности снабжать ирригационные насосные установки исключительно дешевой электроэнергией и, во-вторых, в возможности благодаря подпору волжской воды плотиной до отметки +154 м энергетически выгодно осуществлять забор воды на ирригацию.

Забор воды на ирригацию возможен в двух вариантах: либо вода забирается из верхнего бьефа Куйбышевской плотины в среднем с отметки +52 м либо забор осуществляется из нижнего бьефа с отметки в среднем +16 м. При заборе воды верхнего бьефа Куйбышевской плотины средняя высота подъема воды на орошаемую территорию составляет 53 м, а при заборе воды из нижнего — около 78 м.

Вследствие значительной разницы в высоте подъема воды в этих двух вариантах количества энергии, отпускаемой ирригации, и мощность насосных довольно значительно разнятся. При заборе воды из верхнего бьефа количество энергии, отпускаемой с шин гидростанции на ирригацию, составляет для площади орошения 3750 тыс. га около 4700 тыс. MWh, а установленная мощность насосных — 1135 MW.

При заборе воды из нижнего бьефа количество энергии выразится цифрой 6180 тыс. MW и мощность насосных равна 1355 MW.

Таким образом в первом варианте ирригация потребует около 1500 тыс. MWh энергии меньше, чем во втором. Однако следует отметить, что разница эта значительно уменьшается тем, что при заборе воды из нижнего бьефа потребляемая ирригацией вода в количестве 500 м³/сек предварительно проходит через турбины гидростанции и таким образом вырабатывает дополнительное количество энергии в количестве около 850 тыс. MWh. Поэтому разница в потреблении энергии ирригацией в этих двух вариантах забора воды выразится лишь цифрой 650 тыс. MWh. После постройки Камышинской гидростанции и создания подпора в нижнем бьефе Куйбышевской гидростанции эта разница еще больше уменьшится — примерно до 450 тыс. MW.

Столь небольшая разница в потреблении энергии в вариантах забора воды из верхнего или нижнего бьефов Куйбышевской плотины делает их равноценными, так как перерасход в капиталовложениях по насосным станциям и электропередачам при взятии воды из нижнего бьефа будет меньше перерасхода по переводу воды через Волгу и по длинному каналу при взятии воды из верхнего бьефа.

Таким образом экономический эффект забора воды на ирригацию из нижнего бьефа Куйбышевской плотины не меньше эффекта при взятии воды из верхнего бьефа этой плотины; в первом случае — при заборе из нижнего бьефа часть расходуемой на ирригацию энергии восстанавливается в турбинах гидростанции, а во втором случае при заборе из верхнего бьефа благодаря уменьшению высоты наработки насосными станциями несколько большее количество энергии экономится по сравнению со случаем энергоснабжения ирригации без Куйбышевской плотины.

В отношении очередности развития ирригации — сначала на базе Куйбышевского гидроузла, а затем после постройки Камышинского, на базе

обоих гидроузлов приняты следующие положения.

Во время строительства Куйбышевской гидростанции, т. е. примерно в течение 6 лет, раздается относительно мелкое орошение либо местном стоке либо из Волги. Выбор площади для такого орошения производится по соображениям близости их к имеющимся источникам электроэнергии, по возможности допускающим комбинирование ирригационной нагрузки с промышленной. Площади такого орошения по этой причине, главным образом, окажутся поблизости крупных промышленных центров — городов Куйбышева, Саратова, Сталинграда. Общую площадь орошения можно оценить до 500 тыс. га с электропотреблением до 300 тыс. MW и максимальной мощности насосных около 150 MW.

Ко времени пуска первой гидростанции Куйбышевского гидроузла должна быть подготовлена площадь орошения еще около 750 тыс. га.

Электропотребление ирригации возрастает до 1400 тыс. MWh энергии с максимумом мощности насосных около 260 MW с постоянной мощностью около 130 MW.

Дальнейшее развитие площади ирригации будет идти параллельно развитию деривационно Куйбышевской гидростанции и достигнет 2–2,5 млн. га.

К этому сроку, надо полагать, будет построена вторая нижеволжский гидроузел — Камышинский и дальнейшее развитие ирригации будет осуществляться уже на базе обоих гидроузлов.

Транспортный эффект Куйбышевского гидроузла выразится в том, что на участке Волги от Козьмодемьянска до Самарской Луки, протяжением около 700 km, условия водного пути изменятся коренным образом. Здесь создадутся большие глубины от 5 до 10 м, средние скорости течения уменьшатся с 0,5 до 0,05 м/сек в межень и с 0,1 до 0,11 м/сек в паводок, фарватер спрямится на 70 km до Луки и на самой Луке на 130 km, а всего на 200 km.

Эти изменения условий водного пути являются благоприятными, снижающими стоимость водных перевозок. Неблагоприятными последствиями являются некоторое уменьшение времени навигации с 200 до 195 дней и возможные в водохранилище при ветрах волны высотой до 1,5 м и длиной до 10 м, в связи с чем в проекте предусматриваются устройства в водохранилище портов убежищ.

Изменяется и условия водного пути ниже Луки. Вместо обеспеченного навигационного расхода воды в 3800 м³/сек, который здесь будет иметь место при наличии Рыбинского и Пермского водохранилищ, Куйбышевское водохранилище обеспечивает на этом участке расход воды не менее 4500 м³/сек, в связи с чем здесь можно будет при незначительном землечерпании поддерживать глубины 3,5–4,0 м.

Произведенные подсчеты показали, что вследствие сокращения длины транзитного пути и увеличения глубины экономия капиталовложений в флот по сравнению с условиями водного пути при Рыбинском и Пермском водохранилищах и капиталовложений на землечерпательные суда составляет 130 млн. руб.

Единовременные вложения в трассу верхнего бьефа и порты-убежища составят 85 млн. руб. В итоге экономия в единовременных затратах в транспорт Куйбышевской плотины составит 45 млн. руб.

При проектируемом на 1947 г. грузообороте рассматриваемого участка Волги около 70 млн. т и транспортной работе между Рыбинском и Астраханью около 150 млрд. tkm в год ежегодные расходы движения вследствие спрямления водного пути и погашения скоростей Куйбышевской плотинной уменьшатся на 24,6 млн. руб.

Учитывая стоимость шлюзования, потери на сплаве в верхнем бьефе, потери в условиях озерного плавания всего в сумме 4,7 млн. руб., экономия в расходах движения в год будет равна 20 млн. руб.

Кроме того по водному пути будет ежегодная экономия по землечерпанию в сумме около 3,5 млн. руб. и перерасход по содержанию пути в водохранилище 2,4 млн. руб.

Общая экономия в издержках производства в год составит 21 млн. руб.

Принимая срок окупаемости в 30 лет, получим размер возможных вложений в транспортные сооружения $21 \times 30 = 630$ млн. руб. плюс единовременная экономия в 130 млн. руб.

Таким образом общий допустимый размер затрат в транспортные сооружения против условий пути при Рыбинском и Пермском водохранилищах получается равным 760 млн. руб.

Предположенные по проекту затраты в водный путь составят 85 млн. руб. и в сооружения гидроузла 380 млн. руб., а всего 465 млн. руб.

Таким образом транспортная эффективность Куйбышевского гидроузла несомненна.

Подводя итоги народнохозяйственной эффективности Куйбышевского гидроузла, можно констатировать, что наиболее значителен он в энергетическом отношении. Выгоды, которые получает народное хозяйство вследствие возможности при Куйбышевском гидроузле снизить расходы на тепловое энергетическое хозяйство, настолько велики (экономия в ежегодных расходах в 350 млн. руб. в год), что все сооружения гидроузла как энергетические, так и транспортные и ирригационные могут быть отнесены на энергетику. Таким образом для ирригации и транспорта сооружения гидроузла являются бесплатными. Однако и в ирригационном и в транспортном отношениях эффект соответствующих сооружений настолько велик, что они сами оправдывают себя, и тем самым еще более усиливают основной энергетический эффект гидроузла.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Проблемы теории электромагнитного поля в электротехнике в прошлом и настоящем

PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC FIELD THEORY IN THE PAST AND AT PRESENT

И. А. Черданцев

Энергетический институт Академии наук СССР

В НАСТОЯЩЕЙ статье я ставлю себе задачей в кратких чертах познакомить читателя с современным положением вопроса о точных методах расчетов электромагнитных полей электрических машин, трансформаторов, аппаратов; линий передач и пр.

Основой для таких расчетов является несколько модернизированная теория Maxwell, которую можно математически сформулировать в девяти уравнениях: первом и втором уравнениях Maxwell, уравнениях Laplace — Poisson для электрического и скалярного магнитного потенциалов, интегрального определения потенциала из закона Coulomb и четырех условий на границе двух сред для напряженностей электрического и магнитного полей.

Как известно читателю, для расчетов

атомных эти уравнения непригодны, в этом смысле теорию поля, о которой здесь идет речь, можно назвать «макроскопической».

1. Метод изображений. Вопросами теории электрического и электромагнитного поля физики занимались с самого начала XIX в.; для электротехники, кроме общих теоретических задач, решенных за первую половину XIX в. и вошедших большей частью в содержание физики, важен метод электрических изображений, данный W. Thomson как раз на рубеже двух половин столетия, в 1848 г.; позднее P. F. C. Searle (1896—1898) и другие распространили этот метод и на магнитные поля токов. В этом случае метод с удобством применяется и имеет практическое значение главным образом при плоскопараллельных полях, т. е. при прямолинейных токах. Searle то-

гда между прочим доказал, что в зубчатом якоре механическая сила, приложенная к тонкому проводнику, составляет $\frac{2}{\mu}$ от всей силы, действующей на якорь, и что $\left(1 - \frac{2}{\mu}\right)$ этой силы приложено к железу якоря (где μ — магнитная проницаемость железа якоря).

Эта идея прививалась среди электротехников медленно, и еще в 1925 г. инж. Fleischmann должен был на опыте показывать, что большая часть силы приложена к железу якоря, а не к самим проводникам.

Таким образом первые приложения методов теории поля к расчетам электрических машин были сделаны уже сорок лет назад.

Нужно заметить, что применение метода изображений не было обосновано с самого начала какими-нибудь общими принципами, каждую отдельную задачу приходилось решать заново; в самое последнее время инж. Э. А. Меерович в своей работе «Применение метода изображений к расчету электрического и магнитного поля» («Известия Энергетического института Академии наук», в дальнейшем обозначенные сокращенно — «Известия ЭНИИ», т. IV, вып. 1, 1936) дал общие соображения о том, как вообще должна находиться так называемая «характеристическая функция поля», из которой легко вычисляется напряженность поля, причем показал, что здесь, повидимому, впервые в технике, могут быть прекрасно использованы многолистные поверхности Riemann, и решил несколько трудных еще нерешенных и иным методом вряд ли поддающихся решению задач. Таким образом весьма как будто отвлеченные построения математики находят в конце концов себе техническое применение.

II. Метод конформных преобразований плоскостных полей. Этот метод имеет весьма большое значение для техники. Началось применение метода конформных преобразований поля¹ к вопросам электромагнитного поля с решения некоторых электростатических задач. Повидимому, первым по времени был здесь Н. Helmholtz, который еще в 1868 г. в статье, посвященной гидродинамике, намечает решение вопроса о поле плоского конденсатора, состоящего из двухконечной ширины и бесконечной длины (отчего поле и можно рассматривать, как плоскопараллельное) проводящих полос, однако не доводит решения до конца, полагая, что оно будет чрезвычайно сложно. Однако много позднее, в 1893 г., I. I. Thomson показал, что функция Jacobi

$$\frac{E}{K^2}$$

преобразует однородное поле z идеального плоского конденсатора в поле двух полос конечной ширины и тем весьма просто решил вопрос, просто потому, что он шел обратным путем: исследовал

додал определенные функции и при одной из них нашел преобразование в упомянутое поле; при этом же отыскания функции, которая преобразует заданное поле в поле идеального плоского конденсатора, — много сложнее; примером может служить прекрасная работа Л. И. Балабухи² «Математический расчет некоторых полей электростатики», который, не зная о работе I. I. Thomson, шел именно обычным путем отыскания функции.

Н. Helmholtz затем в 1868 г. решил задачу о поле около краев пластин конденсатора, не учитывая ширины пластин. Эту же задачу решил и Р. Kirchhoff в 1878 г., I. I. Thomson в своей книге «Recent researches in Electricity and Magnetism», 1893 г., решает целый ряд задач по определению электростатических полей при различных расположениях пластин.

Этим и ограничились до 1900 г. попытки применить метод конформных преобразований для практических расчетов.

В электрических машинах значительная по сравнению с другими размерами длина якоря позволяет приближенно (пока мы не имеем других путей к решению задачи) рассматривать его поле в воздухе, как плоскопараллельное; при этом мы не учитываем теоретически, что у концов якоря поле искажается, практически это легко учесть путем экспериментов. Во всяком случае такой подход к задаче позволяет рассчитывать поле в главной, доминирующей, его части.

Чрезвычайно стройный, развитый и удобный математический аппарат теории функций комплексного переменного делал метод конформных преобразований самым подходящим орудием для исследования плоскопараллельных лапласовых полей.

Первым, кто усмотрел и оценил оба только что отмеченные обстоятельства в их совокупности, был инж. F. W. Carter, который в первой своей работе в 1900 г. «Note on air gap interpolar induction» исследует поле под краем полюса машины постоянного тока методом конформных преобразований. Эту работу следует считать началом работ инженеров над задачами подобного рода. Однако надо заметить, что, как это часто бывает в науке, эта первая попытка практического интереса не представляет, потому что Carter якорь берет гладким, а полюс в виде прямоугольника, без всякого полюсного наконечника. В позднейших работах он продолжал разрабатывать эту тему, пока, наконец, в большой статье³ под названием «The magnetic field of the dynamoelectric machine» не дал богатую сводку своих исследований по этому вопросу; здесь рассматриваются и зубчатый якорь и его пазы и различные формы полюсных наконечников. Для исследования последних он употребляет остроумный метод, заключающийся в подыскании при простой геометрической форме наконечника эквипотенциальной поверхности, подходящей к поверхности данного наконечника.

¹ Читатель, незнакомый с методом конформных преобразований, может получить о нем начальное представление из моей статьи в ж. «Электричество» № 6—7, 1933 «Основные принципы конформных преобразований, и их применения в электротехнике» или из моей книги «Введение в теоретическую электротехнику».

² Теоретическая и экспериментальная электротехника № 1—2, 1932.

³ Journal of the Institution of Electrical Engineers, vol. 64, 1926.

Следующим шагом вперед здесь была работа Сое и Н. Taylor, которые точно решают ряд вопросов, например, учитывают потери от токов в поперечном направлении при зубчатом якоре и пр. и дают результаты в виде удобных таблиц и кривых.

Поле в пазу, разумеется, при этом определяется вполне.

Я не называю здесь работ и фамилий еще нескольких исследователей, которые за это время трудились над вопросами поля при зубчатом якоре; в другом месте я предполагаю дать подробный обзор всех работ по теории поля.

Метод изображений в применении к полям электрических машин употребляется также при решении большинства задач по методу конформного преобразования, ибо, отражая изгиб и зубец в поверхности полюса, которая решенных пока задачах принимается за плоскость, мы получаем симметричное относительно плоскости на чертеже этой плоскости расположение контура поля, что облегчает построение отображающей функции.

По большей части последняя выражается эллиптическими интегралами, причем появляется и незнакомый почему-то редко встречающимся интеграл третьего рода; исследование ведется обычно в эллиптических функциях Jacobi, которые весьма удобны для всевозможных преобразований. Работа инж. К. Frey «Anwendungen der konformen Abbildung auf praktische Probleme des Elektromaschinenbaues», 1925 (Arbeiten aus dem Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule zu Karlsruhe. B. IV, 1920—1924), который пользуется в своем исследовании поля под прямоугольным полюсом и в пазу якоря эллиптическими функциями Weiterstrass, страдает необыкновенной длиннотой выкладок; попытки найти другие более короткие пути решения при пользовании этими функциями не привели к положительным результатам.

Кажется, что этот пример можно рассмотреть как показательный и можно советовать инженеру-электрику пытаться начинать решение сложных задач, требующих эллиптических функций, применением функций Jacobi.

Метод изображений в чистом виде без конформных преобразований в применении к полю электрических машин нашел себе приложение в работах В. Hague, перенесшего решения ряда электростатических задач на задачи магнитного поля машин. Эти исследования в главных чертах изложены в прекрасной, хотя и трактующей только те задачи, которые решаются в элементарных функциях, книге Hague «Electromagnetic problems in Electrical Engineering, переведенной на русский язык под редакцией проф. Я. Н. Ильиной под названием «Электромагнитные задачи» (ОНТИ, 1934).

Несомненно, что расчеты как самого поля в машинах, так и механических сил, испытываемых различными частями машин, сильно уточнены в работах Hague и других авторов; принята во внимание конечная величина магнитной проницаемости железа и пр.; может быть, например,

статора и катушкой ротора и т. д. с большей, чем прежде, точностью. Недаром Hague уже ставит задачу построения полной теории электрических машин с точки зрения уточнения всех соотношений посредством методов теории поля.

Следует упомянуть, что расчеты магнитных полей в приборах и аппаратах описанными методами тоже уже находят себе применение; по этим вопросам имеется несколько обстоятельных работ, из которых назовем, например, работу⁴ Н. Buchholz «Die magnetische Leitfähigkeit eines unregelmässig gestalteten Luftzwischenraumes bei parallelen Feld». Такие исследования имеют громадное значение для расчетов, например, реле и пр.

Параллельно с решением задач по расчету сложных магнитных полей шло исследование электростатических полей, которое после Kirchhoff возобновлено было W. Rogowski в 1923 г. в работе⁵ «Die elektrische Festigkeit am Rande des Plattenkondensators» и продолжено Dreyfus, Andronescu и многими другими авторами. Большинство авторов рассматривают вопросы определения градиента потенциала электрического поля с точки зрения техники высоких напряжений и трансформаторостроения.

I. Labus своеобразно решил задачу в том случае, когда электрическое поле заключено между границами, на которых имеются не два, а больше различных потенциалов. Принципиальных трудностей для решения и раньше не было, — решение всегда было возможно с помощью так называемого интеграла Poisson, но Labus введением в поле идеального плоского конденсатора промежуточных пластин сделал возможным несколько упростить задачи конформного преобразования заданного поля с тремя или четырьмя потенциалами. Попытку применить наклонную плоскость в этом поле для конформного преобразования поля с потенциалом, непрерывно меняющимся вдоль части контура (учет падения потенциала вдоль обмотки высокого напряжения в трансформаторе), Labus до конца не довел. Эта задача проще решается применением интеграла Poisson, что в самые последние дни сделал инж. Г. С. Аронзон.

Часто инженеру надо иметь хоть какое-нибудь обоснование для приближенного расчета практического случая; из этой потребности вытекают случаи распространения формул, выведенных, например: для плоскопараллельного поля на случаи полей плоскомеридианных, иногда с нужными оговорками, а иногда и без всяких оговорок (Loebner в работе о кабельных муфтах и концах).

Я не могу по ограниченности места продолжать здесь список довольно длинного ряда случаев электрических полей, которые рассчитаны за последнее время методом конформных преобразований.

Весь этот материал полезен не только для техники высоких напряжений, но и для радиотехники, для измерений с высоким напряжением и даже для чисто физических исследований (например, конденсаторы в виде четырех прямых

двугранных углов, из которых два любые соседние друг другу держатся при потенциале, равном нулю, а другие два под потенциалами $\pm U_1$, — работа W . Göhre, — такое поле нужно для исследования движения электрона).

Все до сих пор сказанное относилось к полям плоскопараллельным, но в электротехнике есть задачи, где поле ни в какой своей части не является плоскопараллельным; потенциал такого поля зависит от всех трех координат.

Из этих полей выделяется группа полей плоскомеридианных, играющая сравнительно небольшую роль, ибо трудно создать такое поле, например, поле ввода высокого напряжения было бы плоскомеридианным, если бы провод высокого напряжения удалить из соседства с двумя другими и от земли. Точный расчет в этих случаях требует отказа от условия осевой симметрии поля. Впрочем, она, конечно, допускается все же и даже часто в расчеты для упрощения решения задачи.

Все такие задачи, как и задачи на поля, зависящие вообще как-то от всех трех координат, приходится решать интегрированием уравнения Laplace с наложением заданных условий на границах поля, т. е. на проводниках и на бесконечности.

Как на пример, можно указать на недавно исполненную работу инж. А. И. Даревского «Электрические поля сеток» («Известия ЭНИН», 1937, печатается), где автор решил считавшуюся весьма трудной задачу определения поля заряженной винтовой линии. Известный немецкий физик V. Laue в 1919 г. писал даже, что мы не можем и думать выразить потенциал такого поля.

А. И. Даревский, учитывая двоякую периодичность поля, решил задачу применением двойного ряда Фурье.

Работы по полям сеток важны для находящихся уже себе обширное применение электронных и ионных приборов, — этих по истине — приборов будущего!..

III. Поля постоянного во времени вектор-потенциала. Развитие техники, увеличение мощностей машин, усложнение коммутационных устройств и необходимость уточнить методы расчетов их заставили учитывать то, что проводники в действительности не линейны, а обладают поперечным сечением, и часто весьма солидным, и что от формы этого сечения зависит само поле или его вектор-потенциал A .

Работы Roth по расчету полей рассеяния в трансформаторах и машинах сочетают в себе применение, во-первых, метода изображений, ибо катушки обмоток отражаются в верхнем и нижнем ярме трансформатора, и, во-вторых, метода интегрирования уравнения вектор-потенциала плоскопараллельного поля типа уравнения Laplace для поля вне катушек и уравнения Poisson для поля внутри последних, т. е. вида

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} &= 0 \\ &\} \end{aligned} \right\}.$$

Roth является здесь оригинальным продолжателем работы, которую начал Rogowski своей теорией рассеяния в трансформаторах. В дальнейшем Roth расчленяет A на два составляющих.

в обмотках в отсутствие железа, а другая — только железным сердечником.

По важному вопросу о рассеянии в трансформаторе совершенно новую точку зрения, объединяющую и невозможность в способе Roth и других разделить первичное и вторичное рассеяние высказал Э. А. Меерович в своей работе «К вопросу об электромагнитном рассеянии в трансформаторах».

IV. Поля с переменным по времени вектор-потенциалом. Хотя в предыдущих случаях с точки зрения техники речь шла, конечно, по большей части о полях переменного тока, но, приняв вектор-потенциал постоянным по времени, мы тем самым свели все вопросы на поле постоянного. Однако все тот же рост мощности машин и трансформаторов, рост поперечных сечений проводов заставляет учитывать переменность поля во времени, ибо она ведет к чрезвычайно важному последствию — к появлению в массивах проводников (и железа) вихревых токов. Таким образом уравнением поля будет

$$\nabla^2 A + \mu \delta = 0,$$

где A и δ зависят от времени. Предположив синусоидальную зависимость от времени, будем иметь из второго уравнения Maxwell

$$\text{rot } \delta = -i\omega \gamma B,$$

откуда

$$\delta = -i\omega \gamma A.$$

При этом мы пренебрегаем токами смещения, что вполне допустимо до частоты в миллион герц. Уравнение поля приобретает вид

$$\nabla^2 A + k^2 A = 0$$

$$(k^2 = -i\omega \gamma \mu).$$

Техническими вопросами, сводящимися к решению этого дифференциального уравнения, называемого иногда волновым, иногда уравнением Poissels, являются вопросы расчетов: 1) неравномерной плотности тока, в частности так называемого скин-эффекта в уединенных проводниках, 2) электромагнитного экранирования и 3) вообщее влияния на источник переменного электромагнитного поля и на самое поле различных проводящих тел, находящихся в этом поле. Как видим, последняя задача является задачей весьма общего типа по своей формулировке.

Определение скин-эффекта произведено с достаточной строгостью только для цилиндрических, круглого сечения, проводников, сплошных и пустотелых, из одного металла и биметаллических.

Этой задачей занималось много исследователей начиная с W. Thomson. По вопросу об электромагнитном экранировании до последнего времени ограничивались расчетами для экранов плоских, цилиндрических и сферических бесконечно тонких. Это не было, конечно, решением вопроса, ибо, во-первых, в электротехнике нужны экраны для защиты и от весьма мощных полей, например, экраны для реакторов, во-вторых, нужны экраны биметаллические, рассчитать

рые по теории бесконечно тонких экранов, размещается, нельзя.

Только Buchholtz решил задачу для пустотелого круглого цилиндра со стенками произвольной длины, но для частного случая — однородного внешнего поля.

Работами Л. А. Жекулина «Многослойные электромагнитные экраны»¹ (плоские и цилиндрические), «Многослойные сферические экраны»² «Токи Фуко в плоских экранах» (печатается) положена основа для теории многослойных экранов конечной толщины.

В. А. Судаков в работе своей «Реакция сферического экрана на источник поля» на основе теории Л. А. Жекулина строит расчет изменения активного и реактивного сопротивления катушки переменным током под действием экрана и выводит ряд интересных следствий из теории.

Эта трудная для исследования, но богатая важными для практики следствиями область теории поля в сущности только еще начинает разрабатываться, хотя литература по ней и насчитывает несколько десятков работ, но все эти работы произведены для экранов, заранее принятых бесконечно тонкими.

Все эти задачи сводятся к интегрированию уравнения Pockels методом Фурье при помощи

специальных функций, т. е. функций цилиндрических, сферических, функций Lamé и Mathieu.

Вышеизложенное должно убедить читателя, что в мировой журнальной литературе имеются уже решения целого ряда задач по расчету полей электрических машин, трансформаторов, аппаратов, конденсаторов и пр., решения, уточняющие и облегчающие расчеты весьма уже сложных случаев.

Надо их применять! — Вот вывод, который надо отсюда сделать, а применяя, придется эти решения и задачи видоизменять, приспособляя к повседневной практике расчетов или к новым особым случаям. Что мешает этому? Думается, что только та внешняя математическая форма, в которую по необходимости выливаются решения задач по теории поля: конформные преобразования, функции комплексного переменного, функции эллиптические, сферические, цилиндрические. Но это есть орудия для математического исследования физико-технических вопросов, орудия, — без которых современному инженеру-расчетчику и исследователю не обойтись, — следовательно, надо ими овладеть! Иначе — богатая литература остается неиспользованной, целый ряд вопросов рассчитывается грубо приближенными кустарными способами, каждый раз сызнова, без представления об ошибке, которая делается при таком способе.

¹ «Известия ЭНИН», т. III, вып. 1—2.

² «Известия ЭНИН», т. IV, вып. 1.

Погрешности при измерении высокого напряжения с помощью конденсаторной втулки

ERRORS TAKING PLACE AT HIGH VOLTAGE MEASUREMENTS BY MEANS OF CONDENSER BUSHING

А. А. Акопян

МЭИ, Лаборатория высокого напряжения

КАК известно, в основе измерения высокого напряжения с помощью конденсаторного бушинга лежит принцип использования бушинга в качестве емкостного делителя напряжения. Для этой цели в бушинге от одной из обкладок, измерительной, устраивается вывод наружу и между этим выводом и заземленным фланцем включается измерительное устройство. Схемы такого устройства в выполнении различных фирм представлены на рис. 1.

Анализ схемы. Формула Keinath¹, дающая связь между измеряемым напряжением и напряжением на измерительном приборе, не учитывает влияния диэлектрических потерь в бушинге и тока холостого хода трансформатора на погрешности измерений. Между тем, как это будет видно из дальнейшего анализа и экспериментального материала, диэлектрические потери в бушинге могут оказать существенное влияние на погрешности измерения. Этот фактор заметно сказывается особенно в тех случаях, когда емкости между высоковольтным стержнем бушинга и измерительной обкладкой C_1 и между измерительной обкладкой и землей C_2 имеют различные углы диэлектрических потерь δ_1 и δ_2 , что собственно и имеет место в большинстве случаев в дей-

ствительности. Если даже углы δ_1 и δ_2 в новом бушинге и бывают одинаковыми, то в процессе эксплуатации под влиянием сырости и вследствие других причин угол δ_2 значительно изменяется.

Целью настоящей статьи и является выяснение влияния углов диэлектрических потерь δ_1 и δ_2 на погрешности измерений.

На рис. 2 представлена эквивалентная схема системы втулка — измерительное устройство.

На этой схеме:

r_1 и r_2 — активные сопротивления, обусловленные диэлектрическими потерями, соответственно на участках стержень — измерительная обкладка и обкладка — фланец, а

C_1 и C_2 — известные уже нам емкости этих участков

$$Z' = r_1 + \frac{1}{j\omega C_1};$$

$$Z'' = r_2 + \frac{1}{j\omega C_2};$$

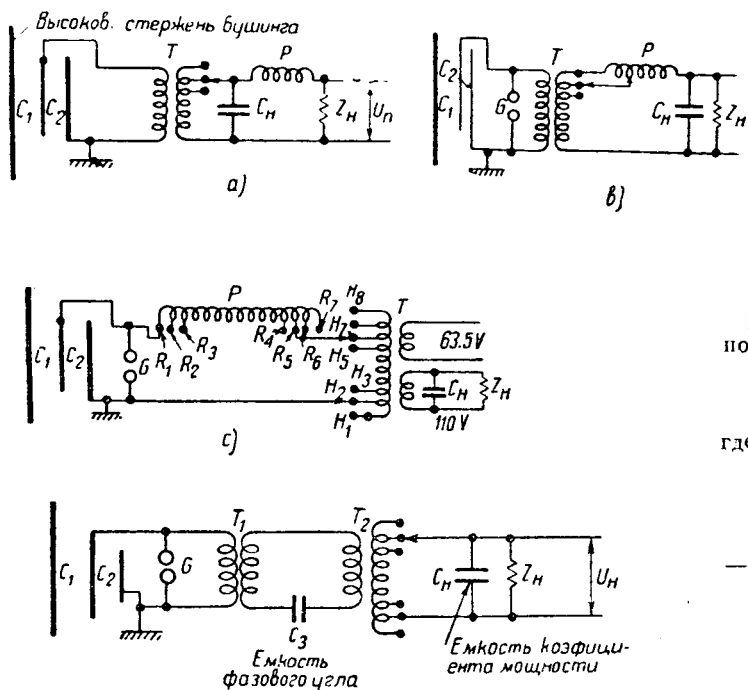


Рис. 1. Схема измерителей напряжения при помощи бусинги различных заводов. а — Westinghouse; б — GEC, тип КА-2; в — „Электроаппарат“, тип ПИН-100 (подобен типу КА-1 GEC); д — GEC (новейшая схема)

$Z_1 = R_1 + jx_1$ — первичной обмотки трансформатора;
 $Z_2 = R_2 + jx_2$ — вторичной обмотки;
 $Z_H = R_H + jx_H$ — приборов (нагрузки);
 $Y_0 = a_0 - jb_0$ — проводимость трансформатора;

где

$$a_0 = \frac{R_0}{R_0^2 + x_0^2}$$

$$b_0 = \frac{x_0}{R_0^2 + x_0^2};$$

U — измеряемое высокое напряжение;
 U_1 и U_2 — напряжения на емкостях C_1 и C_2 ;
 U_H — напряжение на вторичных клеммах трансформатора (на приборах), приведенное к первичной обмотке;
 φ_0 — угол между векторами напряжений U и U_H — погрешность в угле.

Согласно схеме рис. 2 легко показать, что напряжение на вторичных клеммах трансформатора

$$\dot{U}_H = \frac{\dot{U} Z_{eff}}{(Z_{eff} + Z_2) \left(1 + \frac{Z'}{Z''}\right) + \left[(Z_{eff} + Z_2) Y_0 + 1\right] \left[\left(1 + \frac{Z'}{Z''}\right) (Z_p + Z_1) + Z'\right]} \quad (1)$$

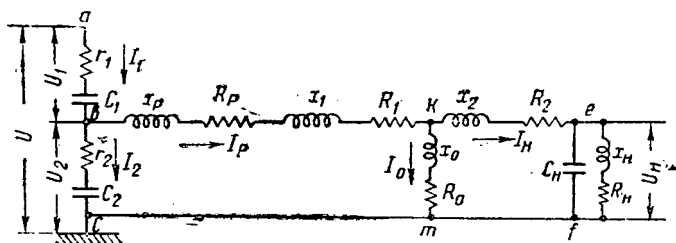


Рис. 2. Эквивалентная схема системы втулка — измерительное устройство

* Все параметры вторичной цепи трансформатора и на-
 борки измерительного устройства

Для компенсации индуктивной нагрузки необходимо подобрать величину емкости C_H такой, чтобы реактивная составляющая тока нагрузки равнялась нулю:

$$\omega C_H = \frac{x_H}{x_H^2 + R_H}$$

Для этого случая:

$$Z_{eff} = \frac{R_H^2 + x_H^2}{R_H} = R'_H$$

После подстановки в выражение (1) значений импедансов получим:

$$\dot{U}_H = \frac{\dot{U} R'_H}{M + jN}, \quad (2)$$

где

$$M = \left(1 + a \frac{C_2}{C_1}\right) (R'_2 + AR_k + Bx_k) -$$

$$- a \frac{C_2}{C_1} (x_2 + Ax_k - BR_k) \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2) + \frac{1}{\omega C_1} (B + A \operatorname{tg} \delta_1);$$

$$N = \left(1 + a \frac{C_2}{C_1}\right) (x_2 + Ax_k - BR_k) +$$

$$+ a \frac{C_2}{C_1} (R'_2 + AR_k + Bx_k) \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2) - \frac{1}{\omega C_1} (A + B \operatorname{tg} \delta_1);$$

$$a = \frac{1 + \operatorname{tg} \delta_1 \operatorname{tg} \delta_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2};$$

$$R'_2 = R'_H + R_2;$$

$$A = (R'_H + R_2) a_0 + x_2 b_0 + 1;$$

$$R_k = R_p + R_1;$$

$$B = (R'_H + R_2) b_0 - x_2 a_0;$$

$$x_k = x_p + x_1.$$

С достаточной степенью точности можно считать, что $a = 1$, а напряжение на вторичной стороне трансформатора $U'_H = \frac{U_H}{k_0}$, где k_0 — отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной.

Следовательно, напряжение на вторичной стороне трансформатора

$$U'_H = U \frac{R'_H}{k_0 \sqrt{M^2 + N^2}}; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = -\frac{N}{M}. \quad (4)$$

Коэффициент трансформации всей схемы:

$$k_g = \frac{U}{U'_H} = k_0 \frac{\sqrt{M^2 + N^2}}{R'_H}. \quad (5)$$

Рассмотрим влияние отдельных параметров на величину k_g и $\operatorname{tg} \varphi_0$. Для простоты пренебрежем активной и реактивной проводимостью трансформатора,

$y_0 = 0$, тогда $A = 1$ и $B = 0$.

* Следует указать, что трансформаторы для этих измерительных устройств выполняются с возможно малым током холостого хода, вследствие чего пренебрежение величинами a_0 и b_0 при нагрузках мало повлияет на результаты подсчетов. Для случая же холостого хода ими пренебре-

овательно,

$$U'_n = U \frac{R'_n}{k_0 \sqrt{\left[\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) R - \frac{C_2}{C_1} x \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2) + \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{\omega C_1} \right]^2 + \left[\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) x - \frac{1}{\omega G_1} + \frac{C_2}{C_1} R \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2) \right]^2}}; \quad (6)$$

$$\% \varphi_0 = - \frac{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) x - \frac{1}{\omega C_1} + \frac{C_2}{C_1} R \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2)}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) R + \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{\omega C_1} - x \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2)}. \quad (7)$$

внениях (6) и (7)

$$R = R'_n + R_2 + R_1 + R_p$$

$$x = x_2 + x_1 + x_p.$$

и пренебречь влиянием потерь в бушинге

$$r_1 = r_2 = 0,$$

внение (6) даст известную формулу Keinath —

$$U \frac{R'_n}{k_0 \sqrt{R^2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)^2 + \left[x \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) - \frac{1}{\omega C_1} \right]^2}}; \quad (6a)$$

того случая

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = - \frac{\left(1 + \frac{C_2}{G_1}\right) x - \frac{1}{\omega C_1}}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) R}. \quad (7a)$$

чно при расчетах описываемого измерительного устройства пользуются формулами (6a) и (7a).

в этом выбирая x из условия

$$\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) x = \frac{1}{\omega C_1}. \quad (8)$$

аем, что $\operatorname{tg} \varphi_0 = 0$ и не зависит от нагрузки. При учете потерь в бушинге в случае такого подбора реактив-

ности цепи имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = - \frac{R \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2)}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) R + \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{\omega C_1} - x \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2)}.$$

Иначе говоря, погрешность в угле определяется в основном углами диэлектрических потерь δ_1 и δ_2 и лишь в частном случае, когда $\delta_1 = \delta_2$, $\operatorname{tg} \varphi_0 = 0$. Таким образом, чтобы погрешность в угле свести к минимуму и сделать ее почти независимой от нагрузки, необходимо, помимо подбора величины и реактивности цепи из вышеприведенного условия (8), обеспечить равенство углов диэлектрических потерь: $\delta_1 = \delta_2$. Если же эти углы не равны между собой, то для доведения до минимума угловой погрешности необходимо соблюсти условие

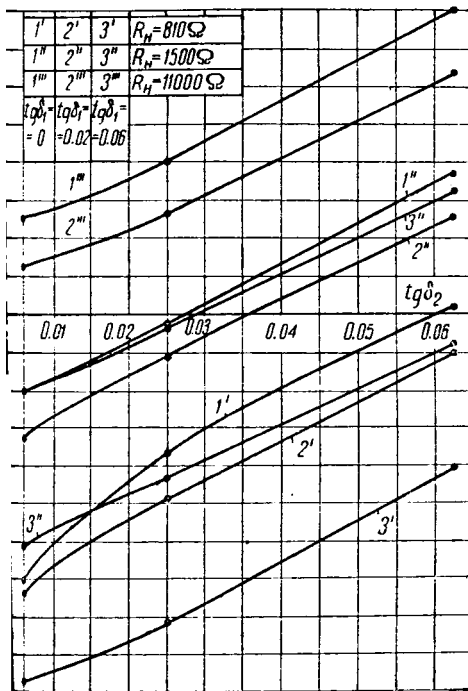
$$\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) x - \frac{1}{\omega C_1} + R \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2) = 0 \quad (9)$$

для номинальной нагрузки. Для всякой другой нагрузки погрешность в угле тогда будет определяться разностью между активным сопротивлением, обусловленным номинальной нагрузкой, и активным сопротивлением, соответствующим этой нагрузке. Вообще говоря, как видно из приведенных выше формул, влияния δ_1 и δ_2 на погрешности в угле взаимно противоположны: угол δ_1 обуславливает поворот вектора U'_n по часовой стрелке (погрешность в угле отрицательна), а δ_2 , наоборот, — против стрелки часов.

Из выражения (6) видно, что δ_1 и δ_2 оказывают также взаимно противоположный эффект на коэффициент трансформации: при равенстве углов диэлектрических потерь влияние их становится наименьшим, и в этом случае оно определяется углом δ_1 (слагаемым $\frac{\operatorname{tg} \delta_1}{\omega C_1}$). Следовательно, для уменьшения степени влияния нагрузки и высших гармонических на коэффициент трансформации желательно, помимо соблюдения вышеприведенного условия (8) или (9), иметь возможно малое абсолютное значение угла δ_1 .

Таким образом мы видим, что при неблагоприятных условиях, т. е. когда углы δ_1 и δ_2 отличаются друг от друга, нельзя пренебречь влиянием диэлектрических потерь в бушинге на результаты измерений. К этому нас приводит также экспериментальное исследование устройства ПИН-100.

Экспериментальное исследование⁴. Кривые рис. 3 и 4 достаточно ясно показывают влияние диэлектрических потерь на погрешности в угле. При постоянном $\operatorname{tg} \delta_1$ колебание погрешности в угле составляет около 4° при измене-



Погрешность в угле φ_0 в зависимости от $\operatorname{tg} \delta_2$ ($U = 63,5$ kV; $f = 50$ Hz)

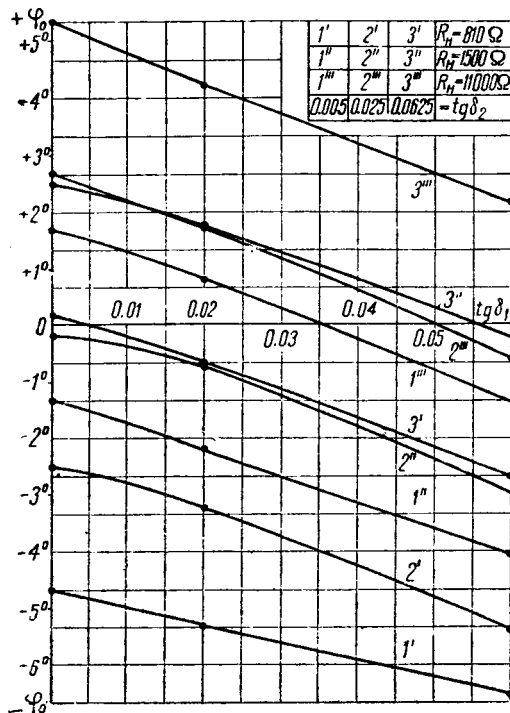


Рис. 4. Погрешность в угле φ_0 в зависимости от $\operatorname{tg} \delta_1$ ($U = 63,5$ kV; $f = 50$ Hz)

⁴ В экспериментах и в обработке экспериментального материала принимал участие Н. П. Булавенко.

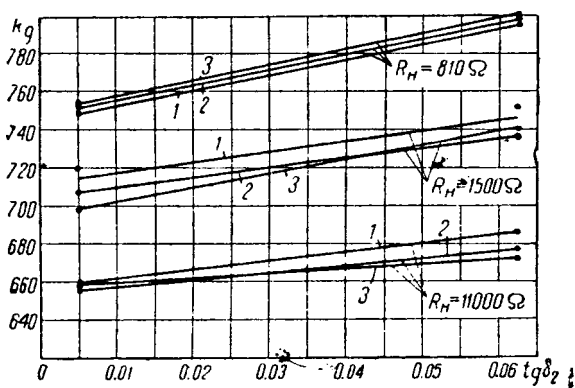


Рис. 5. $k_g = f(\text{tg } \delta_2)$. Кривые 1, 2 и 3 соответственно для $\text{tg } \delta_1$, равного 0; 0,02 и 0,06 ($U = 63,5 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$)

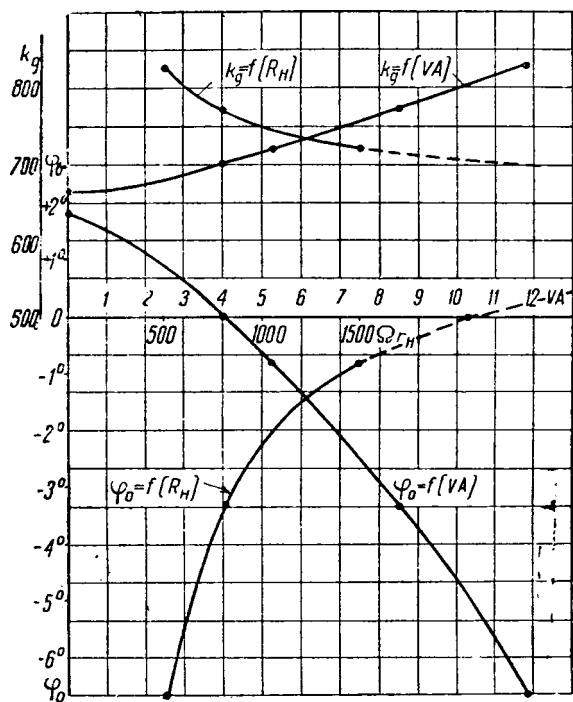


Рис. 6. Коэффициент трансформации k_g и погрешность в угле φ_0 в зависимости от нагрузки ($U = 63,5 \text{ kV}$; $\text{tg } \delta_1 = 0,02$; $\text{tg } \delta_2 = 0,025$; $f = 50 \text{ Hz}$)

нии $\text{tg } \delta_2$ в пределах 0,005—0,0625. По мере увеличения $\text{tg } \delta_2$ вектор U'_H вращается в направлении опережения вектора U и погрешность в угле возрастет по положительным значениям. При больших значениях $\text{tg } \delta_1$ кривая $\varphi_0 = f(\text{tg } \delta_2)$ смещается вниз, преобладают отрицательные ошибки. С увеличением нагрузки (R'_H уменьшается) погрешности возрастают в направлении отрицательного знака (вектор U'_H поворачивается по часовой стрелке). Эффект $\text{tg } \delta_1$ на погрешность в угле противоположен влиянию $\text{tg } \delta_2$. Абсолютная величина погрешности в угле достигает $6-7^\circ$.

Она тем больше, чем больше разность $\delta_1 - \delta_2$.

На рис. 5 приведены кривые зависимости коэффициента трансформации всего устройства от $\text{tg } \delta_2$.

Таким образом результаты эксперимента находятся в полном соответствии со сделанными ранее выводами на основе теоретического анализа.

Влияние нагрузки на погрешности иллюстрируются кривыми рис. 6 и 7. Из этих кривых видно, что с увеличением нагрузки коэффициент трансформации возрастает. Погреш-

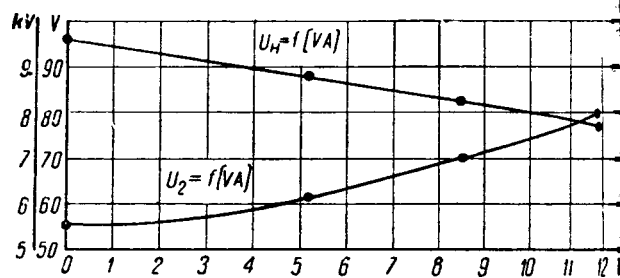


Рис. 7. Напряжение на измерительной обкладке U_2 и на первичной обмотке U_1 в зависимости от нагрузки при $\text{tg } \delta_1 = 0,02$; $\text{tg } \delta_2 = 0,025$ ($U = 63,5 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$)

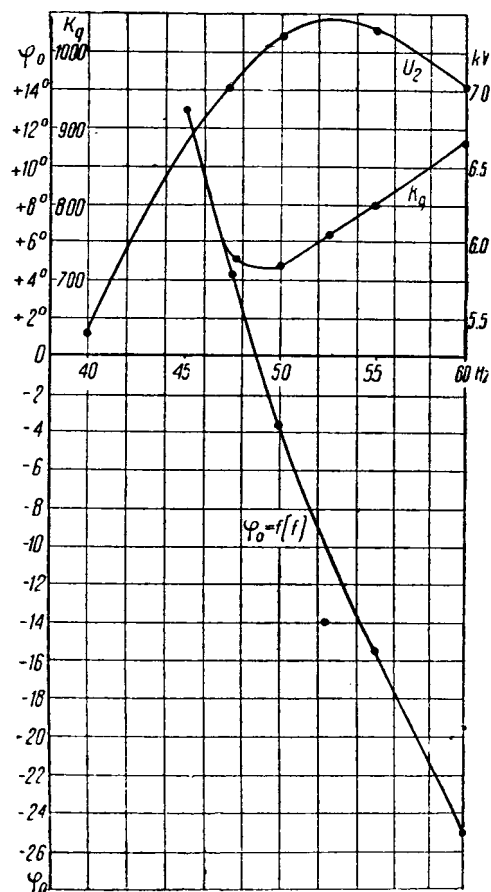


Рис. 8. Напряжение на измерительной обкладке U_2 , коэффициент трансформации k_g и погрешность в угле φ_0 в зависимости от частоты ($U = 63,5 \text{ kV}$; $R_H = 810 \Omega$; $\text{tg } \delta_1 = 0,02$ и $\text{tg } \delta_2 = 0,025$)

ность в угле при холостом ходе составляет около 14° . В дальнейшем, с увеличением нагрузки она сперва обращаясь при нагрузке 4 VA в нуль, а потом снова становится по отрицательным значениям. Напряжение U_2 на измерительной обкладке и фланцем возрастает с увеличением нагрузки от 5,5 kV при холостом ходе до 8 kV при нагрузке в 12 VA.

Как сказывается частота на погрешность в угле, коэффициент трансформации и напряжение U_2 иллюстрирует рис. 8. Как видно из рисунка, вторичное напряжение достигает максимума при $f = 48 \text{ Hz}$; при этой же частоте φ_0 имеет минимум. Частота оказывает значительное влияние на погрешности измерений, в особенности на погрешность в угле.

Два века русской электротехнической мысли

TWO HUNDRED YEARS OF RUSSIAN ELECTROTECHNICAL SCIENCE

Б. Г. Кузнецов

Институт истории науки и техники
Академии наук СССР

I

В СКОРЕ после того, как г. профессор, отстоя на фут от железного прута, смотрел на учителя электрического, увидел помянутой Соко- в, что из прута, без всякого прикосновения, шел бледно-синеватый огненный клуб, с кулак личиною, шел прямо ко лбу г. профессора, ко- рый в самое то время, не издав ни малого го- су, упал назад на стоящий позади его у стены «ндук»¹.

Так гласит официальное описание смерти Геор- Рихмана. Он был первой жертвой изучения ат- мосферного электричества. Летом 1752 г. «Санкт- петербургские ведомости» сообщили об исследо- ваниях, предпринятых Франклином «для изведе- ния, не одинакова ли материя молнии и электри- ческой силы». В это время в Петербурге акаде- ник Рихман производил электростатические опы- ты. Сохранилась записка Шумахера, в которой весильный советник академической канцелярии требовал от Рихмана «произвести электрические опыты для некоторых знатных особ» и даже «сде- ланные в Академии электрические эксперименты инить ему, профессору, при дворе, дабы ее им- ператорское величество собственною высочайшею воєю особою действие оногo эксперимента ви- еть изволила»². Вскоре после сообщения об опы- ах Франклина Рихман произвел свои наблюде- ния, следующим образом описанные в «Санктпе- тербургских ведомостях»:

«Понеже в разных ведомостях объявлено важ- нейшее изобретение, а именно: что электрическая материя одинакая с материею грома, то здешний профессор физики экспериментальной г. Рихман удостоверил себя о том и некоторых зрителей следующим образом. Из середины дна бутылочно- го выбил он иверень и сквозь бутылку продел железный прут длиною от 5 до 6 футов, толщи- ною в один палец, тупым концом и заткнул гор- ло ее коркою. После велел он из верхушки кровли зынуть черепиц и пропустил туда прут, так что он от 4 до 5 футов высунулся, а дно бутылки ле- жало на кирпичках. К концу прута, который под кровлю из-под дна бутылочного высунулся, укре- пил он железную проволоку и вел ее до среднего аппарата все с такою осторожностью, чтоб проволока не коснулась никакого тела, производя- щего электрическую силу. Наконец, к крайнему концу проволоки приложил он железную линейку ак, что она перпендикулярно вниз висела, а к

верхнему концу линейки привязал шелковую нить, которая с линейкой параллельно, а с широчайшею стороною линейки в одной плоскости висела. Описание сих приготовлений к опыту читал он при исследовании объявленного отдаления грома от строения в начале сего июля месяца в акаде- мическом собрании членам, и начал уже с начала оногo месяца по вся дни следовать, отскочит ли нить от линейки и произведет ли потому какую электрическую силу, токмо не приметил ни ма- лейшей перемены в нити. Чего ради с великою нетерпеливостию ожидал грома, который 18 июля в полдень случился. Гром, по видимому, был не близко от строения, однакож он после первого удара тотчас приметил, что шелковая нить от линейки отскочила, и материя с шумом из конца линейки в светлые искры рассыпалась, и при каж- дом осязании причиняла ту же чувствительность, какую обыкновенно производят электрические искры... И так совершенно доказано, что электри- ческая материя одинакова с громовою материею, и те расклеваться станут, которые преждевремен- но маловероятными основаниями доказывать хо- тят, что обе материи различны»³.

Такие же опыты производил Ломоносов. В де- кабре 1752 г. он пишет послание к Шувалову о пользе стекла, где есть следующие строки:

«Вертясь Стекланный шар дает удары с блеском,
С громовым сходственным сверканьем и треском.
Дивился сходству ум, но видя малость сил,
До лета прошлого сомнителен в том был.
Внезапно чудный слух по всем странам течет
Что от громовых стрел опасности уж нет!
Что та же сила туч гремящих мрак наводит,
Котора от Стекла движением исходит,
Что оныя правила изысканны Стеклом,
Мы можем отвратить от храмин наших гром»...

Зима 1752 г. прошла, и стихи снова уступили место наблюдениям, которые не производились вплоть до весенних гроз. В мае 1753 г. Ломоно- сов совместно с Рихманом открыл, что атмосфер- ное электричество наблюдается и в отсутствие грозы. На основе майских наблюдений были сде- ланы существенные теоретические выводы. «В 28 число того же месяца,— писал Ломоносов Шува- лову⁴,— при прохождении дождевого облака без всякого чувствительного грома и молнии проис- ходили от громовой машины сильные удары с ясными искрами и с треском издалеко слыш- ным; что еще нигде не примечено, и с моею дав- ной теорией о теплоте и с нынешней об электри-

¹ Пекарский, История императорской Академии наук 1, СПб 1870, стр. 710.

² Там же, стр. 700.

³ Там же, стр. 704—705.

⁴ Б. Н. Меншуткин. Труды Ломоносова по физике и химии. М. — Л. 1936, стр. 166.

ческой силе весьма согласно, и мне к будущему публичному акту весьма прилично. Оной акт буду я отправлять с господином профессором Рихманом; он будет предлагать опыты свои, а я теорию и пользу от оной происходящую, к чему уже и приуготовляюсь»...

Для изучения атмосферного электричества Ломоносов построил «громовую машину». На крыше дома Ломоносова на второй линии Васильевского острова, между Средними и Малым проспектами, был установлен шест с металлическими остриями. Проволока отводила электричество в комнату, где не заземляясь, оканчивалась железной линейкой. Поэтому заряд не уходил в землю, как это происходит в громоотводе, и «громовая машина» была очень опасной. Подобное устройство было причиной гибели Рихмана.

Ломоносов подробно описал смерть Рихмана в известном письме Шувалову⁵.

«Сего июля в 26 число в первом часу пополудни поднялась громовая туча от норда. Гром был нарочито силен, дождя ни капли. Выставленную громовую машину, посмотрев, не видел я ни малюго признаку Электрической силы. Однако пока кушанья на стол ставили, дождался я нарочитых Электрических из проволоки искор, и к тому пришла моя жена и другие; и как я, так и оне беспрестанно до проволоки и до привешенного прута дотыкались, затем, что я хотел иметь свидетелей разных цветов огня, против которых покойной профессор Рихман со мною споривал. Внезапно гром чрезвычайно грянул в самое то время, как я руку держал у железа и искры трещали. Все от меня прочь побежали. И жена просила, чтобы я прочь шол. Любопытство удержало меня еще две или три минуты, пока мне сказали, что шти простынут, а притом и Электрическая сила почти перестала.

«Только я столом посидел несколько минут, внезапно дверь отворил человек покойного Рихмана весь в слезах и в страхе запыхавшись. Я думал, что его кто-нибудь на дороге бил, когда он ко мне был послан; он чуть выговорил: *Профессора громом зашибло*. В самой возможной страсти (скорости?), как сил было много, приехав, увидел, что он лежит бездыханен. Бедная вдова и ее мать таковы же, как он, бледны. Мне и минувшая в близости моя смерть и его бледное тело и бывшее с ним наше согласие и дружба и плачь его жены, детей и дому — столь были чувствительны, что я великому множеству сошедшего народа не мог ни на что дать слова или ответа, смотря на того лицо, с которым я за час сидел в Конференции и рассуждал о нашем будущем публичном акте. Первый удар от привешанной линейки с ниткой пришел ему в голову, где красно-вишневое пятно видно на лбу; а вышла из него громовая Электрическая сила из ног в доски. Нога и пальцы сини и башмак разодран, а не прожжен. Мы старались движение крови в нем возобновить, затем, что он был еще тепл; однако голова его повреждена, и больше нет надежды. И так он плачевным опытом уверил, что Электрическую громовую силу отвратить можно; однако, на шест с железом, которой должен

стоять на пустом месте, в которое бы гром сколько хочет. Между тем умер господин Рихман прекрасною смертью, исполняя по своей профессии должность. Память его никогда не умолкнет».

Это письмо оканчивалось следующим характерным прибавлением: «Чтобы сей случай не был протолкован противу приращения наук, всепокойнейше прошу миловать науки».

Действительно, смерть Рихмана окрылила противников знания. Генерал Нащокин, вспоминая мистические легенды, собранные в схоластической киевской «Ифике», злорадствовал по поводу гибели ученого⁶: «Июля 26 убило громом в Санкт-Петербурге профессора Рихмана, который мажором старался о удержании грома и молнии, да от идущего грома людей спасти; но с ним прежде всех случилось при той самой сделанной машине... С ним, Рихманом, о мудровании сходно произошло, как в древности пишется о афинском стихотворце Евсхилии, что и оной чре астрономию познал убиение себя вержением с верху, и для того изыде из града и в пустом месте сидяще на ясне; орел же, на воздухе носив желвь, иска камение, да с высоты разбьет, у Евсхилия глава была лыса; по случаю опустил желвь, и паде на главу. И так нечаянно конец вымыслу и оного Рихмана, как и Евсхилия получил. А о Евсхилии пишется в книге «Ифике» Иерополитике на листе 183».

Ломоносов теперь уже один продолжал изучение атмосферного электричества. В сентябре он должен был прочесть свое сообщение. Не обошлось без обычной борьбы с Шумахером, который препятствовал публичному выступлению Ломоносова и изложению его теории атмосферного электричества. В ноябре, наконец, было прочитано «Слово о явлениях воздушных, от Электрической силы происходящих, предложенное от М. Ломоносова ноября 26-го 1753 года». В «Слове» Ломоносов рассматривает атмосферное электричество как результат трения. Охлажденные и отяжелевшие слои воздуха погружаются вниз. Вверх поднимаются нагретые «пары». Трение, вызванное вертикальными потоками воздуха, электризует его. «Жирные шарики горящих паров, которые ради разной природы с водяными слиться не могут, и ради безмерной малости к свойствам твердого тела подходят, скорым встречным движением сражаются, трутся, Электрическую силу рождают, которая, распространяясь по облаку, веселый занимает»⁷... Здесь же объясняются причины северных сияний. Ломоносов разгадал электрическую природу, несмотря на фикцию «горючих паров». Теория тесно связана с ломоносовским пониманием теплоты и его представлениями о газах. Она опирается на множество метеорологических наблюдений и физико-химических догадок.

«Слово о явлениях воздушных, от Электрической силы происходящих», было разослано ряд крупнейших ученых. «То что остроумнейший Ломоносов предложил относительно течения этой тонкой материи в облаках, должно принести в

⁶ Пекарский, т. I, стр. 712.

⁷ Меншуткин. Труды Ломоносова по физике и химии, стр. 175.

⁵ Там же, стр. 169—170.

чайшую помощь тем, кто хочет приложить свои силы для выяснения этого вопроса», — ответил Эйлер. Другие отзывы требовали экспериментальных доказательств. Но для этого нужно было поднять приборы в верхние слои атмосферы. Ломоносов сконструировал небольшой геликоптер, который мог поднять термометр и измерить температуру на большой высоте. Протокол академической конференции отмечает, что 1 июля 1754 г. «Советник Ломоносов показал машину, названную им аэродромной, выдуманную им и имеющую назначение при помощи крыльев, приюжденных в движение горизонтально в разные стороны заведенной часовой пружиной, сжимать воздух и подниматься в верхние слои атмосферы для того, чтобы можно было исследовать состояние верхнего воздуха метеорологическими приборами, прикрепленными к этой аэродромной машине»¹.

Каковы были воззрения Ломоносова на природу электричества? По его почину Академия наук предложила в качестве задачи на 1755 г. «списать подлинную Электрической силы причину и оставить точную ее теорию». В программе, приюженной к этой задаче, Ломоносов писал²: «Трение, представить можно три разные движения тончайшей Электрической материи, которая сквозь кважины тел ходит, то есть: прохождение, вращение и трясение. Здесь равным образом примечать надобно, сколько и которые движения роды повольны к произведению Электрических явлений быть могут»...

На первый взгляд может показаться, что речь идет о специфической «электрической жидкости». Но если внимательно прочесть приведенный отзывок, то станет ясным, что Ломоносов предлагает исследовать «которые движения роды» производят электрические явления, иначе говоря, электрические явления есть результат особой формы движения некоторой «тончайшей материи». Задача состоит в том, чтобы ближе определить эту форму движения. «Тончайшая Электрическая материя» — это эфир. Эфир состоит из круглых частиц. Вращение частиц передает теплоту, колебания, свет. Частички эфира, по мнению Ломоносова, передают и электрические заряды. Взгляды Ломоносова стоят гораздо выше распространенного в XVIII в. представления о специфических жидкостях.

Конечно, его эфир напоминает физику Декарта отсутствием экспериментального обоснования, фантастичностью и механическим характером картины. Но тем более поразительно, что Ломоносов, опираясь на изучение естественных условий своей страны, пришел к представлению о теплоте, свете и электричестве как о различных формах движения и применил понятия картезианской физики для объяснения явлений природы.

В XVIII в. представление об электричестве, как о форме движения, могло быть лишь натурфилософской догадкой. В то время были известны лишь электростатические явления. О превращении химических процессов в электрические и обратно еще не знали. В Европе электростатические машины и лейденские банки собирали противо-

положные заряды и электрические искры демонстрировали новую область явлений. В Америке и в России наблюдали, главным образом, атмосферное электричество. И в том, и в другом случае не наблюдалось непрерывного возникновения электричества из другой формы движения. Электричество не получали в форме длительного процесса — тока.

XIX в. начался открытием гальванического тока. В 1800 г. стал известен *вольтов столб*.

II

Наиболее важные наблюдения над действием гальванического тока были сделаны в 1802—1803 гг. Василием Владимировичем Петровым — профессором Петербургской медико-хирургической академии.

Биография В. В. Петрова показывает, что в конце XVIII в. в глубине российской провинции мог вырасти один из крупнейших ученых своего времени. В. В. родился в 1761 г. в Обояни, учился у дядьки, а затем в харьковском «коллегиуме». Не окончив этой школы, Петров в 1788 г. уехал в Барнаул, где стал преподавателем математики и физики Колыванско-воскресенского горного училища. Пока Петербург искал иностранцев для Академии наук, в горно-промышленных центрах вырастали самобытные очаги образования. Барнаул, который незадолго до Петрова видел машину Ползунова, был одним из таких центров. Преподавание физики в Горном училище стояло сравнительно высоко. После пяти лет пребывания в Барнауле Петров был приглашен в Медико-хирургическое училище при петербургском Главном сухопутном госпитале, которое позднее преобразовали в Медико-хирургическую академию. Сорок с лишним лет Петров преподавал здесь физику, причем создал физический кабинет, где производил свои опыты.

После опубликования открытия Вольты Петров докладывал медицинской коллегии³: «Поелику опыты над гальванизмом сделались весьма достопримечательными в различных отношениях, а между всеми учебными пособиями, находящимися в Медико-хирургической академии, нет вовсе никаких приборов, относящихся к сему предмету», требуется «такой гальванический прибор, посредством коего можно было бы производить самые новые физико-химические опыты, которыми многие европейские физики начинают заниматься с гораздо большим против прежнего рачением». Коллегия разрешила заказать в Англии батарею из ста медно-цинковых кружков. Но Петров вскоре соорудил батарею из 4200 кружков — самую большую в мире в то время.

В 1803 г. появилась книга Петрова под названием «Известия о Гальвани-Вольтовых опытах, которые производил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипаче батареи, состоявшей иногда из 4200 медных и цинковых кружков и находящейся при Санкт-Петербургской Медико-Хирургической Академии». В этой первой русской книге по электричеству описаны

¹ Там же, стр. 192

² Проф. Л. Д. Бельский, Академик Василий Петров, со «История техники», вып. IV, М. — Л. 1934, стр. 233.

эксперименты, произведенные впервые. В введении к «Известию» Петров пишет¹⁰:

«Поелику же, сколько мне известно, доселе никто еще на Российском языке не издал в свете и краткого сочинения о явлениях, происходящих от Гальвани-Вольтовской жидкости, то я долгом моим поставил описать пороссийски и расположить в надлежащем порядке деланные *самим мною* важнейшие и любопытнейшие опыты посредством Гальвани-Вольтовской батарееи».

Значение этих экспериментов видно из характера сделанных Петровым открытий. Он нашел самые важные физические и химические действия тока, которые и поныне являются основой всей электрохимии и всей электрометаллургии. Петров, независимо от Никольсона и Карлейля, открыл электролиз, и за несколько лет до Дэви вольтову дугу.

Страница пятьдесят третья «Известия» Петрова представляет начало главы, трактующей об электролизе («разрешение воды» и т. д.).

Еще большее значение имеет другое открытие Петрова — вольтова дуга. Оно изложено в главе восьмой «о светоносных явлениях и о сжигании многосложных, твердых тел», предвосхитившей опыты Дэви, следующим образом описанные в «*Phylosophical Magasine*»:

«На заключительной лекции в Королевском институте был впервые приведен в действие большой вольтов аппарат, состоящий из 2000 пар кружков площадью в 2 кв. дюйма каждый. Эффект этой комбинации, самой большей из когда-либо построенных, был, как это можно заключить, весьма блестящим. Искра, свет которой был так силен, что казался солнечным, прорезала несколько линий в воздухе, произвела разряд в теплом воздухе длиной в 3 дюйма слепящей яркости».

В то время когда Дэви производил описанные опыты, прошло уже семь лет после действительного открытия вольтовой дуги.

Впоследствии Петров много работал в области электростатики. В своей книге «Новые электрические опыты» он изложил некоторые представления о причине электрических явлений. Петров думал, что «кислотворный газ», т. е. кислород, состоит из «кислотворного вещества» и тепла и света, которые выделяются, когда «кислотворное вещество» соединяется с металлом, окисляя его. Конечно, эти фантастические представления не имели бы места, если бы мысль Ломоносова об электричестве, как форме движения, осталась в сознании русских ученых; но взгляды Ломоносова были забыты. Между тем если бы они были подкреплены, дополнены и развиты экспериментами с вольтовым столбом, — наука могла бы прийти к самым важным обобщениям. Отсутствие преемственности в русской экспериментальной науке закрыло дорогу этим обобщениям. Гораздо позже к ним пришел Фарадей.

В свою очередь и книга Петрова была забыта. Только в 90-х годах проф. Гершун, тогда студент, нашел ее в виленской библиотеке и передал проф. Н. Г. Егорову. В результате удалось установить приоритет русского ученого в открытии вольтовой дуги.

Остатки «огромной наипаче батарееи» сохранились до сих пор, между тем о самом ученом трудно собрать сведения. Даже портрет его сохранился. В 1834 г. после смерти Петрова Академия наук решила увековечить его память мунументом, но даже и это не было сделано. Уж в 30-х годах открытия Петрова стали все реже упоминаться в русских работах, и до конца XIX о нем почти ничего не знали. Только советская наука показала его личность и творчество.

Первым практическим применением электрического тока, т. е. началом производственной электротехники, был электромагнитный телеграф, первой линией электромагнитного телеграфа был провод между Зимним дворцом и Министерством путей сообщения, проведенный в 1832. Известный изобретатель Шиллинг устроил эту передачу. Он воспользовался явлением Эрстеда — отклонением магнитной стрелки вблизи тока, чтобы передавать сигналы. Через несколько лет подобные аппараты были построены Вебером и Гауссом в Германии, Уитстоном и Куком в Англии, а в 40-х годах появился телеграф Морзе, который получил повсеместное распространение.

Но в телеграфе электричество еще не стало универсальным звеном энергетических переходов. Телеграфная линия, конечно, передает энергию, но не это является производственной задачей телеграфа. Лишь после того как электротехника вышла за рамки связи и внедрилась в энергетическое хозяйство, электричество показало свою основную историческую роль — объединение различных форм энергии. Этот важнейший момент истории электричества — создание энергетической техники — связан с именами русских академиков Якоби и Ленца.

В 1836—1837 гг. русский академик Б. С. Якоби открыл гальванопластику. Он увидел, что пластинки, монеты и т. п., опущенные в раствор медного купороса, покрываются медью, если рез эти предметы в раствор проходит электрический ток. В качестве электрода берут предмет с которого хотят снять медный отпечаток и покрыть его металлом. 5 сентября 1839 г. Якоби писал президенту Академии наук:

«Сей новый способ приготовления копий всех родов, по содействию гальванического произведения, может быть распространен и применен всякого рода художествам и ремеслам. Но так как легко может случиться, что источник сего изобретения впоследствии может уничтожиться, то нижеподписавшийся желал бы, дабы сие гальваническое произведение сохранено было, и историческое доказательство, что сие открытие последовало в 1836 году, а в 1839 году достигло высшей степени совершенства, какое только может быть при практическом употреблении. Сие изобретение принадлежит России и не может быть оспоримо никаким другим изобретателем».

¹⁰ «Известие о Гальвани-Вольтовских опытах, которые производил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипаче батарееи, состоявшей иногда из 4200 медных и цинковых кружков и находящейся при Санкт-Петербургской Медико-Хирургической Академии в Санкт-Петербурге в Типографии Государственной Медицинской Коллегии, 1803 года», стр. VII.

Но Якоби создал не только гальванопластику. Он сконструировал один из первых электродвигателей. Двигатель Якоби был первым, получившим практическое применение. Он состоял из двух систем электромагнитов — одна была неподвижной, другая вращалась. Приведем описание двигателя¹¹, составленное Якоби в 1834 г., т. е. через три года после открытия электромагнитной индукции.

«Аппарат состоит из двух групп по 8 стержней мягкого железа, длиной по 7 дюймов и толщиной в 1 дюйм. Обе группы стержней располагаются на двух дисках под прямым к ним углом и симметрично одна по отношению к другой таким образом, чтобы полюсы приходились один против другого. Один из дисков неподвижен, а другой вращается вокруг некоторой оси, благодаря чему группа подвижных стержней проходит мимо группы неподвижных на возможно более близком расстоянии от них... Механизм мотора очень несложен, по сравнению с паровой машиной: нет ни цилиндра, ни поршня, ни клапанов и т. д., изготовление которых требует очень точной работы и стоит больших средств; нет также трения, благодаря которому теряется больше половины всей производимой работы; в этой машине потерю составляет только трение в подшипниках. Далее машина эта дает непосредственно постоянное круговое движение, которое гораздо легче преобразовывать в другие виды движения, чем возвратно-поступательное движение. Кроме того, нет опасности взрыва».

Однако, Якоби недостаточно ясно понимал, что новый двигатель подчиняется общему энергетическому закону. Продолжая описание, он говорит: «Новый мотор не подчинен имевшему до сего времени силу закону пропорциональности между эффектом и затратами». Но практические испытания показали иллюзорность этого утверждения. Через несколько лет после изобретения, Якоби поместил свой двигатель на шлюпке, пустил ток от батареи, состоявшей из 64 элементов, и шлюпка с мотором в одну лошадиную силу возила 14 пассажиров по Неве. Из донесения комиссии, изучавшей двигатель Якоби, ясно видно, что энергетическая теория электрических машин вырастала по мере крушения иллюзий о неприменимости к электричеству закона сохранения движения. Иллюзии разбивались практикой. В ноябре 1838 г. указанная комиссия доносила¹² министру народного просвещения Уварову:

«...Комиссия поставляет себе в удовольствие засвидетельствовать, что исследования их (Якоби и Ленца.— Б. К.) более существенно послужили к объяснению количественных отношений электромагнетизма, нежели другие какие-либо опыты новейшего времени... Якоби признал, что открытием этих законов (законов действия электромагнитных машин.— Б. К.) он обязан преимущественно опытам над различными электромагнитными машинами, которые по действию своему не оправдали возложенных на них надежд. Между

тем устройство этих машин было основано на законах статических действий электромагнитов, законах, которые были выведены из многочисленных наблюдений, произведенных им, Якоби, совместно с академиком Ленцем, а они однакоже оказались недостаточными, как скоро дело доходило до движения этих машин и до механического производства».

Полное освобождение теории электричества от представлений, тянувших ее в сторону от закона сохранения энергии, было достигнуто позднее, после того как электрическое освещение вызвало к жизни современные динамомашины. В России был проделан один из первых опытов электрического освещения. 30 марта 1753 г. в Казанском университете профессор физики Савельев освещал университетский двор вольтовой дугой. Ток получался из батареи в сто восемь элементов Даниэля и тридцать шесть элементов Грове. Дуговая лампа находилась на крыше физического кабинета. Заметка, помещенная в журнале Министерства народного просвещения, описывает¹³ впечатления наблюдателя, находившегося за две версты от университета: «Лампа казалась ему звездой втрое большей, чем Венера».

Но России принадлежит и первая действительно применимая дуговая лампа.

«Свет приходит к нам с Севера»; писали шестьдесят лет тому назад парижские газеты. Речь шла о «русском свете», как называли тогда электрическое освещение. Магазины Лувра, театр Шатле и площадь Оперы освещались свечами Яблочкова — первыми электрическими лампами, практически примененными для освещения городов. Уже год прошел с того дня, когда Павел Николаевич Яблочков получил французский патент на свою «свечу». Муниципалитеты французской провинции тянулись за Парижем. В Гавре решили осветить электричеством порт. За каналом англичане подсчитывали сравнительную выгодность газового и электрического освещения набережной Темзы. Только в 1877 г. Яблочков получил русский патент, но, предложив изобретение военному министерству России, он не удостоился ответа. А между тем изобретение было на редкость простым и остроумным. Дуговые электрические лампы имели одно существенное неудобство: по мере того как угли сгорали, расстояние между ними вырастало, и в конце концов ток прерывался, и дуга исчезала. Нужно было все время регулировать расстояние между углями, сдвигать их по мере сгорания. Яблочков нашел гениально простой выход. Вместо того чтобы помещать угольные стержни один против другого, обратив концами друг к другу, он расположил их параллельно. Два вертикально поставленных параллельных угольных стержня и изолирующая прокладка между ними, сгорающая вместе с углями, образуют свечу Яблочкова. Вольтова дуга, соединяющая концы углей, не прервется, так как они, сгорая, будут все время на одном и том же расстоянии.

В своем первом патенте П. Н. писал: «Изобретение состоит в уничтожении всякого механизма, применяемого в обычных электрических лам-

¹¹ «Электродвигатель в его историческом развитии» — документы и материалы под ред. акад. В. Ф. Миткевича М. — Л. 1936, стр. 111.

¹² «Электромагнитный бот Б. С. Якоби (1837—1842)». Записки имп. технич. общества. СПб 1903, стр. 22.

¹³ Журнал Министерства народного просвещения. 1853 год. VII, стр. 26—28.

пах. Вместо того, чтобы автоматически сближать посредством механизма угольные стержни, по мере их сгорания, я просто ставлю угли рядом... отделяя один от другого изолирующим материалом, способным сгорать одновременно с углями, например каолином. Приготовленные таким образом угли могут помещаться в особого рода подсвечник. Достаточно затем пропустить через них ток от батареи или какого-нибудь другого источника тока, чтобы между концами углей образовалась вольтова дуга.

«В случае применения тока одного направления, так как один уголь сгорит быстрее другого, надо применять угли различного поперечного сечения, дабы сохранить постоянство длины обоих углей. Вместо двух угольных стержней, помещенных по обе стороны каолиновой пластинки, я могу применять каолиновую трубку, внутрь которой вставлен угольный стержень и которая окружена угольной трубкой.

«Для зажигания лампы я соединяю ее свободные концы маленькой угольной полоской, которая при пропускании тока сначала накаливается, затем сгорает и вместе с тем зажигает вольтову дугу»¹⁴.

Опыты, предшествовавшие изобретению, происходили в одной из комнат студенческого пансиона, где П. Н. жил зимой 1875—1876 гг. Яблочков направлялся в Америку, где хотел реализовать электротехнические изобретения, сделанные им в России. Но денег до Америки нехватило, П. Н. остановился в Париже, поселился в Латинском квартале, встречался с русскими эмигрантами во главе с П. Л. Лавровым, дружил с Германом Лопатиным, но все время отдавал электротехническим работам. Опыты он производил у себя в комнате, а также в известных парижских мастерских Антуана Бреге. 23 марта П. Н. получил патент, а в апреле свеча демонстрировалась на выставке физических приборов в Лондоне. В следующем году началось промышленное изготовление свечей Яблочкова.

За один 1877 г. количество электрических ламп в Европе выросло с 80 до 500. Парижская выставка 1878 г. особенно сильно повлияла на распространение электрического освещения. Русские, желавшие видеть в Париже технические новинки, неожиданно встретили изобретение русского инженера в качестве наиболее интересного электротехнического экспоната. После этого П. Н. получил приглашение в Петербург. Он порвал с фирмой, начавшей реализацию его изобретения, и вернулся на родину. Вскоре петербуржцы толпились на углу Литейной и Бассейной, заглядывая в освещенные электричеством окна квартиры Яблочкова, а через несколько месяцев электрические фонари освещали Литейный мост и Екатерининскую площадь. Но для распространения электрического освещения Яблочков должен был погрузиться в финансовые операции. Денежные заботы отвлекали П. Н. от творческой работы. Новыми замыслами никто не интересовался и негде было их осуществить.

Сейчас на фоне мощного роста нашей электро-

промышленности, академических и отраслевых исследовательских институтов, вузов и лабораторий трудно даже представить, в каких нищеских условиях работали пионеры русской электротехнической мысли. Для Яблочкова такие условия были особенно тяжелыми. Каждый год даже каждый месяц приносил новые изобретения. Но рамки капиталистической наживы ограничивали переворот в промышленности, городском хозяйстве и быте, связанный с электричеством. Всего теснее были эти рамки в России, где электропромышленности не существовало вплоть до победы социализма.

Между тем для творчества Яблочкова характерно было именно безостановочное стремление к все новым высотам научной техники. Ни отдыха, ни покоя, ни успокоения не знала его техническая фантазия. Творческая работа Яблочкова продолжалась всего двадцать лет, но не прерывалась ни на один месяц. Когда электрики всего мира удивлялись успехам электрических свечей, П. Н. был поглощен совершенно новыми задачами.

В этом году исполняется шестидесятилетие со дня изобретений Яблочкова, которые известны гораздо меньше, чем электрическая свеча. Сюда относится прежде всего новая динамомашин. Машины Яблочкова предназначались не только для освещения. П. Н. шел в авангарде технической мысли и к концу жизни конструировал машины для передачи энергии на расстоянии и строил легкие электромоторы. Как далеко шли его замыслы, видно из того, что Яблочков в 80-х годах проектировал самолет с электрическим двигателем. Тогда не было ни самолетов ни промышленных электродвигателей.

Одной из основных заслуг Яблочкова было промышленное применение переменного тока, а также первое применение трансформатора для преобразования напряжения тока и дробления энергии.

Конечно, Яблочков не мог и мечтать об изготовлении своих машин в России. В 1880 г. он снова покинул родину и уехал в Париж. Там готовилась всемирная выставка, на которой Яблочков был представителем Франции в международном жюри по электротехническим изобретениям. После выставки он с невероятной энергией начал разрабатывать новую область электротехники. П. Н. стремился создать мощный электрохимический генератор. Яблочков хотел, чтобы горение непосредственно превращало химическую энергию угля в электрический ток. В созданном им гальваническом «элементе горения» окисление угля освобождало энергию в форме электрического тока. Яблочков придумал десятки таких элементов. В некоторых из них окислялся натрий.

Гальванические элементы горения гораздо меньше известны, чем свеча Яблочкова, но связанные с ними проблемы представляют большой интерес для советской техники. В Советском союзе техника направляется по новым путям. Мы уже начали подземную газификацию. Но мы задумываемся и над проблемой непосредственного превращения энергии топлива в электрический ток.

¹⁴ Цит. по статье проф. М. А. Шателена «Свеча Яблочкова и связанные с ней изобретения», «Электричество», 1929, № 12, стр. 498.

Средств на лабораторию у Яблочкова не было, он работал над новыми гальваническими элементами в одной из комнат своей парижской апартиры. Во время испытания натриевых элементов произошел взрыв. Жена Яблочкова рассказывает об этом случае¹⁵: «Окна были выбиты, вся комната наполнилась газом, ничего не было видно и слышно. Яблочков не подавал голоса, когда я его звала. Газы выходили через выбитые окна в большом количестве, и публика на улице решила, что в доме пожар. Был дан пожарный сигнал, и вот, когда приехали пожарные, — наступила страшная минута. Я выбежала на улицу, умоляя пожарных не заливать комнаты водой, иначе произошел бы новый взрыв, который мог бы разрушить весь дом. Хозяин дома, инженер, также выбежал на улицу и, к счастью, сумел убедить пожарных не заливать жар. У нас был запас песку — две бочки — все стали засыпать все песком. Когда все утихло, увидела Павла Николаевича в углу лаборатории, почти задохнувшегося, с обожженной головой». Этот взрыв подорвал здоровье Павла Николаевича. Несколько лет работы в неблагоприятной лаборатории, полной хлорных испарений, довершили дело. В 1893 г. Яблочков приехал в Россию и здесь серьезно заболел. В больном общем номере Саратовской гостиницы он лежал, задыхаясь от водянки. Рядом с диваном ставили стол и П. Н. продолжал опыты, торопясь их закончить. Утром 19 марта 1894 г. он умер. Последние слова его были: «И там тяжело, здесь не лучше».

Широта интересов, разнообразие и оригинальность технических идей, безостановочный, стремительный переход к все более совершенным конструкциям, органическая вражда ко всякой инерции и застою, блестящее предвосхищение новых электротехнических принципов делают Яблочкова одной из наиболее ярких фигур русской электротехнической мысли конца XIX в. Наряду с ним нужно упомянуть А. Н. Лодыгина — создателя ламп накаливания.

В юности Лодыгин учился в кадетском корпусе и юнкерском училище. При первой возможности он покинул военную службу и поступил в Петербургский университет. Уже в 1870 г. он предложил французскому правительству свою конструкцию летательного аппарата тяжелее воздуха. Позже он заинтересовался электрическим освещением. Задолго до этого предлагали воспользоваться для освещения накаливанием проводника. Лампа накаливания Лодыгина отличалась от существовавших попыток тем, что она вышла за пределы лабораторных опытов. В 1873 г. в Петербурге впервые демонстрировалось освещение улиц лампой накаливания. Лампа Лодыгина представляла собой полый герметически закрытый стеклянный шар. Между двумя медными стержнями помещался небольшой уголек, который раскалялся и светился при прохождении тока. Воздух из лампы не выкачивался, так Лодыгин предполагал, что кислород израсходуется раньше, чем уголек сгорит. Но оказалось, что лампа горит всего полчаса, а потом

перегорает. Поэтому впоследствии Лодыгин начал выкачивать воздух из своих ламп. Изобретение Лодыгина было сделано значительно раньше, чем Эдисон выступил со своими угольными лампами. Когда во французском журнале «La lumière électrique» появилось сообщение об изобретении Эдисона, оно сопровождалось указанием на Лодыгина, ранее использовавшего тот же принцип. Даже в Америке во время спора из-за патента между Эдисоном и Сваном суд аннулировал обе привилегии, ссылаясь на приоритет Лодыгина.

Но судьба лампы Эдисона не была похожа на судьбу лампы Лодыгина. Эдисон, опираясь на капиталистическую организацию экспериментальной работы, произвел в своей «фабрике изобретений» тысячи опытов и получил безукоризненный, прочный и дешевый источник света. Русский изобретатель силой вещей должен был не углубляться в экспериментальное изучение и улучшение найденной конструкции, а переходить ко все новым и новым принципам. В 1890 г. он предложил лампу с молибденовой и вольфрамовой нитью. Но эти изобретения были реализованы в Америке. Патент на вольфрамовую нить купила американская фирма General Electric Co. Причина такого положения заключается не в недостаточном внимании к электротехнике со стороны русских ученых. Напротив, за несколько лет до того как в Англии парламентская комиссия спрашивала Тиндала «каким образом паровая машина, служащая источником электричества, может накалить платину до точки плавления, тогда как температура в ее топке несравнимо ниже»¹⁶, задолго до скептической встречи лампы Эдисона европейской наукой, Петербургская академия выдала Лодыгину ломоносовскую премию за его изобретение. Петербургские научные круги проявили значительный интерес к лампе накаливания. Но русская промышленность не дала изобретателю ни лабораторий для длительной экспериментальной работы над лампой, ни средств. Через два года после изобретения и через год после получения академической премии Лодыгин был вынужден поступить слесарем в Арсенал. В 1884 г. он уехал за границу — в Париж, а затем в Америку. Но за границей фирмы уже эксплуатировали новые изобретения. Лодыгин вынужден был работать над автомобилями, на кабельном заводе, на заводе ферросплавов и т. д. До самой смерти он не смог найти применения своим способностям в основанной им области электротехники.

Превращение механической энергии в электричество и затем обратное превращение электричества в механическую энергию сходными машинами опиралось на открытие принципа обратимости. Уже Ленц видел, что если в движущемся проводе, перерезающем линии магнитного поля, индуцируется электрический ток, то в аналогичном приборе ток, пущенный в проводник, заставит его двигаться. Это вытекало из теории Ленца и составило содержание доклада, прочитанного им в Академии наук 29 ноября 1833 г. От-

крытие Ленца содержало в зародыше все дальнейшие успехи электромеханики.

Через четырнадцать лет Якоби высказал мысль о конструктивном тождестве генератора и двигателя. Однако только в 1873 г. Фонтен впервые продемонстрировал две одинаковые машины, из которых одна служила генератором, а другая — двигателем, получавшим ток от первой. Русский электротехник Лачинов один из первых понял значение обратимости. В своей статье, печатавшейся в первых номерах журнала «Электричество», Лачинов развивает следующие мысли. Проблема электромагнитных машин должна быть решена на основе общего учения об энергии. С этой точки зрения двигатель не может дать больше того, что затрачено в генераторе. Тем не менее превращение механической энергии в электричество и обратно открывает широкие перспективы. Лачинов указывает, что динамомашин могут дать ток в двадцать раз дешевле, чем гальванические батареи. Ток можно применить не только для телеграфа и гальванопластики, но и для превращения в механическое движение.

«В этом последнем, наиболее интересном случае вопрос принимает особую, довольно оригинальную форму: в одном пункте мы пользуемся паровой (или какой-либо иной) силой для вращения динамоэлектрической машины и полученный таким образом ток проводим посредством проволок в другой, более или менее удаленный пункт, где заставляем его действовать на машину Сименса или Грамма, которая, наконец, и производит требуемую механическую работу. Электродвижение является здесь, следовательно, в форме передачи механической работы посредством электричества. Предполагая, что обе машины поставлены в весьма выгодные условия, мы приходим к заключению, что таким способом будет передаваться до 80% первоначальной работы двигателя. При обыкновенных условиях, когда мы не стараемся о наилучшем устройстве и о наивыгоднейшей скорости машин, можно все-таки допустить, что посредством электричества мы передадим на значительное расстояние по крайней мере половину работы двигателя»¹⁷.

Блестящим осуществлением этой идеи были передачи Депре (1881—1883), о которых писал Энгельс в своем известном письме Бернштейну¹⁸. Однако широкое применение электричества получило в промышленности лишь с изобретением современного трехфазного электродвигателя, который был создан русским инженером Доливо-Добровольским. Последний также в значительной степени является создателем первой электропередачи переменного тока (Лауфен-Франкфурт).

В русской науке Александр Григорьевич Столетов отразил первый период индустриальной электротехники. Этот период начался первыми магнитоэлектрическими генераторами, которые еще не могли заменить гальванические батареи, хотя и выпрямляли индуктированный переменный ток в постоянный. Следующим шагом в развитии первых генераторов был переход к электромаг-

нитам (Уайльд). Затем были построены машины самовозбуждения (Уитстон, Сименс), появились эти машины были применены Марселем Депре для передачи энергии на расстояние. Новые явления, связанные с индустриальной электротехникой, были обобщены теорией Максвелла.

В начале 1872 г., через несколько лет после появления машин Уайльда, Сименса, Ленца и Грамма, А. Г. Столетов выпустил свою докторскую диссертацию: «О функции намагничения железа». В описанных здесь экспериментах Столетов брал железное кольцо с двумя обмотками. Одна из обмоток соединялась с гальваническими батареями, другая — с гальванометром. Традиционный прибор был в этих опытах применен для очень сложных по тогдашнему времени количественных измерений. Последние имели непосредственное значение для конструирования генераторов и двигателей¹⁹... «изучение функции намагничения железа может иметь практическую важность при устройстве и употреблении электромагнитных двигателей, так и тех магнитных электрических машин нового рода, в которых временное намагничение железа играет главную роль (снаряды Вильде, Сименса, Ладда и др.)». Знание свойств железа относительно временного намагничения также необходимо здесь, как и необходимо знакомство со свойствами пара для теории паровых машин. Только при таком знании мы получим возможность обсудить а priori наивыгоднейшую конструкцию подобного снаряда и наперед рассчитать его полезное действие.

Теоретические проблемы, поставленные индустриальной электротехникой, привели к созданию электромагнитной теории света. Этой очень важной работой Столетова заключалось в определении «критической скорости v », играющей центральную роль в этой теории. «Предметом настоящей работы, — пишет Столетов в введении к ней²⁰, — служит точное определение соотношения между электромагнитными и электростатическими единицами, той скорости (« v » Максвелла), которая была бы скоростью распространения электромагнитных возмущений в пустоте (или в воздухе) и которая по всей вероятности не отличается от скорости распространения света в же среде».

Таким образом еще до Герца, экспериментально доказавшего существование электромагнитных волн, русский ученый стремился разработать наиболее важные части максвелловой теории и найти экспериментальные доказательства связи между светом и электричеством. Помимо практического значения этой работы, она дала толчок созданию московской университетской физической лаборатории, которая, по словам Столетова «выросла из определения v ».

Последние годы своей жизни А. Г. Столетов занимался исследованием так называемых активных электрических явлений — электрических разрядов в газах. «Изучение актино-электрических разрядов обещает пролить свет на процессы

¹⁷ «Электродвигатель в его историческом развитии», стр. 571—572.

¹⁸ Маркс — Энгельс, Соч., т. XXVII, стр. 289, М. 1935.

¹⁹ Цит. по статье П. Н. Лебедева «Экспериментальные работы А. Г. Столетова», Соч. стр. 279—280.

²⁰ Там же, стр. 280.

остириания электричества в газах вообще», пи-
 Столетов²¹. Эта новая область электриче-
 явлений, как известно, была ареной наибо-
 поразительных открытий конца века. Что же
 ается электромагнитной теории света, то
 здесь важнейшие открытия были сделаны
 Н. Лебедевым, которого Столетов в 1891 г.
 пригласил работать лаборантом в физическую
 лабораторию Московского университета. прак-
 тическое применение волн Герца было начато
 России А. С. Поповым в 1894 г. Опыты Герца
 были известны в 1888 г.

В следующем году собрание минных офице-
 в в Кронштадте выслушало доклад «Новейшие
 следования по соотношению между световыми
 электрическими явлениями», прочитанный рус-
 ским физиком Александром Степановичем Попо-
 вом. Попов преподавал физику в так называе-
 мом минном офицерском классе, где готовились
 электротехники для русского флота. В 1894 г.
 Попов попытался применить волны Герца для
 передачи сигналов. Прибор для возбуждения
 электромагнитных колебаний был уже создан
 Герцем и Риги, но приемная часть не улавли-
 вала слабых сигналов. Поэтому Попов обратил
 внимание на прием и регистрацию отдельных
 разрядов. В начале мая 1895 г. происходила
 публичная демонстрация прибора, состоявшего
 из высокой антенны и когерера, т. е. трубки
 с металлическим порошком, пропускавшим ток
 телеграфный аппарат, когда под влиянием
 электромагнитной волны порошок становился
 проводником электричества. Приемник отмечал
 атмосферные разряды и был назван «грозоот-
 четником». Через год, в марте 1896 г., Попов
 продемонстрировал передачу на 200 м электри-
 ческими сигналами ряда букв, образующих слова
 Генрих Герц». Это была первая радиограмма.
 Уже через год Попов установил радиосвязь
 между кораблем, находившимся в море, и бере-
 ом. Наконец, зимой 1899—1900 гг. при помощи
 радиограммы были спасены 27 рыбаков, унесен-
 ных в Балтийское море оторвавшейся льдиной.
 Несколько позднее первого сообщения Попо-
 в, в июне 1896 г., Маркони взял патент на свой
 приемник. Некоторое время схема Маркони не
 была известна. Когда же описание приборов бы-
 ло опубликовано, то оказалось, что они принци-
 пально не отличаются от предложенных Попо-
 вом.

Работы Попова заключались в техническом
 применении электромагнитных волн. Важнейшие
 эксперименты, показавшие физические свойства
 волн, также были проделаны в России.
 Двадцать пять лет назад в Москве, в Мертвом
 переулке, в доме № 20, помещалась небольшая
 физическая лаборатория. Ученые всего мира
 интересом ожидали из этой лаборатории новых
 открытий. Между тем в другой комнате того же
 дома умирал руководитель лаборатории Петр
 Николаевич Лебедев — один из крупнейших фи-
 зиков конца XIX и начала XX в.
 Этому широкоплечему, атлетически сложенному
 человеку было всего 46 лет. Лебедев родился в
 1866 г. Учился он в Петропавловской немецкой

школе, а потом в реальном училище. Научно-тео-
 ретические интересы появились у П. Н. очень рано.
 Также рано появились у него конструктивные
 способности. Близкий друг его А. А. Эйхенвальд
 вспоминал²² о том, как П. Н. «дома мастерил
 различного рода электрические машины, произ-
 водил с ними опыты, читал книги преимущест-
 венно по физике и электротехнике, делал сам
 изобретения, изображая их тщательно выполнен-
 ными чертежами, с пояснительным текстом, что
 мы в шутку называли «патентами». Само собой
 разумеется, что среди этих «патентов» было
 множество летательных машин, но были и дина-
 момашин, телеграфы, регуляторы для вольто-
 вой дуги».

Конструктивные навыки Лебедева получили
 развитие в высшей технической школе. Три года,
 с осени 1884 г. до весны 1887 г., П. Н. провел
 в Московском техническом училище, а потом
 уехал в Страсбург, где учился в университете
 под руководством известного Кундта.

Уже в это время работа Лебедева носила твор-
 ческий характер. У него появлялись самые сме-
 лые научные замыслы. Но Кундт советовал от-
 ложить их осуществление и заняться пока более
 простыми задачами.

В эти годы идея единства форм движения, как
 мы видели, одерживала блестящие победы. В 60-х
 годах Максвелл в своих блестящих работах из-
 ложил учение о связи между электричеством
 и магнетизмом, ввел понятие об электромагнит-
 ных волнах и теоретически доказал, что свет —
 частный случай электромагнитных волн. Но тео-
 рия Максвелла не получила широкого распро-
 странения до опытов Герца. Дальнейшие шаги фи-
 зики по ее основному стихийно-материалисти-
 ческому направлению должны были заключаться
 в полном экспериментальном доказательстве
 давления света на освещенную поверхность.

В 1889—1891 гг. Лебедев систематически ищет
 причину, объясняющую отталкивание хвостов
 комет от солнца. Эта проблема связана с име-
 нем Ф. А. Бредихина. В 60—70-х годах Бредихин
 собрал сведения о всех ярких кометах, отмечен-
 ных старинными и новыми астрономическими за-
 писями. Он изучил больше сорока кометных
 хвостов и разбил их на три типа. Хвосты перво-
 го типа — длинные и прямые — направлены в
 сторону, противоположную солнцу, и лишь не-
 много отклоняются от этого направления. Бреди-
 хин показал, что их отталкивает от солнца сила
 в семнадцать раз большая, чем притяжение. Хво-
 сты второго типа изогнуты, широки и больше
 отклоняются от направления, противоположного
 солнцу. Здесь отталкивающая сила всего на
 0,1 меньше протяжения со стороны солнца. Тре-
 тий тип — короткие и тусклые хвосты — сильно
 отклонены в сторону, откуда идет комета. Их от-
 талкивает от солнца сила в пять раз меньшая,
 чем притяжение. Целым рядом остроумных мате-
 матических приемов Бредихин вычислил силу,
 отталкивающую кометные хвосты от солнца. Но
 какова природа этой силы? В 1872 г. Целльнер
 предложил гипотезу об электростатическом за-
 ряде солнца. Фай высказал догадку о том, что

отталкивающая сила связана с лучеиспусканием, но не указал никаких путей решения проблемы. Она была решена Лебедевым, который писал об этом следующее²³:

«Я, кажется, сделал очень важное открытие в теории движения светил, специально комет... Найденный закон распространяется на все небесные тела. Сообщил Винуеру, сперва он объявил, что я с ума сошел, а на другой день, поняв, в чем дело, очень поздравлял. Сперва я был в сильном нервном напряжении, но теперь, когда закон доказан, — я ничуть не волнуюсь, частью может быть от того, — этого я не скрою, — что озадачен, даже ошеломлен его общностью, которую сначала не предчувствовал. Выведенный мною закон не есть дело минутного наития: около двух лет ношу я его зачатки. Вопрос, которым я занят издавна, я люблю всей моей душой, так, как, я себе представляю, родители любят своих детей».

Вслед за Максвеллом Лебедев предположил существование светового давления и этой силой он объяснил отклонение кометных хвостов. Вскоре он изложил свои представления о давлении, которое испытывают тела со стороны световых лучей. В июле 1891 г. в Страсбурге Лебедев прочитал доклад «Об отталкивательной силе лучеиспускающих тел»²⁴.

Осенью 1891 г. Лебедев приехал в Москву и при содействии Столетова получил место лаборанта в физической лаборатории Московского университета. Это было тесное, непригодное помещение. Трудно было здесь вести серьезную научную работу. Средств также не было. Лебедев часто вспоминал, как он оборудовал мастерскую при лаборатории. Это стоило 300 руб., и такая сумма вызвала ужас в университете. Отсутствие специальных исследовательских лабораторий в России было для П. Н. личной трагедией. В его жалобах звучит та же нота, которая проходит через всю историю русского дореволюционного естествознания. Вспоминая прошлое русской науки, Лебедев подчеркивал эту ноту.

Вот что писал он о Ломоносове²⁵:

«Но все эти работы носят у Ломоносова отпечаток тех невозможных окружающих условий, в которых они зарождались: разработка их в большинстве случаев только начинается и обрывается на интересном месте исследования, — видно, что не разочарование в задаче или в своих силах вызвали перерыв, а внешние неизвестные причины, и невольно перед глазами встает во весь огромный рост трагическая фигура ученого, который не мог не чувствовать, что со всеми своими талантами он не может дать науке и того немного, что дает ей рядовой ученый на Западе, работающий в нормальных условиях».

Сейчас, когда советское правительство создало грандиозные дворцы науки, мощные экспериментальные институты и первоклассные лаборатории, наши ученые-экспериментаторы могут производить любые исследования. До революции

они могли лишь урывками работать в нищенских лабораториях. При таких условиях университетское преподавание становилось для экспериментаторов тяжелой «учебной барщиной».

«Русский ученый, у которого есть и сподобности, и желание работать в области чистой науки, волею судеб поставлен в особенно тяжелые условия, благодаря своей крепостной зависимости от учебных учреждений, и если мы теперя в годовщину 19 февраля с жутким чувством тали воспоминания о том, как баре помыв своими крепостными художниками и заставили их красить заборы, то может быть с таким жутким чувством наши потомки через пятьдесят лет будут читать воспоминания о той учебной барщине, которую отбывали Менделеевы, Столетовы и ныне здравствующие крупные русские ученые, чтобы только получить право производить свои ученые работы, чтобы оплатить возможность прославить Россию своими открытиями»²⁶.

В этих тяжелых условиях Лебедев вел свои исторические исследования, показавшие давление света на газы. К. А. Тимирязев рассказывает²⁷, что Лебедев, измученный университетской работой по требованию врачей уехал в Швейцарию. По дороге он заехал в Гейдельбергскую обсерваторию Вольфа. Последний говорил Лебедеву, что астрономы всего мира ждут от него окончательного решения вопроса о давлении света на газы и связанной с этим проблемы кометных хвостов. «На следующий день, забыв про необходимые отдых и предписание врачей, он вместо того, чтобы продолжать свой путь на юг, поворачивает на север, в душную, пыльную Москву. Дни и ночи, месяцы и годы кипит работа, и в декабре 1909 года Лебедев выступает перед московским съездом естествоиспытателей со своей работой «О давлении света на газы», в которой он превзошел себя самого в своем экспериментальном искусстве».

Главным открытием Лебедева было экспериментальное доказательство давления световых лучей на твердые тела. В своей предсмертной неоконченной статье «Давление света», написанной летом 1911 г.²⁸, Лебедев дает блестящий исторический анализ развития учения о световом давлении. Впервые представление о давлении лучей было высказано Кеплером. В XVII в. это объясняли непосредственным воздействием световых частичек в духе ньютоновской оптики. Опытные данные, которые приводились тогда, были достаточно фантастичными. В 1696 г. Гарзюкер утверждал, что Дунай течет медленнее утром, когда солнечные лучи направлены против течения, и быстрее вечером, когда они подталкивают воды реки вниз. В середине XVIII в. де-Меран и дю-Фэ изготовили горизонтальное железное колесико с вертикальными легкими крыльшками. Они направляли пучок света на крыльшки, и колесо вращалось (1754). Но де-

²⁶ Там же, стр. 352—353.

²⁷ К. А. Тимирязев, Наука и демократия. Стр. 44—45. Л. 1926.

²⁸ Сборник «Новые идеи в физике» IV. 1912 г.; Сочинения, стр. 331—408.

²³ П. Н. Лебедев, Сочинения, стр. XIII.

²⁴ Там же, стр. 27—32.

²⁵ Там же, стр. 373—374.

и дю-Фэ с удивительным экспериментальным чутьем поняли, что в данном случае действует неравномерное нагревание воздуха. В начале XIX в. к тому же результату пришел Фрель, прикреплявший легкие крылышки к подвижной магнитной стрелке (1823). Очень важные опыты проделал в 1870 г. Крукс, но и здесь, как выяснилось, действовали молекулы газа, оставшегося в приборе.

Между тем световое давление неизбежно вытекало из новой теории света. Максвелл не только теоретически вывел световое давление, но и вычислил его величину. Лебедев взялся за экспериментальное доказательство этой теории. Ему удалось то, что не удавалось предшественникам. Он направил лучи вольтовой дуги на легкие крылышки, подвешенные на нити, и по закручиванию нити судил о силе светового давления. Кельвин ряд остроумнейших деталей прибора устранил все посторонние влияния, помешавшие предшественникам Лебедева. Теория Максвелла получила полное экспериментальное подтверждение.

Труднее было устранить «посторонние влияния» общественных условий, мешавших его работе. Больше всего мешало П. Н. отсутствие специальной исследовательской лаборатории, в результате чего он не мог целиком отдаться экспериментам. Измученный педагогической работой и экзаменами, Лебедев заболел, и когда тонкая нить — самая ответственная часть прибора — случайно порвалась в разгаре опытов, он был настолько слаб, что не мог изготовить новой и опубликовать результаты опытов, не считая их полностью законченными.

Это классическое исследование вызвало живой отклик во всем мире. Значение эксперимента определил Кельвин в разговоре с К. А. Тимирязевым²⁹: «Вы может быть знаете, — говорил он, — что я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, а вот ваш Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами». Дальнейшие работы Лебедева были посвящены, главным образом, упомянутым выше исследованиям давления света на газы и некоторым вопросам магнетизма и электричества. В его лаборатории вырастала целая группа талантливых русских физиков. Но события 1911 г. лишили Лебедева и той скромной лаборатории, которую он имел в университете.

В начале 1911 г. в Московском университете происходили студенческие волнения. В аудиторию была введена полиция. Протест университета окончился увольнением ректора А. А. Мануилова и его помощников — М. А. Менсбира и П. А. Минова. В знак протеста 124 профессора и доцента ушли из университета. Среди них были Н. А. Умов, П. Н. Сакулин, Е. Н. Трубецкой, И. А. Кистяковский, В. К. Млодзеевский, В. М. Вернадский, С. А. Чаплыгин, Д. М. Петрушевский, А. А. Эйхенвальд, А. А. Кизеветтер, С. С. Наметкин, Н. Д. Зелинский и другие. Были среди них и К. А. Тимирязев с П. Н. Лебедевым. Кассо заявил, что он пошлет несколько десятков моло-

дых людей за границу, где они вдалеке от родины станут законопослушными профессорами и заменят ушедших. В этом выразилось характерное для царизма стремление отдалить науку от народа и раболепие перед капиталистическим Западом.

По словам К. А. Тимирязева³⁰, «Московский университет сделал усилие, что бы устоять от напора мутной волны повального раболепия, от которой — еще немного — и может захлебнуться совесть целого народа».

Однако для некоторых профессоров уход из университета был этапом политической карьеры. Для кадетов уход был эффективным приемом в их мелкой торговле с царизмом. Лебедев находился в другом положении.

Он действительно жертвовал всем во имя чести и достоинства ученого.

«Не был он из тех, кто при таких условиях с барышом уходит в практическую жизнь, — для него жизнь без науки не имела *«raison d'être»*. Знал он также, что своим уходом он лишает возможности продолжать научный труд и своих учеников. В полном цвете лет он не уносил с собой и права на пенсию, не мог иметь он и каких-нибудь сбережений, так как никогда не пользовался процветавшими вокруг него баснословными гонорами и совместительством. Он терял все: возможность продолжать научную деятельность сам и в трудах своих учеников, терял просто средства для существования своего и своей семьи»³¹.

По почину К. А. Тимирязева в Москве, в Мертвом переулке, в доме № 20, была организована на общественные средства лаборатория Лебедева, а затем также на общественные средства был построен Московский физический институт. Но Лебедеву не пришлось в нем работать. События 1911 г. роковым образом отразились на его здоровье. Участились сердечные припадки. 14 марта 1912 г. П. Н. Лебедев скончался в Москве, в том самом доме, где помещалась его лаборатория. Он умер в расцвете творческих сил, подобно сорокавосемилетнему Максвеллу и тридцатишестилетнему Герцу. Его убили реакционные силы старой России.

«Волна столыпинского «успокоения» докатилась до Московского университета и унесла Лебедева на вечный покой», — писал К. А. Тимирязев в некрологе, посвященном Лебедеву. «Эта новая жертва, — продолжал он дальше, — снова и снова приводит на память невольный крик, когда-то вырвавшийся из наболевшей груди Пушкина — крик отчаяния, крик проклятия родившей его стране: «Угораздило же меня с умом и сердцем родиться в России»... «Успокоили Лебедева, успокоили Московский Университет», с горечью пишет К. А. и заканчивает некролог прекрасными гневными и пророческими словами... «страна, видевшая одно возрождение, доживет до второго, когда перевес нравственных сил окажется на стороне «невольников чести», каким был Лебедев. Тогда и только тогда людям «с умом и сердцем» откроется, наконец, возмож-

ность жить в России, а не только родиться в ней, — чтобы с разбитым сердцем умирать»³².

* *

Учение об электричестве и электротехника на каждом этапе своего развития находили в России такой отклик, который имел значение для всего естествознания. На опыты Франклина откликнулся Ломоносов своей теорией атмосферного электричества. Открытие Вольты было разработано В. Петровым. Творчеству Фарадея соответствуют открытия Якоби и Ленца. Наконец,

³² Там же, стр. 51—52.

теория Максвелла и опыты Герца вызвали в русской почве Попова и Лебедева.

В конце XIX в. русская наука оказалась ареной событий всемирно-исторического значения. Появились работы Ленина. Уже в первых своих сочинениях Ленин заинтересовался значением электричества. Позже, в 1908—1909 гг. Ленин дал гениальное обобщение нового учения об электричестве в «Материализме и эмпириокритицизме». Наконец, победоносная социалистическая революция осуществилась под руководством Ленина и Сталина лучшие мечты человечества. Плановая электрификация страны советов явилась могучим фактором социализма. Началась советская эпоха электротехнической мысли.

ОТКЛИКИ НА СТАТЬИ В „ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ“

ПОЛНАЯ И РАЗДЕЛЬНЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ ОБМОТКОВ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ УЧЕТЕ НАСЫЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

В № 23 за 1936 г. журнала «Электричество» была помещена в порядке обсуждения содержательная статья инж. Е. Г. Марквардт, рассматривающая рассеяние в трансформаторах с концентрическими обмотками. Статья вызвала ряд помещенных в том же номере журнала возражений со стороны проф. Г. Н. Петрова. Основные моменты дискуссии связаны со следующими вопросами:

1. Какой схемой расположения обмоток следует пользоваться для расчета не только полной индуктивности рассеяния трансформатора, но и ее распределения между первичной и вторичной обмоткой?

2. Каково влияние насыщения магнитопровода на явление рассеяния?

Первый вопрос относится к расчету рассеяния без учета влияния насыщения, и мы его рассмотрим в первую очередь. Это тем более удобно, что результаты обсуждения его необходимы нам для анализа влияния насыщения железного сердечника, что является основным в нашей статье.

Имея в виду, что понятие рассеяния возможно определить различно, важно отметить, что оба автора исходят из определения рассеяния по Роговскому. Принимается, что поле рассеяния двухобмоточного трансформатора — это то поле, которое образуется при равенстве нулю суммы ампервитков обеих обмоток и что потокосцепление каждой из обмоток определяет ее раздельную индуктивность рассеяния. Очевидно, что если только принять возможным пользование принципом суперпозиции полей, то такое определение индуктивностей рассеяния является совершенно однозначным и принципиально не оставляет места для дискуссии. Во всех случаях, когда поле может быть точно рассчитано, с той же точностью могут быть определены и индуктивности рассеяния. Стало быть первый из двух вопросов, упомянутых выше, касается не столько принципов теории рассеяния, сколько возможности применения тех или других приближенных методов расчета.

К этому мы и перейдем.

Предварительно покажем, что совершенно разные степени приближения необходимы при расчете полной и раздельных индуктивностей рассеяния.

Оба упомянутых выше автора, не входя в физическое истолкование этого явления, отмечают почти совершенную независимость суммарной индуктивности рассеяния двух обмоток от конфигурации магнитопровода. Действительно, экспериментальные данные, сообщаемые Е. Г. Марквардтом, показывают, что индуктивность рассеяния

железного сердечника очень мало влияет на величину суммарной индуктивности. С другой стороны, расчет¹ произведенный для других крайних условий, именно, когда принято, что обмотка расположена целиком в кольцевом цилиндрическом поясе, образованном в железе с бесконечной магнитной проницаемостью, также приводит к результатам, совпадающим с опытом для обычного трансформатора.

Каково физическое объяснение этого обстоятельства?

Необходимо заметить, что суммарная индуктивность рассеяния, определенная по Роговскому, может быть выведена как энергетический коэффициент:

$$L_s = \frac{2W_\mu}{I^2},$$

где $W_\mu = \int \frac{BH}{2} dv$ — энергия магнитного поля,

распределенная во всем пространстве. Однако поле, образованное двумя близкими токами разного направления затухает в пространстве очень быстро; поэтому оказывается достаточным с большой степенью приближения распространить область интегрирования только на пространство, непосредственно занятое обмоткой или прилегающее к ней. Основную роль при этом играет участок поля между обмотками, где поле наиболее интенсивно. В частности, пространство, занятое железом, вследствие его большой магнитной проницаемости может совершенно не приниматься во внимание, если только силовые линии не замыкаются в нем целиком.

Мы заключаем, что при расчете суммарной индуктивности рассеяния трансформатора расположение железа имеет небольшое значение и его можно выбрать любым, лишь бы при этом не очень сильно искажалось поле в непосредственной близости от обмотки.

Если проследить все известные теоретические расчеты в этой области, то можно убедиться, что в сущности роль железа в этих расчетах сводится к получению удобных граничных условий, облегчающих рассмотрение поля.

Таким образом мы видим, что для расчета суммарной индуктивности рассеяния можно ограничиться той же

¹ См. В. А. Роговский, «Электричество», 1936, № 23, стр. 114. Inductance due aux fuites magnétiques dans les transformateurs à bobines cylindriques, Revue de l'électricité, 1936, № 23, стр. 114.

енью приближения, при которой определяется достаточно точно поле вблизи обмоток.

Можно также прийти к выводу, что для такого расчета динаково пригодны и плоскопараллельная и плоскоэллиптическая схемы, так как влияние кривизны обмотки называется только на расстояниях, значительных по сравнению с радиусом.

Перейдем теперь к раздельным индуктивностям рассеяния.

Для их определения энергетические соотношения мало пригодны. Чтобы определить потокоцепления каждой из обмоток в отдельности, нельзя также ограничиться изучением поля только в непосредственной близости от обмоток. Для изучения раздельных потокоцеплений необходимо изучение геометрической структуры поля во всем пространстве, с тем, чтобы определить характер замыкания силовых линий.

С этой точки зрения изучение поля в железе трансформатора имеет основное значение, так как вследствие большой магнитной проницаемости оно является направляющим элементом для магнитного потока. Поэтому та степень приближения при расчете, которая удовлетворяет нас при определении суммарной индуктивности, недостаточна для определения раздельных индуктивностей.

Высказанные соображения не позволяют нам согласиться с мнением проф. Г. Н. Петрова, что можно, исходя из предложенной в его статье плоскопараллельной схемы рис. 1, определить раздельное поле рассеяния обмоток.

Также неправильно, что для учета влияния одной части обмотки на другую необходимо лишь ввести в расчет некоторую конечную магнитную проницаемость — насыщение сердечника.

Высказанные нами соображения и расчет показывают, что для определения раздельных потоков рассеяния нельзя произвольно изменять конфигурацию магнитопровода. Приблизительные подсчеты показывают, что плоскопараллельная схема рис. 2 должна дать значительно более близкий к действительным условиям трансформатора результат, чем схема рис. 1.

Следует отметить, что если на схеме рис. 1 определять влияние одной пары шин на поле вблизи другой пары, то при еще не очень больших значениях магнитной проницаемости железа оно мало ощутимо.

До сих пор мы исходили из определения рассеяния по Роговскому, и, как мы видим, никаких имеющих принципиальное значение затруднений для расчета индуктивности рассеяния при этом не встречается.

Положение резко изменяется, если учесть явление насыщения железа.

Вопрос о влиянии насыщения железа обоими авторами неправильно рассматривается как вопрос лишь о той или другой величине коэффициента магнитной проницаемости, которую необходимо ввести в расчет. Мы сейчас увидим, что обстоятельства здесь значительно более сложны. Возникает ряд принципиальных затруднений, обойти которые, ставшая на базе теории Роговского, нельзя.

Для определения суммарной индуктивности рассеяния эти затруднения несущественны, так как поле вне железа мало зависит от насыщения последнего. Зато поле внутри железа должно находиться в значительной зависимости от насыщения. Как было ранее указано, распределение индуктивности между обмотками в основном определяется именно полем внутри железа.

Вся картина поля в железе и, следовательно, распределение потокоцепления между обмотками не могут оставаться неизменными при разных насыщениях. Здесь дело не в абсолютном значении коэффициента магнитной проницаемости, а в свойствах среды с нелинейной характеристикой. По отношению к потоку рассеяния среда перестает быть изотропной. Если перейти к грубой терминологии и рассматривать раздельные потоки рассеяния, как разветвления одного общего потока, то в течение периода может как бы происходить изменение отношения магнитного сопротивления ветвей.

Само определение раздельных индуктивностей рассеяния по Роговскому становится непригодным.

В своей работе, посвященной вопросам рассеяния³, мы указывали на возможность обобщить понятие рассеяния

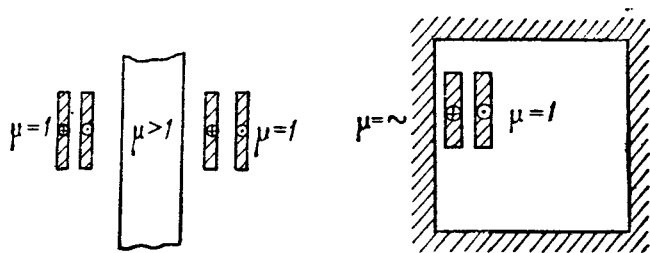


Рис. 1

Рис. 2

таким образом, чтобы оно было пригодно для сред с переменной проницаемостью, а в случае постоянной проницаемости совпадало бы с определением Роговского.

По нашему определению суммарная э. д. с. рассеяния имеет мгновенное значение

$$I_s' = \frac{d(\psi_1' - \psi_2')}{dt} = - \frac{\partial}{\partial i_1'} \psi_1' - \psi_2' \frac{di_1'}{dt} - \frac{\partial}{\partial i_2'} (\psi_1' - \psi_2') \frac{di_2'}{dt}.$$

Здесь ψ_1' и ψ_2' — потокоцепления обеих обмоток, приведенные к одинаковому числу витков, а i_1' и i_2' — приведенные значения токов в обмотке.

Два слагаемых правой части соответствуют раздельным э. д. с. рассеяния первичной и вторичной обмотки.

Раздельные индуктивности рассеяния

$$L'_{s1} = \frac{\partial(\psi_1' - \psi_2')}{\partial i_1'};$$

$$L'_{s2} = \frac{\partial(\psi_2' - \psi_1')}{\partial i_2'}.$$

для сред, в которых действителен принцип суперпозиции, совпадают с индуктивностями, определяемыми по Роговскому. Для сред с переменной проницаемостью они должны быть определены из их динамических характеристик.

Можно усмотреть, что введенные нами раздельные э. д. с. рассеяния — это те э. д. с., которые наводятся в каждой из обмоток, когда при всех изменениях мгновенных значений тока сумма ампервитков в обеих обмотках равна нулю. Таким образом исходим в своем определении из э. д. с., а не как это делается обычно, из потокоцеплений.

В настоящем номере журнала в своей статье Е. Г. Марквардт приводит результаты эксперимента, поставленного для выяснения влияния насыщения железа на явления рассеяния. Опыт этот произведен в целях приближения условий исследования к условиям работы трансформатора при нагрузке.

Рассмотрение этого опыта показывает, что его результаты должны дать как раз те величины индуктивности рассеяния, которые определены нами. Нужно только перейти к эффективным значениям.

Результаты опыта, однако, интересны только в том отношении, что показывают существование влияния явления насыщения на работу трансформатора и тем самым подтверждают практическое значение нашей трактовки вопроса.

Вместе с тем следует отметить, что сама постановка эксперимента обнаруживает, что Е. Г. Марквардт так же, как ранее проф. Г. Н. Петров, оценивает влияние насыщения не в должном направлении, рассматривая его только со стороны учета абсолютного значения магнитной проницаемости.

Как мы выясняем здесь, вопрос значительно более сложен и имеет в действительности принципиальное значение. Для строгой постановки эксперимента необходимо учесть, что хотя суммарный поток рассеяния и синусоидален, частичные потоки рассеяния в общем случае несинусоидальны³. Суммы раздельных индуктивностей обмоток, под-

³ Учитывая это обстоятельство, необходимо было бы проверить результаты тех опытов, которые произведены Е. Г. Марквардтом с помощью вибрационного гальванометра, выделяющего, как известно, основную частоту колебаний. Хотя эти опыты производились без дополнительного насыщения, все же следует установить, нет ли влияния

³ Э. А. Меерович, К вопросу об электромагнитном рассеянии в трансформаторах, Известия Энергетического института им. Г. М. Кржижановского Академии наук СССР, т. III, вып. 1, 1935.

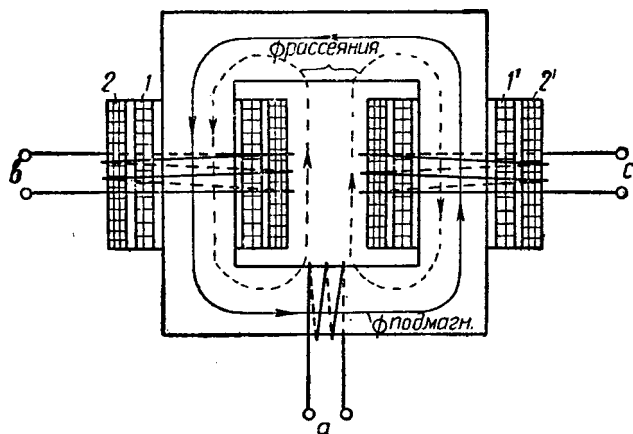


Рис. 3

считанных по величине соответствующих э. д. с., при этом не обязательно должны равняться суммарной индуктивности трансформатора. Получаем значительное расхождение с обычным определением.

Кроме того, с точки зрения приближения к условиям нагрузки следует отметить, что опыт с подмагничиванием постоянным током, произведенный Е. Г. Марквардтом, не показателен. Распределение индуктивности рассеяния в том случае, когда насыщающий поток изменяет направление синхронно с потоком рассеяния, должно оказаться другим, чем в данном опыте.

Некоторые экспериментальные данные. Рассматриваемый нами вопрос о влиянии насыщения до сих пор в литературе не был освещен. Поэтому в электротехнической лаборатории МЭИС были поставлены некоторые эксперименты, результаты которых мы приводим.

Были сняты осциллограммы э. д. с., наведенных потоками рассеяния двух обмоток, расположенных на разных ядрах однофазного трансформатора (рис. 3, обмотка 1—1').

Такое расположение обмоток было выбрано для удобства эксперимента. Хотя обычное расположение обмоток отли-

чается от принятого при опыте, все же принципиальный характер явления не должен претерпеть изменений. Образование потоков рассеяния обмотки 1—1' с одинаковым числом витков были соединены навстречу и подсоединены к источнику переменного тока. Катушки 2—2' служили для подмагничивания сердечника постоянным и переменным током и создавали, таким образом, различные условия насыщения.

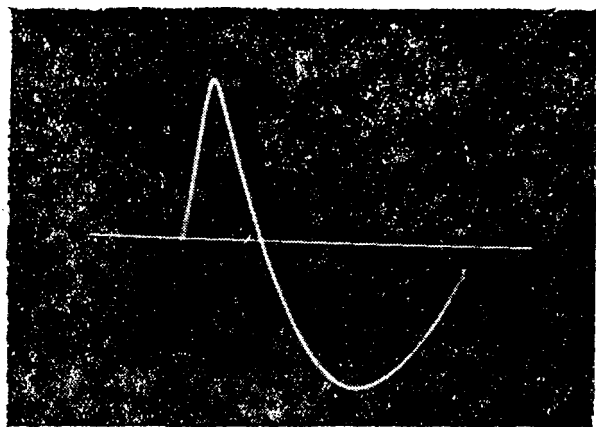
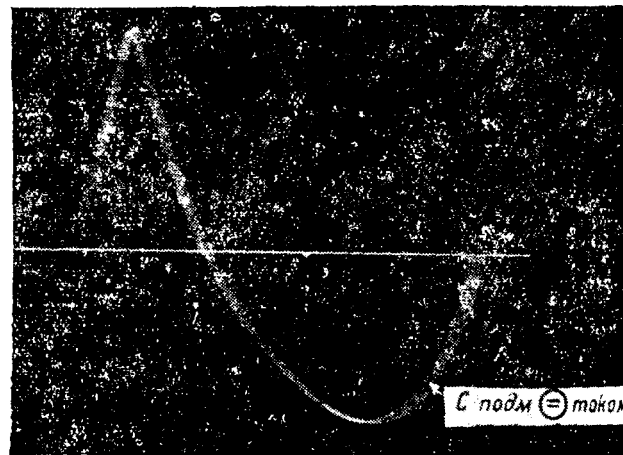
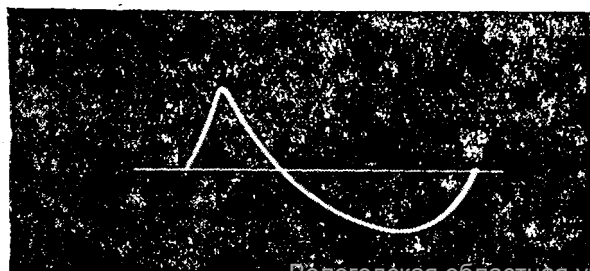
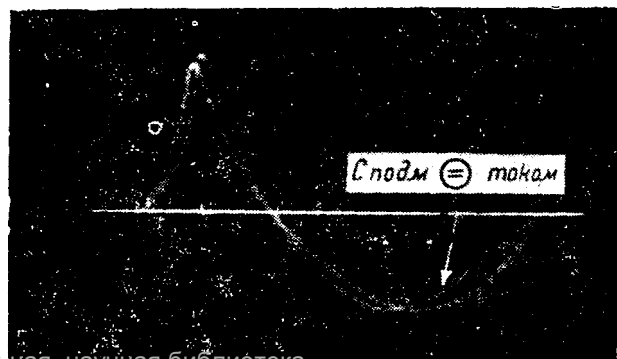
Кривые э. д. с. снимались с помощью катодной трубки, что исключало искажения, вносимые током осциллографирования. Кривые представляют собой э. д. с., наводимые в специально намотанных катушках *a*, *b* и *c* (рис. 3) различных их соединениях.

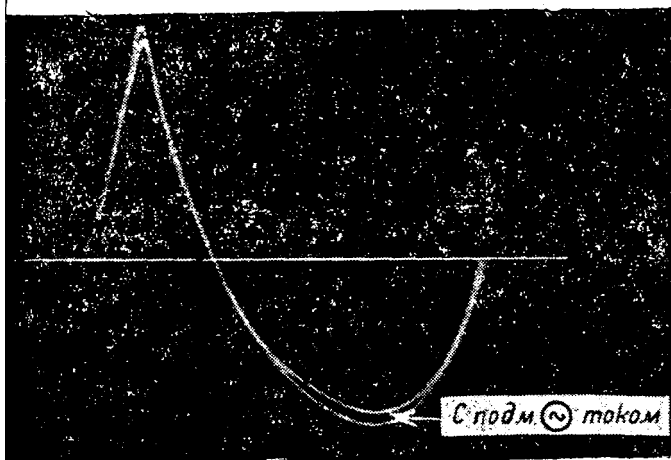
На рис. 4 кривая показывает сумму $E = E_1 + E_2$ э. д. с., наводимых в катушках *b* и *c*, при протекании тока в рассеивающей паре 1—1' и при отсутствии тока в обмотке подмагничивания. Кривая, следовательно, должна характеризовать суммарную э. д. с. рассеяния обеих обмоток. Несинусоидальность этой кривой зависела от источника питания.

На кривой рис. 5 дана э. д. с. E_1 , наводимая в катушке *b* при тех же условиях, что и рис. 4. Кривая характеризует э. д. с., обусловленную отдельным потоком рассеяния обмотки 1. Из этой диаграммы видно, что э. д. с. имеет такую же форму, что и кривая суммарной э. д. с. катушек *b* и *c*.

Рис. 6 иллюстрирует влияние подмагничивания постоянным током, создаваемого с помощью катушек 2—2', суммарную э. д. с. катушек *b* и *c*. Две кривые соответствуют отсутствию и наличию потока подмагничивания почти не различаются между собой.

На рис. 7 показано влияние точно такого же подмагничивания на кривую э. д. с. E_1 катушки *b*. Две кривые диаграммы соответствуют отсутствию и наличию потока подмагничивания. Подмагничивание, как видно, сказывается на форме кривой, взаимно приближая максимальные значения положительной и отрицательной полуволны. Именно это обстоятельство должно иметь место вследствие анизотропии среды по отношению к направлению переменного маг-

Рис. 4. Кривая $E = E_1 + E_2$ Рис. 6. Кривая $E = E_1 + E_2$ Рис. 5. Кривая E_1 Рис. 7. Кривые E_1

Рис. 8. Кривые $E = E_1 + E_2$

нитного потока, налагающегося на постоянный магнитный поток. Кривая рис. 8 была снята при встречном включении катушек b и c ($E_1 + E_2$), и при подмагничивании переменным током и без него. Подмагничивание переменным током так же, как и раньше постоянным током мало повлияло на кривую суммарной э. д. с.

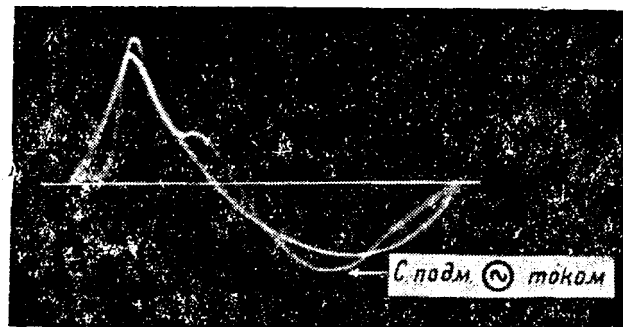
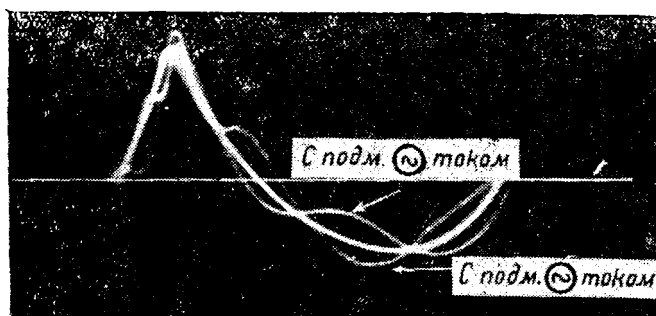
Кривые рис. 9 сняты при встречном включении катушек a и b . В катушке a создавалась лишь э. д. с. переменного потока подмагничивания. Потоки рассеяния обмоток $1-1'$ вследствие симметричного расположения не наводили в ней э. д. с. Это обстоятельство было предварительно проверено.

Так как катушки a и b , имеющие одинаковое число витков, при осциллографировании были соединены на встречку, — э. д. с., индуцированная потоком подмагничивания в обеих катушках, взаимно уничтожалась. Кривые характеризуют, таким образом, только э. д. с. E_1 , наводимую в катушке b потоком рассеяния при наличии и отсутствии подмагничивания. В отличие от предыдущей диаграммы мы видим резкое влияние потока подмагничивания.

Наконец, кривые рис. 10 показывают э. д. с. E_1 и E_2 , создаваемые потоком рассеяния в катушках b и c , снятые один раз при наличии подмагничивания переменным током и в другой раз при отсутствии его. Обе последние кривые почти совпадают и проходят посередине между двумя другими кривыми, искаженными благодаря насыщению.

Приведенные кривые дают экспериментальное подтверждение того, что суммарный поток рассеяния, созданный катушками $1-1'$ при их встречном соединении, почти независим от насыщения сердечника (рис. 6 и 8). Потоки рассеяния, пронизывающие каждую из катушек b и c по отдельности, в значительной мере находятся в зависимости от степени насыщения сердечника (рис. 9 и 7). При этом между катушками происходит такое перераспределение потоков, что сумма остается неизменной (рис. 10). Можно считать, что э. д. с., наводимые в катушках, в которых производилось осциллографирование, если пренебречь некоторой неточностью, характеризуют соответствующие э. д. с. рассеяния обмоток $1-1'$. Таким образом кривые подтверждают те наши положения, для проверки которых и были произведены опыты⁴.

⁴ Все приведенные в статье осциллограммы сняты С. Брохисом в электротехнической лаборатории Московского электротехнического института связи.

Рис. 9. Кривая E_1 Рис. 10. Кривые E_1 и E_2

Резюмируя, можно сказать следующее:

1. Суммарная индуктивность рассеяния определяется полем вне железного магнитопровода трансформатора. При ее расчете обычно расположение железного магнитопровода играет подчиненную роль.

2. Распределение индуктивности рассеяния между обмотками в основном зависит от поля в железе, поэтому точка зрения, высказанная в статье проф. Г. И. Петрова, является неверной.

3. Описанные выше опыты так же, как и эксперимент, произведенный Е. Б. Марквардом, подтверждают практическое значение влияния насыщения. Чтобы количественно исследовать это явление, нельзя базироваться на старых определениях, пригодных лишь для случаев, в которых может быть применен принцип суперпозиции. Должно быть введено обобщенное понятие рассеяния, применимое для среды переменной магнитной проницаемости, как это и было нами сделано.

В заключение заметим, что вопрос о влиянии нелинейной характеристики железа на явление рассеяния значительно выходит за рамки дискуссии, в связи с которой наша статья написана. Он приобретает существенное значение для многих вопросов практики и, в частности, для теории измерительных трансформаторов. Наше рассмотрение, нам кажется, позволяет представить в ясном виде явления, влияющие на их работу. Дальнейшие исследования количественного характера в этом направлении, очевидно, совершенно необходимы.

Э. А. Меерович

(Энергетический институт Академии наук СССР)

О РАССЕЙЯНИИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

(Ответ на замечания проф. Петрова¹ и инж. Э. А. Мееровича)

Определение индуктивности рассеяния отдельных обмоток трансформатора имеет большой практический и теоретический интерес. Работа измерительных трансформаторов тока и напряжения или трансформаторов, питающих различного рода выпрямители, зависит от величины реактивного сопротивления каждой обмотки в отдельности.

В моей работе, опубликованной в «Электричестве» № 23 за прошлый год, этот вопрос был впервые освещен с физической стороны более или менее обстоятельно. Основные выводы, к которым приводит эта работа, сводились к следующему.

Полное рассеяние обычной пары симметричных концентрических обмоток определяется, как известно, их геометрическими размерами и взаимным расположением. При этом расчет реактивного сопротивления трансформатора может быть сделан, исходя из плоскопараллельного поля.

В отличие от полного рассеяния распределение рассеяния между обмотками, кроме того, зависит от двух дополнительных факторов: а) формы и размеров магнитопровода, б) взаимного влияния катушек, расположенных на соседних стержнях магнитопровода.

Кроме этих факторов, определяющих распределение рассеяния между обмотками, существуют и другие, однако они не имеют большого значения.

Таковы основные выводы, которые в моей работе обоснованы и подтверждены опытом.

Исходя из этих соображений, в моей работе была между прочим отмечена ошибочность способа расчета проф. Петрова рассеяния отдельных обмоток при концентрическом симметричном расположении. Г. Н. Петров при расчете рассеяния ни одного из указанных факторов не учел и поэтому получил неверные результаты, противоречащие данным опыта.

Прежде чем приступить к разбору замечаний проф. Петрова по поводу моей работы, полезно несколько подробнее осветить характер влияния указанных факторов на распределение рассеяния между обмотками.

1. Роль яра и соседнего сердечника. Опыты, поставленные на катушках различных геометрических размеров, показали, что обычно индуктивности рассеяния двух концентрических симметричных обмоток, расположенных только на одном стержне, примерно одного порядка. Таким образом потоки рассеяния обеих обмоток приблизительно одинаковы.

Однако характер распределения потоков рассеяния в окружающем пространстве около обмоток и в окне совершенно различен. Значительная часть потока рассеяния наружной обмотки проходит через соседний стержень.

Почти весь поток рассеяния в окне трансформатора замыкается через соседний стержень. Наоборот, в остальном пространстве, окружающем трансформатор, поток рассеяния внутренней обмотки несколько больше наружной.

Достаточно затруднить каким-либо способом проход потока рассеяния в соседний стержень, например, располагая на этом стержне короткозамкнутую обмотку с малым активным сопротивлением или удаляя одно ядро, как рассеяние между обмотками резко перераспределится. Опыт показывает, что в этом случае почти все рассеяние ложится на внутреннюю обмотку.

Измерение рассеяния обеих обмоток после удаления одного ядра и при неизменном положении остальных элементов трансформатора показало понижение индуктивности рассеяния наружной обмотки в полтора раза. В табл. 1 приведены измерения на катушках АВ до и после удаления одного ядра².




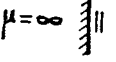
Результаты опыта на этом трансформаторе, как показано в моей работе, приводят к выводу, что 5-10% потока рассеяния наружной катушки замыкаются через соседний сердечник.

Этих соображений достаточно, чтобы прийти к заключению, что на распределение рассеяния имеют решающее значение не только размеры стержней, на которых сидят обе обмотки, но также и присутствие яра и второго стержня магнитопровода.

2. Взаимное влияние обмоток, расположенных на соседних стержнях. Простые соображения и результаты опытов изложенные в моей работе, показывают, что в трансформаторе на распределение рассеяния между обмотками сильно влияет взаимная связь обмоток обоих стержней.

Присутствие на втором стержне такой же пары обмоток вызывает резкое повышение рассеяния наружной обмотки за счет внутренней. В табл. 1 даны значения индуктивности рассеяния обмоток, когда обмотаны оба стержня. Как видно из таблицы, отношение рассеяния обмоток изменяется с 1,09 до 0,38.

Таким образом распределение рассеяния между обмотками в сильной степени зависит от взаимного влияния обмоток соседних стержней.

№	Условия опыта или расчета	$L_s = L_{s1} + L_{s2}$	L_{2s}/L_{1s}	
1		$25,2 = 12 + 13,2$	1,09	Опыт
2		$25,2 = 8,2 + 17,0$	2,07	„
3		$25,5 = 18,5 + 7,0$	0,38	„
4		$25,5 = 4,64 + 20,9$	4,50	Расчет

Примечание. Все индуктивности в мГн.

Эти выводы относятся ко всем нормальным стержневым трансформаторам.

После этих необходимых пояснений к моей работе не трудно показать ошибочность и противоречивость замечаний проф. Петрова по поводу разделения рассеяния между обмотками.

3. В своей работе проф. Петров определяет индуктивности рассеяния концентрических обмоток, пользуясь плоскопараллельной схемой рис. 1. После сделанных выше пояснений легко видеть, что такая схема должна привести к неверному результату. Эта схема не учитывает ни влияния реального магнитопровода ни влияния соседних катушек. Оба эти фактора предопределяют повышение рассеяния наружной обмотки за счет внутренней. Помимо отмеченного, схема рис. 1 предполагает, что осевая длина стержня весьма велика, чего нет на самом деле.

Опыт показывает, что повышение длины сердечника ведет к заметному повышению рассеяния наружной обмотки за счет внутренней. Таким образом все три недостатка схемы рис. 1, суммируясь, дают совершенно неправильную картину распределения рассеяния.

Для иллюстрации сказанного в табл. 1 приведены результаты расчета рассеяния катушек АВ по схеме рис. 1, использованной проф. Петровым. Как видно из таблицы, отношение рассеяния внутренней обмотки к наружной равно 4,5, в то время как в действительности оно равно 0,38. Основываясь на этих неверных положениях, проф. Петров пишет: «Следует отметить чрезвычайно характерную для такого расположения обмоток неравномерность распределения индуктивности. Почти вся индуктивность рассеяния падает на обмотку, ближе расположенную к стальному сердечнику».

Иными словами, проф. Петров приходит к выводу, как раз противоположному действительности.

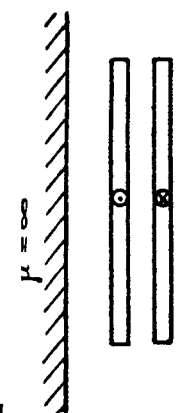


Рис. 1

4. Факт несоответствия между результатами опыта и расчета проф. Петрова может быть объяснен только соображениями, приведенными выше. Однако проф. Петров пытается это обстоятельство объяснить иначе.

В начале своего ответа⁵ после правильного цитирования моей работы, где подымается вопрос об ошибке проф. Петрова, Г. Н. Петров делает неожиданное заключение: «...Эти соображения, приводимые Е. Г. Марквардтом, нельзя признать правильными, так как тот характер распределения индуктивностей между обмотками, который Е. Г. Марквардт приписывает исключительно влиянию кривизны обмоток (поле плоскомеридиальное), может быть легко объяснен и с точки зрения плоскопараллельного поля».

Таким образом выясняется, что по моему мнению причина ошибки проф. Петрова объясняется и с л о ж и т е л ь н о влиянием кривизны, хотя в моей статье по вопросу о влиянии кривизны нет ни одного слова.

Установив таким несложным приемом этот неожиданный для меня факт, проф. Петров далее направил свои усилия на объяснение причины отклонения результатов расчета от опытных данных.

Здесь он стремится доказать, что не кривизна, но принятая им бесконечно-большая магнитная проницаемость железа сердечника привела его к ошибке⁶.

Таким путем Г. Н. Петров сразу делает две ошибки.

Первая ошибка вызвана снова тем же неучетом действительного влияния магнитопровода и соседних катушек.

Вторая ошибка заключается в переоценке роли насыщения магнитопровода, к которой он пришел без достаточного основания.

Распределение рассеяния в некоторой степени зависит от насыщения магнитопровода. Исходя из известного значения этого распределения при $\mu = 1$ и $\mu = \infty$, проф. Петров, «интерполируя» (и при этом не имея представления о тех значениях μ , которые имели место в моих опытах), делает следующее голословное заключение: «Приведенный пример показывает, что, рассматривая поле плоскопараллельным, мы можем независимо от кривизны обмоток получить тот характер перераспределения индуктивности между обмотками, какое Е. Г. Марквардт наблюдал в опубликованных опытах».

Проф. Петров указывает далее, что это влияние магнитной проницаемости железа подтверждается опытными данными. К сожалению, проф. Петров не приводит результатов этих опытов.

Чтобы восполнить этот пробел, нами был поставлен опыт для определения влияния насыщения на распределение рассеяния. Для этого на один стержень магнитопровода были посажены две концентрические обмотки с обычным соотношением геометрических размеров, включенные навстречу друг другу. Обе обмотки имели одинаковое число витков. Для произвольного изменения насыщения магнитопровода через третью обмотку, посаженную на другой стержень, пропускался постоянный ток. Чтобы переменный ток, наводимый полем рассеяния в цепи постоянного тока, свести к возможному минимуму и этим уничтожить его нежелатель-

ное влияние, в эту цепь было включено значительное реактивное сопротивление. Определение индуктивностей рассеяния производилось путем измерения падения напряжения на обеих обмотках при обтекании их переменным током.

Чтобы не вносить искажений при измерении напряжения, в опытах был использован электростатический вольтметр, требующий чрезвычайно малую измерительную мощность.

Опыт показал, что постепенное повышение насыщения до индукции в 135 0 Г повысило индуктивность рассеяния наружной обмотки и понизило рассеяние внутренней обмотки в среднем до 20% от их первоначального значения, которое они имели при отсутствии постоянного тока⁷.

Таким образом результаты опыта не подтверждают, что влияние насыщения, как предполагает проф. Петров, может объяснить его ошибку.

Наоборот, следует отметить, что насыщение магнитопровода, которое имеет место при нагрузке трансформатора, в общем действует в ту же сторону, что и другие факторы, которых не учитывает проф. Петров.

Резюмируя все сказанное, можно, следовательно, притти, к выводу, что для правильного расчета распределения индуктивности между обмотками трансформатора следует иметь в виду не только влияние стержня, на котором сидят катушки, но и целый ряд других факторов. Проф. Петров при расчете индуктивностей рассеяния обмоток исходил из упрощенной плоскопараллельной схемы, ни в какой степени не отражающей характера распределения поля рассеяния во внешнем пространстве около обмоток, и поэтому пришел к ошибочным результатам.

Остановимся теперь на интересной работе Э. А. Мееровича, опубликованной в настоящем номере. В первой части своих замечаний Э. А. Меерович касается вопросов распределения рассеяния между обмотками без учета влияния ферромагнитных свойств магнитопровода. В этой части Э. А. Меерович приходит к тем же выводам, которые изложены в моей работе.

Во второй части своих замечаний Э. А. Меерович рассматривает ряд вопросов, связанных с влиянием ферромагнитных свойств магнитопровода на распределение рассеяния между обмотками. Здесь автор приходит к ряду выводов, которые по нашему мнению недостаточно обоснованы.

Перейдем прежде всего к методу определения рассеяния в случае ферромагнитной среды.

В простом случае среды с постоянной магнитной проницаемостью полные потоки двух магнитно связанных контуров имеют вид:

$$\begin{cases} \Phi_1 = L_1 I_1 + M_{12} I_2; \\ \Phi_2 = L_2 I_2 + M_{21} I_1. \end{cases} \quad (1)$$

Оба выражения приводятся чисто формальным путем к следующему виду:

$$\begin{cases} \Phi_1 = (L_1 - M_{21}) I_1 + M_{21} I_1 + M_{12} I_2; \\ \Phi_2 = (L_2 - M_{12}) I_2 + M_{21} I_1 + M_{12} I_2. \end{cases} \quad (2)$$

В правой части обоих равенств первые слагаемые зависят только от токов с ответствующих контуров, вторые слагаемые равны друг другу. Поэтому потоки рассеяния определяются как

$$\begin{cases} \Phi_{1s} = (L_1 - M_{21}) I_1; \\ \Phi_{2s} = (L_2 - M_{12}) I_2. \end{cases} \quad (3)$$

Следовательно, индуктивности рассеяния будут равны

$$\left. \begin{aligned} L_{1s} &= \frac{\Phi_{1s}}{I_1}; \\ L_{2s} &= \frac{\Phi_{2s}}{I_2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Это простое определение индуктивности рассеяния представляет частный случай определения по Роговскому, когда коэффициент трансформации равен единице. Электродвижущие силы рассеяния в этом случае будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} e_{s1} &= -L_{1s} \frac{dI_1}{dt}; \\ e_{s2} &= -L_{2s} \frac{dI_2}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

⁵ «Электричество» № 23, 1936, стр. 31.

⁶ Учитывая сложный характер распределения поля, можно предположить, что радиусы кривизны должны иметь также некоторое влияние.

⁷ Описанный опыт проводился совместно с Б. М. Вишняковым.

В своей работе Э. А. Меерович приходит к неправильному выводу, что этот метод определения рассеяния неприемлем для случая сред с ферромагнитными свойствами и поэтому следует перейти к новому более общему методу определения рассеяния.

Для того чтобы сделать ясной сущность поднятого вопроса, рассмотрим сначала более простой случай одной катушки с железом.

Уже при определении индуктивности в этом случае приходится столкнуться с неопределенностью. Индуктивность катушки с железом может быть определена тремя различными способами, именно как

$$L' = \frac{\Phi}{I}; \quad L'' = \frac{d\Phi}{dI}; \quad L''' = \frac{2U_m}{I^2}, \quad (6)$$

где U_m — магнитная энергия катушки при токе I и соответствующем этому току потоке Φ .

Если в катушке железа нет, то все три определения равны друг другу. Для катушки с железом все три определения дают индуктивности, изменяющиеся с изменением тока и при этом не равные друг другу ($L' \neq L'' \neq L'''$). Каждый из этих методов определения индуктивности при правильном применении дает правильные результаты, и поэтому вопрос выбора того или другого выражения индуктивности катушки определяется только удобствами в зависимости от методов решения и свойств исследуемого вопроса.

Мнение, что второе определение индуктивности (в дифференциальной форме) представляет наиболее общее определение индуктивности, частным видом которого является, скажем, первое определение, неправильно.

Попытка, например, определить магнитную энергию непосредственно по формуле $\frac{L''I^2}{2}$ привела бы к ошибке, так

как $\frac{L''I^2}{2}$ в данном случае не дает действительной энергии.

При изменении тока во времени э. д. с. катушки, если исходить из первого определения индуктивности, будет определяться по формуле:

$$e = - \frac{dL'I}{dt}.$$

Индуктивность L' будет функцией времени и поэтому остается под знаком дифференциала.

В соответствии с отмеченной неопределенностью определения индуктивности, также неопределенно определение взаимной индуктивности индуктивности рассеяния.

Например, в случае двух магнитно связанных цепей выражение (1) для потоков обеих контуров может быть применено и к ферромагнитной среде. При этом коэффициенты L_1 , L_2 , M_{12} и M_{21} будут зависеть от магнитных свойств среды, которые в свою очередь зависят от величины токов I_1 и I_2 . В этом случае физический смысл величины L_1I_1 будет представлять поток первого контура, возбуждаемый током I_1 , если при этом будут мысленно фиксированы те свойства среды, которые имеют место при одновременном действии токов I_1 и I_2 .

Индуктивности рассеяния попрежнему могут быть определены выражениями (4). Электродвижущие силы рассеяния теперь будут равны:

$$e_{s1} = \frac{dL'_{1s}I_1}{dt}; \quad e_{s2} = \frac{dL'_{2s}I_2}{dt}$$

Таким образом метод определения Роговского остается применимым и в случае ферромагнитной среды.

В соответствии с различными способами определения индуктивности можно определить индуктивности рассеяния и иначе. Например, для двух контуров могут быть написаны следующие два выражения:

$$e_1 = \frac{d\Phi_1}{dt} + I_1R_1;$$

$$e_2 = \frac{d\Phi_2}{dt} + I_2R_2,$$

которые могут быть представлены также и в следующем виде:

$$e_1 = \frac{\partial \Phi_1}{\partial I_1} \frac{dI_1}{dt} + \frac{\partial \Phi_1}{\partial I_2} \frac{dI_2}{dt} + I_1R_1;$$

$$e_2 = \frac{\partial \Phi_2}{\partial I_2} \frac{dI_2}{dt} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial I_1} \frac{dI_1}{dt} + I_2R_2.$$

Простые преобразования позволяют представить эти выражения иначе.

$$e_1 = \left. \frac{\partial (\Phi_1 - \Phi_2)}{\partial I_1} \cdot \frac{dI_1}{dt} + I_1R_1 + \frac{\partial \Phi_1}{\partial I_2} \frac{dI_2}{dt} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial I_1} \cdot \frac{dI_1}{dt} \right\};$$

$$e_2 = \left. \frac{\partial (\Phi_2 - \Phi_1)}{\partial I_2} \cdot \frac{dI_2}{dt} + I_2R_2 + \frac{\partial \Phi_1}{\partial I_2} \cdot \frac{dI_2}{dt} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial I_1} \cdot \frac{dI_1}{dt} \right\};$$

Последние два члена второй части обоих выражений равны друг другу. Два первых члена обоих выражений могут быть приняты за э. д. с. рассеяния

$$e_{1s} = \frac{\partial (\Phi_1 - \Phi_2)}{\partial I_1} \cdot \frac{dI_1}{dt};$$

$$e_{2s} = \frac{\partial (\Phi_2 - \Phi_1)}{\partial I_2} \cdot \frac{dI_2}{dt}$$

и индуктивности рассеяния

$$L''_{1s} = \frac{\partial (\Phi_1 - \Phi_2)}{\partial I_1}; \quad L''_{2s} = \frac{\partial (\Phi_2 - \Phi_1)}{\partial I_2}. \quad (8)$$

К этому определению индуктивностей рассеяния и приходит Э. А. Меерович. Определение индуктивностей рассеяния (8) также следует считать правильным. Однако это обстоятельство не исключает применимости также и метода Роговского. При переходе к среде с постоянной магнитной проницаемостью оба метода дают одинаковые результаты.

Перейдем к вопросу о влиянии насыщения магнитопровода на распределение рассеяния между обмотками. Суммарная индуктивность рассеяния обеих обмоток трансформатора практически не зависит от насыщения магнитопровода и может считаться постоянной величиной. Таким образом, если при опыте встречного включения к обеим обмоткам, имеющим одинаковое число витков, приложено синусоидальное напряжение, то по обмоткам должен проходить практически синусоидальный ток. Опыт показывает, что обе э. д. с. рассеяния в этом случае также синусоидальны, как и их сумма, т. е. индуктивности рассеяния отдельных обмоток также имеют постоянную величину.

Возникает вопрос, какие изменения в распределении рассеяния вносит наложение на это чистое поле рассеяния общего потока, проходящего по магнитопроводу.

Суммарная э. д. с. рассеяния, как уже отмечалось, остается постоянной и почти не изменится. Следовательно, можно ожидать только перераспределения рассеяния между обмотками. Здесь возникает второй вопрос, сведется ли перераспределение только к новым значениям э. д. с. рассеяния отдельных обмоток, но прежней синусоидальной формы или обе э. д. с. рассеяния будут сильно искажены. Иными словами, сведется ли перераспределение рассеяния к новым постоянным значениям индуктивности рассеяния или эти индуктивности также будут периодически меняться во времени. Э. А. Меерович высказывает предположение, что в результате ферромагнитных свойств магнитопровода при появлении общего потока можно ожидать в течение периода приложенного напряжения попеременное сцепление части потока рассеяния то с одной, то с другой обмоткой, вследствие чего э. д. с. рассеяния должны получить искаженную форму. При этом сумма э. д. с. рассеяния останется синусоидальной.

Выясним прежде всего, насколько значительно перераспределение основных гармонических э. д. с. рассеяния. Работы Дая и Бергхана⁸, в которых можно найти подробный анализ влияния насыщения на распределение рассеяния, дают на этот вопрос определенный ответ. Оба автора приходят к выводу, что с изменением общего потока от нуля и до нормальной величины основные гармонические э. д. с. рассеяния изменяются всего на несколько процентов.

Результаты измерения Бергхана основных гармонических э. д. с. рассеяния отдельных обмоток, или, иными словами, постоянных составляющих индуктивностей рассеяния, если они имеют периодический характер, показаны на рис. 2. Измерения производились на трансформаторе тока с просты-

концентрическими обмотками, расположенными только на одном стержне. Кривые рис. 2 представляют большой интерес. Они подтверждают, что индуктивности рассеяния пары обмоток, расположенных только на одном стержне, имеют примерно одинаковые значения. Из рис. 2 также видно, что индуктивности рассеяния мало изменяются с увеличением насыщения (индукция вводилась до 11 500 Г). Экстремум обеих кривых соответствует точке перегиба кривой намагничивания. Следует отметить, однако, что опыты Бергхана производились при очень малом сдвиге фаз между общим потоком и потоками рассеяния. Возможно, что при других фазовых сдвигах результаты опытов были бы несколько иные.

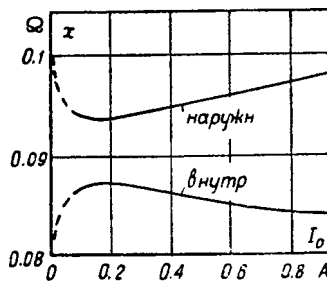


Рис. 2

Установимся теперь на вопросе об искажении э. д. с. рассеяния отдельных обмоток. В своей работе Бергхан приводит две осциллограммы э. д. с. рассеяния одной обмотки для различных насыщений магнитопровода. Обе осциллограммы позволяют считать индуктивности рассеяния постоянной величиной, и следовательно, не подтверждают предположения Э. А. Мееровича.

Таким образом приведенные результаты опытов не подтверждают явления искажения э. д. с. рассеяния⁹. Может быть в слабой форме этот эффект и имеет место. Для выяснения этого обстоятельства необходимо поставить более точные эксперименты. Опыты Э. А. Мееровича, поставленные им для обоснования эффекта искажения э. д. с. рассеяния, нельзя считать убедительными по следующим соображениям.

В опыте Э. А. Мееровича внутренние обмотки разных сердечников, включенные навстречу, создавали поле рассеяния. Наружные обмотки, включенные согласно, создавали общий поток в магнитопроводе. Обмотки *b* и *c*, намотанные на наружные обмотки (рис. 3, и обмотка *a*, расположенная на ядре так, чтобы в ней не наводилась э. д. с. от поля рассеяния, служили для измерения э. д. с. рассеяния.

Для измерения э. д. с. рассеяния правого стержня обмотки *a* и *c* включались навстречу. Аналогичным образом для измерения э. д. с. рассеяния обмотки на другом керне были использованы обмотки *a* и *b*. На рис. 3 схематически показаны потоки Φ_0 и Φ_{01} , образованные наружными обмотками, и потоки рассеяния внутренних обмоток Φ_{1s} и Φ_{2s} .

Легко видеть, что при встречном включении обмоток *a* и *c* результирующая э. д. с. будет определяться потоками

$$(\Phi_0 + \Phi_{01} - \Phi_{1s}) - \Phi_0 = \Phi_{01} - \Phi_{1s}$$

и при встречном включении обмоток *a* и *b*

$$(\Phi_0 + \Phi_{01} + \Phi_{2s}) - \Phi_0 = \Phi_{01} + \Phi_{2s}.$$

Поток Φ_{01} , который в одном случае прибавляется к потоку рассеяния и в другом случае вычитается, замыкается через воздух и поэтому имеет такую же искаженную форму с резко выраженной третьей гармонической, как и намагнивающий ток наружных обмоток. Таким образом, если бы потоки Φ_{1s} и Φ_{2s} были синусоидальны и строго равны друг

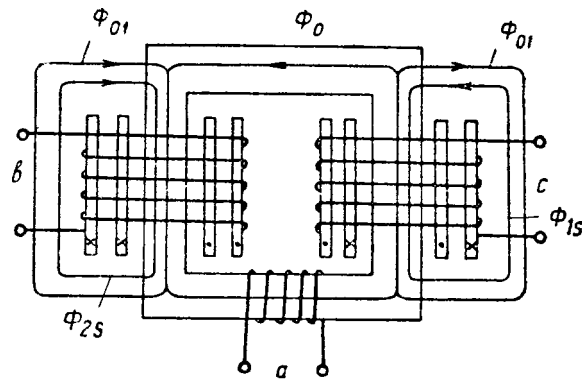


Рис. 3

другу, то и в этом случае все равно в условиях опыта Э. А. Мееровича поток Φ_{01} , накладываясь на потоки рассеяния, вызвал бы те искажения, которые Э. А. Меерович приписал ожидаемому им эффекту.

На рис. 10 работы Э. А. Мееровича мы действительно видим сильное влияние третьей гармонической э. д. с. Э. А. Меерович не учел влияния потока Φ_{01} , величина которого вполне соизмерима с величиной потока рассеяния обмоток, и поэтому неправильно объяснил результаты своего опыта. Таким образом резюмируя свои замечания по поводу статьи Э. А. Мееровича, можно отметить, что:

1. В случае ферромагнитной среды допустимы различные методы определения рассеяния. Метод Роговского, применяемый для сред с постоянной магнитной проницаемостью, может быть применен и для сред с ферромагнитными свойствами.

2. Средние значения индуктивностей рассеяния (если предполагать, что индуктивности рассеяния отдельных обмоток изменяются периодически вместе с током) практически не зависят от насыщения магнитопровода.

3. Предположение об искажении формы э. д. с. рассеяния от насыщения тока опытами не подтверждается. Для ответа на этот вопрос желательно поставить специальные опыты.

Е. Г. Марквардт

ОТ РЕДАКЦИИ

В теории электромагнитного рассеяния существует еще до настоящего времени ряд неясностей, устранение которых имеет важное значение для изучения работы электрических машин. С этой точки зрения возникший на страницах нашего журнала обмен мнений представляет несомненный интерес.

Два основных вопроса рассматриваются нашими авторами. Первый касается методики расчета индуктивностей рассеяния без учета насыщения железа и второй касается роли насыщения железа. Можно считать, что первый вопрос рассмотрен с исчерпывающей полнотой, и в сущности принципиальных расхождений по этому вопросу у авторов нет.

Вопрос об учете влияния насыщения железа на явление рассеяния не является еще достаточно разъясненным, несмотря на весьма интересные экспериментальные данные, полученные т. Мееровичем, и нуждается в дальнейшей разработке и обсуждении.

СИСТЕМА „ДВА ПРОВОДА — ЗЕМЛЯ“¹

Помещенные в журнале «Электричество» № 19, 1936 г., замечания о моей книге, искажая результаты опубликованных работ, могут послужить источником недоразумений.

С целью внесения ясности в затронутые рецензией вопросы считаю необходимым ответить в первую очередь на замечания, относящиеся к положениям принципиального характера. Следует определенно заявить, что здесь бригадой допущено заведомо неправильное освещение положения дел, доказательством чего может послужить следующее:

1. Книга состоит из 8 глав, из которых в 5 главах (I, II, III, VI и VIII) суммированы результаты работ, проведенных мною непосредственно.

2. Для разрешения вопросов, освещенных в остальных трех главах, были привлечены лаборатории научно-исследовательских организаций, производивших исследования согласно разработанным мною программам.

Степень участия этих организаций достаточно подробно отражена в соответствующих разделах книги. Так, например:

а) на стр. 101 и 116 имеются весьма подробные ссылки на работы ЛЭФИ, выдержки из которых включены в главу IV;

б) на стр. 142 отмечено участие в разработке основных видов защиты сотрудников релейной службы Ленэнерго; в) на стр. 234 и 235 имеются подробные указания о произведенных исследованиях ЛЭФИ в области определения влияния линий нового типа на провода связи.

3. После первых удачно проведенных мною в 1932 г. опытов правление Ленэнерго поручило мне разрешение всего комплекса выдвинутых проблемой вопросов, с правом привлечения отдельных лиц и научно-исследовательских организаций. На выделенные для этих работ бризом и пополняемые Главэнерго средства в течение последних четырех лет и были проведены работы, результаты которых опубликованы в моей книге.

Полезно отметить, что в тексте составленных мною договоров с организациями на разрешение отдельных вопросов было предусмотрено обоюдное право опубликования результатов в печати.

Основное участие администрации Электросети Ленэнерго заключалось в напоминании о скорейшем окончании развернутых мною исследований.

Насколько Электросеть интересовалась этим вопросом, можно заключить из того, что система «два провода — земля» в Ленэнерго еще не внедрена.

Переходя к замечаниям, относящимся к содержанию отдельных глав моей книги, необходимо указать следующее:

Из главы I можно видеть, что, вопреки утверждению рецензии, здесь совершенно четко установлены экономические преимущества предложенной мной системы как за счет уменьшения затрат при постройке линий, так и снижении ежегодных эксплуатационных расходов в дальнейшем.

Достаточно обоснованная формула (16) дает возможность определить экономически выгодное падение напряжения в рабочем заземлении, исходя из нагрузочных условий, совершенно независимо от конфигурации сети.

Соответственно, формула (22) устанавливает экономически выгодные пределы применения электропередач нового типа в зависимости от длины участка линии.

Детализировать же отдельные статьи расходов — есть уже дело сметчиков проектных и строительных организаций.

В отношении главы II в рецензии сделана попытка казать два положения:

1. Полное сопротивление одного километра провода земли, определенное экспериментально, не равно $0,0 + j0,355$ ом на километр.

2. Предложенный мною метод электрического разложения непригоден для несимметричных систем, использующих землю в качестве силового провода.

Прежде всего позволю себе формулировать противоположные симметричности.

Трехфазная система считается симметричной при отствии в ней составляющих нулевой и отрицательной последовательностей.

Приведенные на стр. 33 книги векторные диаграммы полной мере удовлетворяют этим требованиям.

Кроме того замечу, что при измерениях на линии Свир Ленинград третий воздушный провод был отключен. Приведенная на рис. 8 диаграмма указывает на отсутствие составляющих отрицательной последовательности в системе в момент проведения опыта.

Полезно отметить, что точность величины $Z = 0,04 + j0,355$ ом на километр подтверждена и другими описанными в книге методами измерений и, следовательно, допускает возможность возникновения сомнений.

Произведенный автором расчет новой системы методов симметричных составляющих пока еще не опровергнут.

Допущенное в рецензии предположение, что наличие асимметрии отражается на постоянных провода — земля есть просто заблуждение.

Глава III. 1. Электротехнические правила и нормы, утвержденные IX ВЭС, исправленные и дополненные в 1933 г., пока являются обязательными для всех, в том числе для системы два провода — земля.

Опубликованные проекты руководящих указаний по заземлениям, например, в журнале «Электричество» № 19 1933 г., еще не утверждены и подвергнуты дополнительному пересмотру.

2. Уточнения ВЭИ в области коэффициентов прикосновения сводятся лишь к практическим указаниям, установленные же нормами предельные значения пока остаются без изменения.

3. Последняя строка табл. 14 (стр. 66 книги) определяет необходимые условия безопасности для выносных огражденных рабочих заземлений, рассмотренных в главе.

Сделанное замечание о полной возможности наблюдения за эксплуатируемыми линиями звучит как злая шутка над моими тщетными усилиями внедрить новый метод электропередачи в систему Электросети Ленэнерго. На годня ни одного километра линий, работающих по системе «два провода — земля» в системе Ленэнерго и А Электросеть имела и имеет все необходимые условия для самого широкого ее внедрения.

Но это не помешало новой системе зарекомендовать себя с самой лучшей стороны в Боровичском районе Боровичская сеть, частично включенная автором в 1933 в постоянную эксплуатацию по системе «два провода — земля», оправдала все возлагаемые на нее надежды. В 1935 г. двухпроводная сеть Борэлектроток уже имеет общую протяженность 430 км и в данное время является основной системой этого района.

Система «два провода — земля» по распоряжению народного комиссара земледелия т. Чернова также широко внедряется в области электрификации сельского хозяйства².

П. С. Орешкин

¹ Ответ гг. Таратынову, Грибанову и Мануйлову, см. «Электричество» № 19, 1936.

² «Электричество» № 1 за 1936 г., инж. Н. А. Сапожников, Электрификация сельского хозяйства СССР, стр.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА ЧАСТОТОЙ 50 Hz ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ИСПЫТАНИИ

В ВЭИ обращались за разъяснениями по вопросу, указанному в заголовке. Вопрос этот имеет значение в связи с разработкой норм импульсных испытаний трансформаторов. Он в основном разобран в статье¹ «Возбуждение пятидесятипериодным напряжением при импульсном испытании», относящейся к проекту норм, опубликованному трансформаторной лабораторией ВЭИ². Дополнительно по этому вопросу считаем необходимым сообщить следующее.

Максимальная амплитуда перенапряжения относительно земли на подводящем проводе определяется искровыми промежутками, расположенными между землей и проводом (рога, промежутки разрядника, в более широком смысле — поверхность фарфора).

Предположим, что отрицательное по знаку перенапряжение возникает в момент положительного максимума U_m напряжения пятидесятипериодной частоты.

До падения волны распределение в обмотке трансформатора определялось прямой 1 рис. 1. Уравнение этой прямой $U' = U_m y$, где y — относительное расстояние от нейтрали в долях длины обмотки. Пусть U_p — пробивное напряжение искрового промежутка. Следовательно, если налагается волна с амплитудой, меньшей $(U_m + U_p)$, то еще не произойдет разряда через промежуток. Таким образом при расчете мы должны допустить возможность наложения импульса с амплитудой $(U_m + U_p)$. Сам по себе этот импульс в первый момент вызвал бы распределение, показанное на рис. 1 пунктиром (кривая 2), характеризующее уравнением:

$$U'' = -(U_m + U_p) \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha},$$

где, как известно, α порядка $10 \div 15$.

Следовательно, истинное суммарное распределение:

$$\begin{cases} t = 0, \\ U = U' + U'' = U_m y - (U_m + U_p) \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha}. \end{cases} \quad (1)$$

Оно представлено схематически в виде кривой 3.

По правилам импульсного испытания генерируемая волна должна иметь такую амплитуду, чтобы испытательный промежуток как раз не перекрывался. Контролем служит то, что волна с амплитудой выше на 5% уже перекрывает промежуток. Если испытания произвести с «максимумом 50-периодного напряжения обратного знака», то будет иметь место картина, описанная выше и отображающая наиболее неблагоприятный случай эксплуатации. Если испытания происходят без 50-периодного возбуждения, то получаем распределение:

$$\begin{cases} t = 0 \\ U = -U_p \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha}. \end{cases} \quad (2)$$

В отношении главной изоляции, расположенной у линейного конца, оба случая равноценны. Достаточно в (1) и (2) положить $y = 1$, как по лучим одно и то же значение, равное U_p .

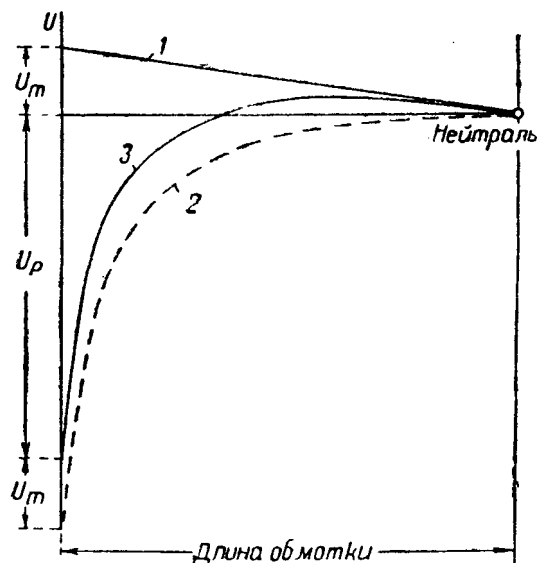


Рис. 1

В процессе перенапряжений первый член $U_m y$ правой части уравнения (1) остается неизменным. Второй член можно для заземленной нейтрали приближенно записать в виде:

$$-(U_m + U_p) \left[y - \left(y - \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha} \right) \cos \omega_1 t \right].$$

Таким образом максимальная огибающая колебаний, соответствующая времени $t = \frac{\pi}{\omega_1}$, определяется кривой:

$$-U_m y + U_m \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha} + U_p \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha} - U_p 2y.$$

При отсутствии 50-периодного возбуждения наше приближенное выражение для процесса колебаний имеет такой вид:

$$-U_p \left[y - \left(y - \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha} \right) \cos \omega_1 t \right],$$

а для огибающей получаем:

$$U_p \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha} - U_p 2y.$$

Следовательно, в первом случае (50-периодное возбуждение) ординаты огибающей выше на величину

$$U_m \left(y - \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha} \right).$$

Относительное превышение:

$$\frac{U_m}{U_p} \left(y - \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha} \right) + 2y + \frac{\text{sh } \alpha y}{\text{sh } \alpha}.$$

¹ «Электричество» № 4, 1936.

² «Электричество» № 5, 1936.

Порядок отношения $\frac{U_m}{U_p}$ $0,2 \div 0,22$ (если U_p — «минимальное импульсное»), и это превышение существенно (на большей части обмотки порядка 10%).

Таким образом в глубине обмотки воздействие на главную изоляцию при 50-периодном возбуждении (и при синхронизации на обратную полярность) выше, чем без возбуждения.

То же имеем в отношении градиентов. Например, в начале обмотки (где градиенты при первоначальном распределении максимальны) в случае 50-периодного возбуждения имеем:

$$U_m - (U_m + U_p) \alpha,$$

при отсутствии его:

$$- U_p \alpha.$$

Относительное превышение:

$$1 + \frac{U_m}{U_p} \cdot \frac{\alpha - 1}{\alpha}.$$

Превышение порядка 200%, а в пересчете 2— μ сек запаздывание³ — около 150%.

Того же порядка будут превышения градиентов и в глубине обмотки.

Таким образом, хотя при применении 50-периодного возбуждения:

1) инсценировка реальных условий в отношении перехода искры в длительную дугу невозможна из-за относительно большого рассеяния испытательных установок⁴,

2) улучшение индикации пробоя сомнительно, все же возбуждение должно применяться в целях воспроизведения наиболее тяжелых условий таких воздействий на изоляцию. Поэтому в проекте норм трансформаторной лаборатории и предусмотрено возбуждение током частоты 50 Hz.

В. А. Карас

³ Наиболее „суровое“ первоначальное распределение имеет место при 2 μ сек запаздывании.

⁴ „Электричество“ № 4, 1936, статья автора.

ХРОНИКА

ИТОГИ ТРЕТЬЕГО ВСЕСОЮЗНОГО СОЦИАЛИСТИЧЕСКОГО СОРЕВНОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И СЕТЕВЫХ РАЙОНОВ¹

Недавно жюри третьего всесоюзного социалистического соревнования электростанций и сетевых районов Союза подвело итоги соревнования за 1936 г. В третий тур социалистического соревнования включились 76 электростанций (61 — системы Главэнерго и 15 — промышленных и коммунальных) и 40 сетевых районов. Жюри признало, что, несмотря на достигнутое электротехническим дальнейшее улучшение работы, все же по важнейшему показателю — «надежность работы» — успехи еще недостаточны (сокращение количества аварий по сравнению с 1935 г. на 25,8% и удельного аварийного недоотпуска энергии на 37%). Отмечено также, что, несмотря на экономию в 1936 г. 420 тыс. т условного топлива и перевыполнение рядом станций задания по экономии топлива, все же в целом в системе Главэнерго в 1936 г. имел место перерасход топлива (фактически 0,624 kg/kWh вместо плановых 0,620).

С другими важнейшими эксплуатационными показателями на предприятиях Главэнерго дело обстоит следующим образом. Простой оборудования в ремонте снижен: по котлам — с 17,18% в 1935 г. до 10,29% в 1936 г., а по турбинам соответственно с 10,93 до 5,61% (по отношению к календарному годовому времени). Число часов использования установленной мощности электростанций поднялось с 4710 в 1935 г. до 5540 в 1936 г.

Несмотря на ввод новых мощностей, расширение сетей и подстанций (что потребовало дополнительно около 5400 чел.), численность персонала в основном производстве уменьшилась с 60 790 в январе 1936 г. до 58 674 в декабре. Улучшение ряда технико-экономических коэффициентов повлияло на такой синтетический показатель, как себестоимость электроэнергии. Себестоимость 1 kWh снизилась до 4,93 коп. (без учета удорожающих факторов). В 1935 г. она равнялась 5,21 коп., а планом 1936 г. была исчислена в 4,95 коп.

В первой группе соревнующихся электростанций (крупные современные станции) первая премия присуждена Шатурской грэс, вторые премии — Дубровской и Каширской грэс. Во второй группе (электростанции средней мощности) первую премию получила Магнитогорская грэс, вто-

рые премии — Харьковская грэс № 2 и Брянская грэс. В третьей группе (электростанции с устаревшим оборудованием) первая премия присуждена 2-й Московской грэс, вторая — Краснодарской грэс. В четвертой группе (теплоэлектроцентрали) первая премия присуждена тэц им. В. Слудской (7-я Лгэс), вторые — Ивановской тэц и тэц Горьковского автозавода им. Молотова. В пятой группе (гидроэлектростанции) лучшими признаны Волховская грэс (первая премия) и Днепрогрэс (вторая премия).

Помимо того, ряд электростанций, хотя и не получивших премий, отмечен особо как добившиеся хороших технико-экономических показателей. К их числу относятся «Красный Октябрь» (5-я Лгэс), грэс им. Классона, грэс им. Красина, Севдонгрэс и Кадырья.

Наряду с этими передовыми электропредприятиями жюри особо отметило недопустимую работу электростанции «Красная звезда», Ивгрэс, Сталинградской грэс, 2-й Лгэс, Криворожской, Ярославской и, в особенности, Куйбышевской, не только не снизивших количества аварий, но даже повысивших их число. Это свидетельствует о не изжитой еще преступной беспечности на ряде важных электростанций.

В основу оценки работы электросетевых районов также, как и при анализе работы электростанций, жюри соревнования положило реализацию решений декабрьского (1935 г.) пленума ЦК ВКП(б) и прежде всего безаварийную работу. Исходя из этого, в первой группе электросетевых районов, включающих крупные сети, жюри постановило премий не присуждать. Работа этих районов не заслуживает премии. Сетевые районы Москвы и Ленинграда, будучи значительно лучше технически оснащены и имея более квалифицированные кадры, по ряду эксплуатационных показателей (снижение аварийности, улучшение релейной защиты и т. д.) уступают многим дериверийным сетевым районам.

Во второй группе электросетевых районов первая премия присуждена Центральному району Донэнерго, а вторая — Шахтинскому району Азчерэнерго. Остальные три премии во второй группе за отсутствием кандидатов, могущих удовлетворить условиям соревнования, никому не присуждены.

Ряд электростанций и сетевых районов, включившихся в третий тур социалистического соревнования, не от-

за большевистской борьбы за развертывание стахановского движения и в дальнейшем выбыл из соревнования, представив даже отчетных материалов. Третий тур социалистического соревнования электростанций и сетей охватил основной массив электрической мощности страны и сыграл положительную роль в улучшении технико-экономических показателей работы электропредприятий. Но этого недостаточно. Растущие требования

к советским энергетикам со стороны всех отраслей народного хозяйства настойчиво говорят о необходимости полностью решить следующие первоочередные задачи: добиться бесперебойной подачи электроэнергии и резко сократить потери в энергохозяйстве. Четвертый тур должен вызвать новый подъем стахановского движения, углубить соревнование между цехами, внутри цехов и между рабочими внутри бригад.

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ МОСКОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Лаборатория электроматериаловедения Московского энергетического института под руководством проф. Ф. Комаркова в настоящее время ведет исследовательскую работу по заданиям промпредприятий, ГУУЗ НКТП по инициативе сотрудников кафедры. Лаборатория в настоящее время представляет достаточно развитую базу для научно-исследовательской работы по электроматериаловедению. Ею охватывается значительный круг вопросов, связанных с изысканием новых изоляционных материалов в соответствии с требованиями промышленности, изучением свойств электроматериалов (проводимости, диэлектрических потерь, емкости, электрической крепости, теплостойкости, огнестойкости и др.), разработкой технологического процесса их изготовления, изучением поведения изоляционных материалов в различных электрических и магнитных полях, борьба с коррозионными явлениями и др. Кроме того, лаборатория электроматериалов МЭИ разработала ряд мероприятий, снижающих высокие потенциалы в связи с накоплением электростатических зарядов на диэлектриках (как причины пожаров и взрывов).

В 1936 г. лабораторией по заданиям ГУУЗ НКТП выполнены следующие работы проблемного и общеметодического порядка: 1) изучение природы диэлектрических потерь; 2) электрокинетические явления в диэлектриках; 3) разрушение масляных эмульсий электрическим способом; 4) разработка люминесцентного метода изучения диэлектриков.

Важнейшие работы, выполненные в 1936 г. по заданиям промышленности, следующие:

1. Исследование коррозионной стойкости электроматериалов для теплоэлектроцентралей.
2. Исследование проводимости и коррозионной стойкости зажимных клемм, применяемых для тросов в электролите.
3. Исследование нагрева, проводимости и коррозионной стойкости биметаллических кабельных наконечников.
4. Исследование гигроскопичности, электропроводности и механической крепости асбоцементных труб с применением различных пропитывающих веществ и лаковых покрытий для выяснения возможности прокладки в них кабеля.
5. Исследование диэлектрических свойств новых сортов шифера и черного мрамора.
6. Разработка способа получения и применения порошковых лаков для конденсаторных выводов.
7. Разработка состава лака из искусственных смол и способа пропитки им полюсных катушек.

8. Разработка способа получения смол из торфяных фенолов.

9. Исследование эмалевых проводов и шнуров.

10. Исследование возникновения электростатических зарядов и мест с высокими потенциалами в цехах резинового производства.

11. Расчет, конструирование и изготовление мощного генератора УКВ для пробы диэлектриков и исследования диэлектрических потерь при высокой частоте.

12. Изготовление и градуировка аппаратов Мартенса для изучения теплостойкости изоляционных материалов.

13. Исследование электропроводности баллонных тканей. Как видно из вышеперечисленной тематики, большая группа работ проделана по исследованию зависимости изменения свойств электроматериалов от внешних влияний производственных условий и характера работы данного материала.

В особую группу из этих работ объединяются исследования по защите от коррозии как весьма интересные и важные, но требующие особой тщательности и глубины проработки.

Другую группу работ составляли работы химико-технологического порядка с параллельно проводимыми электрофизическими исследованиями по заданиям завода «Изолит» и завода им. Лепсе — работы обширные и получившие должное разрешение в лаборатории.

Исследования новых материалов, как, например, шифера, мрамора, эмалевых проводов и шнуров, интересны только в разрезе возможности их технического применения, в методическом смысле исследование представляло только серию обычных стандартных или близких к стандартным испытаний.

Особое место занимают работы по изучению возникновения статического электричества в заводской практике как результат трения различных диэлектриков друг о друга или о проводник и связанное с этим искрообразование как причина взрывов и пожаров в целом ряде предприятий.

Вся работа лаборатории электроматериаловедения пронизана единой идеей — изучения зависимости между структурой материалов и их свойствами.

Лаборатория имеет в настоящее время 12 штатных сотрудников.

В 1936 г. лабораторией сконструированы и находятся в изготовлении установки по исследованию диэлектриков в полях высокой частоты различной мощности и по исследованию магнитных материалов.

С. Г. Яманов

НОВЫЕ КНИГИ

Виккер Д. А., Автоматическое регулирование частоты и активной мощности электрических систем. М.—Л. Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 248 стр. с рис., ц. 5 руб., перепл. 75 коп.

В работе систематизированы методы автоматического регулирования и указаны главнейшие решения, осуществленные в виде опытных установок. При изложении имеются в виду только синхронные турбо- и гидрогенераторы. Книга предназначается для инженеров электрических станций и студентов вузов.

Гаврилов М. А., доц. Автоматизация электрических станций. М.—Л. Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 35 стр. с иллюстр. (Университет физико-химии и энергетики им. акад. Н. Д. Зелинского. Вып. XX), ц. 2 руб.

Изложены методы автоматизации: 1) работы агрегатов станций; 2) устройств для пуска и остановки агрегатов; 3) защитных устройств. В тепловых станциях к этому добавлено автоматическое регулирование котлов, устройство для автоматического пуска турбин и т. п.

Кастерин Н. П., Обобщение основных уравнений аэродинамики и электродинамики. Доклад на особом совещании при Академии наук СССР 9 декабря 1936 г. М. Изд-во Академии наук СССР, 1937, 16 стр., ц. 75 коп.

В задачу доклада входит, не изменяя основ классической механики и физики, построенных на опытных измерениях в первом приближении, искать второе приближение как для уравнений электромагнитного поля, так и для аэродинамики и проверить, не смогут ли эти более общие уравнения обнять всю ту совокупность фактов в области электромагнетизма и аэродинамики, которые твердо установлены опытным путем.

Кузнецов Б. Г., проф., История энергетической техники. Всесоюзный комитет по высшей школе при СНК СССР. Постоянная комиссия по истории техники. М.—Л. Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 912 стр. с иллюстр., ц. 4 р. 35 к., перепл. 1 р. 25 к.

В книге излагаются основные факты из истории электротехники, теплотехники и гидроэнергетики в связи между собой и с развитием народного хозяйства, техники и науки. Показаны исторические предпосылки электрификации. Книга входит в число учебников по истории техники ВКВТО при СНК СССР и рассчитана на студентов старших курсов энергетических вузов.

Линкер А., проф., Электрические измерения. Перевод с 4-го немецк. изд. под ред. проф. А. С. Касаткина. М.—Л. Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 624 стр. с иллюстр., ц. 10 руб., перепл. 2 руб.

В книгу вошли электрические и магнитные измерения, а также измерения переменного тока. Особый раздел посвящен вопросам испытания и исследования электрических машин постоянного тока. В каждом параграфе изложены общие принципы данного измерения. Книга предназначена для инженеров, научных работников и студентов вузов.

Малинин Р., Усилители низкой частоты. 3-е перераб. изд. М. Гос. изд-во по технике связи, 1937, 232 стр. с рис., ц. 4 р. 50 к.

Изложены требования, предъявляемые к усилителям низкой частоты. Приведены сведения о современной промышленной низкочастотной аппаратуре. Значительное место уделено вопросам технической эксплуатации вещательных усилителей и вспомогательного оборудования к ним. Книга издана в качестве руководства для радио-монтеров, киномехаников и др.

Рывкин А. А., Электрическое оборудование подъемно-транспортных механизмов на водном транспорте. Под научн. ред. проф. Н. П. Костромитинова. Учебник для техникумов. Утвержд. Наркомводом. Л., Гострансиздат, 1937, 199 стр. с иллюстр., ц. 3 р. 65 к.

Главное внимание обращено на краны. Первая глава посвящена выбору мощности электродвигателя, механическим характеристикам и свойствам электродвигателей. Затем идут схемы управления крановыми механизмами и крановая электрическая аппаратура для захватных устройств и подъемника. Дано описание трансформаторов, элеваторов и подвесных электрических дорог.

Сиротинский Л. И., проф., Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебника для энергетических вузов. М.—Л. Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 516 стр. с иллюстр., ц. 7 р. 50 к., перепл. 1 р. 50 к.

В книге дается определение понятия перенапряжения и краткие данные об уровнях изоляции. Описано распространение волн вдоль проводов обмоток машин и трансформаторов, перенапряжения атмосферные, коммутационные, дуговые замыкания на землю в системах с изолированной нейтралью и пр.

Соловьев И. И. и Костров М. Ф., Руководство к практическим занятиям в лаборатории релейной защиты. Под общ. ред. проф. В. С. Кулебакина. М. Изд-во Моск. энергетического ин-та им. В. М. Молотова, 1936, 170 стр. с иллюстр., ц. 3 руб.

В книге учтен опыт работы в лаборатории электроаппаратостроения МЭИ и составлено их описание применительно к учебной программе по курсу релейной защиты. Предназначается книга в качестве учебного пособия для студентов вузов.

Франк Ф. и Мизес Р., Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Ч. 2. Перевод с немец. под общ. ред. Л. Э. Гуревича. Л.—М. Главн. ред. общетехнической лит-ры, 1937, 998 стр. с иллюстр., ц. 27 руб., перепл. 2 руб.

Книга содержит подробное изложение методов решения классической математической физики. В изложении Ф. Нётер даны главы, посвященные электростатике, стационарным электрическим токам и квазистационарным токам. В изложении А. Зоммерфель — главы, исследующие сопротивление для переменных токов и скин-эффект, волны вдоль проводов и вопросы беспроволочной телеграфии.

Храмченко В. И. и Загородских С. И., Примеры и задачи по электричеству и магнетизму. Под ред. проф. С. И. Покровского. Л.—М. Главн. ред. общетехнической лит-ры, 1937, 187 стр. с рис., ц. 2 руб., перепл. 75 коп.

В сборнике содержатся задачи, собранные в отделе: 1) электростатика; 2) электрический ток; 3) электричество; 4) магнетизм; 5) электромагнетизм и 6) индукция токов. Перед каждым отделом приводятся основные определения и формулы. Сборник составлен в разрезе программы курса Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина).

Христенко В. А., Курс общей электротехники. Омск, Изд-во «Красное знамя», 1937, 124 стр. с иллюстр. (Томский электромеханический институт инженеров ж.-д. транспорта), ц. 4 руб.

Книга составлена применительно к курсу механических специальностей транспортных вузов.

ВОЧКЕ — ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЛАВИЛЬНАЯ ПЕЧЬ (основные положения). Перевод с немецкого М. Четыркина. Под ред. А. Н. Соколова. Л.—М. ОНТИ, Гл. ред. л-ры по черн. металлургии, 1936, 540 стр. с иллюстр., тир. 2500, ц. 7 р. 80 к., перепл. 1 р. 25 к.

Электрические печи занимают видное место в ряду потребителей электрической энергии современной промышленности. Благодаря быстрому прогрессу советской техники и непрерывному росту внедрения электроплавки их удельное значение все время возрастает. Однако теории электрических печей уделяется недостаточное внимание и почти совершенно отсутствует литература, посвященная этому вопросу.

С этой точки зрения приобретает особый интерес перевод издания такой большой книги, как Вочке — „Электрическая плавильная печь“, изд. ОНТИ, 1936, перевод Четыркина под редакцией А. Н. Соколова, выпущенной тиражом 2500 экземпляров. Книга достаточно объемиста (33³/₄ печатных листа) и включает все вопросы теории электрических печей. Нужно отметить безусловную ценность книги той ее части, где автор пытается связать электротехнические основы теории с технологическими процессами плавки электрической печи, а именно главы: плавильное устройство, коэффициент полезного действия печи. Эти вопросы имеют большое значение для практики, и хотя некоторые опущения автора могут быть оспариваемы, все же он дает интересные и полезные для практики выводы. Но, к сожалению, книга в целом имеет ряд очень существенных недостатков.

Изложение книги страшно запутано и пространно. Автор, разбирая простой вопрос, вводит ряд искусственных понятий („характеризующие числа“), затем начинает производить длинный ряд несложных математических преобразований и таким образом пишет, скажем, по такому вопросу, как теория печи постоянного тока (электрическая цепь, содержащая последовательно соединенные полезное сопротивление и сопротивление потерь), целых 28 страниц, обильно снабдив их графиками. Конечные выражения громоздки и скрывают простые закономерности и физический смысл. Приведем некоторые конечные выражения для важнейших зависимостей, скажем, максимальной полезной мощности печи и соответствующего $\cos \varphi$, и сравним их с формулами, легко выводимыми при пользовании обычными понятиями сопротивлений.

По Вочке максимальная полезная мощность (мы применяем стандартные обозначения)

$$P'_n = \frac{U^2}{2} G_a \frac{G_a - \sqrt{G_a^2 - G_i^2}}{G_i}.$$

Здесь $G_i = \frac{1}{r_n}$ и $G_a = \frac{1}{x}$ („Характеризующие числа“). r_n — активное сопротивление подводки и x — индуктивное сопротивление.

Тогда как эта же мощность может быть представлена без помощи введения „характеризующих чисел“ таким простым выражением:

$$P'_n = \frac{U^2}{2(z_k + r_n)}.$$

Здесь z_k — полное сопротивление подводки.

Аналогично $\cos \varphi$ представляется по Вочке (стр. 47) так:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{G_i}{G_a}\right)^2}}$$

вместо простого

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{r_n}{z_k}}.$$

Недостатком книги является также отсталость некоторых приведенных в книге значений основных параметров от современной практики. Так, на стр. 248, автор указывает фазовые напряжения ферросплавных печей в 35—40 V, тогда как применяемые сейчас в практике имеют 70—80 V и выше. На стр. 247 по графику мощность карбидной печи производительностью 40 t определяется в 7,5 тыс. киловольтампер, тогда как, скажем, в Черноречье даже при совершенно неудовлетворительных трансформаторах такая производительность достигается при 5 тыс. киловольтампер.

В разделе „Теория трехфазной печи с несимметричной подводкой тока“ неверны основные выводы о распределении фазовых мощностей печи (интересующихся подробным изложением автор отсылает к своей предыдущей работе „Мощность трехфазной электрической печи“, где выводы также ошибочны). Там Вочке в своих рассуждениях совершенно неверно отождествляет фазовые мощности трансформатора и системы печь-подводка. Если печь можно рассматривать как работающую звездой, то ее нулевая точка будет смещена по отношению к нулевой точке трансформатора, и мощности фаз трансформатора и печи будут различны. В частном случае (чаще всего встречающемся на практике) при равных токах в печи ошибка Вочке выражается 33 процентами.

Указание автора на стр. 362, что в ферросплавных печах с широким очагом температур свежая шихта должна поступать в зону высоких температур по кратчайшему пути, совершенно неверно. Всегда необходимо добиваться предварительного нагрева и прокаливания шихты, так как при быстром сползании свежей шихты в горячий очаг могут образоваться большие объемы газа, влекущие за собой „выбросы“ горячей шихты из печи, — то, чего справедливо больше всего боятся технологи.

Необходимо остановиться на небрежном и просто неверном изложении в некоторых местах книги выводов, следующих из основ электротехники. Так, в главе „Однофазная печь“ автор замечает, что индуктивность печи Миге может быть изменяема при соответствующем изменении чередования компонентов шихты, так как индуктивность возрастает с увеличением длины пути тока. Каждый грамотный электротехник знает, что индуктивность зависит не столько от длины, сколько от формы пути тока, в частности как раз в указанных печах Миге удлинение токовых линий означает приближение их к кожуху, несущему обратный ток, и соответствует не увеличению, а, наоборот, уменьшению индуктивности печи.

На стр. 375 пинч-эффект определен как результат разрыва жидкого металла, тогда как на самом деле этот разрыв является его следствием.

В книге очень мало места отведено индукционным печам, но и тут изложение не свободно от ошибок. Например, на стр. 425 говорится, что индукционные печи с железным сердечником строятся низкой частоты от 2,5 периодов (пять перемен) и выше, при этом $\cos \varphi$ порядка 0,3—0,5. Работающая же у нас в Союзе печи на нормальной частоте (Кольчугино) — без всяких компенсационных устройств, $\cos \varphi$ достигает 0,7.

Имеется еще много более мелких ошибок в изложении, которые мы здесь не указываем.

Что касается перечня литературы, то странно, что автор не упомянул французских исследователей Бержона, де-Луари и др., раньше его и достаточно успешно начавших работать в области теории электрических печей.

М. А. Ченцов

Oskenden F. Обзор прогресса в области электроизмерительных приборов. JIEE, v. 80, № 482, стр. 190—202, 1937

Материалы

а) *Пластические массы и другие изолирующие материалы.* Использование пластмассы для электроизмерительных приборов небольшого габарита становится все более распространенным явлением; в отношении приборов больших моделей предпочтение отдается дереву, могущему выносить более суровое обращение, чем пластмасса; если последняя удачно используется в приборах с нормальным напряжением и частотой, то ее применение в высокой частоте заставляет желать лучшего. Для амплитудных вольтметров, например, сейчас разрабатываются новые специальные материалы, имеющие весьма низкие диэлектрические потери и могущие быть вообще применены для приборов, это — *calit*, *Tempra S.*, *Frequentite* и т. д.

б) *Материалы для постоянных магнитов.* До 1928 г. для выработки постоянных магнитов использовалась вольфрамовая сталь, но сравнительно низкая коэрцитивная сила последней приводила к тому, что магниты получались слишком длинными по сравнению с их сечением и, таким образом, нельзя было строить приборы малого формата, имеющие большую чувствительность. В 1931 г. введена была сталь с содержанием 35% кобальта. Хотя эта сталь имела более низкий остаточный магнетизм по сравнению с вольфрамовой сталью, но ее большая коэрцитивная сила позволяла сократить размеры магнитов и сконструировать приборы малых размеров, отличающиеся легкостью и чувствительностью.

В 1934 г. был введен еще новый сплав с содержанием никеля, железа, алюминия; имея более низкий остаточный магнетизм, он зато обладает в два раза большей коэрцитивной силой, что дало возможность конструировать наиболее легкие и наиболее чувствительные приборы. В последние два года появился еще другой сплав — никель-железо-алюминий-кобальт, дающий значительное увеличение остаточного магнетизма; еще сейчас продолжают работать в этом направлении.

с) *Материалы с магнитной проницаемостью.* Введение сплава никель-железо для измерительных трансформаторов представляет весьма существенный прогресс; благодаря ему достигнута точность этих трансформаторов, которая до сих пор считалась недостижимой. Устойчивость магнитных свойств этих сплавов приводит к постоянному усилению тенденции применения их для конструирования всяких приборов, имеющих замкнутые или почти замкнутые магнитные цепи. Нужно заметить, что параллельно этому сделан значительный прогресс в производстве трансформаторного железа с минимальными потерями; последнее комбинируется с высокой магнитной проницаемостью его.

Выпрямители

Применение выпрямленных токов для измерительных приборов имеет такие преимущества с точки зрения удобства, простоты и гибкости, что с некоторыми собственными неудобствами таких приборов, дающих скорее среднее, а не среднеквадратичное значение электрических величин, можно примириться. В производстве современных купроксных выпрямителей имеется значительный прогресс, например введение золотого распыления для того, чтобы получить контакт с активной частью оксидного слоя, улучшило их температурные характеристики. Усовершенствована техника получения и монтажа очень малых оксидированных дисков, что дает возможность получать совсем малые выпрямители для токов до 1 мА. Это еще дает и то преимущество, что их собственная емкость так мала, что позволяет рассчитывать приборы, могущие быть применяемыми в высокочастотных цепях порядка 100 кГц.

Конструкции

Как мы видели, преимущества и удобства использования пластмассы для корпусов приборов и новых сплавов для магнитов дают возможность конструировать миниатюрные, но очень точные измерительные приборы. Измерительные приборы 5 X 8,3 см и вес 225 г; это сейчас обычный тип при-

боров, выпускаемых многими приборостроительными фирмами.

В отношении больших приборов, именно регистрирующих, воспользовались высоким демпфирующим моментом, даваемым новейшими магнитами, чтобы устранить массу в приборе в качестве демпфирующей среды. Когда в приборе применяется магнит, он одновременно служит для двух целей, дает рабочий и демпфирующий моменты. Таким образом, обычные изменения демпфирующей постоянной с температурой при использовании масла здесь отпадают. Сейчас некоторыми фирмами реализуются регистрирующие приборы с вращающим моментом в 17 g/cm и потребляемой мощностью в 1 mW. Дальнейшее развитие таких приборов представляет регистрирующий «метер» недавно выпущенный одной английской фирмой.

Электромагнитные приборы, даже самого дешевого типа строятся теперь с системой, состоящей из сплавов известной серии — никель-железо, и точность их так высока, что они могут быть применены для самых точных измерений переменного тока, будучи предварительно проградуированы на постоянном токе. Сейчас некоторые фирмы выпускают приборы динамометрического типа с почти совершенно замкнутой магнитной цепью из надлежаще рассчитанной петли из никель-железа (ферродинамические приборы). Такое устройство дает им большую точность и надежность. Выпускаются такие амперметры, вольтметры и ваттметры, имеющие чрезвычайно низкое потребление мощности. Сейчас сплав никель-железо применяется еще для специальных приборов, так называемых «щипцов», охватывающих провод, в котором надо измерить проходящий в нем ток; показания этих приборов довольно точны.

Высокая степень точности, получаемая приборами, имеющих размеры 7,5 см, дает возможность ввести целый набор нужных для различных испытаний приборов в одном ящике (месскоферы); они даже имеют готовые соединения и стоит только соединить их с испытуемой цепью, чтобы быстро и точно сделать все нужные измерения.

Термические приборы все еще продолжают представлять надлежащий тип для высокочастотных измерений, используемых в радиотехнике и для некоторых медицинских применений. Недавние исследования открывают новые возможности для увеличения точности, получаемой при защите различных термических элементов прибора. Это позволяет использовать приборы для частот, варьирующих от 25 до 100 МГц.

Ничего нового не появилось за последние годы в области приборов для точного измерения коэффициента мощности. Также мало имеется нового в отношении измерительных трансформаторов, но различные лабораторные испытания, требующие широкого диапазона токов, вызвали создание стандартных трансформаторов с большим числом коэффициентов трансформаций в одном приборе, так например, построены трансформаторы, могущие дать диапазон токов от 1 до 600 А и выше. Для трансформаторов тока до 5000 А делаются сейчас особые защиты и применяются сердечники из сплава никель-железо.

Новый аппарат, названный его конструктором емкостным трансформатором, имеет устройство, представляющее комбинацию из емкости, рассчитанной для прямого присоединения к высоковольтной сети, и небольшого трансформатора тока, при помощи которого емкостные токи могут быть измерены низковольтными приборами. Трансформатор так рассчитан, что дает компенсацию фазы и коэффициента трансформации.

Применение купроксных выпрямителей ко всякого рода измерительным приборам чрезвычайно обогатило эту область. Использование выпрямителей в конструкции «прямых» амперметров и вольтметров настолько хорошо известно, что не требует дальнейших подробностей, но можно отметить, что низкое вольтамперное потребление амперметров с выпрямителями, используемых для измерения нескольких миллиампер, привело к значительному прогрессу при расчете специальных амперметров для измерения утечек; эти приборы достаточно чувствительны, чтобы указывать утечку в 0,5 А в линии. Комбинирование чувствительного прибора с выпрямителями дало еще следующий эффект — введение этих приборов в область измерений сопротивлений и изоляции. До этого не было прибора, который мог бы измерять переменные в доли мА, а измерения с приборами...

использовали чрезвычайно громоздкие аккумуляторы сомнительного постоянства.

Спрос радиопромышленности на приборы, при помощи которых можно было бы быстро и просто измерять переменные и постоянные напряжения и токи в довольно широком диапазоне, а также измерить сопротивления в пределах от 10Ω до $M\Omega$, привел к выпуску миниатюрных испытательных аппаратов, включающих небольшой мА выпрямителями. Метод использования чрезвычайно высокой чувствительности микроамперметров, работающих выпрямителями, был применен для измерения гармоник синусоидальных напряжений или токов. Новый прибор рассчитан, чтобы давать параллельный резонанс для выбранной гармоники, повышение напряжения в настроенном контуре измеряется при помощи вольтметра-выпрямителя высоким импедансом. Таким образом общий импеданс прибора для выбранной частоты может достигнуть 5000Ω и вольт для прибора, имеющего полную шкалу в 5 В, импеданс других частот будет немного ниже, именно — около 2000Ω на вольт.

Нужно еще упомянуть о прогрессе в передаче показаний выпрямительных приборов на расстояние. Приборы для этой цели базируются на работе приема переменного тока радиометром, одна катушка которого возбуждается положительной составляющей получаемой волны, а другая — отрицательной составляющей.

Применение фотоэлементов к фотометрированию облегчало быструю техническую калибровку ламп накаливания. Компактность фотоэлемента, используемого в качестве фотометрического указателя, дает возможность получать непосредственно кривую испытываемой лампы.

Л. Г. Брауде

Меры защиты от ледовой нагрузки на линиях электропередачи Силезских горных железных дорог. Elektrische Bahnen, V, 1936

Тяжелая зима 1928/29 г. причинила много вреда линиям электропередачи. На основе анализа имевших место по-

вреждений был принят ряд защитных мер: 1) постройка на особо угрожаемых местах новых линий повышенной надежности; 2) установка электрического подогрева особо неблагоприятных участков Мительштейн — Нидер Зальцбрунн — Гиршберг и 3) ревизия проводов.

Эти меры давали некоторую гарантию от тяжелых аварий, но они недостаточны для обеспечения полной надежности, которая должна быть в работе линии передачи, особенно когда она питает железную дорогу. Поэтому в 1931—1933 гг. были проведены дополнительные меры защиты, сводившиеся к следующему: 1) реконструкция анкерных опор; 2) установка на опорах поворотных консолей; 3) перенос заземляющего троса с верха опоры в плоскость токонесущих проводов; 4) ликвидация многочисленных транспозиций проводов; 5) подогрев линий передач.

Еще в 1920—1921 гг. пришлось заменить жесткие консоли несущих мачт, не рассчитанные на вращение, поворотными консолями. При этом было проведено увеличение горизонтального расстояния между проводами линии передачи и заземляющим тросом, но анкерные опоры были оставлены без изменений. Недостаточно большие расстояния между проводами вели к коротким замыканиям между ними во время штормов и сильных ветров. Поэтому при новых консолях предусмотрено расстояние между проводами и заземляющим тросом в 2,5 м. Естественно, что теперь при обрыве одного провода в результате более длинного плеча получается большее усилие скручивания. Поэтому для усиления опоры она снабжена дополнительными диагоналями.

Ранее при пересечениях линий передачи ж.-д. или других сооружений провода подвешивались друг над другом в вертикальной плоскости, что вело к коротким замыканиям при обрыве, сопровождающемся падением одного провода на другой. Чтобы избежать этого, сейчас провода помещены в одной горизонтальной плоскости.

При реконструкции консолей на несущих опорах в 1923 г. была переделана только часть их, так как тогда существовало мнение, будто бы ледовая нагрузка опасна лишь для линий передач, находящихся выше 450 м над

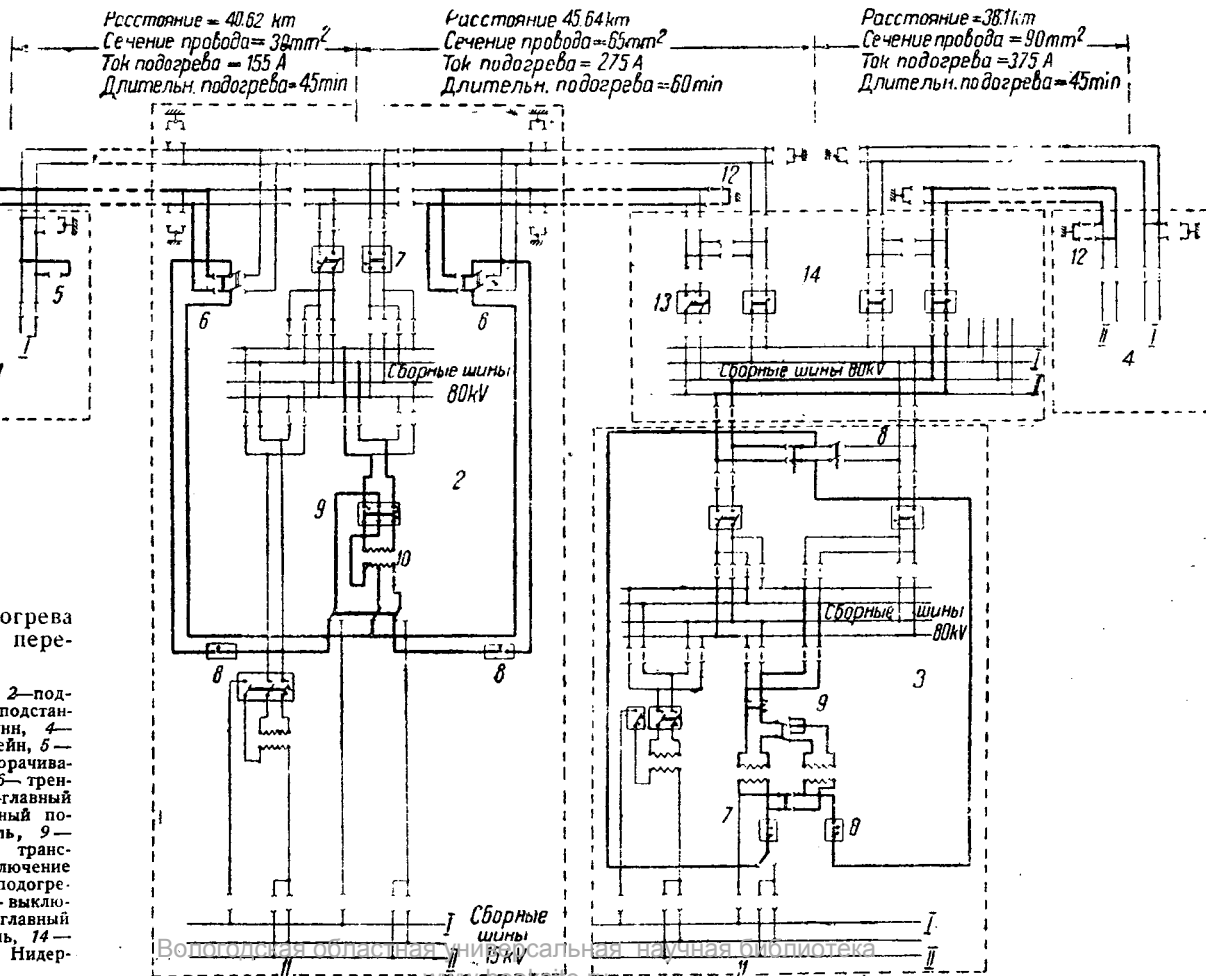


рис. 1. Схема подогрева проводов линии передачи.

1 — подстанция Ляубан, 2 — подстанция Гиршберг, 3 — подстанция Нидер Зальцбрунн, 4 — подстанция Мительштейн, 5 — выключатель для закорачивания при подогреве, 6 — трансформатор подогрева, 7 — главный выключатель, 8 — главный предохранитель, 9 — главный выключатель трансформатора, 10 — включение трансформатора для подогрева, 11 — ж. д., 12 — выключатель заземления, 13 — главный выключатель, 14 — изолирующий пост Нидер Зальцбрунн

уровнем моря. Однако опыт последующих лет показал ошибочность этого взгляда, и теперь были переделаны все остальные поворотные консоли.

Подогрев проводов имеет очень большое значение в районах с образованием гололеда. За последнее время в среднем бывает 10 зимних дней, когда подогрев проводов необходим. Установки для подогрева проводов были созданы еще в 1929 г., и они работают по настоящее время. Но в них имелся тот недостаток, что они могли одновременно подогревать лишь один шлейф, на что требуется 40—60 мп. Таким образом на подогрев 4 шлейфов потребовалось 4 h, что, конечно, чрезвычайно много.

Если подогрев проводов не начать сейчас же после сообщения об образовании льда, то существует опасность, что при продолжающемся понижении внешней температуры не удастся поднять температуру проводов выше температуры таяния, и тогда весь подогрев будет бесполезен. Поэтому подогревательная установка устроена теперь таким образом, что одновременно подогревается один шлейф по всей его длине от Миттельштейна до Ляубан (127 km), для чего требуется около 60 мп. После этого включается второй шлейф, так что в течение двух часов могут быть освобождены ото льда оба провода.

На рис. 1 дана схема подогрева линии 2 по всей ее длине. Цепь подогревного тока показана жирными линиями. На подстанции Нидер Зальцбрунн применяется напряжение подогрева около 8 kV. На подстанции Гиршберг для этой цели используется трансформатор на 3200 kVA. Ввиду различия в сечении разных участков для них применяются различные напряжения. Сечение провода Гиршберг—Нидер Зальцбрунн—65 mm², длина—65,64 km. При напряжении 8,6 kV устанавливается ток

в 275 А, который за 60 min поднимает температуру льда на 10°. На участке Гиршберг—Ляубан: сечение провода 30 mm², длина—40,62 km, напряжение 7,6 kV, ток в 155 А. Здесь достаточно 45 min работы. На участке Зальцбрунн—Миттельштейн: напряжение—8 kV, ток 375 А, время подогрева—45 min. Сечение провода 90 mm² и длина 38,1 km.

Включение подогрева производится следующим образом: линия Нидер Зальцбрунн—Миттельштейн закорачивается на землю в Миттельштейн при помощи специального выключателя и затем подогревается из Нидер Зальцбрунн. Участок Гиршберг—Зальцбрунн таким образом закорачивается в Зальцбрунн, и затем включается низкая сторона трансформатора через треншалтер подогрева 1. При включении главного выключателя подогрева 1 образуется цепь подогрева: главный выключатель подогрева 1, треншалтер подогрева 1, линия передачи, выведенная средняя точка на стороне низкого напряжения трансформатора. Так же образуется цепь при включении треншалтера подогрева 2 с той лишь разницей, что здесь закорачивание производится без заземления, так как в этом случае при одновременном подогреве в линии Зальцбрунн—Ляубан по земле текли бы уравнительные токи.

Установка для подогрева на подстанции Гиршберг имеет защиту от к. з. и от заземления. Треншалтеры, выключатели подогрева линии передачи снабжены дистанционным управлением и необходимой блокировкой.

Установка для подогрева линий передачи вполне себя оправдала. Эксплуатационные расходы очень малы: полный подогрев обеих линий требует 5500 kWh.

А. Г. Фа

ИЗДАТЕЛЬ: ОНТИ

Зав. ред. М. Г. Башкова

Технический редактор А. П. Александрова

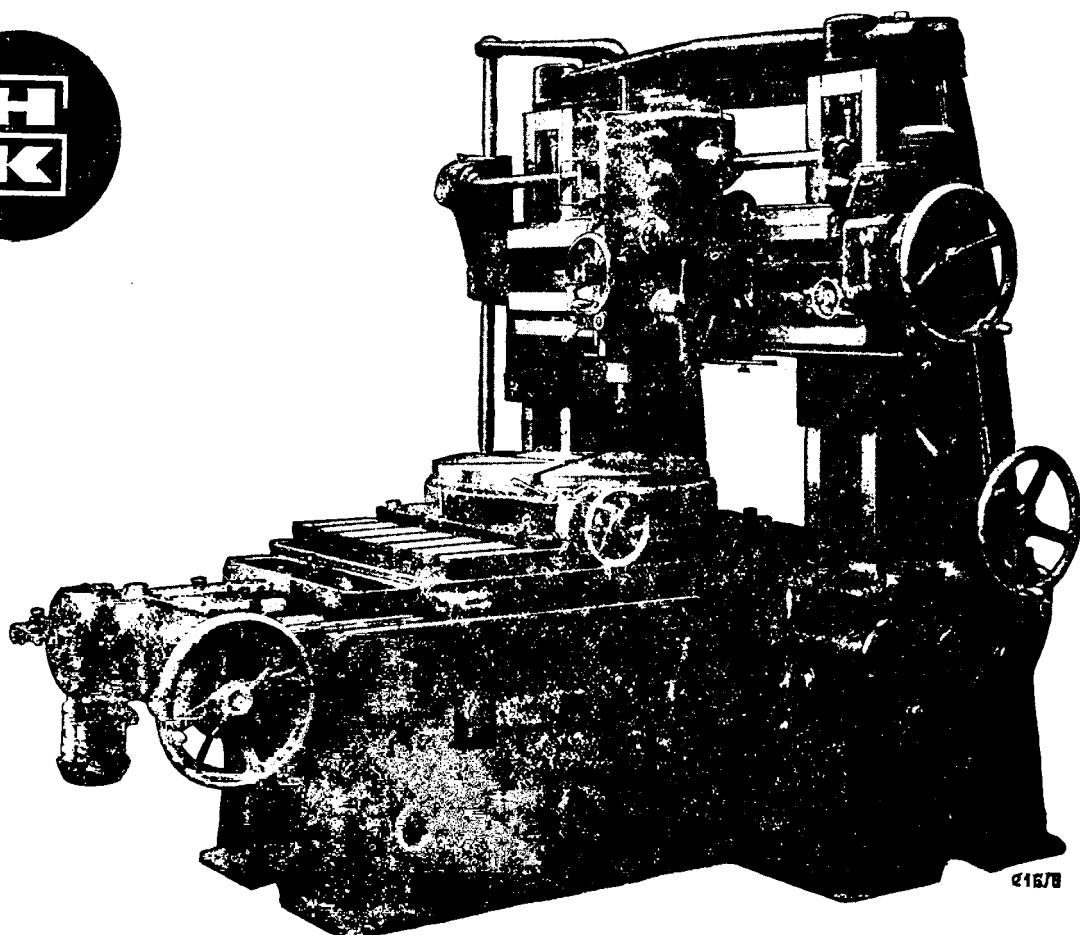
РЕДАКЦИЯ: В. И. Вейц, М. Н. Грановская, Я. А. Климовский, Г. И. Кржижановский, И. С. Палицын, Н. А. Савонов, М. А. Шаталов, К. Шенфер, Н. Г. Шипов.

Отв. редактор Я. А. Климовский

Сдано в набор 14/V 1937 г. Подп. к печати 7/VI 1937 г. Стат. формат 226 X 293. Печ. л. 9 1/2. У. а. л. 12,35. Печ. з. 11

ОНТИ ЧИЛДРСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО Ленинский пер. 30. Заказ 1166. Тм

КАЛИБРОВОЧНО-СВЕРЛИЛЬНЫЕ СТАНКИ ГАУЗЕР - ГИЛЛЕ



Применение калибровочно-сверлильных станков ГАУЗЕР-ГИЛЛЕ является гарантией для высокого качества Вашего изделия. Калибровочно-сверлильные станки ГАУЗЕР-ГИЛЛЕ работают точно, высококачественно и экономически-рационально. При производстве отдельных калибров, шаблонов, давящих инструментов, а также при коротко-серийном производстве изделий, требующих особо точного изготовления, мы рекомендуем Вам обратить внимание на преимущества работы с калибровочно-сверлильными станками ГАУЗЕР-ГИЛЛЕ. Каждый измерительный шпиндель снабжен индикатором и нониусом, чем достигаются, при применении координатной системы, быстрые, в высшей степени точные, надежные установки и измерения (с точностью отсчета до 0,001 мм.), при экономии во времени до 70% и более. Затребуйте пересылку нашего проспекта № 798 R.

HAHN & KOLB · STUTTGART ГАН и КОЛЬБ · ШТУТГАРТ

6705

АВТОМАТИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ "TEDDINGTON"

Мы предлагаем для холодильной промышленности целый ряд приборов и арматур новейшей конструкции и проверенной на опыте эффективности, отвечающих всем требованиям этой отрасли промышленности. Полный каталог охотно высылается нами по первому требованию.

ДЛЯ

Электрическая
емкость :
Переменный
ток — 10 амп.
Постоянный
ток — 2 амп.
до 250 вольт.

ТЕРМОСТАТ ТИПА "Т."



Новый и усовершенствованный контрольный прибор, применяемый в домашних установках для горячей воды и содержащий биметаллический элемент с выключателем, помещенным в изысканной коробке из бакелита. Этот прибор выполняет требования, предъявляемые к термостату малых размеров с переменной длиной стержня до 610 мм. и специально приспособлен для домашнего пользования. Пределы регулирования : 38°—94° Ц., 65°—120° Ц. 94°—204° Ц.

электрических водонагревательных приборов любой системы, как коммерческого типа, так и для домашнего обихода. Термостат "Teddington" осуществляет контроль температуры наиболее совершенным способом.

ПОГРУЖАЕМЫЙ ТЕРМОСТАТ ТИПА "Н.Т."

Термически действующий электрический выключатель для высокого ампеража. переменного и постоянного тока, спроектированный для автоматич. контроля температуры в электрических водонагревательных устройствах, радиаторах и всяких других установках, где требуется контроль температуры жидкостей.

Предел регулирования :
от 38°—204° Ц., от 60°—32° Ц.
Дифференциал : $\pm 3^\circ$ Ц.

Стандартные приборы :
Перем. или пост. ток 20 амп. до 250 вольт
Вес : около 900 гр.

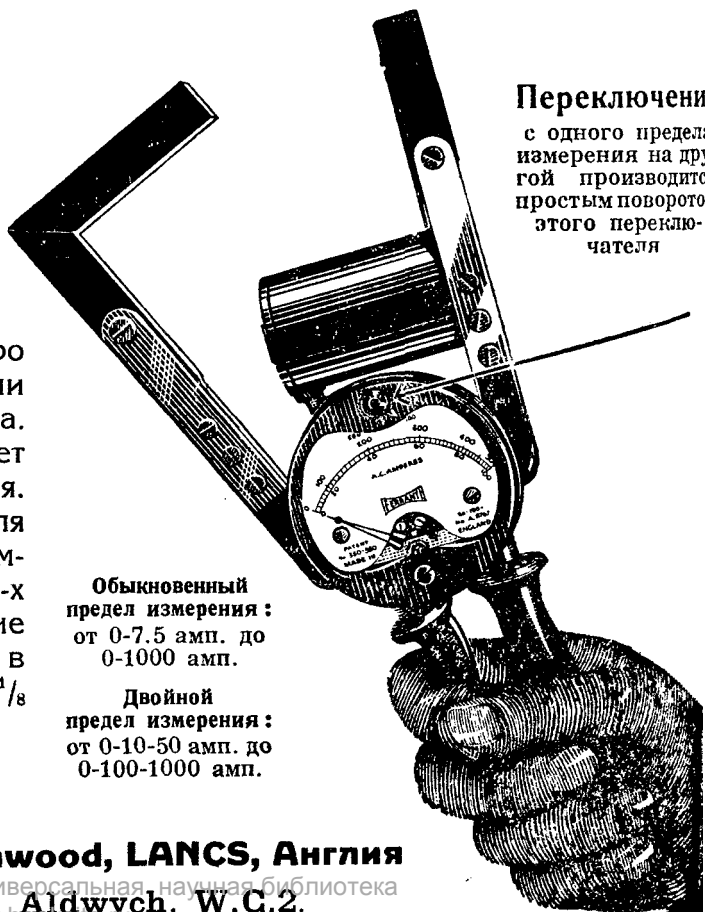


The British Thermostat Co. Ltd.

SUNBURY-ON-THAMES
MIDDLESEX - Англия

АМПЕРМЕТР FERRANTI КЛЕЩЕВОГО ТИПА

Клещевой амперметр Ferranti быстро и надежно измеряет силу тока в цепи путем одного только обхвата провода. Один и тот же прибор регистрирует силу тока в двух пределах измерения. Ток в изолированном сердечнике кабеля выравнивается самостоятельно. Зажимные щеки рассчитаны на кабели до 2-х дюймов диаметром. Быстрое затухание колебаний. Обслуживание состоит в простом движении руки. Вес нетто 2 1/8 англ. фунта.



Переключение
с одного предела
измерения на дру-
гой производится
простым поворотом
этого переключе-
вателя

Обыкновенный
предел измерения :
от 0-7.5 амп. до
0-1000 амп.

Двойной
предел измерения :
от 0-10-50 амп. до
0-100-1000 амп.

FERRANTI LTD., Hollinwood, LANCS, Англия

Бюро в Лондоне : Bush House, Aldwych, W.C.2.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

**Чистое железо
АРМКО**

**Трансформаторная
сталь АРМКО**

Специальные стали

рекомендуется для телефонных и радио-аппаратов. Благодаря своей исключительной чистоте—сумма пяти элементов: углерода, марганца, кремня, серы и фосфора ниже 0,15% — железо АРМКО имеет необыкновенно высокую магнитную проницаемость. Поставляется в виде лент горячей и холодной прокатки, в виде круглых и квадратных брусьев, а также в виде профильного железа.

Производство включает все сорта трансформаторной листовой стали. Обращаем Ваше особое внимание на нашу марку "Transor 5" с потерей в 1 watt при $B=10.000$ и 50 периодах. Листы марки "Transor 5" имеют ровную и гладкую поверхность и поддаются легко штамповке.

Нержавеющие стали для всех целей. Огнестойкие стали марки "Сикромаль". В особенности рекомендуем цельнотянутые легированные трубы (до 1500 мм диаметром) для пароперегревателей, воздухонагревателей, труб для чистки котлов и т. д.



ARMCO

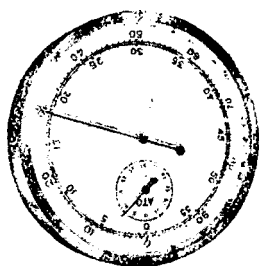
6, Avenue Gourgaud, 6 - PARIS (XVII^e) Франция

В СОЕДИН. ШТАТАХ:
The ARMCO International Corp.
Middletown, Ohio и
21 West Street, NEW YORK City

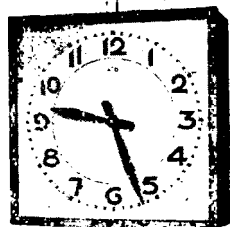
В ГЕРМАНИИ:
ARMCO-EISEN G.m.b.H.
KÖLN a/Rh., Hochhaus

В АНГЛИИ:
ARMCO Ltd
Thames House, Millbank
LONDON, S.W.1.
В ИТАЛИИ:
ARMCO S.A.
Via S.Lorenzo 4. GENOVA

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЧАСЫ



ДЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, ШКОЛ, РАЗНЫХ АДМИНИСТРАТИВНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ, ЗДАНИЙ, ОБЩЕСТВ. МЕСТ И Т. Д.



ПРЕЦИЗИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

ATO

PAUL GARNIER

Фабрикант и поставщик часов французского флота и французских железных дорог

9, RUE BEUDANT, 9 - PARIS (FRANCE)

ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЕ

Для передачи Ваших измерений на расстояние, для окончательного подсчета их и для автоматической передачи результатов показаний счетчиков, пользуйтесь аппаратами

ATELIERS J. CARPENTIER
46, Rue Arago - PUTEAUX (FRANCE)

Предлагаются аппараты трех наших систем: ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЕ при помощи импульсов определенной частоты,

Многократное ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЕ с определенными интервалами между импульсами,

ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЕ с определенным числом импульсов.

Системы эти, основанные на всех современных видах передачи, просты, практичны и основательны.

Запрашивайте ATELIERS J. CARPENTIER. Наша фирма даст Вам возможность использовать ее более чем пятидесятилетний опыт.

Измерительные и контрольные приборы для лабораторий, заводов и учебных заведений. Пирометрия. Теплотехнический контроль. Передатчики приказов.

Телеграфные аппараты Бодо. Аппараты для морской и воздушной навигации.



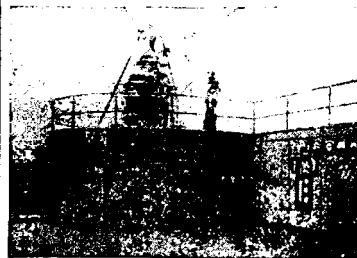
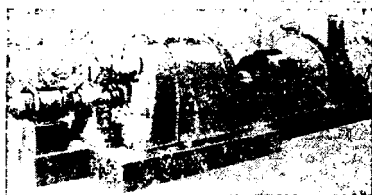
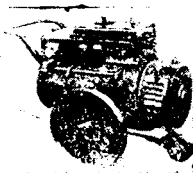
Deutsche Elektrizitäts-Werke
zu Aachen

—Garbe, Lahmeyer & Co.—
Aktiengesellschaft

Электрические машины

Трансформаторы

**Распределитель-
ные установки**



**50-летний
производственный
стаж**

2792

Электроавтоматичес- кое управление



отопительных,
вентиляционных,
холодильных,
насосных установок

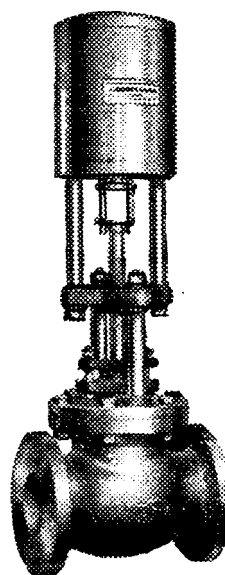
при помощи
периодических выключателей,
контактных часов,
дистанционных выключателей

напорных выключателей,
поплавокных выключателей

регуляторов температуры,
регуляторов влажности

вентилей с электромоторным
приводом,

вентилей с магнитным при-
водом



Вентиль с электро-
моторным приводом

Fr. Sauter A. G., Basel (Швейцария)

Fabrik elektrischer Apparate

Требуйте наши каталоги

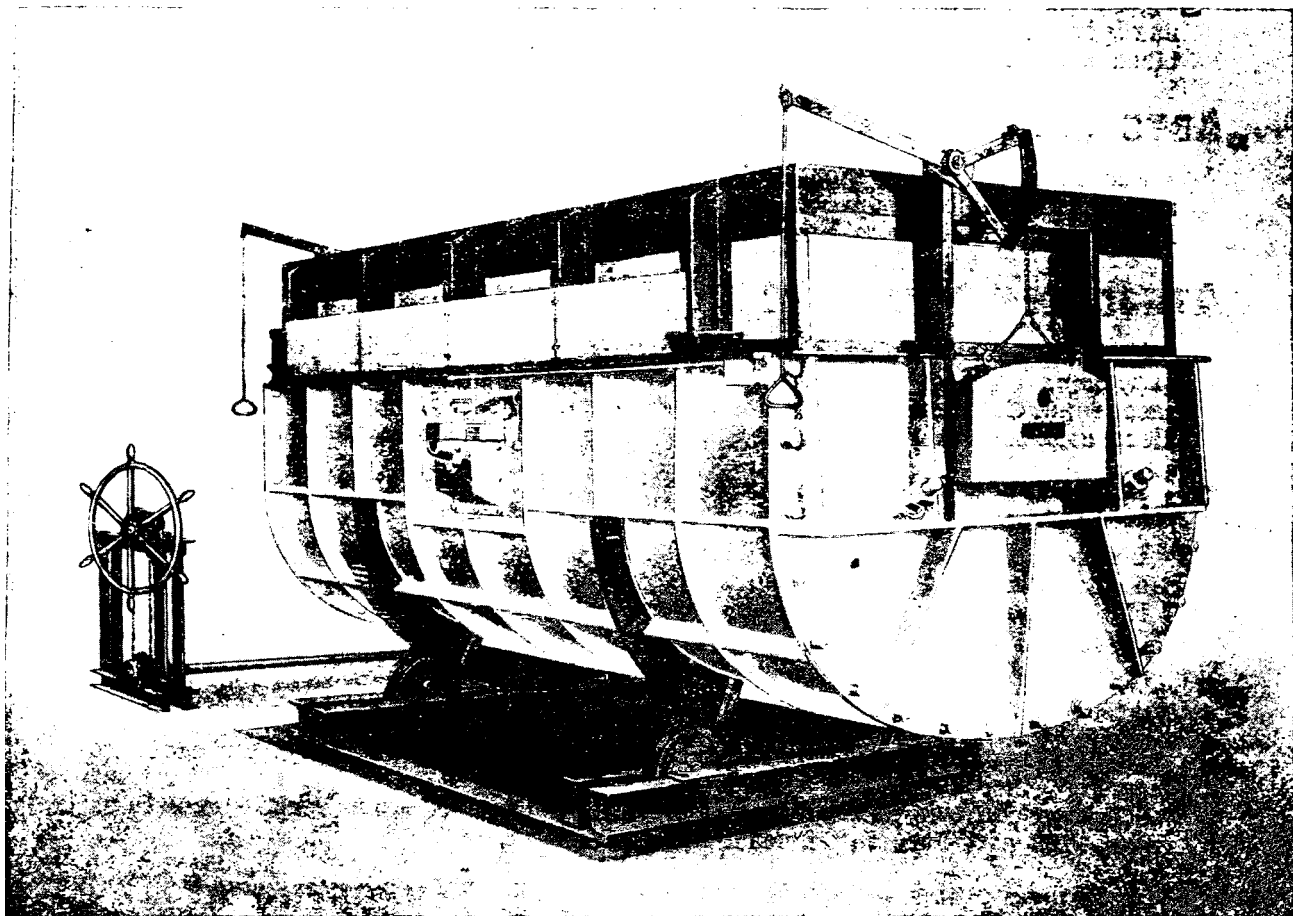
6728

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.



Электropечи для промышленности

преимущественно для литейных
с нагревом посредством сопротивлений



Плавильная опрокидывающаяся печь для алюминия и сплавов легких металлов.
Мощность — 120 kW, 800° C. Емкость — 1000 kg.

Для плавки и поддержания в горячем состоянии нежелезных металлов

Для термической обработки и для отжига чугунных отливок

Для покрытия чугунных изделий эмалью

Для нагрева и сушки форм и сердечников

Акц. О-во СИМЕНС-ШУККЕРТ, Берлин-Сименсштадт

Техническое Бюро Ост

Вологодская областная универсальная научная библиотека

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии

Продолжается прием подписки на подписные издания ОНТИ

„Техническая энциклопедия“

Выходит из печати 2-м переработанным изданием, в количестве 27 томов. «Т. Э.» переработана с учетом достижения стахановского движения и последних успехов науки и техники. Издание «Т. Э.» будет закончено в 1938 г. Цена каждого тома — **15 руб.** При подписке вносится задаток — **15 руб.**

„Автотракторный справочник“

Рассчитан на инженеров и техников, занятых проектированием и изготовлением автомобилей и тракторов. Стоимость справочника в 5-ти томах — **50 руб.** При подписке вносится задаток в размере **10 руб.** 1 том вышел из печати.

„Атлас энергоресурсов СССР“

Необходимое пособие для научно-исследовательских, краеведческих и проектирующих организаций, энергетических и географических кабинетов учебных заведений. Состоит из 2-х томов и 20 карт. Атлас полностью вышел из печати. Цена издания **135 руб.** При подписке вносится задаток в размере **25 руб.**

„Вагоностроение“

2-томный справочник для ИТР вагоностроительных и вагоноремонтных заводов. 1 том вышел из печати.

Подписная цена — **40 руб.** При подписке вносится задаток в **10 руб.**

„Библиографические ежегодники“

Дают возможность научным работникам, библиотекам и институтам получать необходимые сведения о вышедшей литературе по технике и естествознанию.

Издание состоит из 6-ти томов. Цена — **120 руб.** При подписке вносится задаток — **20 руб.** Вышли из печати 4 тома.

„Собрание сочинений проф. Н. Е. Жуковского“

Состоит из 10 том. и 5 выпусков курсов. лекций. Рассчитано на работников авиапромышленности, воздухфлота и авиаинститутов. Цена — **100 руб.** При подписке вносится задаток — **15 руб.**

Вышли из печати 2 и 3 тома.

„Физический словарь“

Предназначен для физиков — научных сотрудников лабораторий и институтов преподавателей, аспирантов вузов и вузов, инженеров, химиков, биологов, геофизиков, астрономов и т. д.

Содержит 8000 терминов, относящихся к различным областям физики смежных с нею дисциплин 5 томов. Стоимость — **80 руб.** При подписке вносится задаток — **15 руб.** Вышел из печати 1 том.

Проспекты подписных изданий высылаются бесплатно.

Подписку и деньги направляйте по адресу: Москва, 31, Пушечная ул., 9, «Техпериодина» ОНТИ.

Подписка принимается также отделениями и уполномоченными «Техпериодики» ОНТИ, магазинами, книжками и уполномоченными Книгосбыта