

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

## 4

1938

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО НКТП СССР

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ГОД ИЗДАНИЯ 59-й

4

1938

АПРЕЛЬ

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

*Да здравствует 1-е Мая—боевой смотр  
революционных сил международного  
пролетариата!*

*За дальнейший расцвет культуры  
народов СССР, за новые успехи  
и завоевания советской науки, техники  
и искусства!*

*Да здравствует блок коммунистов  
и беспартийных в предстоящих  
выборах Верховных Советов союз-  
ных и автономных советских  
социалистических республик!*

(Из лозунгов ЦК ВКП(б) к 1 Мая 1938 г.)

**Всем рабочим, инженерам, техникам, ко всем работникам  
электростанций, сетей и энергосистем**

*Обращение Всесоюзного совещания работников электростанций и сетей НКТП, состоявшегося  
14—20 марта 1938 г. в г. Москве*

СВАРИЩИ! Мы, хозяйственники, инженеры, стахановцы и ударники, собравшись на Всесоюзное совещание по энергетике, созданное Народным Комиссаром Тяжелой Промышленности Р, в течение нескольких дней обсуждали работу электростанций, сетей и энергосистем. Совещание с большевистской самокритикой, в полном разоблачении недостатков в работе электростанций и сетей, вскрыло причины невыполнения государственного плана по выработке электроэнергии, экономии топлива и другим качественным показателям и наметило предложения по изменению порядка на электростанциях и в сетях. Важнейшие мероприятия по упорядочению работы электростанций и сетей будут даны в при-

казе Народного Комиссара Тяжелой Промышленности СССР.

В настоящем обращении мы, участники совещания, со всей большевистской прямоотой заявляем, что, несмотря на удвоение мощности районных электростанций за годы второй сталинской пятилетки и ввода новых мощных электроцентралей, оснащенных передовой техникой, до сих пор электростанции продолжают работать неудовлетворительно. За 1937 г. государственный план выработки электроэнергии выполнен лишь на 89,4 проц. Электростанции Главэнерго в 1937 г. пережгли 580 тыс. т условного топлива и перерасходовали сверх нормы 173 млн. квтч электроэнергии на собственные нужды.

Велика аварийность на электростанциях и в электросетях, особенно по прямой вине обслуживающего персонала. За первые два месяца этого года мы еще не добились резкого перелома в своей работе.

Работники электростанций еще не выполнили решений декабрьского Пленума ЦК ВКП(б) (1935 г.), который указал пути развития стахановского движения в энергохозяйстве, командиры энергетики еще не стали подлинными организаторами и руководителями стахановцев.

Хозяйственники, инженеры и техники, партийные и профсоюзные организации еще не сделали необходимых выводов из указаний товарища Сталина на февральско-мартовском Пленуме ЦК ВКП(б) в 1937 г. и не взялись как следует за ликвидацию последствий вредительства троцкистско-бухаринско-рыковских японо-немецких шпионов и диверсантов.

**Товарищи энергетики!** Мы работаем на самом важнейшем участке тяжелой индустрии. Электростанции — это сердце народного хозяйства. Троцкистско-бухаринско-рыковские шпионы, диверсанты, агенты всех фашистских разведок стремились подорвать энергетическую базу нашей страны, ослабить оборонную мощь социалистической родины. Но враги просчитались. Их осиные гнезда разрушены, и фашистские выродки уничтожены. Будем бдительны! Выкорчем до конца остатки вредительства и вместе со всем народом нашей страны сотрем с лица нашей родной советской земли продажных троцкистско-бухаринских шпионов. Наглухо закроем двери наших электростанций для врагов народа.

Мы, участники совещания, призываем всех работников энергетики решительно взяться за быструю ликвидацию последствий вредительства и развертывание массового стахановского движения на электростанциях и в сетях.

Партия и правительство доверили нам ценнейшее и сложнейшее оборудование. От того, как мы будем его эксплуатировать, зависит работа шахт, рудников, заводов, железных дорог, освещение городов. Наведем большевистский порядок в нашем энергохозяйстве, организуем работу так, чтобы турбины, котлы, все наше оборудование работало, как выверенные часы. Будем учиться новой технике и обучать новые кадры.

Мы имеем все условия для выполнения и перевыполнения плана 1938 г. На электростанциях до сих пор не использованы громадные резервы для экономии топлива и электроэнергии. Устранение разрывов между отдельными элементами технологического оборудования может дать стране в этом году дополнительно 144,8 тыс. квт.

Использование основного оборудования может быть повышено путем уменьшения простоев оборудования в ремонтах и ревизиях, организации максимального использования гидростанций, выравнивания графика нагрузки потребителей.

Энергетика имеет много проверенных и беззаветно преданных партии Ленина — Сталина работников. Опираясь на передовых людей, мы должны покончить с аварийностью, организовать ремонт оборудования строго по графику, ликвидировать недостатки в организации труда, резко повысить дисциплину и ответственность каждого работника

энергетики за работу электростанций, за бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией.

**Товарищи эксплуатационники!** Полностью ликвидируйте аварии и простои оборудования, выполняйте в установленный срок противоаварийные мероприятия. Изучайте детально оборудование станций и сетей, все его особенности, и в соответствии с этим установите и строго соблюдайте правильный, наиболее выгодный режим работы, который обеспечил бы максимальную производительность оборудования и бесперебойное энергоснабжение. Добейтесь выполнения и перевыполнения заданий по удельным расходам топлива по затратам электроэнергии на собственные нужды и потерям в сетях. Только приведение этих расходов в соответствие с установленными нормами позволит сохранить для нужд нашей страны много десятков тысяч тонн топлива: свыше 100 млн. квтч электроэнергии, которая сейчас используется нерационально. Организуйте и строго соблюдайте графики планово-предупредительного и капитального ремонта, осмотра и профилактических испытаний оборудования.

Строго соблюдайте режим работы оборудования, технические нормы эксплуатации, инструкции, правила по технике безопасности. Поднимайте еще трудовую дисциплину.

**Товарищи ремонтники!** Бесперебойное энергоснабжение потребителей, особенно в период осенне-зимнего максимума, полностью зависит от своевременного и высококачественного планово-предупредительного ремонта оборудования. Ремонт должен проводиться в течение всего года. Нельзя допускать переноса его полностью на второе полугодие.

Главная ваша задача — правильно подготовить ремонт. Еще до начала его надо иметь дефектную ведомость, заготовить необходимые материалы, инструмент и приспособления. Ремонт производится высококачественно и точно по графику.

Во время ремонта необходимо полностью ликвидировать аварийные очаги, устранить дефекты теплоперегревателей, сепарации пара, присосы чужеродной кладки, неплотности во фланцах, дефекты машин, турбин, насосов, масляных выключателей, лейной защиты и т. д.

Боритесь за сокращение сроков простоя оборудования в ремонте не менее чем на 10 проц. сравнению с прошлым годом.

Организуйте стахановское движение и социалистическое соревнование, шире применяйте и освоенные методы механизации наплавки твердых и специальных сплавов, торкретирование котловых обмуровок при помощи цемент-пушки и т. д.

После ремонта оборудования сдавайте эксплуатацию, тщательно проверив его, а при оформлении специальным техническим актом указанием всех результатов в ремонтном журнале.

**Товарищи кочегары!** Пора покончить с авариями котельных агрегатов из-за неправильной эксплуатации, ненормального перегрева пароперегревателей котлов, упуска воды и т. д. Не допускайте перегорова топлива! Овладейте техникой эксплуатации котлов по графику с наиболее экономичным режимом работы, максимально используйте при этом измерительные приборы. Добейтесь оптимального значения  $\text{CO}_2$  и нормаль-

без пара. Наведите в котельных образцовую чистоту и порядок.

**Товарищи турбинисты!** Обеспечьте правильный ход за турбинами и конденсационными агрегатами, своевременно замечайте неисправность во вращающихся агрегатах, овладевайте техникой пользования турбин по наиболее выгодному режиму распределения нагрузки, соблюдайте наиболее выгодный вакуум.

Не допускайте сброса, нагрузки из-за срыва или пущения вакуума. Ликвидируйте аварийность у турбин из-за расплавления подшипников, неисправности регулирующих устройств, превышения, сверх нормальных, температур масла.

Установите на вахтах железную дисциплину. Широко внедряйте опыт передовых стахановцев, имеющих высокую производительности труда, высокого качества работы.

**Товарищи электрики!** Перед вами стоит ответственная задача — соблюдать нормальные параметры отпускаемой электроэнергии. Мы, участники совещания, считаем недопустимым работу с пониженными частотой и напряжением. Овладевайте техникой и обеспечьте нормальную работу автоматических регуляторов напряжения. Улучшайте работы электрооборудования с наименьшими потерями. Не допускайте аварий из-за ошибок персонала при переключениях, нарушении правил эксплуатации и техники безопасности. Содержите электрооборудование и электроаппаратуру в образцовой чистоте.

**Товарищи работники электросетей и подстанций!** Вредители, орудовавшие в энергетике, созидали разрыв между производством энергии и ее распределительной способностью высоковольтных и кабельных сетей. Некоторые электростанции из-за недостатка линий передач или малой их пропускной способности сейчас не могут полностью использовать своей мощности. Ваша задача — обеспечить максимального использования существующих сетей и подстанций, безаварийной их работы. Организуйте плано-предупредительные работы точно по графику. Устраните полностью аварийные очаги в сетях: дефекты клемм, изоляторов втулок, трансформаторов и т. д.

Электрики должны максимально снизить потери электроэнергии в сетях. Ведите работу трансформаторов и сетей по наиболее выгодному режиму, полностью используйте компенсационные устройства на подстанциях, добейтесь полной безаварийности при обслуживании и переключениях электрооборудования.

**Товарищи работники защиты от сверхтоков и молний!** Вам необходимо добиться четкой, безотказной, правильной и селективной работы защитных устройств. Полностью устраните аварийность электрооборудования из-за неправильной работы молниезащиты. На существующей аппаратуре обеспечьте ускорение действия защиты, увеличьте ее чувствительности путем периодических испытаний и организации правильной эксплуатации. В период ремонтов проведите реконструкцию: испытания и наладку защитных устройств. Одновременно подготовьтесь к грозовому сезону, выполнив все необходимые работы. В период гроз сети должны работать безаварийно.

**Товарищи связисты!** Четкая и бесперебойная

связь — важнейшее звено надежного управления работой в энергосистемах. Обеспечьте безотказное, безаварийное обслуживание электростанций связью, своевременно проводите ревизии и ремонт аппаратуры, внимательно обслуживайте ее. Не должно быть ни одного случая отказа или расстройства работы связи.

**Товарищи работники лабораторий!** На большинстве станций лабораторное хозяйство и измерительная аппаратура запущены и часто бездействуют. Мы, участники совещания, вынуждены признать, что этому оборудованию работники электростанций не уделяют необходимого внимания. Содержите в чистоте и исправности имеющиеся на электростанциях измерительные приборы. Используйте полностью лаборатории для проведения профилактических испытаний и проверок правильности работы оборудования станций и подстанций. В 1938 г. лаборатории должны стать важнейшим средством в достижении культурной работы электростанций и сетей.

**Товарищи работники электростанций!** Борьба за экономию электроэнергии у потребителей и на электростанциях является первостепенной задачей. Потребители и сами электростанции еще расточительно расходуют электроэнергию, борьба с хищническим пользованием энергией как следует не организована. Наведите большевистский порядок в электрохозяйстве промышленных предприятий. Добейтесь выполнения норм расхода электроэнергии на единицу продукции. Организуйте рациональное распределение и потребление электроэнергии.

**Товарищи командиры — инженерно-технические работники!** Будьте организаторами стахановского движения. Личным примером показывайте образцы дисциплинированности и высокоответственного отношения к порученной работе. Опираясь на передовых рабочих-стахановцев, наведите образцовый большевистский порядок на электростанциях и в сетях. Обеспечьте работу электростанций и сетей, как одного целого организма.

**Товарищи работники промышленных электростанций!** Работа ваших станций улучшает электроснабжение промышленности. В совместной работе с электростанциями Главэнерго добивайтесь наилучшего обслуживания потребителей. Строго соблюдайте диспетчерскую дисциплину при регулировании графика нагрузки электросистемы. Обеспечьте точное выполнение ремонтов оборудования в установленные для вас сроки. Повышайте культуру эксплуатации, используйте опыт и достижения передовых электростанций Главэнерго. Добейтесь безаварийной работы и выполнения плана по всем показателям. Помните, что и от вашей работы во многом зависит выполнение плана промышленности.

**Товарищи работники фабрик, заводов, шахт, коммунального и сельского хозяйства, товарищи потребители!** Электроэнергия является важнейшим рычагом в развитии нашего социалистического хозяйства.

Мы призываем вас решительно взяться за экономию электроэнергии, за прекращение расточительного расходования энергии. Вы должны навести порядок в электрохозяйстве ваших пред-

приятый, уничтожить холостые хода агрегатов, снять излишнюю мощность моторов, повысить косинус фи установок и резко сократить потери электроэнергии.

**Товарищи работники электростанций и электросетей!** Наша великая партия Ленина — Сталина, наше Советское правительство оказывают нам огромную помощь и внимание. Наш великий вождь и учитель — товарищ Сталин — повседневно следит за нашей работой, заботится и помогает нам. Это ко многому обязывает нас. Как никогда велика сейчас ответственность энергетиков перед народным хозяйством, перед нашей родиной.

Электростанции обязаны дать нашей цветущей стране столько электроэнергии, сколько требуется. Мы выполним задачу, поставленную перед нами любимым сталинским наркомом — Л. М. Кагановичем, и в кратчайший срок выведем энергетику в ряды передовых отраслей народного хозяйства.

Развернем во всю ширь стахановское движение! Поднимем высоко знамя социалистического соревнования! Выполним план 1938 г. по всем показателям! Обеспечим новый подъем в работе электростанций!

Энергетика нашей социалистической страны вместе со всем народным хозяйством развивается бурными темпами, — только за последние десять лет мощность электростанций увеличилась почти в четыре раза, план ГОЭЛРО перевыполнен в 25 раз.

Великие вожди В. И. Ленин и товарищ Сталин с гениальной прозорливостью еще в 1921 г. определили план электрификации как вторую программу нашей коммунистической партии по преобразованию нашей в то время отсталой в техническом и экономическом отношении страны в передовую, мощную социалистическую державу.

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

В 1938 г. партией и правительством намечен дальнейший огромный рост мощности электростанций и создание резервов.

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

*Всесоюзное совещание работников электростанций и сетей НКП*

## Электропередача Куйбышев — Москва — дело чести советских электротехников

**В** РЯДУ ВАЖНЕЙШИХ проблем народного хозяйства СССР в третьей пятилетке большое место занимает проектирование и строительство куйбышевского гидроэнергетического узла.

Волею коммунистической партии и советского правительства, по указанию товарища Сталина на Самарской Луке р. Волги будет создана крупнейшая в Европе и во всем мире по своей мощности энергетическая база для электроснабжения ирригационных установок засушливого Поволжья, а также растущей промышленности прилегающих районов (Урал, Горький) и центрального промышленного района.

Общегосударственное значение Куйбышевского гидроэнергетического узла в единой электроэнергетической системе Европейской части СССР будет огромно. Созданием этого комплекса сооружений большевики продолжают осуществление великой ленинско-сталинской идеи электрификации всей страны. Волхов — Днепр — Волга — таковы замечательные вехи строительства социализма и продвижения к коммунизму.

На этом своем пути советский народ побеждает все трудности, беспощадно преодолевает яростное сопротивление врагов — троцкистско-бухаринских агентов фашизма, шпионов, убийц, диверсантов и поджигателей войны.

Факт постановки в третьей пятилетке перед народным хозяйством СССР задачи строительства куйбышевского гидроэнергетического узла, этого величайшего сооружения сталинской эпохи, сам по себе является показателем успехов социалистической индустриализации и нашего технического роста, показателем высокой зрелости советской научно-технической мысли.

Можно смело заявить, что, например, электротехнические проблемы этого строительства в своем масштабе и содержанию не имеют прецедента в теории и практике подобных сооружений капиталистических стран.

Достаточно сказать, что по разрабатываемому проекту мощность примерно в 1000 MW будет передаваться на расстояние (Куйбышев — Москва) 900 km, чтобы оценить грандиозность дела.

С радостью и гордостью за свою родину и выпавшую на их долю честь советские ученые-специалисты — электротехники разрешают поставленные перед ними задачи.

Ниже мы помещаем материалы, освещающие основные вопросы передачи энергии куйбышевского гидроэнергетического узла в Москву и являющиеся предметом обсуждения широкой советской электротехнической общественности.

\*\*\*

Дискуссия об электропередаче Куйбышев — Москва, проведенная в ВЭИ 20 и 31 января 1938 г. по докладам<sup>1</sup> проф. А. А. Горева (Ленинградский индустриальный институт) и проф. С. А. Лебедева (ВЭИ), показала, что нашими исследовательскими организациями проделана большая и ценная работа по расчету новых вариантов передачи и исследованию новых средств обеспечения устойчивости ее работы.

Наряду с блочной схемой передачи на 300 km в данной дискуссии была представлена и замечена

<sup>1</sup> См. ниже.

2-цепная схема на 400 kV, как обоснованное техническое решение.

В расчетах Ленинградского индустриального института наряду с напряжениями 300 и 400 kV рассматривали напряжения промежуточные — 330 и 350 kV и выявлена возможность передачи на этих напряжениях как по блочной, так и по замкнутой схеме.

В ходе дискуссии были рассмотрены варианты решения для передачи в Москву (вместо 600) — 1100 MW.

В работах Ленинградского индустриального института по устойчивости передачи, доложенных на совещании А. А. Горевым, можно отметить важные методологические сдвиги по сравнению с прежними расчетами (эскизный проект передачи Куйбышев — Москва, разработанный Ленгидэтом). Впервые, статическая устойчивость проверялась не по переходному, а по синхронному реактивному, во-вторых, рабочая мощность одной цепи определялась непосредственно из условий динамической устойчивости при наиболее тяжелой аварии — трехфазное короткое замыкание (к. з.) на шинках низшего напряжения понижающих трансформаторов, отключаемой в 0,25 сек. При этом в расчетах Ленинградского индустриального института статическая устойчивость всегда сохранялась. Максимальная рабочая мощность на одну цепь получалась равной 0,71 от ее натуральной величины.

Вторая предпосылка методики расчета устойчивости вызвала серьезные возражения. В выступлении С. А. Лебедева, П. С. Жданова и других указывалось, что в работах института статическая устойчивость передачи исследована недостаточно, так не рассматривались такие специфические случаи нарушения статической устойчивости, как выход из работы одновременно двух агрегатов, полный наброс мощности, установившийся ток в системе после выключения к. з., который может оказаться весьма тяжелым из-за пониженного напряжения, обусловленного заторможенностью двигателей. Возможны также тяжелые для динамической устойчивости режимы, связанные с изменением частоты в системе и ведущие к неблагоприятному балансу реактивной мощности и, следовательно, к понижению напряжения.

Очевидно, в связи с этими возражениями статическая устойчивость электропередачи Куйбышев — Москва должна быть доработана и проверена дополнительными расчетами.

Проведенное в работах института экономическое сравнение одной и той же электропередачи, выполненной на различные напряжения, выявило экономию стоимости на 9,6% при переходе с 300 на 330 kV и на 12% при переходе с 300 на 350 kV. Однако эта экономия поглощается в результате удорожания конечных устройств, обусловленного дроблением их мощности.

Как показали расчеты института, по блочной схеме линии при напряжениях 330 kV может быть с достаточной степенью надежности передана мощность в 640—700 MW. При повышении напряжения до 350 kV максимальная передаваемая мощность в Москву может быть доведена до 700 MW.

Замкнутый 2-цепный вариант на 400 kV с 4 переключаемыми постами (без искусственных

мероприятий по увеличению устойчивости) позволит передать в Москву мощность около 570 MW. Рабочая мощность для замкнутого 3-цепного варианта с тремя переключаемыми постами на 346 kV составляет 640 MW.

По расчетам института наиболее дешевый вариант — блочный, 4-цепный на 300 kV, — 633 руб. за установленный kW; наиболее дорогой — замкнутый 2-цепный вариант на 400 kV, с 4 переключаемыми постами, — 720 руб./кВт. Несколько экономичнее выглядит замкнутый вариант, 3-цепный на 346 kV, — 707 руб./кВт.

Выводы, которые сделал А. А. Горев на основании работы Ленинградского индустриального института, сводятся к следующему. Блочная 4-цепная схема передачи позволяет при повышении ее напряжения до 330—350 kV довести рабочую мощность линии до 800 MW с сосредоточением в одной генераторной единице мощности в 200 MW. Блочная схема передачи не угрожает нарушением устойчивости системы и ее нагрузке при выходе из работы одного из блоков. Блочная схема передачи, даже с учетом дополнительных вложений на ее резервирование, все же на 10—15% дешевле замкнутой схемы передачи. Меньшие для блочной схемы напряжения, разрывная мощность и количество потребной коммутационной аппаратуры, чем в замкнутой схеме передачи на 400 kV, облегчают задачи электропромышленности. Поэтому, несмотря на реальную техническую осуществимость обеих схем передачи — блочной и замкнутой, первая пока что имеет серьезные преимущества перед второй.

Работы ВЭИ в части расчетов устойчивости передач, доложенные совещанию С. А. Лебедевым, были посвящены замкнутой 2-цепной схеме передачи на 400 kV с переключаемыми постами вдоль линии. Рабочая мощность линии —  $550 \div 600$  MW.

Удовлетворительные результаты в смысле обеспечения статической и динамической устойчивости передачи были получены при 4 переключаемых постах и при мощности реакторов на генераторном конце в 700 MVA. При этом запас статической устойчивости для нормальной схемы составлял 31%, для схемы с выключенным участком — 21%. Предельное время выключения 2-полюсного замыкания на землю на линии составляло 0,25 сек. По стоимости kWh в Москве этот вариант передачи оказался дороже на 0,31 коп. по сравнению с блочным 4-цепным вариантом на 300 kV.

Применение электронного регулятора напряжения и насыщенных дросселей на генераторном конце передачи значительно улучшило экономические показатели этого варианта передачи. Разница в стоимости kWh в Москве снизилась до 0,15 коп. Предельное время для выключения трехполюсного к. з. составило 0,107 и для двухполюсного замыкания на землю — 0,27 сек.

С ростом мощности передачи до 800 и 1100 MW число цепей замкнутой передачи должно соответственно возрасти до 3 и 4.

Статическую и динамическую устойчивость замкнутой схемы передачи можно в дальнейшем повысить, используя синхронные компенсаторы в комбинации с насыщенными дросселями и частично снижая мощности первичных двигателей при выключении участка линии и др.

Полагая, что связанная передача обеспечивает большую надежность и эксплуатационную гибкость и предъявляет меньшие требования к резервированию по активной мощности и связям в приемной системе, С. А. Лебедев высказался в пользу выбора для передачи Куйбышев—Москва замкнутой схемы. В отношении величины напряжения передачи С. А. Лебедев считает более целесообразным выбор 400 kV, мотивируя это экономией меди и перспективой роста передаваемой мощности как по этой, так и по другим передачам.

Оживленная дискуссия<sup>2</sup>, развернувшаяся по докладам А. А. Горева и С. А. Лебедева, выявила как сторонников блочной 300—350-kV передачи, так и сторонников замкнутой передачи на 400 kV.

Аргументация сторонников блочной схемы в основном сводилась к следующему.

Блочная схема передачи на 300—350 kV дешевле (на 10—15%), легче для освоения промышленностью (коммутационной аппаратуры требуется в 2—3 раза меньше по сравнению с замкнутой схемой передачи), обеспечивается устойчивость нагрузки и системы при выходе блока.

Потребность в величине резервной мощности одинакова в обеих схемах. Риск распада всей системы вследствие затяжки аварии на линии при блочной схеме значительно меньше, чем при замкнутой. Реконструкция приемной системы Мосэнерго абсолютно необходима в обеих схемах передачи.

Грубейшей ошибкой является, как совершенно правильно отмечали сторонники блочной схемы, ориентировка некоторых специалистов при разрешении вопроса о передаче энергии Куйбышев—Москва на существующую техническую отсталость сети и отсутствие резервов мощности в системе Мосэнерго. Эта запущенность системы Мосэнерго есть результат вредительской работы врагов народа, последствия которой должны быть ликвидированы в кратчайший срок.

Мощность генераторной единицы при блочной схеме получается до 200 MW. Разрывная мощность линейных выключателей значительно меньше (3000, 5500 MW для замкнутой схемы).

Недостатки блочной схемы—повышенные затраты меди, недостаточная эксплуатационная гибкость, более частая потребность в привлечении резервов приемной системы—окупаются большей надежностью работы системы в целом и другими указанными выше преимуществами.

Доводы сторонников замкнутой схемы таковы.

Замкнутый вариант более надежен и эксплуатационно более гибок. Он облегчает требования к резервам в приемной системе (так как выход аварийного участка линии не связан с потерей мощности) и выполним при значительно меньших затратах меди и черного металла.

Порядок стоимости с учетом искусственных мероприятий по устойчивости и дополнительных издержек на резервирование один и тот же для обеих схем. Нагрузка при замкнутой схеме находится в более благоприятных условиях, тогда как при выходе блока не исключено опрокидывание двигателей. С этим явлением нужно считаться, имея в перспективе рост коэффициента загрузки и

увеличение промежуточных реактансов между грузкой и генераторами.

Отдельные участники ставили вопрос выбора варианта схемы и напряжения в тесную и посредственную зависимость от величины передаваемой мощности. Признавая эксплуатационные выгоды замкнутой схемы передачи и ее техническую осуществимость, эти товарищи, однако, подчеркивали, что замкнутый двухцепный вариант на 400 kV имеет предел по передаваемой мощности (550—600 MW).

При этом отмечалось, что идти на еще более высокое напряжение, чем 400 kV, в настоящих условиях нереально. С увеличением передаваемой мощности до 800—1100 MW по замкнутой схеме передачи последняя теряет ряд своих преимуществ перед блочной. Экономия на меди уменьшается, так как число цепей возрастает до 3. Мощность связанной передачи становится настолько большой по сравнению с общей установленной мощностью системы, что при затяжных авариях на линии неизбежен распад всей системы. Коммутация на переключательных постах усложняется и может сама послужить поводом к возникновению тяжелых аварий.

Возможность одновременного возникновения нескольких аварий на линии в замкнутой схеме более вероятна (из-за переключательных постов), чем в блочной.

Блочная схема позволяет за счет повышения рабочего напряжения до 330—350 kV довести передаваемую мощность по четырем цепям до 800 MW, сохраняя при этом приемлемое значение для величины мощности генераторной единицы, так и для величины мощности, передаваемой по одной цепи-блоку (до 200 MW).

В случае передачи 1000—1100 MW привлекает к себе внимание вариант 400-kV системы двух блоков, каждый из которых представляет замкнутую 2-цепную линию передачи с 4 переключательными постами. При установленной мощности в объединенной системе около 4000 MW можно избежать распада системы из-за выхода работы одного блока, выключая вместе с ним часть нагрузки.

Совещание не приняло определенных решений по схеме и напряжению электропередачи, имея в виду, что окончательный выбор их может быть сделан лишь с уточнением задания по передаче мощности на основе прогноза развития ближайшем будущем единой высоковольтной сети Европейской части СССР.

Тем не менее ценность работы, проведенной институтами и совещанием, не умаляется.

В результате этой работы установлено, что схемы—блочная и замкнутая, и оба напряжения 300 и 400 kV, дают технически реальные решения для электропередачи Куйбышев—Москва. Качественные материалы позволяют уже в сравнительно короткий срок сделать окончательный выбор параметров передачи, после того как будет установлена величина передаваемой мощности.

Проведенная работа поможет промышленности в ее подготовке к освоению оборудования электропередачи Куйбышев—Москва, поможет вертыванию проектных работ как по самой электропередаче, так и в особенности по реконструкции приемных систем—Московской и Уральской.

<sup>2</sup> См. ниже.



# Электрпередача Куйбышев—Москва<sup>1</sup>

А. А. Горев

Ленинградский индустриальный институт

**ПЕРЕДАЧА** Куйбышев—Москва характеризуется как необычной мощностью (свыше 900 MW), так и необычным расстоянием (900 km). Ее грубая характеристика—произведение этих двух величин—составляет 540 000 MW km. Эта цифра в 1,5 раз больше соответственной характеристики рекордной заграничной передачи—Болдер-Дам—Лос Анжелос, построенной полтора года назад в США.

Экономически приемлемое решение проблемы этой передачи было дано осенью 1936 г. в эскизном проекте Ленгидэпа<sup>2</sup>.

Последовавшее затем решение партии и правительства о сооружении станций Куйбышевского завода поставило на очередь задачу технического проекта.

В связи с этим Главгидроэнергострой поручил Ленинградскому индустриальному институту выработать основные параметры электрооборудования будущих сооружений и разработать предварительные технические условия, которым оно должно удовлетворять. Эта работа произведена под общим руководством проф. Толвинского группой специалистов, участвовавших и в составлении эскизного проекта. Здесь будут изложены важнейшие результаты ее.

В расчетах были учтены следующие изменения в основном задании:

1. Длина линии передачи в связи с переносом центра отпавляющей станции с Переволок на станцию Глинка была увеличена с 850 до 900 km.

2. Для удешевления станций принимались в расчет генераторы максимальной возможной конструкции мощности.

3. Изыскание возможности осуществления генераторов и трансформаторов с оптимальными с точки зрения устойчивости параметрами проводилось на основе проектных работ завода «Электросила», и результаты их были учтены как при расчетах, так и при составлении технических условий.

4. Применение автотрансформаторов на приемном конце линии, предполагавшееся в эскизном проекте, было исключено.

5. Было предположено в отличие от эскизного проекта, что передача работает при постоянных напряжениях на обоих своих концах, так что при изменении нагрузки напряжение на шинах низкого напряжения понизительных трансформаторов испытывает некоторые колебания (не выходя, как показал расчет, из пределов 3%). Предполагалось, что для компенсации этих колебаний, а равно и колебаний напряжения в приемной и, следовательно с понизительными транс-

форматорами включаются бустеры. Такая схема дает возможность считать напряжения на обоих концах линии постоянными и равными максимальному эксплуатационному напряжению, допускаемому выбранному классом изоляции аппаратуры.

6. В эскизном проекте мощность шунтирующих линию реакторов отпавного конца выбиралась так, чтобы емкость линии, приходящаяся на этот конец в П-образной схеме замещения линии, была скомпенсирована (100%-ный реактор). В настоящих расчетах, кроме общего изучения влияния мощности реактора на пропускную способность линии, рассматривались усиленные реакторы, мощность которых выбиралась так, чтобы генератор работал с максимальным расчетным отстающим током, что вело к некоторому увеличению устойчивости системы.

7. В основу расчетов была положена трасса линии, соединяющая Куйбышев с Москвой по кратчайшему возможному расстоянию. Вариант захода в Горький московских линий не рассматривался. Однако вызываемое им удлинение не настолько значительно, чтобы существенно изменить выводы. Мощность, подлежащая передаче в Москву, твердо не фиксировалась; она колебалась в разных случаях от 550 до 800 MW. Предполагалось, что, кроме Москвы, значительную долю мощности Куйбышева возьмут и другие потребители, в частности Урал.

**Методология расчетов.** В эскизном проекте, равно как и в работе автора о возможностях предельных электрпередач, доложенной в прошлом году Академии наук, рабочая мощность цепи определялась из условий статической устойчивости. В расчетах, положенных в основу работы Ленинградского индустриального института, была принята несколько отличная методология: рабочая мощность линии определялась непосредственно из условий динамической устойчивости системы при наиболее тяжелой для нее аварии. Выбранная из этого условия мощность проверялась и на статическую устойчивость, причем во всех случаях эта проверка дала положительный результат.

Для блочной передачи наиболее тяжелой считалась авария на шинах низшего напряжения понижающего трансформатора. В соответствии с основным принципом работы блочной передачи допускалось, что авария в зоне самого блока, т. е. на понижающем трансформаторе, самой линии, повышающем трансформаторе и в генераторе будет вызывать отключение блока, причем выпавшая мощность должна компенсироваться вращающимся резервом приемной системы.

Как выяснилось еще из расчетов эскизного проекта, авария в вышеуказанной точке накладывает наиболее жесткое ограничение на рабочую мощность линии. Было принято, что авария состоит в трехфазном к. з., отключаемом селективно в 0,25 sec 110-кV масляными выключателями прием-

Авторская обработка доклада, сделанного проф. А. А. Горевым на совещании 20 января 1938 г. в ВЭИ по материалам эскизного проекта, выполняемой Ленинградским индустриальным институтом по заданию Главгидроэнергостроя и Гидроэнергостроя.

<sup>1</sup> См. статьи А. А. Горева, В. А. Толвинского, В. В. Вульфа, «Электричество» № 11 и 12, 1937.



ной системы. Сохранение устойчивости при такой аварии считалось обязательным как для блочной, так и для связанной передачи.

Предельная мощность, которая может передаваться по одной цепи в Москву, определенная из условий устойчивости системы при этой аварии, равна 0,71 натуральной мощности линии. Эта величина не зависит от напряжения линии, если только параметры конечных устройств, отнесенные к натуральной мощности, постоянны.

На основании этих расчетов максимальная рабочая нагрузка на одну цепь куйбышевской передачи во всех вариантах как блочного, так и связанного была принята равной 0,71 натуральной мощности одной цепи.

Проверка на устойчивость при выпадении одной блочной передачи была произведена при таких предположениях. Считалось, что реактор на приемном конце линии отсутствует и что упреждающая мощность этого конца компенсирует часть отстающей мощности, поглощаемой приемниками, улучшая  $\cos \varphi$  на зажимах московских генераторов. При отключении блока московская система теряла не только активную мощность, равную мощности блока, но и реактивную мощность линии, что вело к внезапной нагрузке генераторов отстающим током и соответственному понижению напряжения на их зажимах.

Нагрузка секции московской системы, питающейся выпавшим блоком, на 25% имела постоянную проводимость и на 75% состояла из асинхронных двигателей двухкратной перетружаемости, загруженных в момент аварии на  $\frac{3}{4}$  своей мощности.

Продолжительность аварии (трехполусное к. з. на линии) принималась равной 0,1 сек, после чего блок отключался.

Расчет показал, что за время аварии двигатели не успевают достичь критической скорости, причем напряжение на их зажимах не падает ниже того предела, при котором они способны удерживать нагрузку. Нужно отметить, что этот положительный результат был получен для того типа схемы замыкания, который был принят для напряжения 300 kV.

Из расчетов следует, что блочная цепь при напряжении 300 kV не выпадает из синхронизма в случае наиболее тяжелой аварии вне зоны блока; при аварии же в зоне блока она отключается без нарушения непрерывности снабжения потребителей.

Необходимо отметить, что устойчивость моторной нагрузки в этом последнем случае может быть существенно увеличена, если шунтовой реактор будет установлен и на приемном конце линии, вместе с соответствующей мощности синхронным компенсатором; тогда при отключении блока приемная система будет терять только активную мощность, но не потеряет упреждающей реактивной мощности приемного конца линии, что и является главной причиной снижения напряжения на зажимах двигателей. Эта мера — включение реактора на приемном конце линии, благоприятствующая также исключению перенапряжений рабочей частоты на линии при одностороннем с приемного конца ее отключении, приводит, однако, к некоторому вздорожанию

устройства и ухудшению условий работы генераторов приемной системы в нормальном режиме, почему в настоящей фазе изучения вопроса не рекомендуется.

Связанная передача должна во всяком случае сохранять устойчивость при авариях в приемной системе. Таким образом мощность, передаваемая по одной цепи связанной передачи, не должна быть больше 0,71 натуральной мощности цепи. Кроме того, связанная передача должна быть устойчива и при авариях на самой линии. Это требование должно повести к снижению рабочей мощности одной цепи связанной передачи: сравнению с блочной, если не будет принято каких дополнительных мер к повышению устойчивости. В этом последнем предположении расчет дал следующие цифры.

Число цепей	Число переключаемых постов	Допустимые нагрузки одной цепи в долях натуральной мощности при длине линий (km)		
		500	700	900
2	—	0,48	0,35	0,28
2	1	0,68	0,52	0,43
2	3	0,86	0,67	0,56
3	—	0,68	0,52	0,43
3	1	0,84	0,65	0,53
3	2	0,92	0,72	0,60
3	3	0,98	0,75	0,64

Расчет был произведен при следующих предположениях.

Авария имеет место у шин генераторной станции и состоит в трехполусном к. з. продолжительностью в 0,08 сек. Принималось, что такое замыкание приблизительно эквивалентно по своему эффекту двухполусному к. з. продолжительностью в 0,1 сек. Такое время отключения аварии следует считать по опыту передачи Болде-Дам — Лос Анжелос достижимым. Таким образом приведенные в таблице цифры относятся только к двухполусным к. з. предельно малой продолжительности; устойчивость связанных систем в трехполусных к. з. не гарантируется.

Считалось, что инерционная постоянная генератора равна 10 сек; после окончания расчетов генератора заводом выяснилось, что эта постоянная будет больше (см. ниже) и, следовательно, нагрузку на одну цепь можно повысить по сравнению с указанным в таблице значением ее.

Принималось, что э. д. с. генератора за его переходной реактивностью остается постоянной во время аварии; таким образом благоприятный эффект возможного применения быстрого действия возбуждения не учтен.

Ни сопротивление дуги, ни активные сопротивления системы в аварийной фазе процесса учитывались; не принят был также во внимание возможный благоприятный эффект демпферных клеток на роторе генераторов, которые могут существенно повысить устойчивость системы в двухполусных к. з.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Также не учтен был и весьма существенный, согласно сообщению проф. С. А. Лебедева, эффект включения в трансформаторную обмотку линейных трансформаторов активного сопротивления.

Предполагалось, что емкостной эффект линий полностью компенсирован включением 100% реакторов по обоим концам каждой цепи<sup>4</sup>.

Цифры таблицы показывают, что при приведенных предположениях мощность одной цепи связанной передачи, даже при минимальной продолжительности аварии, значительно меньше, чем мощность 0,71, определенная из условия устойчивости цепи при наиболее тяжелой аварии вне зоны блока. Таким образом чтобы уравнивать рабочие мощности блочных и связанных передач, для последних, кроме устройства переключательных постов, необходимо предусмотреть ряд дополнительных мер, повышающих их динамическую устойчивость при авариях на линии. Имеется ряд средств, практическое применение которых не может вызвать возражений с точки зрения их сложности и неопытности, именно: искусственное повышение махового момента гидротурбогенераторов; быстродействующее возбуждение на генераторах; устройство демпферных клеток; включение активных сопротивлений в нейтраль линейных трансформаторов.

Две последние меры эффективны только при асимметричных авариях.

Выбор наиболее эффективных мер в настоящей работе не может быть произведен. Полагаясь, что той или иной их комбинацией, при точенных расчетах, можно будет довести рабочую нагрузку одной цепи связанной передачи до величины 0,71 ее натуральной мощности, принятой для блочной передачи. В этом предположении были просчитан ряд вариантов, приводимых ниже.

**Возможные варианты передачи Куйбышев — Москва.** На заводе «Электросила» были просчитаны два варианта генератора: 1) 195 MW, 200 MVA,  $\cos \varphi = 0,85$ ; 2) 160 MW, 200 MVA,  $\cos \varphi = 0,80$ .

Для уменьшения размеров здания станции нужно при прочих равных условиях отдать предпо-

ложение предельному по мощности генератору. Его мощность на валу с учетом к. п. д. должна быть около 200 MW. Мощность турбины должна превышать максимальную рабочую мощность генератора на 5—10%. Возможность осуществления такой турбины не могла быть установлена с полной надежностью. Поэтому в расчетах вариантов передачи было предположено, что предельная мощность турбины составляет 200 MW на валу, а допустимая максимальная рабочая мощность агрегата на зажимах генератора с учетом к. п. д. и 10% запаса на регулирование равна 176 MW.

Однако многочисленными расчетами было установлено, что увеличение номинальной мощности генератора вследствие снижения удельных значений его реактивностей и вытекающего отсюда улучшения условий устойчивости безусловно выгодно. Поэтому в задании для предельного генератора мощность его вновь увеличена до 195 MW при  $\cos \varphi = 0,85$ . Вследствие этого в приводимых ниже вариантах генераторы работают нормально при мощности на зажимах на 10% меньшей их номинальной.

Потери в линии передачи и реакторах приняты были равными 10% передаваемой мощности. В этих предположениях были рассчитаны приведенные в таблице типичные варианты передачи.

Как следует из примечания к таблице, варианты связанных передач лишь условно равноценны вариантам блочных. С другой стороны, вариант 2 нельзя рассматривать как реальный, так как он накладывает слишком высокие требования на вращающийся резерв приемной системы.

Кроме подсчетов стоимости приведенных вариантов, было также исследовано изменение стоимости передачи вместе с напряжением, причем в подсчет было включено и напряжение в 230 kV. При этих подсчетах принималось, что реактивности конечных механизмов, отнесенные к их номинальной мощности, остаются неизменными, а номинальная их мощность пропорциональна натуральной мощности передачи. Необходимое в некоторых случаях дробление механизмов из-за перехода их мощности за пределы реально осуществимой не учитывалось. В этих теоретических

Типичные варианты передачи Куйбышев—Москва

Номер и название варианта передачи	Напряжение линии передачи, kV	Натуральная мощность одной цепи MW	Мощность в Москве на 1 цепь MW	Число цепей	Число постов	Общая мощность в Москве, MW	Общая мощность в Куйбыше MW	Число генераторов	Мощность одного генератора, MW	Общая мощность генератора, MW	Число и мощность (MVA) понижающих трансформаторов	Число и мощность (MVA) повышающих трансформаторов	Число и мощность (MVA) реакторов отправного конца	То же приемного конца	Стоимость передачи на 1 kW в Москве, руб.
330-kV блочный	300	225	160	4	—	640	704	4	195	780	8 × 165	4 × 230	4 × 160	4 × 115	633
330-kV " "	400	400	285	2	—	570	627	4	173	692	6 × 195	4 × 204	2 × 285	2 × 204	615
330-kV связанный	300	225	160	4	2	640	704	4	195	780	8 × 165	4 × 230	4 × 115	4 × 115	713
330-kV " "	330	272	193	3	3	580	638	4	178	712	6 × 200	4 × 209	3 × 140	3 × 140	720
365-kV " "	346,5	300	213	3	3	639	703	4	195	780	6 × 220	4 × 230	3 × 153	3 × 153	707
400-kV " "	400	400	285	2	4	570	627	4	173	692	6 × 195	4 × 204	2 × 204	2 × 204	720

**Примечание.** В связанных вариантах путем изменения инерционной постоянной, применения быстродействующего возбуждения или иных мер, повышающих динамическую устойчивость, необходимо добиться повышения допустимой нагрузки на 1 цепь: на 8% в варианте 3, на 11% в вариантах 4 и 5 и на 14,5% в варианте 6. Стоимость этих мероприятий приведенных в последнем столбце таблицы цифрах не учтена.

предположениях оказалось, что повышение напряжения линии передачи с 230 до 300 kV приводит к снижению ее стоимости на 9,6%, а переход с 300 на 400 kV дает снижение в 12%. Однако эта экономия в большинстве реальных случаев недостижима из-за необходимости дробления оборудования (трансформаторов и масляных выключателей).

В стоимость вариантов блочных передач стоимость вращающегося резерва не включалась, так как предполагалось, что независимо от того, будет ли система питаться от дальних передач или нет, она должна по соображениям надежности снабжения и резервирования против аварии наиболее крупного из внутренних ее агрегатов, иметь пятипроцентный вращающийся резерв.

При учете стоимости вращающегося резерва следует по мнению автора принять во внимание следующие соображения.

Если максимум нагрузки в системе равен 4000 MW, при пятипроцентном резерве она должна иметь в работе во время максимума 4200 MW; стоимость резервной мощности должна быть распределена между всеми агрегатами системы, пропорционально вероятной продолжительности аварии каждого агрегата во время максимума и его мощности. Если за отсутствием данных допустить равную вероятную продолжительность аварии каждого киловатта мощности, при 5%-ном вращающемся резерве на каждый такой киловатт должно быть начислено 5% средней стоимости установленного киловатта в системе, т. е. сумма порядка 50—60 руб. От подобного начисления могут быть освобождены только те агрегаты, которые имеют 100%-ный резерв во всех своих элементах (генераторы, трансформаторы и линии) и дают, следовательно, полную гарантию подачи 100% своей мощности во время максимума. При связанной передаче такой гарантии нет, так как при аварии генератора или повышающего трансформатора подаваемая мощность уменьшится на величину мощности выпавшего элемента. С другой стороны очевидно, что вероятность выпадения части мощности, подаваемой связанной передачей или эквивалентным ей по мощности комплексом блочных передач, различна, если, как это предполагается, авария на самой линии в первом случае не дает редукации подаваемой мощности, а во втором — ведет к выпадению одного блока. Поэтому при распределении стоимости резерва между агрегатами системы, включающей связанные передачи, на их киловатт мощности должно быть сделано меньшее начисление, чем на киловатт мощности передач блочного типа. Разница в этих начислениях и должна быть учтена при экономическом сравнении обоих типов передач.

Данные приведенной таблицы позволяют сделать следующее заключение. С повышением напряжения стоимость передачи несколько снижается, но не существенно.

Блочные передачи требуют на 10—15% меньших капиталовложений на 1 kW передаваемой в Москву мощности, если необходимый для них вращающийся резерв имеется налицо.

В вариантах связанной передачи передаваемую в Москву мощность следует считать, в данной

фазе развития проектных работ, лишь условно обеспеченной. В особенности это относится к двухцепному 400-kV варианту, где необходимо путем специальных мер достичь повышения устойчиво передаваемой мощности на 14%.

Блочные варианты допустимы по соображениям устойчивости системы при выпадении одного блока и величины вращающегося резерва лишь при мощностях на одну цепь не выше 200 MW. Это накладывает ограничение на выбор напряжения — напряжение выше 300—330 kV уже неприемлемо.

Перечисленные положения непосредственно вытекают из работы Ленинградского промышленного института. Приведем некоторые дополнительные соображения.

Максимальная мощность одной цепи блочной передачи обусловлена, с одной стороны, предельной мощностью генератора, с другой — ожидаемой максимальной величиной одного агрегата приемной системы, которая определяет необходимый вращающийся резерв. Принимая мощность предельного генератора в 195 MW (230 MVA) и допуская, что турбину можно будет построить с необходимым запасом на регулирование (на мощность 210—220 MW), мы получаем возможность передать в Москву  $195 : 1,1 = 177$  MW; при принятой пропускной способности блочной цепи в 0,71 натуральная мощность ее будет 249 MW, что отвечает напряжению в 315 kV. Если для повышения надежности ввести некоторый запас в пропускной способности линии, приняв рабочую мощность ее 0,65, получим напряжение в 330 kV. Это напряжение и следует считать предельным для блочной передачи при длине в 900 km.

Этот вариант дает в Москве при 4 цепях 708 MW, при 5 — 885 и при 6 цепях — 1060 MW, т. е. он может разрешить задачу передачи и при изменении заданий в сторону увеличения мощности, подаваемой в Москву. Однако нужно заметить, что в последнем случае с блочным вариантом будет серьезно конкурировать вариант связанной передачи из трех цепей с тремя переклещательными постами каждая, который, в зависимости от числа генераторов в комплексе (4,5 или 6), потребует<sup>5</sup> соответственно линейных напряжений в 380, 425 и 466 kV при мощности в Москве в 708, 885 и 1060 MW.

Между прочим последний подсчет показывает, что при требовании повышения подачи энергии на Москву, связанная схема передачи приводит нас к таким напряжениям, которые не могут быть приняты как следующая, после 220 kV, ступень нашего стандарта, вследствие недопустимого разрыва в натуральных мощностях, приходящихся на одну цепь. Если принять во внимание, что схема единой высоковольтной сети Европейской части Союза потребует передач на более дальние расстояния при меньших передаваемых мощностях, придется, повидимому, в этом случае пойти на введение двух ступеней напряжения.

Если по уточнению заданий для комплекса дальних передач, связанных с Волжской гидроэнергетической проблемой, или более общестро-

<sup>5</sup> В этих расчетах, так же как и в случае блочного варианта с повышенным запасом, допустимая нагрузка на 1 цепь принята в 0,65 ее натуральной мощности.

блемой сверхмощных передач Европейской части Союза, окажется возможным, экономически и технически, ограничиться напряжением в 300—330 kV,—проблема выбора между блочной или связанной схемой может отпасть, так как блочные передачи могут быть всегда превращены в связанные, путем последующего устройства переключательных постов, составляющих главную часть разницы в стоимости этих вариантов.

**Технические условия на оборудование. Генераторы.** На основании расчетов завода «Электросила» были установлены следующие значения основных характеристик генераторов.

	Вариант		Задано
	I	II	
Мощность генератора, MW . . . . .	195	160	—
Коэффициент мощности . . . . .	0,85	0,8	—
$T_d$ . . . . .	0,89	0,89	0,9
$T_d'$ . . . . .	0,56	0,56	0,6
$T_d''$ . . . . .	0,36	0,32	0,32
$H^*$ , sec . . . . .	13	15	10
$T_d''$ . . . . .	10	9,5	—

\* Инерционная постоянная.

\*\* Постоянная времени контура возбуждения при разомкнутом статоре.

Цифры, приведенные в последнем столбце, были положены в основу расчетов устойчивости, результаты которых приведены выше. Хотя расхождение между заданным значением переходной реактивности и расчетной по первому варианту не превышает 10%, вопрос о снижении этого параметра, по крайней мере до заданной величины, является существенным.

Высокие значения  $T_d'$  снижают эффективность быстродействующего возбуждения. Ввиду важности этого вопроса для выбора схемы передачи приведены некоторые результаты предварительного его исследования.

Выяснилось, что для получения максимального эффекта необходимо возбуждать гидрогенератор от отдельно стоящего возбуждательного агрегата, индукционный двигатель которого питается от вспомогательного генератора, сидящего на одном валу с главным.

Предварительные расчеты дали такой результат.

Связанная передача, состоящая из двух цепей с одним переключательным постом и 100%-ными реакторами на обоих концах, при постоянной  $\lambda$ , д. с. за переходной реактивностью выпадала из синхронизма при аварии около станции (трехфазное к. з. длительностью 0,8 sec) уже при нагрузке, равной 0,5 натуральной мощности. Применение быстроотзывчивого возбуждения со «взлетом»<sup>6</sup> напряжения, равным 3 и «потолком» 1,5, сделало передачу устойчивой.

Увеличение взлета с 3 до 8 при увеличении потолка с 3,5 до 7,5 повысило устойчиво передаваемую мощность на 20%. Постоянная времени короткого хода гидрогенератора принималась в этих расчетах равной 4,5 sec.

По мнению завода «Электросила» для предель-

ного генератора по первому варианту осуществимым возбудитель, который (при мощности в 2000 kW с подвозбудителем мощностью в 500 kW) параллельным включением катушек всех полюсов (наружный диаметр такого возбудителя будет около 3,3 m) даст взлет, равный 3 при потолке 2,5.

Одновременно оказалось, что постоянная времени контура ротора генератора будет не 4,5, как ранее предполагалось, а 10 sec.

Упомянутый выше расчет влияния быстроотзывчивого возбуждения на устойчивость связанной двухцепной передачи был повторен с этим возбудителем при  $T_d'$  генератора в 10 sec. Результат оказался отрицательным — система выпадала из синхронизма. Таким образом пока вопрос об эффективности быстродействующего возбуждения нельзя считать окончательно решенным, дальнейшие расчеты производятся. Применение безинерционных возбудителей типа ртутного выпрямителя вызывает большие сомнения в отношении надежности.

**Трансформаторы и шунтовые реакторы.** Учитывая опыт Болдер-Дам, в расчетах была принята реактивность рассеяния как повышающих, так и понижающих трансформаторов в 11%, причем предполагается задать в технических условиях реактивность в 10%; один процент считался возможным допуском при выполнении этого требования.

Мощности повышающих трансформаторов определяются предельной мощностью генератора. При генераторе по первому варианту мощность единицы должна быть 77 MVA. Это есть тот предельный размер, на который приходится рассчитывать повышающие трансформаторы. При условии сооружения трансформаторного завода непосредственно на водном пути, связанном с Волгой (выбор оптимального местоположения такого завода значительно облегчается устройством водной системы Москва—Волга), транспортно-габаритные ограничения отпадают; расчеты показали, что в этом случае проектное значение реактивности может быть достигнуто как при напряжении 300, так и при напряжении в 400 kV.

Выбор мощности понижающих трансформаторов должен быть сделан в соответствии с условиями схем примыкания. И здесь могут встретиться случаи, когда пользование водным транспортом окажется невозможным. Как показали расчеты, в этом случае транспорт накладывает некоторые ограничения на возможность снизить реактивность предельных 400-kV трансформаторов до 10%. Однако, применяя специальные транспортные средства (20-осный «крокодил» и перевозка трансформаторов в специальных баках, наполненных сухим азотом, без масла), можно осуществить трансформаторы с 12%-ной реактивностью. Расчеты показывают, что небольшое увеличение реактивности трансформаторов не оказывает решающего влияния на устойчивость системы.

Устройство встроенных регуляторов напряжения, работающих под нагрузкой, ни в повышающих ни в понижающих трансформаторах не предполагалось вследствие связанных с ним трудностей.

Были сделаны попытки конструктивного расчета шунтовых реакторов, компенсирующих емкость линии. При больших мощностях реакторов

<sup>6</sup> Взлетом напряжения называется отношение скорости нарастания напряжения в вольтах в секунду к номинальному напряжению возбуждения в вольтах.

стrepились трудности, связанные с отводом тепла, которые пока разрешаются их дроблением. Поэтому стоимость этих аппаратов достигнет, по-видимому, стоимости трансформаторов соответственной мощности и напряжения; на результаты экономических подсчетов это обстоятельство, однако, существенно не повлияет. В этой совершенно новой области подготовительную работу ни в каком случае нельзя считать законченной; необходимы дальнейшие исследования<sup>7</sup>.

**Силовые выключатели.** Подбором приемной схемы, которая удовлетворяла бы одновременно как условию устойчивости, так и минимальным значениям токов к. з., удалось снизить разрывную мощность масляных выключателей, работающих после понижающих трансформаторов при напряжении в 110 кВ до 2500 MVA, при времени отключения, включая время реле, в 0,2—0,25 сек как в случае блочной, так и в случае связанной переключки. Этот результат следует считать весьма благоприятным, так как большие разрывные мощности этих выключателей значительно увеличили и стоимость приспособления потребляющих систем к приему куйбышевской энергии.

Для связи отдельных секций приемной системы между собою предусматривалась кольцевая линия напряжением в 220 кВ, связанная с отдельными секциями трансформаторами 110/220 кВ с подходящей реактивностью. Силовые выключатели, устанавливаемые на этом кольце, должны разорвать мощность к. з. не менее чем в 3500 MVA при полном времени отключения 0,1 сек. Более благоприятных результатов для выключателей достичь не удалось. Приведенная цифра учитывает уже, кроме естественной реактивности воздушных линий 220-кВ кольца, включение в рассечку 3%-ных факторов.

Выключатели линейного напряжения (300, 346,5, 400 кВ) в связанных передачах должны быть рассчитаны на разрывную мощность в 5500 MVA и минимальном возможном времени отключения, которое во всяком случае не должно быть менее 0,1 сек, считая и время работы реле. Ускорение действия этих выключателей весьма существенно для подъема пропускной способности связанных систем. В блочных передачах разрывная мощность линейных силовых выключателей может быть в зависимости от схемы примыкания снижена до 3000 MVA при времени отключения 0,1 сек. Таким образом проблема силовых линейных выключателей как в отношении скорости действия, так и разрывной мощности при связанных системах значительно более серьезна. Другой стороны, возможность применения при связанных системах более высоких напряжений позволяет надеяться на успешное ее разрешение.

**Изоляция линий, подстанций и аппаратуры.** Нормированные напряжения (110, 154 и 220 кВ), как известно, являются средними эксплуатационными; напряжения повышающей подстанции выше, а понижающей подстанции ниже на 5% против среднего эксплуатационного. Класс изоляции аппара-

туры нормируется на 5% выше напряжения повышающей подстанции (121, 169 и 242 кВ).

При отсутствии перепада на линии — при равенстве напряжений ее приемного и отправного концов, — очевидно, допустимо для данного класса изоляции аппаратуры, принимать на обоих концах линии напряжение, равное напряжению повышающей подстанции соответствующего стандарта.

Так как многочисленные расчеты не обнаружили какой-либо выгоды от введения перепада на линии вследствие того, что он может при заданном классе изоляции привести только к снижению напряжения одного из концов, но не к его повышению, во всех расчетах принималось, что напряжения на обоих концах поддерживаются одинаковыми. Класс изоляции соответственной аппаратуры должен, следовательно, отвечать напряжениям, превосходящим на 5% напряжения различных вариантов. В соответствии со сказанным имеем следующий вывод.

Повышающая подстанция . . .	300	400	330	346,5	кВ
Среднее эксплуатационное . . .	286	380	315	330	
Понижающая подстанция . . .	272	362	300	315	
Класс изоляции аппаратуры . . .	315	420	346	364	

При разных напряжениях концов необходимо накладывать 5% на наибольшее из двух напряжений. При установке какой-либо аппаратуры вдоль самой линии нужно рассчитывать ее изоляцию на наивысшее возможное в установившемся режиме работы линии напряжение в месте установки аппарата с накидкой в 5%. В частности, отсюда следует, что изоляция выключателей переключательных постов, устраиваемых вдоль линии длиной в 900 км, должна удовлетворять более высоким требованиям, чем изоляция конечных аппаратов линии.

Согласно установившейся в последнее время практике изоляция воздушных линий и аппаратов, к ним приключенных, рассчитывается из соображений грозоупорности. Для выяснения возможной степени грозоупорности куйбышевских линий в порядке первого подхода к вопросу была исследована грозоупорность тех линейных конструкций, на которых основывались расчеты Ленгидэпа.

Прежде всего путем анализа литературных данных удалось установить, что вся совокупность имеющихся наблюдений над грозовыми авариями хорошо укладывается в следующую зависимость между вероятным числом отключений линий на 100 км в год —  $n$  и защитным уровнем линии / (наибольший ток отвода молнии в килоамперах), при котором отключение не имеет места<sup>8</sup>:

$$n = 21,5e^{-0,051I}.$$

Длина фронта волны тока молнии, ввиду отсутствия исчерпывающих сведений, принималась в 1 и 3 мсек. Недостаточность наших знаний о роли короны при импульсах заставила делать расчеты

<sup>8</sup> Ток в стволе молнии в килоамперах, умноженный на волновое сопротивление отвода, принятое в дальнейшем равным 300  $\Omega$ , дает так называемый динамический потенциал молнии в мегавольтах. Наблюдаемый в изолированной опоре при сопротивлении заземления, равном нулю, ток вследствие отражения равен  $2I$ .

В материалах работы Ленинградского индустриального института имеется записка инж. А. В. Трамбицкого „Эскизный проект линейного шунтирующего трехфазного группового фактора на 400 кВ и 210 MVA“.

как с учетом короны на проводах, так и при отсутствии ее.

Защитный уровень линий при прямом ударе в опору<sup>9</sup> оказался лежащим при сопротивлении заземления в 10  $\Omega$  в пределах 25—46 MW для линий 300 kV и 35—65 MW для линий 400 kV в зависимости от длины фронта волны и учета или неучета короны. Для фронта в 3  $\mu$  sec без короны соответственные цифры были: 33 MW (110 kV) и 45 MW (150 kV). Эти цифры показывают ничтожную вероятность перекрытия изоляторов при прямом ударе в опору.

Иной результат получился в случае удара в трос в середине пролета.

Высота троса под проводами в середине пролета была в проекте Ленгидэпа принята равной 10 м, а длина пролета — 400 м. Для 300-kV линии получаются такие цифры: при волне  $1/40 \mu$  sec — без учета короны 11 MW ( $I = 36$  kA), при учете ее 19 MW ( $I = 63$  kA); при волне  $3/40 \mu$  sec — без учета короны 19,4 MW ( $I = 65$  kA), при учете ее 34 MW ( $I = 113$  kA). Линия 400 kV дала весьма близкие к этим цифры. Вероятность перекрытий с троса на провод при этих значениях ни в каком случае нельзя считать ничтожной, таким образом расчет обнаружил необходимость координировать изоляцию опор с изоляцией пролета путем повышения троса в середине пролета. Поэтому в дальнейших расчетах высота троса над проводами в середине пролета была принята равной 12 м для линии в 300 и 14 м для линии 400 kV. Для последней длина пролета считалась равной 450 м.

Для общей оценки грозоупорности линии к ударам в опору и в середину пролета при различных защитных уровнях было найдено выражение для вероятного числа отключений такой линии в том предположении, что защитный уровень изменяется от максимального до минимального прямолинейно и что вероятность попадания прямого удара в вершину опоры и середину пролета одинаковы. Пользуясь этим выражением, было вычислено среднее число отключений линии в год на 1000 km. В приводимых табл. 1 и 2 даны результаты расчета только для волны  $3/40 \mu$  sec как более вероятной для токов молний большой силы.

Приведенные цифры показывают, что подъем троса недостаточен ввиду неудовлетворительной координации различных элементов линейной изоляции, а также с точки зрения вероятности отключения линии в целом, которая для линий такого значения, как куйбышевские, слишком высока. Естественно, возникает вопрос об устройстве специальной поддерживающей трос конструкции в середине пролета. Эта возможность, равно как и другие меры, подлежит дальнейшему изучению. В частности, расчеты показали, что для сохранения данного защитного уровня при ударе в середину пролета высота подвески троса над проводом должна изменяться пропорционально

Таблица 1

	Характеристика грозоупорности 300-kV линий	С учетом короны	Без учета короны
Прямой удар в опору (сопротивление заземления $R = 10 \Omega$ )	Защитный уровень, MW	46,5	32,5
	То же, kA . . . . .	155	108
	Число отключений в год на 1000 km . . . . .	0,1	0,95
Прямой удар в середину пролета при высоте троса над проводом 12 м	Защитный уровень, MW	41	23,3
	То же, kA . . . . .	137	78
	Число отключений в год на 1000 km . . . . .	0,195	3,9
	Среднее число отключений линии в год на 1000 km . . . . .	0,16	2,55

Таблица 2

	Характеристика грозоупорности 400-kV линий	С учетом короны	Без учета короны
Прямой удар в опору ( $R = 10 \Omega$ )	Защитный уровень, MW	65	45
	То же, kA . . . . .	217	150
	Число отключений в год на 1000 km . . . . .	0,00035	0,1
Прямой удар в середину пролета при высоте троса 14 м	Защитный уровень, MW	45	24,6
	То же, kA . . . . .	150	82
	Число отключений . .	0,1	2,9
	Среднее число отключений в год на 1000 km	0,03	0,8

длине пролета при изменении его в пределах от 300 до 500 м.

Сконструировать изоляторы с необходимыми для линий 300 и 400-kV импульсными характеристиками не представит затруднений; необходимо, однако, экспериментальное изучение явлений на моделях, масштаб которых позволил бы точно учесть роль короны; отсутствие достаточных данных в этом вопросе приводит, как это видно из вышеприведенных таблиц, к результатам, не позволяющим сделать определенные выводы.

Значительные трудности представит вопрос о такой арматуре гирлянд, которая обеспечила бы достаточно равномерное распределение напряжений между отдельными изоляторами и исключила бы возможность образования короны на изоляторах при рабочем напряжении.

Расчеты показывают, что для линий столь высоких напряжений требования, предъявляемые коммутационными перенапряжениями, в некоторых отношениях могут оказаться более суровыми, чем требования грозоупорности. Возможная величина таких перенапряжений в подобных линиях подлежит поэтому более тщательному изучению, чем это было сделано до сих пор. В частности, необходимо серьезно учесть роль

<sup>9</sup> Тип опоры и расположение проводов были взяты согласно эскизному проекту Ленгидэпа; число изоляторов в гирлянде для напряжения 300 kV было принято равным 24, а для напряжения 400 kV — 32. Предполагалось, что изоляторы имеют характеристики изоляторов передачи Болдер-Дам.



короны как ограничителя перенапряжений рабочей частоты.

Согласно предварительным расчетам появление короны на проводах столь длинной линии вызывает перегрузку генераторов и снижает напряжение на их зажимах.

Изучение амплитуды и формы волн, приходящих с линии на подстанцию, обнаружило, что наиболее опасно проникновение длинных несрезанных волн. В предположении отсутствия защитной аппаратуры на подстанции изоляция трансформаторов должна была бы выдерживать продолжительные импульсы с амплитудой порядка 4400 kV при напряжении линии в 300 kV и порядка 5600 kV при напряжении в 400 kV. Применение тиритовых разрядников значительно снижает величину импульсов.

Так как построить изоляцию на импульсные напряжения порядка 5—6 MV при длинных волнах практически невозможно, пришлось остановиться на обязательном применении тиритовых разрядников. Предполагалось, что максимальные расстояния разрядника от защищаемого объекта не превышают 100 м и что коэффициент запаса равен 1,2.

Тиритовые разрядники должны обладать такими характеристиками:

Напряжение линии, kV . . .	300	400
Фазовое разрядное напряжение при 50 Гц, kV . . . . .	520	690

Верхний предел вольтсекундной характеристики искрового промежутка ( $t$  — предразрядное время в  $\mu$  sec) . . .  $850 \sqrt{1 + \frac{1}{t}}$   $1130 \sqrt{1 + \frac{1}{t}}$

Вольтамперные характеристики ( $E_a$  в kV,  $I_a$  в А) . . .  $E_a = 100 \cdot I_a^{0,28}$   $E_a = 130 \cdot I_a^{0,28}$

Амплитуда обрывного тока при рабочем напряжении, А . . . Около 30

Разрядники позволили снизить требования импульсной прочности подстанционной изоляции до практически осуществимых величин.

Требования к электрической прочности при рабочей частоте обосновать расчетами кратности возможных перенапряжений на настоящей стадии работы оказалось невозможным; поэтому в таблице предварительно даются цифры, полученные путем экстраполяции соответственных величин для построенных аппаратов на рабочие напряжения до 230 kV. Анализ имеющихся данных показал, что кривые кратности разрядных и испытательных напряжений с повышением номинального напряжения понижаются, стремясь к асимптоте, которой они достигают уже при напряжении 230 kV.

Характеристики изоляции 300- и 400-kV подстанций

Номинальное напряжение, kV . . . . .	300	400
Класс изоляции аппаратуры, kV . . . . .	315	420
Сухое разрядное напряжение, $kV_{eff}$ . . . . .	910	1200
Мокрое " " " $kV_{eff}$ . . . . .	700	930
Сухое испытательное напряжение в течение 1 min, $kV_{eff}$ . . . . .	790	1050
Мокрое испытательное напряжение в течение 10 sec, $kV_{eff}$ . . . . .	630	830
Минимальное импульсное разрядное напряжение при волне $+1,5/40 \mu$ sec, $kV_{max}$ . . . . .	1680	2150
Разрядное напряжение при запаздывании 2 $\mu$ sec при той же волне, $kV_{max}$ . . . . .	2100	2680
Амплитуда падающей волны при съемке импульсных характеристик не менее, $kV_{max}$ . . . . .	4400	5800

Гарантированная импульсная прочность внутренней изоляции трансформаторов должна определяться из того условия, чтобы выдерживать без повреждений разряд на вводе при максимальном запаздывании.

## Замкнутая схема электропередачи Куйбышев—Москва<sup>1</sup>

С. А. Лебеде  
ВЭИ

В СТАТЬЕ изложены результаты работы лаборатории электрических систем и автоматики ВЭИ по вопросу куйбышевской передачи<sup>2</sup>.

Основным исходным материалом, имевшимся к началу работы, являлся эскизный проект Ленгидэпа, в котором рассматривались варианты передачи энергии при напряжении 300 kV и частично при напряжении 400 kV. Все расчеты относились преимущественно к варианту блочной системы передачи. Согласно проекту стоимость передачи при напряжениях 300 и 400 kV примерно одинакова. Учитывая возможную потребность переброски больших мощностей, чем это было принято в эскизном проекте, а также экономию

в затрате металла при более высоком напряжении, было решено более детально рассмотреть вариант передачи при напряжении 400 kV.

Общая оценка блочной и замкнутой схемы передачи. Неудачная попытка решения задачи передачи энергии из Куйбышева в Москву по принципу Баума породила другую крайность — блочную схему линии передачи. Основанием для отказа от внутреннего резервирования линии были, несомненно, преувеличенные трудности сохранения устойчивости при авариях на линии. Излагаемые ниже материалы свидетельствуют о том, что двухполосные замыкания на землю в нормальной резервированной замкнутой схеме линии не предъявляют чрезмерных требований к защите и выключателям при умеренном числе переключательных постов и что аварии на линии не ограничивают пропускной способности замкнутой линии в большей мере, чем это необходимо для обеспечения надлежащего уровня статической устойчивости. С другой стороны, блочная

<sup>1</sup> Отредактированный текст доклада на совещании в ВЭИ 20 января с. г.

<sup>2</sup> Работа по анализу устойчивости передачи в основном была выполнена Д. А. Городским и М. М. Дерманер; по насыщению дросселям — П. С. Жданов; по искусственной устойчивости — С. А. Лебеде, П. И. Сазанов, П. В. Чебышев; по электронному регулятору напряжения — Л. С. Гольдфарб, Г. Р. Герценберг, А. И. Васильев.



схема встречает серьезные возражения с точки зрения надежности работы приемника при внезапном отключении блока, не говоря уже о повышенных требованиях в отношении вращающегося резерва.

Кроме того, блочная схема значительно осложняет эксплуатацию системы передачи: использование линий при передаче пониженной мощности (увеличение потерь и меньшие запасы устойчивости), ремонт линий, взаимное энергетическое резервирование систем, маневренность.

Замкнутая схема, обладая рядом преимуществ перед блочной как в отношении надежности работы, так и в эксплуатационном и энергетическом, требует для обеспечения устойчивости дополнительных мероприятий (в основном переключательные посты).

**Устойчивость нагрузки в блочной схеме.** Основным техническим вопросом, подлежащий рассмотрению, — это анализ устойчивости нагрузки при выходе блока. Критерий статической устойчивости нагрузки — положительный знак производной от мощности асинхронных двигателей по скольжению. Математический анализ устойчивости по этому критерию довольно сложен. Исследование показало, что этот критерий эквивалентен тому, что производная э. д. с. генераторных станций по изменению напряжения на зажимах нагрузки была бы больше нуля:

$$\frac{dE}{dU} > 0.$$

Задаваясь различными напряжениями у нагрузки, легко определить э. д. с. генераторных станций и построить кривую  $E = f(U)$ . Кривая имеет U-образную форму (рис. 1). Если фактическое значение э. д. с. генераторных станций пересекает

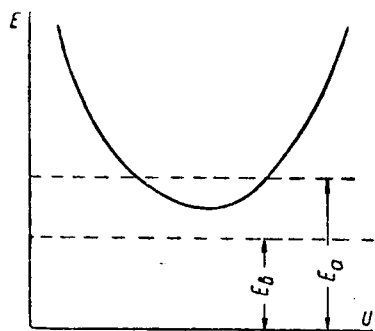


Рис. 1. Определение устойчивости нагрузки

эту кривую ( $E_a$ ), то нагрузка будет устойчива, если же она проходит ниже ее ( $E_b$ ), то это показывает, что установившийся режим данной системы невозможен, и устойчивость ее будет нарушена вследствие выпадения нагрузки.

Расчеты, произведенные для передачи Куйбышев — Москва, показали, что при выходе одного из блоков и резерве в московской сети 10% при напряжении 400 кВ устойчивости нагрузки не обеспечивается, и вся система распадается; при напряжении 300 кВ вследствие потери меньшей мощности устойчивость нагрузки сохраняется, но полученные запасы невелики. В расчетах рассматривалось лишь установившееся состояние и не

учитывалось переходных процессов и эффекта регуляторов напряжения.

**Выбор схемы передачи.** Расчеты показывают, что при напряжении 400 кВ технически возможным решением является замкнутая схема системы передачи. Как будет показано в дальнейшем, преимущества замкнутой схемы по сравнению с блочной требуют дополнительных затрат на переключательные посты, что дает увеличение стоимости<sup>3</sup> переданного киловатт-часа с 2,23 до 2,54 коп.

Для напряжения 300 кВ подробных расчетов не производилось. Однако, учитывая преимущества замкнутой схемы перед блочной и ориентируясь на цифры стоимостей, приведенные в докладе проф. А. А. Горева, следует и при этом напряжении остановиться на замкнутой схеме системы передачи.

**Динамическая устойчивость замкнутой схемы.** Для возможности сравнения результатов расчетов с вариантом блочной передачи параметры схемы (рис. 2) были приняты те же, что и в проекте Ленгидэпа.

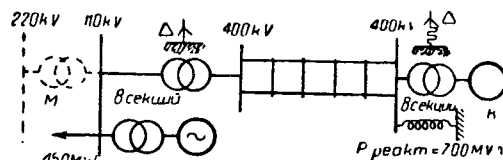


Рис. 2. Схема системы передачи и ее константы.

Генераторы Куйбышева (днепровского типа):  $P_{ном} = 125$  МВА;  $\cos \varphi = 0,8$ ;  $X_d = 90\%$ ;  $X_q = 60\%$ ;  $X'_d = 30\%$ ;  $X'_q = 45\%$ ;  $M = 10$ . Генераторы Москвы:  $P_{ном} = 530$  МВА;  $\cos \varphi = 0,85$ ;  $X_d = 150\%$ ;  $X_q = 150\%$ ;  $X'_d = 20\%$ ;  $X'_q = 20\%$ ;  $M = 16$ . Трансформаторы 400 кВ:  $P_{ном} = 125$  МВА;  $X = 13\%$ ;  $r = 0,5\%$ ;  $b = 4,5\%$ ;  $g = 0,3\%$ . Резистор  $R = 3,5\%$ . Трансформаторы Москвы на генераторном напряжении:  $P_{ном} = 530$  МВА;  $X = 7,07\%$ ;  $b = 3,5\%$ . Линия:  $L = 850$  км;  $r = 0,0493$ ;  $X = 0,413$ ;  $g = 0$ ;  $b = 2,78 \cdot 10^{-6}$ . Нагрузка — 450 МВт,  $\cos \varphi = 0,85$ .

Динамическая устойчивость при двухполюсном замыкании на землю и передаче в Москву 600 МВт при напряжении 400 кВ на приемном конце и высоковольтных шинах Куйбышева была обеспечена установкой: 1) активного сопротивления в нейтрали повышающих трансформаторов (3,5%), благодаря чему эффект двухфазного замыкания на землю был сведен к эффекту замыкания между фазами; 2) дросселей на генераторном конце мощностью 615 МВА для компенсации емкости линии и увеличения э. д. с. генераторов; 3) трех переключательных постов с разбивкой длины линии на участки 19—26—29—26%.

При этих мероприятиях предельное время выключения двухфазного замыкания на землю в любой точке линии получилось не менее 0,2 сек, что с большим запасом обеспечивает динамическую устойчивость замкнутого 400-кВ варианта, так как фактическое время выключения будет значительно меньше.

**Статическая устойчивость.** Статическая устойчивость системы характеризуется величиной коэффициента запаса. Выбор величины его имеет существенное значение при проектировании си-

<sup>3</sup> В подсчете стоимости не учитывалось дополнительной стоимости резерва для блочной схемы, что должно уменьшить разницу в стоимостях.

стем передачи, особенно для передач от Куйбышева, в которых статическая устойчивость является лимитирующим фактором. Коэффициент запаса статической устойчивости есть по существу коэффициент незнания, поэтому всякие уточняющие расчеты позволят несколько снизить его. Однако всегда и для любой системы необходимо задаться определенным коэффициентом запаса устойчивости, ориентируясь на ряд неучтенных в расчетах факторов. При уточнении коэффициента запаса необходимо учесть возможные набросы мощности вследствие аварийного выхода какого-либо агрегата в системе или скачка непредвиденной нагрузки, понижения напряжения в системе, особенно после ликвидации к. з. и частичного затормаживания двигателей, затяжные к. з. в в отдаленных частях системы и пр. Разрешение всех этих вопросов требует дополнительных расчетов и исследований.

Чтобы иметь возможность произвести сравнение с результатами расчетов Ленгидэпа, нами были приняты аналогичные же значения коэффициентов запаса устойчивости<sup>4</sup>.

Для обеспечения устойчивости на этом уровне потребовалось увеличение числа переключательных постов с трех до четырех и мощности дросселей с 615 до 700 MVA. Мощность дросселей была выбрана из условия максимально допустимой загрузки генератора при выходе одного из участков линии. Для нормального режима коэффициент запаса статической устойчивости, с учетом характеристик нагрузки, получился равным 31%, а для случая выключенного участка линий — 21%.

Следует отметить, что коэффициент запаса устойчивости существенен, главным образом, для нормального режима. Для случая выхода одного из участков сети может быть допущено несколько меньшее значение коэффициента, так как такой режим может быть во времени сокращен до минимума искусственным уменьшением передаваемой мощности на сравнительно небольшую величину. Для рассматриваемого варианта передачи необходимо уменьшить передаваемую мощность всего лишь на 7,6%, чтобы увеличить коэффициент запаса статической устойчивости до его значения при нормальном режиме. Снижение мощности при выключении любого из участков линии может быть автоматизировано.

Это мероприятие для увеличения статической устойчивости замкнутых систем, предложенное проф. А. А. Вульф для Сталиногорской грэс, было нами проверено экспериментально на этой станции. Результаты эксперимента показали, что если при выходе связи дать импульс на уменьшение мощности первичного двигателя, то можно удерживать систему в синхронизме, в то время как без уменьшения мощности устойчивость была бы нарушена. Это показывает, что процесс нарушения устойчивости протекает медленнее, чем уменьшение мощности первичного двигателя. Скорости регулирования паровых (на которых производились испытания) и гидротурбин на сегодняшний день являются величинами одного порядка, поэто-

му при применении этого мероприятия статическая устойчивость замкнутой системы по существу приближается к статической устойчивости блочной передачи, которая на выход участка не рассчитывается.

Таким образом можно считать, что уровень статической устойчивости в рассматриваемой замкнутой схеме более высок, чем в блочной схеме.

**Экономическая оценка.** Стоимость замкнутой схемы передачи по сравнению с блочной увеличивается в основном за счет ячеек масляных переключательных постов, а также вследствие увеличения мощности реакторов. В подсчетах приняты те же стоимости, что и в проекте Ленгидэпа.

Для замкнутой схемы стоимости передачи 1 kW мощности составляет 762 руб., для блочной — 635 руб.; соответствующие стоимости энергии в Москве — 2,54 и 2,23 коп./kWh. Необходимо отметить, что стоимость масляных выключателей в проекте Ленгидэпа завышена. Кроме того, не была учтена дополнительная стоимость резерва для блочной схемы. Все это должно уменьшить разницу в стоимостях сравниваемых схем.

**Насыщенные дроссели для увеличения статической устойчивости.** Как показали произведенные расчеты, лимитирующим фактором передачи Куйбышев — Москва является статическая устойчивость. Поэтому нами были разработаны мероприятия, направленные на повышение устойчивости.

Первым мероприятием является применение насыщенных дросселей вместо обычных. Для схемы передачи с дросселями в начале линии синхронизирующая мощность между станцией и приемником зависит от регулирующего эффекта дросселей<sup>5</sup>. Величину регулирующего эффекта можно характеризовать следующим: емкость линии имеет отрицательный регулирующий эффект; у синхронного компенсатора он обычно положителен, а сравнительно невелик (порядка одной единицы у линейных дросселей (ненасыщенных) он равен 1; в случае насыщенных дросселей эта цифра значительно увеличивается).

Рядом расчетов было показано, что чем больше регулирующий эффект насыщенного дросселя, тем больше значение высших гармоник, накладывающих практические ограничения на выбор величины регулирующего эффекта. Однако регулирующий эффект порядка 4—5 может быть сравнительно легко осуществлен. Повышение статической устойчивости при этом получает довольно значительным. Так например, для системы передачи, аналогичной куйбышевской, увеличение предельной мощности за счет насыщения дросселя получилось порядка 15%. Насыщение дросселя сказывается благоприятно также и на динамическую устойчивость, но в меньшей степени (увеличение предельного времени с 0,17 до 0,2 sec).

Высшие гармоники, образующиеся вследствие насыщения дросселя, могут быть компенсированы до десятых долей процента путем специального соединения обмоток дросселя. Третья гармоника компенсируется специальной обмоткой, а пятая:

<sup>4</sup> С тем лишь изменением, что цифры Ленгидэпа были пересчитаны на соответствующие значения из расчета постоянства э. д. с. за синхронным реактансом. Коэффициент запаса в вариантах Ленгидэпа составил 22% для нормального режима работы.

<sup>5</sup> Регулирующий эффект дросселя есть производная от реактивной мощности по напряжению  $\left(\frac{dQ}{dU}\right)$ .

седьмая — параллельным соединением двух групп дросселей, из которых одна соединена в звезду, а другая или в треугольник или в зигзаг.

Применение вместо дросселей трансформаторов с увеличенным намагничивающим током нерационально, так как при этом уничтожается взаимозаменяемость трансформаторов и, кроме того, это уменьшает предельную мощность примерно на 2,2%.

Применение насыщенных дросселей позволяет вновь поставить вопрос о пересмотре схемы Баума. Основным недостатком ее является то, что промежуточные синхронные компенсаторы обладают чрезвычайно небольшим регулирующим эффектом, и их влияние на устойчивость благодаря этому незначительно. Применение насыщенных дросселей на переключательных пунктах и синхронных компенсаторов небольшой мощности (только для регулирования напряжения) значительно увеличивает предельную передаваемую мощность. Целесообразность этого мероприятия для куйбышевской передачи не была проверена, и оно требует дополнительного технико-экономического анализа.

**Искусственная устойчивость.** Теоретический анализ и экспериментальные данные показывают, что при ручном регулировании напряжения статический предел мощности определяется условием, когда частная производная мощности по углу при постоянстве  $\varepsilon$  д. с. холостого хода становится равной нулю  $\left(\frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const})\right)$ . Протекание процесса нарушения статической устойчивости при работе в области искусственной устойчивости  $\left(\frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}) < 0\right)$  характеризуется уравнением

$$\Delta \delta = A_1 e^{\alpha_1 t} + (A_2 \sin \beta t + A_3 \cos \beta t) e^{-\alpha_2 t}.$$

Уравнение показывает, что при работе в области искусственной устойчивости имеет место затухающий колебательный процесс и, кроме того, плавное возрастание угла, определяемое первым членом уравнения.

При регулировании напряжения регулятором, обладающим зоной нечувствительности и непропорциональным регулированием, при работе в области искусственной устойчивости можно добиться лишь динамического состояния равновесия, т. е. машина все время будет находиться в колебательном процессе. Было установлено, что основной причиной, вызывающей колебания генератора, является нечувствительность регулятора. Для устранения этого явления был разработан электронный регулятор напряжения, практически не обладающий зоной нечувствительности. Теоретические исследования возможности работы в области искусственной устойчивости при таком регуляторе показали, что предел устойчивой работы определяется условием

$$\frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d' = \text{const}) = 0.$$

Электронный регулятор напряжения при этом должен иметь статическую характеристику, обеспечивающую постоянство  $\varepsilon$  д. с. за продольным переходным реактансом или некоторое уменьше-

ние ее при увеличении угла. Экспериментальная проверка в лабораторных условиях и на машине мощностью 50 MW показала, что практически результаты получаются лучше, чем те, которые были получены из анализа. Так, из теоретических расчетов для устойчивой работы следовало иметь статизм электронного регулятора примерно 20%, в то время как на машине 50 MW была получена устойчивая работа при статизме 3—6%. Предельная мощность в условиях эксперимента не была достигнута (по условиям перегрузки генератора), однако устойчивая работа происходила при угле 118° (предельный угол 95°), и полученная величина мощности на 200% превышала статический предел мощности.

**Влияние реактанцев трансформаторов на предельную мощность.** Как показали расчеты, произведенные для куйбышевской передачи, влияние реактанцев повысительных трансформаторов на предельную мощность сравнительно невелико и составляет примерно 0,07% на 1% реактанта. Для понизительных трансформаторов понижение реактанта сказывается несколько заметнее и составляет примерно 0,28% на 1% реактанта. Таким образом уменьшение реактанта понизительных трансформаторов более целесообразно, чем повысительных.

**Эффект насыщенных дросселей и электронных регуляторов напряжения на устойчивость передачи Куйбышев — Москва.** Эффект разобранных мероприятий по увеличению статической устойчивости был проверен применительно к системе передачи Куйбышев — Москва. Расчеты производились в двух вариантах: в первом варианте число переключательных постов оставалось тем же и увеличивалась передаваемая мощность; во втором — число постов было уменьшено до трех.

В варианте с четырьмя постами каждое из мероприятий (насыщенные дроссели и электронные регуляторы напряжения) дает увеличение предельной передаваемой мощности на 7%. Оба вместе дают увеличение порядка 10%. При уменьшении числа переключательных постов до трех оказалось, что эффект насыщенных дросселей и электронного регулятора не только компенсирует уменьшение мощности вследствие уменьшения числа переключательных постов, но даже увеличивает предельную передаваемую мощность на 5,3%. Контрольные расчеты динамической устойчивости при двухполосном замыкании на землю дали предельное время выключения при четырех постах 0,27 сек, а при трех — 0,19 сек. Столь благоприятные результаты позволили поставить вопрос о сохранении динамической устойчивости по крайней мере при большинстве, если не при всех, трехполосных к. з. с тем, чтобы получить систему, динамически более устойчивую, чем существующие системы передачи 220 и 110 kV. Предельное время выключения трехполосного к. з. при четырех постах составило 0,11 сек, что может быть обеспечено при собственном времени защиты 0,02—0,04 сек и выключателей 0,06 сек, уже достигнутых на практике. При трех постах это время равнялось 0,07 сек, что уже вряд ли может быть достаточно надежно обеспечено.

Применение насыщенных дросселей и электронных регуляторов напряжения снижает стоимость на передаваемый киловатт и стоимость энергии

в Москве. Результаты расчетов даны в таблице.

		Стоимость пере- дачи на киловатт руб.	Стоимость энер- гии в Москве коп./квт-ч
Без мероприятий для увели- чения статической устой- чивости . . . . .		762	2,544
С применением электронных регуляторов напряжения и насыщенных дросселей . .	4 переключа- тельных поста	701	2,38
	3 переключа- тельных поста	705	2,39

Эти данные показывают, что эти мероприятия дают значительный экономический эффект. Срав-

нение вариантов с четырьмя и тремя переключательными постами показывает, что экономически оба варианта практически равноценны.

**Закключение.** На основании приведенных материалов можно заключить, что короткие замыкания на линии не влекут за собой больших трудностей в замкнутом варианте, вместе с тем отпадает и наиболее серьезное возражение против этого варианта. Пропускная способность линий в замкнутом варианте так же, как и в блочном определяется запасами статической устойчивости, и поскольку при выходе участка цепи может быть принят меньший коэффициент запаса, чем при нормальном режиме, допустимая величина передаваемой мощности почти одинакова в обоих вариантах. Разница в стоимости обоих вариантов, особенно с учетом дополнительной стоимости резерва для блочного варианта, также не столь велика, чтобы оправдать отказ от резервирования линий. Все это позволяет нам уверенно высказаться в пользу замкнутой схемы с ее более высокой степенью надежности, гибкостью и удобством в эксплуатации.

## Намечаемая схема линий электропередач Куйбышевской межрайонной гидростанции<sup>1</sup>

А. И. Баумгольц

Управление строительства  
куйбышевского гидроузла

**В**ЫРАБОТКА электроэнергии в 1937 г. по всему СССР составляла около 40 млн. MWh при установленной мощности около 9,5 тыс. MW. Эти цифры позволяют оценить, каким большим вкладом в энергетику Союза явится куйбышевский гидроузел при своей мощности в первом этапе 2,5 тыс. MW и при запроектированном для него отпуске энергии в 12,5 млн. MWh.

В последующем, когда будет построен еще ряд гидростанций на Волге, куйбышевский гидроузел сможет дать до 15 млн. MWh, и его мощность будет доведена до 3,2—3,5 тыс. MW.

Вся энергетическая система Волги даст мощность около 10 тыс. MW при отпуске энергии 50 млн. MWh.

Куйбышевский гидроузел проектируется как межрайонная гидростанция. Этим определяется необходимость сооружения длинных линий передачи, в первую очередь в районы Москвы и ЦПР, где сосредоточена развитая промышленность при отсутствии достаточной топливной базы и остром дефиците мощности. Поэтому основное направление передачи энергии на большое расстояние — это от Куйбышева на Москву и Горький.

Предполагается, что мощность, передаваемая от Куйбышева в Москву, составит 600 ÷ 1000 MW. Трассы линий передачи намечены лишь предва-

рительно. Возможно, что линии передачи от Куйбышева на Горький и Москву пройдут по объединенной трассе. Существует также вариант самостоятельных трасс на Москву и Горький. Автор считает первый вариант более целесообразным.

В числе первоочередных намечаются линии на Уфу и Савельевку. Как известно, одна из важнейших задач куйбышевского гидроузла — это покрытие ирригационных нагрузок в районе от Куйбышева на юг примерно до Сталинграда — на восток от Волги. Центром этих ирригационных нагрузок будет являться Савельевка.

Впоследствии, когда будет построен узел Камышин, появится ряд других крупных линий передач и линий связи. Одна из крупнейших линий будет Камышин — Москва. Предполагаемая мощность Камышинской установки — около 2000 MW. Длина линии на Москву — около 900 km. О других линиях передачи говорить преждевременно. Во всяком случае линия передачи от Камышина на Куйбышев будет также высокого напряжения (300—400 kV). Проектируется, что в будущем куйбышевский гидроузел будет попрежнему отдавать значительную часть своей мощности: районы, дефицитные по топливу, — в Москву и др., а камышинский возьмет на себя в значительной части питание ирригации, районы Саратова и другие районы к югу от Куйбышева.

<sup>1</sup> Отредактированный текст выступления на совещании в ВЭИ, 20 января с. г.

Как будут работать линии электропередач Куйбышев — Москва?

Куйбышевский гидроузел при наличии судовой деривации может, не нарушая нормального судоходства, вести суточное регулирование в широких пределах, что для других гидростанций невозможно в таком размере. Кроме того, занимая центральное положение в системе Москва — Поволжье — Урал, Куйбышевская гэс будет представлять собой межрайонный энергетический узел. Такую роль Куйбышевская гэс сохранит и после осуществления схемы Большой Волги (Камшин, Чебоксары, Соколы Горы и др.).

Электропередачи Куйбышев — Москва и др., связывая гидроузел с мощными тепловыми системами, позволяют осуществить комбинированную работу тепловых станций и гидростанций, что обеспечит устойчивое энергоснабжение Поволжья при различных по водности годах. При этом режим работы линий передач характеризуется годовым числом часов использования в среднем около 4500; в маловодные годы использование падает до 3000 ч, а в многоводные возрастает до 6500 ч. Загрузка линий передач в Поволжье

будет несколько больше, в результате число часов использования кгэс в первом этапе составит 5300—5000 ч.

Многолетние колебания водного режима куйбышевского гидроузла сравнительно невелики. Если в средний год гидроузел будет отдавать 12,5 млн. MWh, то в маловодные годы он отдаст на 3 млн. MWh меньше, а в многоводные — на 3 млн. MWh больше.

Во всяком случае благодаря связи куйбышевского узла с мощной тепловой системой нормальная работа всей энергосистемы не нарушается и в маловодные годы, так как дефицит гидроэнергии в такие годы покрывается форсировкой тепловой системы.

Намечаемые линии электропередач являются основной частью всей схемы использования Куйбышевской гидростанции. Несмотря на значительные затраты на их сооружение, экономический эффект от интерконнекции энергосистем, начиная от Уфы и кончая Москвой, почти полностью перекрывает эти затраты, сокращая установленную мощность системы, ее резервы и улучшая использование.

## Дискуссия по электропередаче Куйбышев—Москва

Ю. А. Якуб

Управление строительства  
куйбышевского гидроузла

В ПРОЕКТЕ, разработанном Гидроэнергопроектом в прошлом году, намечались следующие схемы передачи энергии от Куйбышева на Москву для передачи 600 MW — 3 линии напряжением 300 kV; от Куйбышева на Горький — 2 линии; питание ирригационного района — 2 линии; питание Урала — 3 линии; на участках Куйбышев — Уфа — Магнитогорск — по 2 линии.

Общая длина линий составляет 7500 км. Куйбышевской гэс при напряжении 400 kV эта линия мыслится в таком виде: Москва, Горький, ирригационный район, Уфа, Магнитогорск.

Линии Куйбышев — Москва проходят недалеко от основного потребителя Горьковского края — района Дзержинск — Муром. Поэтому целесообразен вариант передачи энергии на Москву через подстанцию, которая условно будет находиться где-то в районе Мурома.

На Урале линия 400 kV будет доходить только до

Общая длина линий передач на 400 kV — 3800 км и на 300 kV — 750 км.

400 kV вариант по сравнению с вариантом 300 kV дает экономит 3000 км линий передач; стоимость передачи уменьшится на 100—120 000 000 руб., будет сэкономлено 14—15 000 т меди и 60—70 000 т металла на опоры.

А. А. Горев совершенно правильно отметил, что все расчеты, производимые до сих пор, базировались на завышенных величинах энергопотоков. Во вступительном слове т. Баумгольц сказал, что величина 600 MW мыслится как минимальная, возможно, потребуется передача до 1000 MW. При таком росте нагрузки линий пе-

редачи энергии Центрально-промышленного района, особенно учитывая параллельное этому росту строительство гидростанций на Северном Урале, можно считать, что основное направление электроэнергетики от Куйбышева будет не на восток, а на запад.

В свете этого резко выступают преимущества 400-kV варианта.

Схема 400 kV позволит передать по трем линиям с двумя переключательными постами от Куйбышева на Горький около 1000 MW, что равносильно использованию линии с коэффициентом 0,82, дальше от Горького до Москвы можно будет транспортировать 650—700 MW с коэффициентом 0,85. Эти цифры не являются недостижимыми. Таким образом при 400-kV схеме осуществима передача мощности значительно больше приведенной.

Что касается приемной московской системы, то мне кажется, что реконструкция существующей, исторически сложившейся и в настоящее время непрерывно развивающейся системы в целях приема энергии по системе «блоков» будет в условиях эксплуатации если не невозможной, то во всяком случае трудной задачей.

С. Д. Соловьев

Мосэнерго

НАМЕЧАЮЩИЙСЯ хотя еще и не утвержденный план электростроительства системы Мосэнерго очень сжат. Нельзя утверждать, что Мосэнерго будет располагать большими резервами мощностей. Поэтому выбор блочной системы для передачи куйбышевской мощности в систему Мосэнерго является весьма неосторожным.

Сокращенная стенограмма основных выступлений на заседании в ВЭИ 20 и 31 января с. г.

Если говорить о приеме мощности четырьмя блоками по 160 MW, то мыслится, что каждый блок приходит в какую-то определенную географическую точку. Даже предполагая, что в системе Мосэнерго будут достаточные резервы мощностей, чтобы поднять мощность выпавшего блока, все же говорить о том, что в одну географическую точку удастся доставить мощность 160 MW, нельзя, так как это приведет к большим затруднениям внутри сети. При такой схеме передачи нужно ставить вопрос о коренной реконструкции сети Мосэнерго.

Правда, эту блочную систему можно несколько видоизменить в части вторичной коммутации. Во всяком случае такое решение потребовало бы размельчения отдельных трансформаторных мощностей и подробного просмотра схемы коммутации вторичной сети Мосэнерго.

Вопрос о выборе этой схемы не исчерпывается анализом проблемы передачи энергии на значительные расстояния. Схема эта требует рассмотрения и с экономической стороны.

Например, предположим, что мощность системы Мосэнерго к моменту получения энергии с Куйбышева будет порядка трех с лишним миллионов киловатт и что при блочном варианте потребуется увеличение резерва мощности на 3%. Стоимость этого дополнительного резерва в виде какой-то мощности — тепловой или другой, — отнесенная к стоимости мощности, передаваемой с Куйбышева, потребует вложений, которые составят 100—180 руб./квт. Этот пример показывает, что стоимость киловатта в Москве при блочной схеме будет та же, что и при связанной.

В блочном варианте имеется еще одна деталь. При нем, казалось бы, надо блоки мельчить. Однако повышение напряжения при этом варианте увеличивает мощность каждого отдельного блока. Следовательно, потребуется большой резерв мощности.

Очевидно, блочный вариант, как и следовало из доклада, рационален при напряжении 300 kV. Связанный вариант в части напряжения сулит большие перспективы. Это весьма существенно потому, что все подсчеты велись в предположении передачи в систему Мосэнерго 600—700 MW. Если же возникнет дилемма передачи больших мощностей, то с необходимостью возникает вопрос о повышении напряжения.

Мне кажется, что сейчас уже можно сказать, что блочный вариант в системе Мосэнерго крайне нежелателен. Следовательно, надо идти на связанный вариант и на повышение напряжения.

#### И. М. Маркович Мосэнерго

**В ПЕРЕДАЧАХ** такого типа, как Куйбышевская, есть моменты более важные, чем экономические. Наиболее важные требования абсолютной надежности; надежность должна быть обеспечена во всех элементах передачи как конструктивных, так и режимных.

Передача должна также удовлетворять определенным эксплуатационным удобствам.

Третий момент — это гибкость передачи. Гибкость имеет особое значение для Куйбышевской гидростанции, которая, повидимому, будет работать на несколько энергетических систем без параллельной связи между ними. Гибкость особенно существенна для переброски мощности из одной системы в другую.

При учете всех этих требований, отвлекаясь от экономики сегодняшнего дня, мне представляется, что блочная система совершенно неприемлема. Какие соображения заставляют меня высказываться столь определенным образом?

Тов. Соловьев сказал, что он не ожидает появления таких резервов в системе Мосэнерго, которые требуются при блочной схеме. Это очень серьезный аргумент.

Учитывая основное требование — надежность, я должен забраковать блочную схему, как ненадежную. Она по своей внутренней идее ненадежна.

Блочная система неудобна в эксплуатации. Например, Сталиногорская станция работает сейчас частично по блочной системе, и это лишает возможности выключить линию на осмотр даже на 2 часа, потому что это означает выключение мощности генераторов. При блочной передаче Куйбышев — Москва у нас положение будет не

лучше. Краткие осмотры линий нельзя будет делать, потому что это потребует отключения соответствующих машин. Неприемлема она и по своей коммутационной схеме на самой Куйбышевской станции.

Можно сказать, что и при замкнутой секционированной системе выключение одного участка является вполне надежным по той причине, что имеется возможность к. з. на одноименном участке второй цепи.

Выступление С. А. Лебедева дало весьма интересный материал и показало, на мой взгляд, достаточно убедительно, что замкнутая передача и при напряжении 400 kV может быть вполне надежной. Переходя к моему вопросу о выборе напряжения, я прежде всего коснусь экономической стороны его.

Цифры, продемонстрированные Горевым и Лебедевым, неубедительны. Это вполне понятно. Для авторов докладов и докладов они тоже недостаточно убедительны. Сегодня у нас нет ясного представления ни о стоимости аппаратуры, ни о стоимостях линий.

Но, кроме стоимости, выбор напряжения определяется рядом других факторов, в частности экономическим фактором.

Во время доклада я напомнил проф. Гореву о цветном металле. Я сделал это тогда, когда он сказал, что вариант в 300 kV потребует большого количества цветных металлов, но меньше затруднит аппаратостроительную промышленность. Думаю, что затруднения с цветными металлами могут быть не меньшими, чем с ратостроением. Этот момент заставляет осторожно подойти к вопросу напряжения, и необходимо считать более желательным вариант, требующий меньшего количества цветных металлов.

У нас ввиду вредительских действий сетевое строительство отставало от строительства станций. Мне кажется, что сегодня момент экономии цветных металлов является важнейшим фактором, определяющим преимущества отдельных вариантов.

Вариант 400 kV является, повидимому, более целесообразным.

В предложение т. Якуба желательно внести некоторые изменения. По-моему лучше иметь три цепи на участке Горький — Москва. Это не вызовет большого удорожания варианта.

При секционировании передачи и выключении одного участка на ремонт можно будет в этом случае не опасаться выключения параллельного участка и полного разрыва передачи.

Если мощность передачи достигнет миллиона kW, придется в схеме т. Якуба иметь 4 цепи. Это требует соответствующих подсчетов. С точки зрения эксплуатации ценой было бы иметь вариант передачи, состоящий из 2 цепей, а 3.

(А. А. Горев: — Еще приятнее может быть иметь 4 цепи. Четыре цепи менее приятны с точки зрения расхода цветных металлов.)

При проектировании передачи вопрос об увеличении грозозащиты придется учесть. С этой точки зрения может быть выгоднее линии передачи вести по радиотрассам, но с таким расчетом, чтобы в районах расположения пастов они сходились.

Я хочу напомнить об одном дополнительном моменте, о котором никто не говорил, — это о продольной компенсации. Хотел бы обратить внимание проектирующих организаций на то, что в связи с продольной компенсацией может возникнуть заманчивая идея (может быть при более глубоком подходе она будет отвергнута) — применение двухфазной передачи с третьим проводом — землей.

Какие здесь могут встретиться затруднения? Наиболее серьезное — это влияние на провода большого тока.

Что касается электромагнитных влияний, то в силу того, что токи нормального режима невелики, вряд ли можно встретиться с существенными препятствиями. В случае заземления такой передачи неуравновешенные токи при нормальной системе не будут превышать логичные токи обычных систем. Более неприятны могут быть электростатические влияния.

При передаче по двум проводам для трех цепей (т. е. по 6 фаз, т. е. то же самое, что при двух цепях и малой мощности передачи).

Создание солидных заземлений в обоих концах представляет больших сложностей.



**С. А. Кукель-Краевский**  
Московский энергетический  
институт им. Молотова

ИЗ ТОГО, что нам сообщалось, можно, повидимому, сделать следующие выводы: 1) Передача электроэнергии куйбышевского гидроузла до Москвы технически осуществима и при 330 и при 440 kV. 2) В первом случае возможна блочная передача, а при 440 kV, по-видимому, необходима связанная передача (мои исследования вопроса о вероятных масштабах потребления ко времени готовности куйбышевского гидроузла этот вывод полностью подтверждают).

Оглашенные обоими докладчиками А. А. Горевым и С. А. Лебедевым цифры совершенно согласно показывают, что на один переданный kW блочная передача при 300 kV несколько дешевле, чем связанная при 440 kV.

Однако по моему мнению не эти цифры, а совсем другие соображения решают вопрос о выборе напряжения для тех линий передач от куйбышевского гидроузла и других волжских гидростанций, которые нельзя выполнять уже освоенным стандартным напряжением 220 kV.

Я в свое время выступал против применения промежуточного между 110 и 220 kV напряжения в Днепровской энергосистеме. Но до напряжения 220 kV пропущенная способность линии при передаче на большие расстояния соответствовала мощности агрегатов. То же соответствие пропускной способности одной цепи при 330 kV мощности агрегатов будет иметь место после соединения куйбышевской гидроцентрали с гидротурбиной на 150—200 MW.

Я считаю необходимым иметь для каждой ответственной передачи электроэнергии не менее двух цепей. Если мы остановимся на выборе напряжения 330 kV как следующего стандартного после 220, то пропускная способность одной двухцепной линии будет 300 MW, тогда как в случае выбора напряжения 440 минимальная пропускная способность двухцепной линии будет 600 MW. Это же относится к наиболее длинной линии Москва—Куйбышев, другие связи куйбышевского гидроузла с отдаленными районами будут короче, а следовательно, и пропускная способность еще выше. Отсюда следует бесспорно, что для куйбышевского гидроузла, а тем более для других волжских гидростанций, обойтись только напряжениями 220 kV и 440 kV для связи с различными системами будет невозможно, окажется необходимым применять и промежуточное напряжение 330 kV.

А если это так, то, имея в виду, что даже наиболее длинная линия от волжских гидростанций осуществима при 330 kV, напрашивается вывод о том, что напряжение 440 kV для волжских гидростанций, а в особенности для куйбышевского гидроузла, не будет нужным.

Вся единая система европейской части СССР может быть осуществлена межрайонными линиями 220 и 330 kV<sup>2</sup>, более высокое напряжение при сохранении трехфазного тока понадобится только в Сибири.

То обстоятельство, что в конечном итоге развития при применении напряжения 440 kV будет затрачено несколько меньше цветного металла, чем при напряжении 330 kV, я никак не могу считать решающим доводом для выбора напряжения. Остановившись на 330 kV, мы имели бы возможно более постепенно и более разветленно развивать электрические связи между волжскими гидростанциями и соседними системами. С точки зрения надежности и рациональной конфигурации единой высоковольтной системы, как костяка единой системы, увеличение числа связей и выходов энергии волжских гидростанций дает определенные преимущества.

В частности, например, вовсе не доказано, что когда куйбышевская будет передаваться в Центральную систему 600 MW, целесообразно все эти 600 MW передавать именно в Москву, а не разделять передаваемую энергию на два потока: один на 300 MW на Москву, другой на 300 MW на Горький. При выборе напряжения 330 kV это сделать легко, при выборе напряжения 440 kV это неосуществимо, надо непременно сразу подать

в Москву 600 MW. Но, кроме того, такую большую «порцию» сразу трудно освоить. Линия в 300 MW соответствовала бы годовому приросту потребной мощности в Центральной системе, и ее пропускная способность легко была бы сразу использована без дублирования мощностей. Передача сразу 600 MW примерно в 1944 г. в Москву превысит годовой прирост и повлечет за собой вынужденное бездействие ранее построенных станций.

И, наконец, для наших алюминиевых заводов легче дать в течение двух-трех лет провод для двух линий на 300 MW каждая (при 330 kV), чем, хотя и несколько меньшее количество металла, для одной линии на 600 MW (при 440 kV), но зато сразу в один год. Финансирование сооружения линий при 330 kV тоже будет легче, чем при напряжении 440 kV.

Нагрузка наших электротехнических заводов при развитии связей куйбышевского гидроузла линиями на 330 kV (при блочной системе для больших расстояний) будет значительно меньше, чем нагрузка тех же заводов в том случае, если бы мы остановились на связанных системах передачи при напряжении 440 kV и больших единичных мощностях 600 MW на одну двухцепную линию.

Наконец, перспективы возможности в будущем (начиная со второй очереди Куйбышевской гзэ) перейти на постоянный ток высокого напряжения тоже говорят в пользу выбора напряжения 330 kV.

Тенденция развития техники передачи больших мощностей на дальние расстояния идет в направлении применения подземных кабелей постоянного тока высокого напряжения. Чтобы переиграть капиталистические страны и в области техники передачи больших мощностей, нам следует, не покладая рук, работать над разрешением проблемы передачи электроэнергии на дальние расстояния подземными кабелями постоянного тока высокого напряжения, а для переменного тока остановиться пока во всяком случае для куйбышевского узла первой очереди на напряжении 330 kV и 220 kV.

**А. А. Вульф**

Ленинградский индустриальный институт

**ПРИЕМНАЯ** электрическая сеть Москвы, которую мы принимали в расчеты, должна быть в сущности спроектирована заново.

Исходным было то основное положение, что мощность к. з. приемной сети не должна превышать известную предельную величину. Это достигалось секционированием сети. Произведенные расчеты разделяются на две категории: расчеты упрощенные, так сказать обезличенные, и более уточненные, относящиеся к передаче Куйбышев—Москва.

В упрощенных расчетах полагалось, что существует какая-то приемная сеть, которая может быть заменена некоторой реактивностью, отделяющей место приема энергии удаленной станции от точки приложения эквивалентной э. д. с. приемной сети. Реактивность должна быть такой, чтобы мощность к. з. на низковольтных шинах понижающей подстанции электропередачи не превосходила 3000 MVA.

Этому условию удовлетворяет реактивность в относительных единицах при базисной мощности 225 MW (натуральная нагрузка 300-kV линии), равная  $\frac{225}{3000} = 0,075$ , а при базисной мощности 400 MW (натуральная нагрузка 400-kV линии) —  $\frac{400}{3000} = 0,133$ .

В уточненных расчетах эквивалентная реактивность приемной сети получалась довольно близкой к указанным приближенным значениям. Так, для 300-kV варианта блочной системы вместо указанных величин получилась цифра 0,070, а для связанной системы 400 kV — 0,113.

Как выглядит приемная схема, фигурировавшая в уточненных расчетах передачи Куйбышев—Москва?

Она составляется из следующих элементов: подходящие к Москве линии с их понижающими подстанциями, выделенные для приема их энергии районы, и оставшаяся часть сети системы Мосэнерго.

В случае, например, блочной 300-kV передачи по одному блоку передается 160 MW. От вторичных шин понижающей подстанции 100-kV линиями мощность блока передается несколькими подстанциями. Эти подстанции в

<sup>1</sup> До недавнего времени я признавал в своих работах единой системе необходимость напряжения 400 kV, а теперь считаю ошибочным.



свою очередь соединяются с районными и городскими центральными станциями, линиями и трансформаторами ограниченными условиями токов к. з. мощности. Кроме того, должна быть какая-то объединяющая отдельные элементы городской системы артерия. Эта артерия предполагалась нами в форме 220-kV кольца, соединяющего отдельные районы сети. Такая система в расчетах приводилась к схеме, питаемой от одной эквивалентной э. д. с. и имела эквивалентную реактивность, как указано выше, — 0,070 и 0,113.

А. А. Горев в своем докладе сказал, что от непосредственных расчетов запаса статической устойчивости системы мы отказались, считая достаточным, чтобы устойчивость была соблюдена при любых условиях работы сети.

При такой сложной сети, как Московская, трудно предполагать, чтобы параметры сети заметно менялись при отключении какого-либо из ее элементов. Мы считаем поэтому, что какая бы авария в сети ни была, после ее ликвидации система возвращается в доаварийное состояние. Нарушения режима в таком случае приобретают характер импульса. Такой импульс может иметь разную силу. В пределе можно считать, что станция теряет все 100% своей нагрузки.

Мощность, которая фигурирует в проекте, сообщенном А. А. Горевым, составляет 0,711 натуральной. Система передачи Куйбышев—Москва может выдержать предельную аварию в приемной сети при указанной нагрузке в течение 0,08 sec.

Если исходить из схемы приемной подстанции, которая имеет 2 трансформатора и разделена на шины низкого напряжения на 2 секции, то трехполосное к. з. даже на одной из таких секций не вызовет полной потери нагрузки. Как показали расчеты, при передаче нагрузки 0,71 натуральной длительность такой аварии может быть допущена в 0,25 sec.

Если же эта авария произойдет где-либо в сети на питаемой от трансформатора 100-kV подстанции, то при мощности этого трансформатора, не превышающей 30 MVA, блоковая система способна выдержать такой режим при его любой длительности. Для блоков характерна градация: 1) 0,08 sec как минимальнейшее время отключения наиболее жизненных элементов системы; 2) 0,25 sec для отключения элементов непосредственно примыкающих к точкам вливания куйбышевской энергии и 3) возможность вынести сравнительно более мелкие аварии в сети, которая не принадлежит данной системе. Эти три критерия и характеризуют устойчивость блоковой системы с точки зрения динамических процессов, которые могут произойти в приемной сети.

Случай нагрузки блока 0,71 от натуральной мощности удовлетворяет всем этим трем требованиям. Точно проверен только средний случай. Первый и третий проверены для упрощенной схемы, где приемная сеть представлялась реактивностью, равной 0,075.

(С места:—Вы сказали, что проверяли статическую устойчивость на наихудший случай. Какой это наихудший случай?)

Мы находили ту нагрузку, при которой статическая устойчивость будет предельной. Получилось, что предел статической устойчивости имеет место при длине линии 900 km, предел нагрузки по статической устойчивости равен 0,94 от натуральной.

(С места:—Какой запас получается?)

Запас статической устойчивости получается небольшой. Для передачи 0,71 натуральной он лежит в пределах между 5 и 10%, ближе к последней цифре, чем к первой. Надо заметить, что имеются разные толкования понятия запаса статической устойчивости. Здесь подразумевается запас, рассчитанный при постоянстве э. д. с., определенной по синхронной реактивности и равной той же величине, которая требуется по условиям нормального режима.

Несколько слов относительно 400-kV варианта. Нами была рассмотрена передача нагрузки 0,71 натуральной мощности на цепь при четырех постах при мощности реактора, приблизительно равной той, которую называл С. А. Лебедев (немного меньше), и при применении действующего возбуждения. Устойчивость переходного режима получается на пределе при таком возбуждении, которое имеет скорость подъема порядка 600 V/sec (при 200 V номинальных) с «потолком», равным 2,5-кратному значению нормального напряжения, и при увлечении постоянной инерции куйбышевских генера-

торов до 15 sec вместо 10, как принималось нами ранее. При 10 sec 400-kV вариант получился неустойчивым. По этому мне было бы очень интересно посмотреть, в чем же разница, почему при расчете почти такого же варианта ВЭИ получил 300 MW (0,75 натуральной), т. е. более высокая нагрузка передается более устойчиво, чем получается по нашим расчетам.

(С места:—Активные сопротивления учитывались?)

Активные сопротивления не учитывались. Они не могут дать больших отклонений.

Однако, если даже согласиться с результатом расчета ВЭИ, то нужно иметь в виду, что для блоковой и связанной передачи в одинаковой мере остаются общими для обоих условий к. з. в приемной сети. Приемная сеть представляется наиболее неопределенным моментом во всей задаче. Какие будут в этой сети переходные режимы, как их учитывать? Сейчас мы имеем только первые наметки по этому вопросу. Предположим, что можно создать на линии передачи мгновенное отключение в при бесконечно-дробном секционировании линии.

Тогда, казалось бы, можно работать по связанной передаче на пределе статической устойчивости. Но на самом деле это не так. Для этой передачи необходимо снизить допустимую нагрузку до тех величин, которые получены для блоковой, исходя из условий аварий в приемной сети. В настоящий момент было бы неосторожно превышать эту величину для связанной системы без предварительного детального изучения условий работы приемной сети.

Далее для меня неясен вопрос о реакторе в середине линии. Когда мы попытались перенести тот же реактор, который стоял в начале линии, в середину, то получилось не улучшение статической устойчивости, а ухудшение за счет этого реактора. Дело заключается в том, что реактор посередине линии разбивает ее на два участка и при равенстве напряжения по концам ее создает пониженное напряжение посередине линии.

Скажу в заключение несколько слов относительно расчетов устойчивости приемной сети с учетом поведения приемников. В первом эскизном проекте Ленинградского отделения Гидроэнергопроекта оно учтено не было. Поэтому в настоящем проекте была произведена проверка, как будут вести себя приемники при трехполосном к. з. на блоке, длящемся 0,08 sec (после чего блок отключается). Расчет показывает, что этот режим устойчив. Правда, он проверялся не для всего переходного режима, а только для первого колебания роторов.

Должен, однако, сказать, что ни в одном расчете не ощущалось такой зависимости от исходных условий задания, как в данном. Чувствовалось, что сравнительно небольшое изменение этих исходных положений в ту или другую сторону может сделать рассматриваемый режим либо устойчивым при любых условиях либо неустойчивым. На первый взгляд это обесценивает расчет, но с другой стороны, это дает ценные указания относительно того, что если в реальных условиях получится неустойчивое состояние приемников, то это легко исправить, изменив схему сети.

П. С. Жданов

ВЭИ

**ВЫСТУПАВШИЕ** здесь работники Мосэнерго и Куйбышевского управления привели довольно убедительные доводы в пользу повышенного напряжения. В частности приведенные т. Якуб цифры экономии металла, по сравнению, близки к истине, хотя он и рассматривал совершенно новый, неразработанный вариант сети. Я подставлял аналогичные цифры для старых вариантов сети Ленинграда и получил близкие результаты: примерно 18 500 km провода на 300 kV, с одной стороны, и 8500 km на 400 kV и плюс 3 цепи на 220 kV, запроектированных на Горький, — с другой.

Экономия в проводе составляет 12 000 t, или около 25% общего количества меди. Вариант направления московских цепей через Горький даст при переходе на повышенное напряжение дальнейшую экономию, ибо тогда одна дополнительная 400-kV цепь заменит 3 цепи 220 kV, которые фигурируют в 400-kV старом варианте, где одна 400-kV цепь на Горький не могла быть принята по соображениям надежности.

Вариант направления московских линий через Горький

представляет интерес и с точки зрения надежности, так как на основном участке линии идут 3 цепи (Горький — Куйбышев).

Следует, однако, отметить, что при переходе на трехцепную линию значительно усложняются переключательные посты, если принять американскую схему, а это необходимо. Переход от двух цепей к трем вызовет непропорциональное увеличение числа масляников (с 4 до 6, а может быть до 12). Правда, при этом число постов уменьшится.

Я не согласен, однако, с т. Марковичем в отношении подсчетов себестоимости. Расход меди и себестоимость являются единственным критерием для количественной оценки.

Приведенные проф. Горевым цифры весьма интересны в том отношении, что они убедительно показывают, где лежит наиболее экономичное напряжение.

Минимум себестоимости получается при напряжении 350 kV. Хотя рассматривался вариант линий только на Москву, но если учесть и другие линии, скажем уральские, то и для них 350 kV будет также лучшим решением с точки зрения себестоимости.

Стоимость 400-kV оборудования в подсчетах Ленгидэпа была преувеличена. По мнению нашей лаборатории коммутационной аппаратуры с увеличением напряжения стоимость ячеек выключателей возрастает менее чем по квадратичной зависимости. Если это так, то минимум себестоимости должен сместиться в сторону 400 kV. Увеличение проектного задания передаваемой мощности является дополнительным доводом в пользу повышенного напряжения.

Единственным серьезным возражением, которое я слышал против 400 kV — это было заявление проф. Кукель-Кравецкого относительно того, что будущие межрайонные связи Европейской части СССР потребуют напряжения меньше 400 kV, может быть порядка 300 kV. Но, к сожалению, не было приведено никаких цифр, а без них этот довод представляется мало убедительным. Напротив, на первый взгляд куйбышевские линии представляют собой большую часть тех связей, какие можно ожидать в Европейской части Союза, по крайней мере за 20—30 лет, если к ним прибавить камышинскую линию и исключить те связи, которые прекрасно можно осуществить при напряжении 220 kV.

Теперь о блоках. В прежних своих выступлениях я указывал, что основные возражения блочная схема встречает со стороны зрения устойчивости нагрузки. Известно, что несколько лет назад у нас имел место ряд аварий, описанных под названием «лавины напряжения», которые представляют собой не что иное, как массовое опрокидывание двигателей или неустойчивость нагрузки. Устойчивость двигателей определяется двумя основными факторами: степенью загрузки двигателей и внешней реактивной мощностью между двигателями и э. д. с. станций.

У нас имеет место непрерывный рост коэффициента загрузки двигателей, и реактивность наших генераторов показывает тенденцию к повышению. При таких условиях оказывается достаточным небольшого толчка для того, чтобы наступило массовое опрокидывание двигателей и полное распадение системы. Донэнерго указывает, что у них так называемая лавина напряжения происходила при снижении напряжения порядка 5%. Целый ряд аварий был при напряжении около 90% от нормального. С этими авариями сейчас пытаются бороться, стараясь поддержать уровень напряжения в сети. Но что можно сделать с напряжением, если выйдет генератор? Здесь неизбежно приходится считаться с посадкой напряжения, и с этой точки зрения внезапный выход генерирующих мощностей представляется чрезвычайно опасным. В ближайшем будущем следует ожидать дальнейшего увеличения коэффициентов загрузки двигателей.

Сыграет роль и такой фактор, как большие реактивности вновь устанавливаемых у нас крупных генераторов. Даже при существенном улучшении вопроса с резервами в наших системах вряд ли можно ожидать устранения существующих трудностей в ближайшем будущем в отношении устойчивости нагрузки. В таких условиях блочная схема мне представляется весьма мало приемлемой, ибо здесь проектируются те выходы мощностей, которые так опасны с точки зрения устойчивости нагрузки. Думаю, что не ошибусь, если скажу, что выход генерирующей мощности с точки зрения устойчивости нагрузки является столь же тяжелой аварией, как, скажем, а.з. на магистральной линии с точки зрения динамиче-

ской устойчивости станций. Ленинградский индустриальный институт в своих расчетах, о которых сообщил здесь А. А. Горев, этот вопрос затронул. Однако там рассматривалась устойчивость нагрузки двигателя лишь в переходном процессе при выходе блока, тогда как я считаю наиболее опасным здесь новый стационарный режим, возникающий после отключения блока.

При этом я считал бы неправильным возлагать сохранение устойчивости системы и двигателей только на регуляторы напряжения московских станций.

Несомненным преимуществом для устойчивости нагрузки обладает замкнутая схема. Правда, за это преимущество приходится платить и считаться с некоторым (умеренным) удорожанием схемы. Если год назад после первоначальных исследований схемы Баума аварии на линии представлялись весьма тяжелыми, что вызвало весьма понятный решительный переход в сторону блоков в первых работах Ленгидэпа, то теперь расчеты ВЭИ и также Ленинградского индустриального института показали полную возможность сооружения замкнутых линий. Наши расчеты показали, что динамическая устойчивость не является определяющей для замкнутого варианта.

Мало того, мы считаем возможным поставить вопрос относительно сохранения устойчивости при трехполусных к. з. на линиях, чего мы не требуем от существующих систем. Нами получено время отключения при трехполусных к. з. при известных облегченных условиях 0,1 sec. Собственное время масляников 0,06 sec и защиты 0,02 sec обеспечивает нас по крайней мере при большинстве трехполусных к. з.

Разрывная мощность масляников в замкнутом варианте не является серьезной проблемой, ибо для 400 kV разрывная мощность порядка 5 000 000 kVA не является чрезмерной.

В расчетах Ленинградского индустриального института и ВЭИ имеются кое-какие расхождения. В частности, с точки зрения уровня динамической устойчивости Ленинградский индустриальный институт не считает возможным обеспечить трехполусные к. з. Причина этого та, что институтами были приняты различные исходные данные мощности реактора и генераторов.

Работники Ленинградского индустриального института довольно решительно разделились с запасом статической устойчивости, перейдя к расчетам только динамической устойчивости. Причину такого шага я вижу в трудности установления надлежащих коэффициентов запаса статической устойчивости. Куйбышевская система — первая система, к которой мы подошли строго с точки зрения коэффициента запаса статической устойчивости. Материалов никаких нет. Мы еще не можем сказать, в какой мере с увеличением коэффициента запаса статической устойчивости уменьшается вероятность статических нарушений. Единственный путь — это исследование конечных нарушений, на который встали работники Ленинградского индустриального института. Но почему же динамических, а не статических отклонений стационарного режима от нормальных условий? Динамическая и статическая устойчивость — вещи разные. Короткое замыкание в приемной схеме, которое рассматривают работники Ленинградского индустриального института, по существу ничего не говорит об устойчивости при непредвиденных набросах нагрузки.

Допустим, что в Москве отключается крупная машина. Потерянная мощность распределяется в зависимости от степеней неравномерностей регуляторов турбин между всеми машинами. Если принять, что степени неравномерности у всех регуляторов будут одинаковы, то можно ожидать, что на Куйбышев падет до 20—25% потерянной мощности.

Если же учесть, что степень неравномерности регуляторов гидравлических турбин обычно меньше, чем у паровых, и считаться с возможностью местных неравномерностей в характеристике регуляторов, то, очевидно, можно ожидать, что на Куйбышев ляжет значительно большая доля мощности, может быть до 50%, и такой режим может существовать десятки секунд, до тех пор, пока частотная станция не разгрузит куйбышевских машин, если она будет в состоянии сделать это.

Этот случай мне представляется типичным вопросом статической устойчивости. Сохранение устойчивости в этом режиме может быть обеспечено надлежащим запасом именно статической устойчивости в нормальном режиме.

Таким образом я считаю необходимым рассчитывать

статическую устойчивость как таковую, установить нужный коэффициент запаса и его в дальнейшем обеспечить. Здесь фигурировали два варианта генераторов — 160 MW,  $\cos 0,8$  и 195 MW,  $\cos 0,85$ .

Удешевление машин и станций говорит в пользу второго варианта. Однако простое сопоставление реактанцев свидетельствует, что параметры более мощных машин менее приемлемы, чем 160-MW: у машин 160 MW переходный реактанс меньше на 10%. Это уже значительная разница в их пользу. Далее из-за различия  $\cos \varphi$  при одной и той же киловаттной мощности всей станции, очевидно, киловольтамперная мощность 160-MW машин будет больше примерно на 6%. Из-за этого изменятся и синхронная реактивность в пользу менее мощных машин, а переходная реактивность будет отличаться уже на 16%.

Но более того, при  $\cos \varphi = 0,85$  уменьшаются э. д. с. и мощность шунтирующих реакторов, в результате чего мы получим дальнейшее ухудшение устойчивости. Таким образом более мощные машины 195 MW, несомненно, ограничат пропускную способность линий.

Я считал бы правильным выбирать предельной такую максимальную мощность машины, которую сможет обеспечить завод при  $\cos \varphi = 0,8$ .  $\cos 0,8$  должен быть положен в основу выбора мощности.

Несколько заниженными я считаю реактивности трансформаторов, которые фигурируют в технических условиях Ленинградского индустриального института.

Институт требует 10% реактанца — это цифра чрезвычайно низкая, и я не знаю, можно ли будет ее обеспечить при мощности 77 MVA в фазе. Если для понижающих трансформаторов, где мы не связываем с мощностью, это значение и может быть принято как предельное задание, то для повышающих это вряд ли может быть сделано. Главное, для этого нет серьезных оснований, ибо реактивности повышающих трансформаторов шунтируются реактивностями реакторов, поэтому мне кажется вполне приемлемым повысить цифру реактивности до 12%, а может быть даже выше.

Наконец, последний небольшой вопрос. Я считаю вряд ли необходимым введение бустеров, как это сделали работники Ленинградского индустриального института, для того, чтобы погасить 3%, которые возникают в конце линии при колебаниях нагрузки. Эти колебания будут лежать в пределах номинального напряжения трансформаторов, которое должно быть выше на 5%. Известно, что трансформаторы с минимальным напряжением 121 kV фактически работают при 118—120 kV, а не при 115 kV, т. е. близко подходят к номинальному напряжению.

**Я. М. Червоненкис**

Гидроэнергoproject

**ПОДСЧЕТЫ** проф. Горева показывают, что для таких сверхмощных передач, как Куйбышев — Москва, одно лишь повышение напряжения не приводит к сколько-нибудь заметному снижению себестоимости. С другой стороны, быстрое развитие ионной техники дало в руки инженера возможность реального осуществления давнишней мечты высоковольтника связать в одно целое наиболее совершенный генератор — машину переменного тока с наиболее совершенной передачей — линией постоянного тока сверхвысокого напряжения.

В Соединенных штатах Америки компания GEC после ряда пробных линий построила первую промышленную линию выпрямленного тока между гидроэлектростанцией Шах-тикок и подстанцией Скенектэди.

В Австралии работает линия постоянного тока на 20 MW. Линия Норвегия — Германия проектируется согласно последнему варианту на постоянном токе.

В Германии в 1933 г. был построен выпрямитель Маркса на запирающее напряжение 360 kV при максимальном токе 300 А. В 1934 г. напряжение вентили в лабораторных установках было доведено до 700 kV. Предыдущие установки были испытаны на подстанции Чорневиц; испытания дали благоприятные результаты.

С целью выяснения целесообразности применения передачи постоянным током для линий Куйбышев — Москва Гидроэнергoproject произвел ряд подсчетов. Они позволяют сделать следующий вывод.

Во-первых, передача энергии порядка 600 MW и боль-

ше на расстояние 850 km постоянным током при современном состоянии техники принципиально осуществима.

Во-вторых, помимо общеизвестных преимуществ передачи постоянным током (неограниченная устойчивость, повышенная надежность передачи, упрощение коммутационных операций, регулирования напряжений), перевод четырех длиннейших линий Куйбышевской гЭС на постоянный ток дает следующие преимущества: а) Пропускная способность каждой цепи увеличивается от 4 до 6 раз. б) Стоимость линии снижается в 2 раза за счет возможности повышения линейного напряжения в отношении корня из двух к одному при той же линейной изоляции и том же диаметре проводов. в) Стоимость подстанций снижается за счет упразднения высоковольтных масляных выключателей, что возможно при применении сеточной защиты выпрямителей. Экономия даже по сравнению с наиболее дешевым вариантом передачи переменным током — 300-kV блочная схема — выражается в цифре 420 млн. руб. при передаваемой мощности 600 MW. Повышение мощности приводит к дальнейшему повышению экономии. г) Расход алюминия сокращается вдвое (примерно на 16 тыс. т) по сравнению с 300-kV передачей. д) Эксплуатационные расходы уменьшаются по произведенным подсчетам примерно на 19 млн. руб.: во-первых, вследствие снижения амортизационных отчислений, во-вторых, за счет сокращения числа цепей.

Произведенные подсчеты, а также переговоры с работниками ВЭИ, Трансформаторного завода и другими организациями выяснили следующее: аппаратура, требуемая для переоборудования, принципиально не является новой, но в тех масштабах, которые требуются для данной передачи, она нигде в мире не осуществлена.

Основное — требуется вентиль с запирающим напряжением порядка 300 kV при токе 350 А эффективных.

У нас изучение проблемы передачи постоянным током находится в зачаточном состоянии. Работы по вентилю Маркса ведутся только с прошлого года. Сейчас лабораторией ВЭИ испытывается вентиль Маркса, рассчитанный на напряжение порядка 200 kV при токе около 65 А эффективных. Согласно заявлению работников ВЭИ и Академии наук для осуществления требуемой аппаратуры и проверки ее в реальных эксплуатационных условиях потребуются даже при наиболее напряженной работе примерно около 4—5 лет. Принимая это во внимание, нужно сказать, что освоить первые линии Куйбышевской гЭС на постоянном токе едва ли представляется возможным.

Однако не вся полная мощность линии Куйбышев — Москва будет введена в эксплуатацию одновременно. Проект намечает ввод в 1944 г. 300 MW и доведение мощности до 600 MW в 1947 г. с возможностью развития после 1947 г. Срок до начала работ по второй очереди линий вполне достаточен для разрешения проблем, связанных с передачей постоянным током.

В этом случае, если проверка в эксплуатационных условиях даст положительные результаты, можно осуществить удвоение и даже большее увеличение пропускной способности линии без строительства дополнительных цепей. Генераторы первой очереди гЭС могут продолжать работать на переменном токе, питая более близких потребителей.

Если при строительстве первой очереди будет учтено дальнейшее развитие и переход на постоянный ток, то этот переход будет связан сравнительно с небольшими капитальными затратами. Суммарно экономия от перехода на постоянный ток уменьшится примерно на 30% по сравнению с той экономией, которую мы имели бы.

Если принять такое решение — первые линии в связи с недостатком времени осуществлять на трехфазном токе, имея в виду перевод их в дальнейшем на постоянный ток, — спрашивается, какую схему и напряжения следует принять? Подсчеты показали, что даже если будет принято напряжение 300 kV, перевод такой цепи на постоянный ток с соответствующим повышением напряжения до 330—350 kV обеспечит пропускную способность цепи от 800 до 1100 MW.

Вопрос выбора блочной или связанной системы в такой постановке в значительной мере теряет свою остроту, так как линия постоянного тока имеет больше 600% запаса, и каждый провод линии может работать независимо от других проводов. Линия постоянного тока не нуждается в целях резервирования в переключательных постах.

## П. И. Сазанов ВЭИ

Ю. А. ЯКУБ указал на возможность перехода от связанной схемы передачи к блочной. Я считаю, что такая возможность нет. В выступлении проскальзывала такая мысль: давайте выполним связанную передачу, а потом, если потребуется, будем работать по разомкнутой схеме.

Неоснователен и довод, приведенный в защиту блочной схемы А. А. Горевым, что, осуществив блочную схему, можно в дальнейшем перейти к замкнутой. Совершенно очевидно, что обсуждаемые здесь блочный и связанный варианты — это два принципиально совершенно различных подхода к схеме передачи. Кроме того, каждый из них практически по-разному разрешает вопросы устойчивости: блочный — за счет увеличения числа цепей, связанный — за счет устройства переключающих устройств при минимуме цепей. Блок по идее своей ограничивает величину передаваемой мощности по обособленной линии.

Связанная схема эти ограничения исключает. Отсюда ясно, что обе эти схемы по существу своему необратимы.

Выступавшие здесь гг. Соловьев и Маркович утверждали, что Мосэнерго не будет располагать резервами, в связи этой системы будут недостаточными для изыскания на случай выхода из работы одного из блоков определенной мощности.

Можно ли согласиться с таким «развитием» системы Мосэнерго? Безусловно, нет. Сеть Мосэнерго запущена, система не располагает достаточной и активной и реактивной мощностью, чтобы поддерживать нормальными током и напряжением. Все это — результат вредительской деятельности троцкистско-бухаринских агентов фашизма в Мосэнерго.

Мы не должны забывать, что резервы в энергетической системе — это резервы народного хозяйства. Вращающийся резерв в такой системе, как Мосэнерго, должен быть и он будет. Этот момент я заранее отмечаю тому, что предполагаемое отсутствие резервов в системе Мосэнерго приводилось как серьезный довод в защиту замкнутой схемы передачи. Однако и для замкнутой и для блочной системы передачи Куйбышев — Москва вращающийся резерв в 5—7% от установленной мощности явно необходим.

Работа лаборатории ВЭИ посвящена замкнутому варианту. В результате этой работы установлена возможность устойчивой передачи мощности порядка 550—600 MW по двухцепной замкнутой линии с четырьмя переключаемыми постами на напряжение 400 kV. Эта передача уже сейчас имеет удовлетворительные показатели в смысле запасов статической и динамической устойчивости. У этой передачи имеются и перспективы в смысле улучшения и статической и динамической устойчивости.

К числу мероприятий, которые будут способствовать повышению статической устойчивости связанной 400-kV передачи, приведенных в докладе С. А. Лебедева, а именно: автоматическое частичное снижение мощности вращающихся двигателей в случае выключения одного из блоков, установка промежуточных синхронных компенсаторов с насыщенными дросселями, я хотел бы добавить предложенное нашей лабораторией раздельное выключение фаз. В двухцепной замкнутой передаче при переходе переключаемых постов это мероприятие не имеет сколько-нибудь заметной асимметрии электрического режима.

Следующее мероприятие — повторное включение. Правильно ли мероприятие требует оговорки. Не может ли оно закончиться палкой о двух концах?

В замкнутой схеме при повторном включении выключенного участка не возникает вопроса о синхронизации шин, связанных этой передачей, естественно, поэтому не возникает и требования ограничения собственного времени повторных включений.

Другое дело, что повторное включение может снова привести на неликвидированную аварию (место пробоя деионизировалось) и вызвать ухудшение устойчивости передачи. Этот вопрос требует дополнительного исследования, но, повидимому, удовлетворительное решение будет достигнуто увеличением выдержки времени перед повторным включением, что вполне допустимо. Приме-

нение повторного включения в блочной схеме передачи исключается, поскольку собственное время выдержки перед повторным включением настолько велико (0,2 sec), что машина успеет за это время выпасть из синхронизма.

Нужно сказать и о тех ограничениях, которые существуют для замкнутого двухцепного варианта: во-первых, величина напряжения и, во-вторых, передаваемая мощность. Совершенно ясно, что 400 kV мы вынуждены считать предельным рабочим напряжением в настоящее время, но при этом напряжении и при двух цепях замкнутой схемы предельной мощностью передачи является  $550 \div 600$  MW.

Возникает вопрос: если передаваемая мощность будет  $700 \div 1000 \div 1100$  MW, как ее передать?

Я полагаю, что если мощность, подлежащая передаче в Москву, достигнет 700 MW, наимыгоднейшим решением будет блочная четырехцепная схема передачи на  $300 \div 330$  kV.

Чем я обосновываю в этом случае необходимость такого решения? Тем, что замкнутая двухцепная передача на 400 kV не решает вопроса о передаче 700—800 MW. Выход из положения для замкнутой схемы — это добавить еще одну цепь. Но строить трехцепную передачу на 400 kV с выключательными постами — это громоздкое и дорогое решение. Кроме того, 700—800 MW в связанной передаче — это уже много; получается невыгодное соотношение между установленной мощностью приемной системы и мощностью, передаваемой по одной связанной передаче.

Блочная схема дает для передачи 700—800 MW удовлетворительное решение: во-первых, эта передача будет дешевле сравнительно с трехцепной с выключательными постами на 400 kV; во-вторых, и в освоении и по объему работ для электропромышленности это, безусловно, более легкий вариант.

На каждую цепь-блок приходится мощность одного агрегата, причем максимальная возможная мощность в одном агрегате — 195 MW. Соотношение между установленной мощностью системы в целом и мощностью одного блока весьма благоприятное ( $> 15$ ).

Рассмотрим возражения против блочной схемы для передачи 700—800 MW. Приводились соображения о резервах. Однако эти соображения по причинам, изложенным мною вначале, неосновательны. Приводится соображение о больших затратах меди. Аргумент как будто веский, но вопрос о меди не решающий. Приводится соображение, что будет затруднение с нагрузкой, с выходом одного из блоков. Но, как показали расчеты, нагрузка при выходе одного из блоков сохраняется; условия, правда, создаются сравнительно тяжелые, но, имея в виду, что система будет располагать достаточным вращающимся резервом как активной, так и реактивной мощности и такими эффективными средствами регулирования, как электронный регулятор, положение с нагрузкой может быть улучшено.

Указывают также, что блочная схема ограничивает использование энергии гидроэлектростанции. Это возражение в известной части существенно: аварии на передаче — более возможное явление, чем авария с самими агрегатами; агрегаты гидроэлектростанции при блочной схеме передачи будут обречены на более частый выход из работы, чем в связанной схеме передачи.

Основное преимущество блочной схемы в том, что при выходе одного из блоков система получает наименьший удар, чем в случае выхода мощности связанной передачи, а для такой большой системы, как Московская, это имеет решающее значение. Эту идею, вероятно, нам придется последовательно проводить при дальнейшем развитии наших энергосистем. Передаваемая мощность, будь то одноцепной или двухцепной связанной передачи, всегда должна оставаться не меньше  $\frac{1}{4}$  и  $\frac{1}{2}$  от общей установленной мощности системы.

Если возникает вопрос о передаче 1100 MW, то в этом случае выгодно применить комбинированную схему, а именно: схему, состоящую из двух блоков, каждый из которых должен представлять замкнутую двухцепную передачу с четырьмя переключаемыми постами. В каждом блоке будет мощность порядка  $\frac{1}{4}$  от общей установленной мощности системы. Выход одного из блоков будет, конечно, связан с тяжелыми последствиями для системы.

Однако, имея в наличии вращающийся резерв порядка 200—250 MW и осуществив примыкание каждого из бло-

ков таким образом, чтобы вместе с блоком можно было выключить и часть нагрузки, мы можем спасти систему от расстройств.

Предвидя в перспективе рост передаваемых мощностей до 1000 MW как с Куйбышевской, так и других гидроэлектростанций (Камышинская и др.), мы должны все подготовительные работы в электропромышленности по реконструкции существующих и постройке новых заводов, а также все работы по созданию испытательных установок ориентировать на 400 kV.

### Б. И. Певзнер Теплоэлектропроект

**РАБОТЫ** Ленинградского индустриального института и ВЭИ исходят из целого ряда условных предположений и прежде всего из средней мощности передачи 600 MW.

В проектах принята совершенно нереальная схема приемного конца Москвы. Схема приемного конца по существу состоит из 110-kV блоков, на которых производится распределение энергии, а синхронизационной шиной служит условная линия 220 kV. На всех блоках равномерно распределен резерв.

Эта схема сомнительна. Энергоснабжение Москвы и существующие линии и узлы не позволяют с 380-kV подстанции идти на блоки 110 kV; придется идти на 220 kV. В этих условиях создать мелкие блоки будет затруднительно. Таким образом тяжелые условия от к. з., создаваемые во вторичной цепи (что иллюстрировалось в выступлении А. А. Вульфа), могут усугубиться. Возможно, что целый ряд трудностей, вызванных коммутацией московского кольца, могут совсем уничтожить блочный вариант — может остаться только связанный вариант в какой-то модификации. Трудность заключается в том, что требуется иметь в московской системе резерв не менее 175 MW. Все перечисленные предположения должны быть пересмотрены. Как я понял заявления товарищей из Управления куйбышевского узла, мощность, передаваемая в Москву, будет более 600 MW, — надо считать, что хотя бы вариант с мощностью 1000 MW.

Кроме того, можно установить, что схема, принятая в обеих работах ВЭИ и Ленинградского индустриального института, — нереальная, и экономическая целесообразность ее на сегодня не доказана.

Третий момент, который также на сегодня почти ясен, — это то, что в первый год передачи энергии из Куйбышева придется работать со значительно меньшим резервом, чем 175 MW, во всяком случае с меньшим вращающимся резервом; в Москве есть такие станции, которые держат в горячем резерве вряд ли будет целесообразно. Эти станции мало экономичны, работают на дефицитном топливе и будут находиться в холодном резерве.

Таким образом можно установить, что целый ряд предположений, положенных в основу разработок Ленгидэпа и ВЭИ, являются предпосылками методологическими.

Для формального выбора напряжения и решения вопроса о схеме передачи требуется просмотреть повышенную по сравнению с принятой в основу расчета величину передаваемой мощности, разработать реальную схему приемного конца с учетом возможных сроков осуществления и спроектировать схему отправного конца, а для этого нужно полтора года.

Здесь С. А. Кукель-Краевским и А. А. Горевым приводились такие доводы: по их мнению для Европейской части единой высоковольтной сети 400 kV не нужно. Мы считаем, что все существующие проектировки единой высоковольтной сети, даже те, о которых говорил С. А. Кукель-Краевский, недостаточны для того, чтобы отказаться теперь же от применения напряжения 400 kV. По нашему мнению две электропередачи, о которых мы сегодня знаем, требуют для Европейской части Союза применения напряжения 380—400 kV — это куйбышевская передача и передача от Камышина. Все остальные проектировки единой высоковольтной сети нигде и никогда серьезно не обсуждались.

Следует признать, что методология подхода к вопросу разработана институтами блестяще. Дело за конкретным проектированием. Что мы под этим понимаем?

Во-первых, комплексное проектирование по линии передачи приемного и отправного конца электростанции во-вторых, проектировку не только электрического режима, но и конструктивную разработку линий. Теплоэлектропроект считает, что он мог бы взять на себя составление эскизного проекта передачи мощности от Куйбышевской гидроэлектростанции во все направления, которые нам будут заданы, разработку собственно куйбышевской сети и участие в разработке схемы коммутации самой станции.

В частности, в первой стадии проектных работ может ограничиться только предварительным учетом различных вариантов коммутации станции и местной сети: объеме, необходимом для разработки электропередачи на Москву, на Урал и другие направления, а разработку эскизного проекта электроснабжения собственно Куйбышевского района, в частности насосных станций вести в будущем году.

### А. А. Вульф Ленинградский индустриальный институт

**В** ВЫСТУПЛЕНИИ т. Жданова отмечалось, что после в трехцепной линии передачи будут иметь больше чем два выключателя на одну цепь. Исходя из схем американской установки Болдер-Дам, можно, однако, создать схемы с двумя выключателями на цепь в трех- и четырехцепной линии. Это имеет некоторое отношение и к выступлению т. Сазанова. Нет нужды вызывать на каждом посту все 4 линии, достаточно переключать цепи попарно и связать эти двухцепные линии только в одной точке на высоковольтных или низковольтных шинах станции. Конец линии передачи будет связан приемной сетью с общей э. д. с. Москвы суммой ее э. д. с. В этом случае эффект выхода участка одной из двух цепных линий будет распределяться поровну на все четыре цепи.

Мы не рассчитывали установившегося режима после выхода блока. Мне кажется, что надобности в этом нет. Наши расчеты переходного режима для варианта 300 kV, хотя и не доведенные до конца, показали устойчивость нагрузки. Продолжать этот расчет не представляло интереса.

Верно, что моторная нагрузка чувствительна к величине реактивного сопротивления, отделяющего ее от точки приложения э. д. с. Если бы нагрузка в сети или на отдельных участках ее страдала от этого обстоятельства, то легко было бы исправить дело установкой синхронного компенсатора.

Я вполне согласен с тем, что необходимо считать связанную систему на трехполюсное к. з. Выход из крупной связанной системы из работы представлял собой большую неприятность, что допускать этого в наших масштабах передачи невозможно. В наших расчетах связанной передачи мы так и поступали.

В выступлении т. Певзнера утверждалось, что 175 MW, которые выпадают из работы при выключении блока, могут быть обеспечены резервом на тот год, когда предполагается вступление Куйбышевской станции. Этот резерв необходим не только блочной, но и связанной передаче, потому что мощность генератора Куйбышевской станции в настоящий момент уже достигла по величине мощности блока на 300 kV. В одном случае будет нуждаться чаще в резерве, а в другом — меньше.

Относительно приемной сети. Я никак не могу согласиться с т. Певзнером, что те наметки приемной сети Москвы, о которых здесь говорилось, совершенно нереальны. Я указывал прошлый раз, что так как эта сеть в значительной части еще не существует, мы можем ставить те или иные требования, которым она должна удовлетворять в будущем.

Мне представляется, что требования, выдвинутые нами, совершенно реальны и исполнимы и что они совпадают с теми, которым сеть должна удовлетворять и удовлетворяет в уже существующих более мелких сетях.

Связь между линией и сетью должна быть запрограммирована таким образом, чтобы не получить слишком больших токов к. з. в точке примыкания линии.

Я не являюсь сторонником только блочной или той



связанной передачи. В настоящий момент ту и другую систему передачи энергии можно считать технически осуществимой. Это является одним из наиболее крупных результатов проделанной работы.

Весь вопрос сводится к экономике и к условиям эксплуатации. Одна система — связанная, более гибкая, более удобна и совершенна с точки зрения эксплуатации. С другой стороны, она, несомненно, более дорогая. При стоящем положении вопроса на данной стадии разработки передачи невозможно вынести определенного решения, что лучше — блоковая или связанная система. Как кажется во всяком случае, что и та и другая система заслуживают того, чтобы продолжать работать над ними при дальнейшей проектировке куйбышевской гидропередачи.

А. А. Акопян

ВЭИ

ПРИ СОЗДАНИИ той или иной степени грозоупорности — при определении защитного уровня — мы все исходим из номинального напряжения системы, например, при расчете 110-kV линии допускают меньшее число выключений, чем в случае линии на 35 kV.

Линия Куйбышев — Москва должна быть абсолютно грозоупорной; по крайней мере наибольшие возможные известные нам до сих пор токи не должны вызывать выключения вообще.

Если принять такую установку, то, конечно, оперировать формулами, связывающими число выключений и величину грозоупорности, как это сделано в работах Ленинградского индустриального института, не следует.

Надо определить, какого порядка максимальная величина тока молнии может быть, и рассчитывать линию таким образом, чтобы этот ток не вызывал перекрытия. Согласно литературным данным, в частности, опубликованным в Америке, где в последние годы проводились довольно обширные исследования, токи молний колеблются в пределах 30–100 kA, причем более часты токи, близкие к нижнему пределу. Единственный зарегистрированный случай дал ток 220 kA. Он из года в год фигурирует в статистике. Известен один зарегистрированный ток молнии в 220 kA, фигурирующий из года в год в статистике.

Следует заметить, что величины, которые я привожу, все больше указываемых в расчетах; в статистических данных дается весь измеренный ток молнии, а в расчетной схеме принимается ток падающей волны, т. е. вдвое меньший. Зарегистрированный ток 220 kA соответствует 110 kA в расчетной схеме.

Исследования, которые проводились у нас в СССР в прошлом и в этом году, дали среднюю величину тока в пределах 30–60 kA.

Если обеспечить отсутствие выключений при токе 220 kA, то можно считать, что вероятное число отключений будет равно нулю.

Значит, имеется в виду, что возможность прямого удара молнии непосредственно в провода линии исключается.

Но не верят, что тросы абсолютно защищают. Но как же, если располагать тросы так, чтобы по возможности крайние углы защиты получались бы малыми, порядка 15–20°, то можно определенно утверждать, что прямого удара в провод не может быть.

Остается вопрос обратного перекрытия с провода на тросы.

Сложения здесь в том, что пролеты очень большие, требуется очень большое расстояние между проводами и тросами.

Проф. Горев указал на одну возможность снижения этого расстояния. Предлагалось в середине пролета ставить промежуточную опору и с помощью такого свойства приподнять тросы в этом месте.

Можно было развить эту идею дальше. Вовсе нет необходимости поднимать тросы. Достаточно устроить в середине пролета хорошее заземление, и это приведет к фактическому уменьшению пролета вдвое. При этом расстояние между тросом и проводом в 14–15 м можно считать абсолютно грозоупорным. Тогда установку защитной аппаратуры на самой подстанции

в виде тиристовых разрядников или других типов аппаратов нужно рассматривать как резервную меру защиты.

На первое время тиристовые разрядники можно заменить обычными координирующими промежутками и считать, что изоляция во всяком случае будет защищена.

Главное внимание нужно обратить на защиту от прямого удара молнии.

С. И. Рабинович

Московский трансформаторный завод

ВОПРОС О ТОМ, какое напряжение предпочтительнее — 300, 350 или 400 kV, разумеется, связан также с возможностью выполнения соответствующих трансформаторов. Работы завода и Трансформаторной лаборатории ВЭИ показали, что трансформаторы на 400 kV можно построить.

В какой мере они сложнее 350-kV конструкции?

Понятно, при 400 kV трудности несколько увеличиваются, но кардинальных изменений нет; 350-kV трансформаторы будут немного легче, чем 400-kV, и их проще осуществить с меньшими реактанцами, как это требуется из условий устойчивости. Разница в реактанце сопоставляемых типов достигнет 1–1,5%.

Вопрос о реактанце упирается в транспортную проблему. Реактанцы в 10%, которые назывались здесь, при мощности порядка 74 MVA в фазе и 400 kV — это весьма серьезная задача, в условиях ж.-д. транспорта, по-видимому, неразрешимая.

Если ориентироваться на доставку трансформаторов водным путем или на возможность сборки их на месте, то тогда вопрос о реактанце в значительной мере отодвигается на задний план. Необходимый реактанс 10–12% можно будет достичь при неизбежном, естественно, удорожании и утяжелении трансформаторов. Если станционные трансформаторы могут быть доставлены водой при условии, что представится возможность погрузить их с места производства, то для понизительных трансформаторов вопрос транспорта их связан с месторасположением подстанции. Между тем мощность понизительных трансформаторов того же порядка, что и повышающих.

Реактивность понизительных трансформаторов зависит еще от передаточных отношений. В докладе проф. Горева фигурируют напряжения 110 kV. Очевидно, мыслилось, что трансформация будет 380 на 110 kV. Повидимому, с этим связано одно из исходных положений доклада — отказ от автотрансформаторов. Я хотел бы, чтобы в заключительном слове проф. Горев разъяснил, обусловлен ли отказ от автотрансформаторов выбором вторичного напряжения 110 kV или же это принципиальное положение, от вторичного напряжения не зависящее. В частности, есть ли возражения к применению автотрансформаторов при выборе трансформации 380 на 220 kV?

(А. А. Горев: — Нет, не имеется.)

Насколько можно заключить из данного доклада, вопрос стоимости в значительной степени зависит от системы передачи, а не от напряжения. Очевидно, последнее почти не влияет на стоимость. Во всяком случае нам неизвестно, каким образом производилась калькуляция. Если были приняты квадратические измерения стоимости с напряжением, то цены 400-kV трансформаторов значительно преувеличены.

(А. А. Горев: — Делалась эскизная проектировка трансформаторов, определялся вес и устанавливалась стоимость.)

Говорить о количестве материалов в трансформаторах при изменении напряжений нет никакой надобности, так как количество материалов, которое расходуется на трансформаторы вообще, по сравнению с тем, которое идет на линию передачи, составляет совершенно ничтожную цифру, в некоторых случаях — доли процента.

Вопрос относительно перехода от 220 на 400 kV. То, что здесь достаточно большой скачок, вряд ли должно вызывать опасения. Мы имеем в Союзе один такой случай, где было применено промежуточное напряжение в 150 kV, и сейчас можно сказать, что оно применено, по-видимому, неудачно.

(А. А. Горев:—Напротив, есть такие системы, которые требуют этого напряжения.)

Как показывает практика за истекшие 8—10 лет, с того времени, как проектировалась Днепровская система, это напряжение нигде не получило применения.

(А. А. Горев:—А Кольская система требует такого напряжения.)

Теперь о реакторах. Трудность их проектирования может оказаться большей, нежели проектирование трансформаторов, так как подобного рода реакторы до сих пор не строились, и воспользоваться опытом не удастся.

Значительную трудность представит также и измерительный трансформатор.

Чтобы отрегулировать 3% колебание напряжения, предложено установить бустеры. Возлагается ли на эти бустеры, кроме того, еще какое-то регулирование?

А. А. Горев:—Кроме того, регулирование колебаний напряжения в приемной сети.)

Эти бустеры представят затруднения. Их динамическая устойчивость при тех мощностях к. з., которые будут иметь место, создаст громадные трудности. Они будут весьма тяжелыми и дорогими.

Вопрос о необходимости бустеров подлежит тщательному рассмотрению, потому что применение их связано со значительными капиталовложениями.

В докладе указано, что было проделано сравнение вариантов 200—300—400 kV в целях выяснения зависимости стоимости от напряжения. Эта работа показала, что при переходе от 200 к 300 и от 300 к 400 kV получается определенное снижение стоимости. При этом полагалось, что реактансы не изменяются с напряжением. Такое допущение увеличивает выгоды высокого напряжения и не соответствует тому, что может быть достигнуто в реальных конструкциях.

**С. А. Лебедев**

**ВЭИ**

**Я ХОЧУ остановиться на некоторых принципиальных вопросах. Первое, что я считаю необходимым отметить,—это вопрос относительно методики анализа устойчивости системы. Ленинградский индустриальный институт, отказавшись от анализа статической устойчивости, ограничился рассмотрением нарушения динамической устойчивости. Этого недостаточно. Вопрос относительно запаса статической устойчивости должен быть уточнен. Расчеты, которые были произведены Ленинградским индустриальным институтом, этого уточнения полностью не дают. В частности, существенное значение имеет устойчивость системы при всевозможных нарушениях режима работы в приемной системе.**

Каковы могут быть нарушения в режиме приемной системы? Прежде всего нужно сказать о набросах мощности. Система должна обязательно выдерживать набросы мощности как обусловленные выходом одного из агрегатов, так и связанные с непредвиденным ростом нагрузки.

Второй вопрос—это к. з. в приемной системе не с точки зрения переходного процесса, а в связи с последующим установившимся режимом после выключения к. з. Как показывают расчеты, после к. з. имеет место значительное снижение напряжения почти во всех точках системы вследствие сильного затормаживания моторной нагрузки. Напряжение не сразу восстанавливается. Необходимо проверить статическую устойчивость на пониженное напряжение. Следующий фактор, который должен быть учтен при анализе статической устойчивости,—поведение системы при пониженной частоте. В этом случае мы имеем совершенно другую картину баланса реактивной мощности, благоприятствующую значительной посадке напряжения. Таким образом устойчивость режима работы системы при пониженной частоте нужно обязательно проверить.

Следующий вопрос, на котором нужно остановиться,—это вопрос о выборе системы. Я не буду повторять высказываний, которые были за и против блочной системы, я хочу остановиться лишь на резерве. Когда мы определяем величину необходимого резерва в системе, это не есть что-то твердо заданное. Величина резерва в системе зависит от числа агрегатов. Исходя из этих сооб-

ражений, при блочной системе передачи мы увеличим вероятность выхода нескольких агрегатов, так как в аварии с самими генераторами добавляются аварии в линиях. Поэтому количество элементов, выход которых возможен, будет повышаться, а следовательно, резерв должен быть увеличен.

Кроме того, в процессе эксплуатации можно встретиться с таким обстоятельством, когда в системе выйдет какая-то крупная мощность и резерв будет использован для покрытия ее. В этом случае блочная система передачи остается без запаса, и должно быть предусмотрено снижение мощности, т. е. ограничение мощности потребителя. С этой точки зрения резерв для блочной системы передачи также должен быть выбран более повышенный, чем для замкнутой системы передачи.

Я не могу согласиться с мнением т. Сазанова, который говорил, что для 600 MW лучшее решение—400 kV замкнутой вариант, а для большей мощности лучше переходить на блочный вариант. Наоборот, при трех целях я считаю, что замкнутый вариант будет более экономичным и стоимость перехода на замкнутый вариант будет ниже, чем при двухцепном варианте.

Я хотел отметить выступление т. Вульфа, который говорил, что технически возможно осуществить передачу как по замкнутой, так и по блочной схеме. С этим следует согласиться, равно как и с последующим его положением, что дальнейший выбор замкнутой или блочной системы передачи должен решиться по совокупности: учетом того, что блочная система обходится несколько дешевле, а замкнутая дает больше удобства для эксплуатации и надежнее в работе.

Еще одно обстоятельство, которое должно быть подвергнуто анализу в дальнейшей разработке,—это относительно местной нагрузки Куйбышевской станции. При замкнутой системе необходимо просмотреть вариант параллельной работы секций, питающих московскую нагрузку и нагрузку местных районов через соответствующую реактивность для ограничения токов к. з. Те расчеты, которые были произведены в Теплоэлектропроекте для различных систем, показали, что наличие такой связи между двумя секциями в значительной степени увеличивает устойчивость параллельной работы.

Таким образом, объединяя секцию Куйбышев—Москва с местной нагрузкой, мне кажется, что возможно будет вполне надежно обеспечить динамическую устойчивость даже при таких тяжелых авариях, как трехфазное к. з.

Особо следует остановиться на более детальной разработке приемного конца системы, которая имеет существенное значение как с точки зрения динамической устойчивости, так и, в особенности, статической устойчивости и аварий в самом приемном конце. В отношении выбора напряжений на сегодня нет окончательных мнений, но, по моему мнению, тенденция идет в сторону повышения. Можно сказать, что следует идти на напряжения 330—350 kV при мощности 600 MW. При увеличении мощности будет стремление к дальнейшему повышению напряжения. При уточнении мощности передачи по отдельным районам выбор напряжения будет, по моему мнению, происходить в диапазоне 350—400 kV.

**А. А. Горев**

**Ленинградский индустриальный институт**

**В НАШЕЙ** разработке мы высказывались за генераторы предельной мощности, хотя рассматривали также и вариант 160-MW машины. Вариант генератора предельной мощности электрически менее приемлем для передачи, однако трудность компоновки самой станции массово растет вместе с уменьшением мощности генераторов и увеличением числа их. Так как эта сторона дела имеет очень большой экономический вес, придется остановиться на генераторе предельной мощности и принять все меры к тому, чтобы заводы такие генераторы сделали. Это должны быть не фиктивные генераторы, а которых написано одно и которые дают другое, а настоящими генераторами на 195 MW с  $\cos \varphi = 0,8$ . В турбинах должны быть введены запасы мощности, достаточные для обеспечения условий правильного регулирования и условий работы при снижении напора.



Здесь много говорилось о пресловутой блочной или связанной системе. Я много занимался этим вопросом. По варианту передачи 600—700 MW куйбышевской электростанции в Москву по блочной системе при наличии вращающегося резерва я сейчас готов подписать свою фамилию. В осуществимости и надежности работы этого варианта я уверен; правда, будут случаи, когда блок может выпасть, но это предусмотрено расчетом, это не катастрофа, а просто неприятность, для эксплуатационных потребителей от такого выпадения не пострадают.

Напротив, под связанным вариантом я в настоящую минуту подписаться не могу уже по одному обстоятельству, что мощность одной цепи связанной передачи при условии устойчивости мы стараемся дотянуть до той же величины, что и при блочной, но еще не дотянули.

(С места: — Возьмите коэффициент мощности 0,8.)

Мы выяснили, в чем разница между подсчетами ВЭИ и Ленинградским индустриальным институтом. У ВЭИ выходит все благополучно, а мы мучаемся. В расчетах ВЭИ не только взят коэффициент мощности 0,8, но поставлен добавочный генератор в группу, совершенно излившийся с точки зрения мощности. Поэтому переходная реактивность в генераторной группе в расчете ВЭИ 0,18, тогда как при отсутствии лишнего генератора она равна 0,23. Конечно, можно поставить вопрос и о лишнем генераторе в группе, т. е. вместо четырех генераторов сделать пять, чтобы уменьшить их реактивность. Понятно, эта мера разрешает вопрос, но сомнительно, чтобы экономически такая мера была допустима.

У Ленинградского индустриального института в связанной системе разрывная мощность получается 4 млн. MVA при мощности трансформаторов связи между секциями порядка 1,2 MVA; у ВЭИ эта мощность достигает 4 млн. kVA. Вы понимаете, что это вызовет дальнейшее увеличение разрывной мощности. Производя расчеты токов к. з., мы путем уменьшения мощности трансформаторов связи или искусственным увеличением реактивности старались сжать мощность к. з. до 4 млн. kVA; не считаясь с токами к. з., обеспечить устойчивость нетрудно. Задача заключается в том, чтобы дать надежное и осуществимое техническое решение. С. А. Лебедев с удивлением констатировал, что оба варианта технически осуществимы. Это верно, но что они равноценны в смысле мощности на эту цепь при настоящем состоянии расчета, я сейчас сказать не могу. Я поставил вопрос так: необходимо дотянуть мощность одной цепи связанного варианта до мощности в блочном, и эту задачу мы выполним, но пока на сегодня она еще не разрешена.

Здесь очень много сделано нападок на то, что блочной вариант предполагает наличие вращающегося резерва в Москве, которого может и не быть. Речь идет о вращающемся резерве. Указывают, что сейчас в Москве нет резерва. Нельзя примириться с этим положением и спокойно ждать, пока придет куйбышевская авария, — такая концепция принесет не пользу, а вред народному хозяйству страны.

Не только резерв, но и многое другое в электрохозяйстве Москвы необходимо привести в порядок и притом раньше, чем будет построен Куйбышев.

Здесь уже говорилось о том, что нам необходимы лаборатории, новые заводы и т. д. Без них мы, разумеется, поставленную проблему не разрешим.

Одно из основных требований — это приведение в порядок электрохозяйства Москвы в смысле мощности и резервов, релейной защиты, выключателей и т. д.; этого можно добиться и на это можно рассчитывать. Приспособление куйбышевской схемы к дефектам нынешнего московского электрохозяйства в плане на 7 лет влечет с этим я никак не могу согласиться. Эти дефекты должны быть изжиты во что бы то ни стало.

Совершенно согласен, что резерв должен быть учтен в стоимости, что те стоимости различных вариантов, которые я здесь публиковал и которые имеются в письменном докладе, не учитывают известной разницы в стоимости резерва для связанной и блочной системы, падающей на работающую единицу. Эта разница появляется вследствие того, что в связанной системе полная

пропускная способность линии всегда гарантирована (хотя непрерывная работа генераторов и трансформаторов все-таки не гарантирована на 100%). Я оцениваю эту разницу примерно в 75 руб. на 1 kW.

Следовательно, цифры 100—120 руб. в пользу блочных вариантов, которые я здесь приводил, необходимо наполовину срезать. Тем не менее известное экономическое преимущество при равной мощности на одну цепь остается за блочной системой.

Здесь есть общее мнение, что в связанной системе нужно добиться устойчивости и при трехфазном замыкании.

Такое хотя и мало вероятное обстоятельство, как трехфазное замыкание, которое может быть не только на линии, но и на шинах и на переключательных постах, представляет серьезную угрозу для московского электроснабжения. Мы должны иметь 100% уверенность в том, что ни при каких обстоятельствах этого не случится.

В отношении статической устойчивости мы все наши режимы проверили.

(С. А. Лебедев: — Нет не все.)

Вы имеете в виду, повидимому, что немного не досчитали. Я совершенно уверен, что определяющим моментом в пропускной способности линий является не статическая устойчивость, потому что мы допускаем только 0,71 от натуральной мощности на одну цепь; 10% запас в статической устойчивости, как ни считать, во всяком случае имеется.

Перехожу к вопросу об устойчивости потребителей при выпадении блока. Здесь указывалось, что опасность может возникнуть в послеаварийном режиме. Это мы проверим. Оснований для беспокойства я не вижу.

Еще одно замечание относительно связанной системы: если допустить, что устойчивость ее и равноценность блочной схеме достигнуты, то все же к этой системе предъявляются более высокие требования к выключателям, и количество их в 3 или 4 раза больше. Эти выключатели имеют разрывную мощность, в 2 раза большую, чем при блочной системе. Кроме того, они устанавливаются на переключательных постах, где напряжение при холостом ходе будет больше, чем на концах, на величину, достигающую 12,5%, или 40 kV. Это накладывает более суровые требования на их изоляцию.

Здесь также мотивировали, что с блочной системой будет плохо при двойной аварии. По теории вероятностей вероятность двойной аварии, чрезвычайно ничтожна — она равна произведению вероятностей отдельных аварий; допустим, что она будет такого же порядка, как и вероятность отказа связанной системы от правильного действия. Однако различие в последствиях очевидно: в первом случае дело ограничится отключением 5% потребителей, во втором — неминуем распад всей системы.

(С. А. Лебедев: — У вас в ремонте генератор и выходит один блок.)

Если ремонт производится во время максимума, то должен быть, кроме вращающегося резерва, ремонтный резерв.

Рекомендуют местную нагрузку Куйбышевской станции как средство для повышения устойчивости. В принципе — это правильная мера, однако она требует развития сети, усложнения схемы коммутации и увеличивает вероятность появления аварий. Для достижения максимальной надежности таких ответственных сооружений, как куйбышевская передача, приключений к ним каких-либо ответвлений следовало бы избежать. Это диктует большую осторожность к этому предложению.

Здесь неоднократно указывалось на дефицит цветного металла. Я могу ответить так: мы делаем какие-то экономические подсчеты. Плохо или хорошо — это другое дело. Если вы совершенно уверены в том, что этот дефицит не будет изжит в ближайшее время (а я в этом не уверен), тогда благоволило указать, какой коэффициент необходимо поставить на вздорожание цветного металла в наших экономических подсчетах, и я подсчитаю стоимость и реальную выгодность тех или других вариантов.

Пока подсчеты показывают примерную равноценность реальных вариантов передачи для обоих напряжений.

## К дальнейшему проектированию электропередачи Куйбышев — Москва<sup>1</sup>

Совещание, созванное Главэлектропромом, Всесоюзным электротехническим институтом и строительством куйбышевского гидроузла 20 и 31 января с. г., отметило, что Ленинградский индустриальный институт (ЛИИ) и Всесоюзный электротехнический институт (ВЭИ) проделали большую и весьма важную работу по вопросу выбора системы и напряжения электропередачи Куйбышев — Москва, в результате чего полностью доказана техническая возможность и экономическая целесообразность передачи энергии из Куйбышева в Москву при любом из напряжений в диапазоне 300—400 kV.

Работы Ленинградского индустриального института и ВЭИ базировались в части энергопотоков на данных эскизного проекта Гидроэнергопроекта, предусматривавшего передачу в Москву мощностью 600 MW. Эти данные и выводы работ являются предварительными.

Проделанные работы не позволяют прийти к окончательному выбору напряжения электропередачи Куйбышев — Москва также потому, что этот выбор не может быть произведен изолированно от системы электропередач Европейской части СССР.

Одним из главных условий для выбора напряжения линий электропередач Куйбышевской гэс является сравнение вариантов выполнения всех важнейших магистральных передач Европейской части Союза при одном из напряжений 300 или 400 kV или же применяя оба напряжения вместе.

Так как выбор системы передачи Куйбышев — Москва (блочной или связанной) не может быть

произведен изолированно от разработки схем приемной системы, выявилась необходимость поставить вопрос перед Главэнерго о срочной организации проектирования реконструкции приемных систем для приема энергии от Куйбышевской гэс.

Для разрешения проблемы передачи мощности от Куйбышевской гэс необходима совместная работа Теплоэлектропроекта, Гидроэнергопроекта Ленинградского индустриального института, ВЭИ энергетических объединений (Мосэнерго, Уралэнерго и т. д.) и строительства куйбышевского гидроузла для того, чтобы дальнейшая разработка этой проблемы носила бы конкретный характер, обеспечивающий комплексное разрешение использования энергии Куйбышевской гэс как в отдаленных районах, так и в районе Куйбышева.

На основании работ Ленинградского индустриального института и ВЭИ можно сделать следующие выводы для дальнейшего проектирования электропередач;

а) стоимости передачи 1 kW из Куйбышева в Москву для различных систем передачи и напряжений в диапазоне 300—400 kV являются величинами одного порядка для принятого в расчетах потока мощности в 600 MW;

б) передача Куйбышев — Москва может быть осуществлена с достаточной степенью устойчивости при любом из напряжений в диапазоне 300—400 kV;

в) вариант связанной передачи должен быть доработан в части обеспечения динамической устойчивости при трехфазном к. з. на линии, а вариант блочной передачи — с точки зрения статической устойчивости системы при выпадении блока;

г) необходимо при блочном варианте уточнить стоимость дополнительного резерва;

д) вариант 400 kV дает значительную экономию меди на линии передач по сравнению с вариантом 300 kV.

<sup>1</sup> Составлено на основе заключения, которое выработано по поручению совещания в ВЭИ 20 и 31 января с. г.: проф. Горев А. А., проф. Лебедев С. А., инж. Баумгольц А. И., инж. Бирюков В. Г., инж. Шитов И. Г., инж. Маркович И. М., инж. Певзнер Г. И.

# Анализ искусственной устойчивости генераторов

С. А. Лебедев  
ВЭИ

При ручном регулировании напряжения генераторов предел мощности определяется синхронным реактансом в холостого хода. При передаче энергии на шины бесконечной мощности через чистый реактанс предел мощности получается при угле  $\delta = 90^\circ$ . Если бы напряжение на шинах генератора идеально поддерживалось постоянным величине, то предел мощности получился бы при угле  $\delta$  напряжением на зажимах генератора и напряжением бесконечной мощности —  $\delta_{U_2} = 90^\circ$  и определялся бы внешним реактансом системы. Угол  $\delta$  при этом получился бы больше  $90^\circ$  (рис. 1), а предельная мощность значительно бы увеличилась. Однако идеального поддержания постоянства напряжения на зажимах генератора нельзя обеспечить никакими известными регуляторами напряжения



можно лишь в той или иной степени приблизиться к этому случаю. Следует отметить, что устойчивая работа при  $\delta > 90^\circ$  может быть обеспечена лишь соответствующим действием регуляторов напряжения, и потому такая работа называется „искусственной устойчивостью“.

Устойчивость при ручном регулировании. При анализе статической устойчивости можно ограничиться рассмотрением малых относительных отклонений, пренебречь нелинейностью уравнения и вместо самих переменных величин применять отклонение их от начальных значений. В этом случае можно написать следующие дифференциальные уравнения:

$$M \ddot{\delta} = -\Delta P = -\frac{\partial P}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) \cdot \Delta \delta; \quad (1)$$

$$M \ddot{\delta} = -\Delta P = -\frac{\partial P}{\partial E'_d} \Delta E'_d - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const}) \cdot \Delta \delta; \quad (2)$$

$$T_0 \Delta \dot{E}'_d = -\Delta E_d. \quad (3)$$

Умножив уравнения (1) и (2) на  $\Delta E_d$  и  $\Delta E'_d$  и подставляя уравнение (3), получим после преобразования:

$$\ddot{\delta} + \frac{\ddot{\delta}}{T'_d} + \frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const}) \Delta \delta + \frac{1}{MT'_d} \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) \Delta \delta = 0, \quad (4)$$

$$T'_d = T_0 \frac{\frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial E'_d}},$$

Для устойчивости состояния необходимо, чтобы все коэффициенты были положительны и кроме того:

Лебедев и Жданов, Устойчивость параллельной электрических систем. Энергоиздат, 1934, стр. 85—89.

$$\left| \frac{1}{T'_d} \quad 1 \right| > 0$$

$$\frac{1}{MT'_d} \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) \quad \frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const})$$

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) > 0. \quad (5)$$

Эти условия показывают, что предел устойчивости получается тогда, когда  $\frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const})$  становится отрицательным

(неравенство (5) при этом всегда соблюдается), т. е. предел мощности определяется из условия постоянства э. д. с. холостого хода в каждый рассматриваемый момент.

Скорость нарушения устойчивости. Решение дифференциального уравнения (4) в области искусственной устойчивости дает:

$$\Delta \delta = A_1 e^{\alpha_1 t} + (A_2 \sin \beta t + A_3 \cos \beta t) e^{-\alpha_2 t}. \quad (6)$$

Из этого уравнения видно, что, помимо затухающих колебаний, будет иметь место непрерывное плавное изменение среднего значения угла. Для определения скорости изменения угла был просчитан конкретный пример работы генератора на шины бесконечной мощности через чистый реактанс. Данные схемы указаны на рис. 2. Дифференциальное уравнение для этой схемы получилось следующее:

$$\ddot{\delta} + 0,455 \ddot{\delta} + 1,437 \Delta \delta - 0,337 \Delta \delta = 0. \quad (7)$$

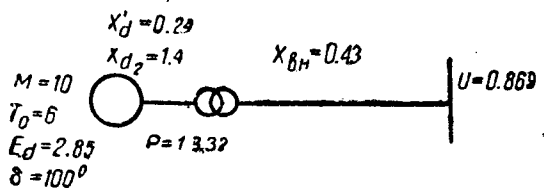


Рис. 2. Схема системы передачи

Графоаналитическое решение характеристического уравнения дало следующие корни:

$$\alpha_1 = 0,2133, \alpha_2 = 0,334, \beta = 1,212. \quad (8)$$

Уравнение изменения угла будет иметь следующий вид:

$$\frac{\Delta \delta}{\Delta \delta_0} = 0,892 e^{0,2133t} (-0,128 \sin 1,212t + 0,108 \cos 1,212t) e^{-0,334t}. \quad (9)$$

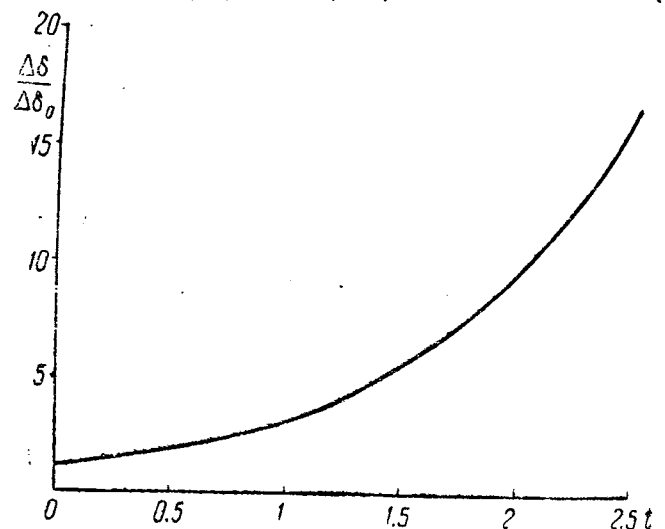


Рис. 3. Изменение среднего значения угла во времени

Изменение среднего значения угла показано на рис. 3. Как видно из кривой, угол изменяется сравнительно медленно. Так например, при  $\Delta\delta_0 = 1^\circ$  изменение угла за 1 сек составит всего лишь около  $3^\circ$  электрических.

**Искусственная устойчивость при наличии регуляторов.** Медленное протекание процесса нарушения статической устойчивости генераторов большой мощности принципиально дает возможность путем воздействия на напряжение возбудителя обеспечить устойчивую работу при углах больше  $90^\circ$ , т. е. работать в области искусственной устойчивости. Соответствующие опыты на машинах малой мощности с обычными регуляторами напряжения были проведены в США. Однако результаты показали, что устойчивая работа сопровождается непрерывным колебательным процессом ротора генератора, что для практической эксплуатации неприемлемо.

Для выявления физической стороны протекающих процессов ниже разобраны случаи идеализированного регулирования. В анализе учитывается нечувствительность регулятора напряжения и пренебрегается временем изменения напряжения на зажимах возбудителя, т. е. при переходе напряжения за зону нечувствительности напряжение на зажимах возбудителя мгновенно изменяется на заданную величину.

В пределах небольших изменений углов ротора генератора зависимости активной мощности от угла могут быть представлены в виде прямых. Можно построить три семейства таких прямых при постоянстве:

- 1) э. д. с. холостого хода;
- 2) э. д. с. за переходным реактансом;
- 3) напряжения на зажимах генератора.

Избыток мощности для этих случаев:

$$\Delta P(E_d) = \frac{\partial P}{\partial E_d} \Delta E_d + \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d - \text{const}) \cdot \Delta \delta; \quad (10 \text{ а})$$

$$\Delta P(E'_d) = \frac{\partial P}{\partial E'_d} \Delta E'_d + \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d - \text{const}) \cdot \Delta \delta; \quad (10 \text{ б})$$

$$\Delta P(U_z) = \frac{\partial P}{\partial U_z} \Delta U_z + \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z - \text{const}) \cdot \Delta \delta. \quad (10 \text{ в})$$

На рис. 4 даны эти семейства прямых.

При работе в области искусственной устойчивости

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d - \text{const}) < 0, \quad \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d - \text{const}) \text{ должно быть больше нуля и}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z - \text{const}) > \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d - \text{const}). \text{ На рисунках для } \Delta P(U_z) \text{ на-}$$

несены лишь две прямые соответственно зоне нечувствительности регулятора. Если напряжение ниже величины, соответствующей нижней зоне нечувствительности, то напря-

жение возбудителя увеличивается до своего верхнего предела  $\Delta E_{de \max}$ . Наоборот, если напряжение превышает величину, соответствующую верхней зоне, то напряжение возбудителя уменьшается до предела  $\Delta E_{de \min}$ . Для суд- о характере процесса можно пользоваться следующим нением:

$$\Delta E'_d = \frac{\Delta E_{de} - \Delta E_d}{T_0}.$$

Из уравнения следует, что если напряжение на возбудителе соответствует  $\Delta E_{de \max}$ , то во всех точках ниже этой прямой  $\Delta E'_d$  будет положительно и кривая протекания процесса пойдет круче прямых  $\Delta P(E_d)$ , а в точках выше этой прямой — менее круто, чем  $\Delta P(E_d)$ . Самое можно сказать, если напряжение возбудителя соответствует  $\Delta E_{de \min}$ .

Предположим, ротор генератора находится в той или иной некоторую начальную положительную скорость. Если напряжение возбудителя соответствует  $\Delta E_{de \min}$ , из предыдущего следует, что протекание процесса пойдет менее круто, чем  $\Delta P(E'_d)$ . Как только будет достигнута нижняя граница зоны нечувствительности, напряжение возбудителя начнет увеличиваться до  $\Delta E_{de \max}$ , и протекание процесса пойдет круче, чем  $\Delta P(E'_d)$ . При некотором угле ротор генератора израсходует свою избыточную кинетическую энергию, и угол начнет уменьшаться, но  $\Delta E'_d$  все время положительно, и кривая протекания процесса загнется вверх, переходя все время на большие значения  $\Delta E'_d$ . Когда будет достигнута верхняя граница зоны нечувствительности, напряжение возбудителя уменьшится до величины, соответствующей  $\Delta E_{de \min}$ , и кривая протекания процесса будет переходить на значения  $\Delta E'_d$ . При некотором угле  $\Delta \delta_d$  кинетическая энергия относительного движения израсходуется, и угол будет увеличиваться. Кривая протекания процесса загнется так как  $\Delta E'_d$  отрицательно. Угол  $\Delta \delta_d$  должен быть таким, чтобы было сохранено правило площадей, т. е.  $\Delta \delta_d \cdot d$  равнялась пл.  $\Delta \delta_b \cdot b$ ,  $\Delta \delta_c \cdot c$ . Процесс увеличения угла будет идти аналогично рассмотренному в предыдущем. Нетрудно убедиться, что максимальный угол отклонения будет больше, чем в предыдущем цикле, так как  $\Delta \delta_d$  больше, чем  $\Delta \delta_b$ ,  $\Delta \delta_c$ , равная пл.  $\Delta \delta_b \cdot b$ ,  $\Delta \delta_c \cdot c$ , больше площади  $\Delta \delta_d \cdot d$ .

Последующий цикл даст еще большее отклонение угла, так как при увеличении угла кривая протекания процесса загнется вверх и при уменьшении угла — вниз,

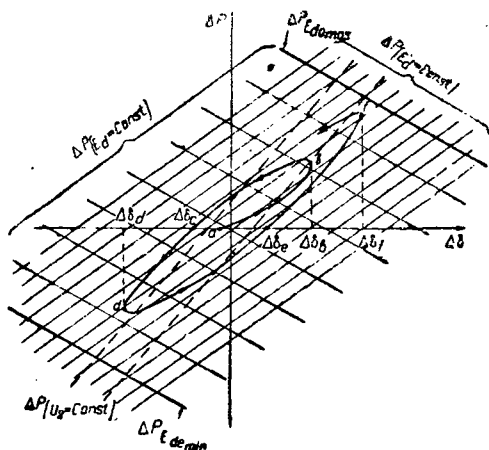


Рис. 4а. Работа в области искусственной устойчивости при ступенчатом регулировании с зоной нечувствительности. Неустойчивая работа

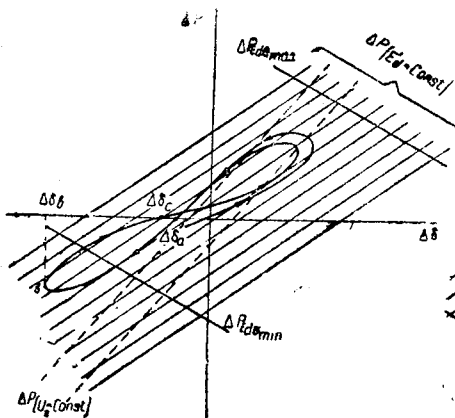


Рис. 4б. Работа в области искусственной устойчивости при ступенчатом регулировании с зоной нечувствительности. Устойчивая работа

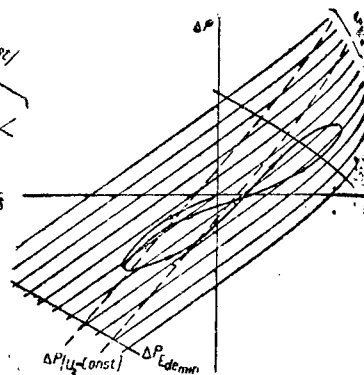


Рис. 4в. Работа в области искусственной устойчивости при ступенчатом регулировании с зоной нечувствительности. Устойчивая работа

она увеличивает площади ускорения и торможения. Колебания угла будут возрастать до тех пор, пока кривая протекания процесса не пересечет прямую  $\Delta E_{de \max}$  или  $\Delta E_{de \min}$ . На рис. 4б показано положение, когда кривая протекания процесса пересекает  $\Delta E_{de \min}$ . В этом случае при уменьшении угла кривая протекания процесса загнется вверх, так что в области ниже  $\Delta E_{de \min}$   $\Delta E_d'$  вновь становится положительной. Площадь ускорения следующего полуцикла будет меньше, чем площадь ускорения предыдущего (пл.  $\Delta \delta_c$ ,  $\Delta \delta_b$ ,  $b$  меньше пл.  $\Delta \delta_a$ ,  $\Delta \delta_b$ ,  $b$ ). В некоторой амплитуде колебания угла кривая процесса перестанет описывать восьмерку, и увеличение амплитуды колебаний прекратится. Таким образом установившийся режим будет иметь колебательный характер.

Аналогичную картину можно получить и в случае пересечения прямой  $\Delta E_{de \max}$  (рис. 4в). И в этом случае установившееся состояние будет иметь колебательный характер. Главной причиной, вызывающей качания генератора в зоне искусственной устойчивости, это — наличие зоны неустойчивости обычных регуляторов. Для устранения этого фактора было рассмотрено регулирование посредством электронного регулятора напряжения, который, являясь фактором непрерывного действия, не обладает этой зоной. Регулирование возбуждения электронным регулятором. Основные уравнения (1), (2), определяющие устойчивость процесса, остаются в силе, и лишь в уравнении (3) необходимо учесть изменение напряжения возбудителя. Таким образом имеем:

$$M \ddot{\delta} = -\Delta P = -\frac{\partial P}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) \cdot \Delta \delta; \quad (12)$$

$$M \ddot{\delta} = -\Delta P = -\frac{\partial P}{\partial E_d'} \Delta E_d' - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d' = \text{const}) \cdot \Delta \delta; \quad (13)$$

$$T_0 \Delta E_d' = \Delta E_{de} - \Delta E_d. \quad (14)$$

Изменение  $\Delta E_{de}$  связано законом регулирования. Примем, что  $\Delta E_{de}$  изменяется таким образом, что поддерживается статическая зависимость между изменением напряжения генератора  $\Delta U_z$  и изменением напряжения возбуждения  $\Delta E_d$  —

$$\Delta E_{de} = -b \Delta U_z, \quad (15)$$

где  $b$  — коэффициент статизма.

Для более простого решения задачи напомним уравнение, полученное (12) и (13):

$$M \ddot{\delta} = -\Delta P = -\frac{\partial P}{\partial U_z} \Delta U_z - \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const}) \cdot \Delta \delta. \quad (16)$$

Подставив из уравнений (12), (13) и (16)  $\Delta E_d$ ,  $\Delta E_d'$  и подставив их в уравнение (14), с учетом уравнения (15) получим:

$$\ddot{\delta} + \frac{1}{T_d'} \left( 1 + \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \right) \dot{\delta} + \frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d' = \text{const}) \cdot \Delta \delta + \frac{1}{MT_d'} \left( \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const}) + \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) \right) \cdot \Delta \delta, \quad (17)$$

$$T_d' = T_0 \frac{\frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial E_d'}}.$$

Это уравнение отличается от (4) коэффициентами при втором и четвертом членах. Условия устойчивости будут:

$$\frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const}) + \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) > 0. \quad (18)$$

$$\left( 1 + \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \right) \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d' = \text{const}) - \left( \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const}) + \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) \right) > 0. \quad (19)$$

Из уравнений (18) и (19) получаем следующее условие устойчивости:

$$\frac{-\frac{\partial P}{\partial U_z} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const})}{\frac{\partial P}{\partial E_d} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const})} < b < \frac{\left( \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d' = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) \right) \frac{\partial P}{\partial U_z}}{\left( \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d' = \text{const}) \right) \frac{\partial P}{\partial E_d}}. \quad (20)$$

Разберем физическое значение этого неравенства, для чего определим избыток мощности  $\Delta P_e$  в зависимости от изменения угла  $\Delta \delta$  при установившемся состоянии для двух крайних случаев неравенства (20):

$$1) \quad b \geq \frac{-\frac{\partial P}{\partial U_z} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const})}{\frac{\partial P}{\partial E_d} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const})}. \quad (21)$$

Из уравнения (16) имеем:

$$\Delta U_z = \frac{\Delta P_e - \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const}) \Delta \delta}{\frac{\partial P}{\partial U_z}}$$

и, учитывая уравнение (15) и (21), получим:

$$\Delta E_{de} = \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const})}{\frac{\partial P}{\partial E_d} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const})} \left[ \Delta P_e - \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const}) \Delta \delta \right].$$

Подставляя найденное значение в уравнение (12), получим:

$$\Delta P_e = \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const})}{\frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const})} \Delta P_e.$$

Так как

$$\frac{\frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const})}{\frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const})} \neq 1,$$

следовательно

$$\Delta P_e = 0. \quad (22)$$

$$2) \quad b \leq \frac{\left( \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d' = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) \right) \frac{\partial P}{\partial U_z}}{\left( \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_z = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d' = \text{const}) \right) \frac{\partial P}{\partial E_d}}. \quad (23)$$

Аналогичным образом получим:

$$\Delta P_e = \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d' = \text{const}) \cdot \Delta \delta. \quad (24)$$

Следовательно, изменение э. д. с.  $\Delta E_{de}$  с изменением угла  $\Delta \delta$  должно происходить таким образом, чтобы было соблюдено неравенство

$$0 < \Delta P_e < \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const}) \cdot \Delta \delta. \quad (25)$$

Если с увеличением угла  $\Delta \delta$  напряжение на зажимах возбудителя возрастет настолько незначительно, что активная мощность в установившемся режиме не увеличивается ( $\Delta P_e < 0$ ), то, естественно, статическая устойчивость генератора будет нарушена. Если же напряжение возбудителя будет увеличиваться больше, чем это требуется для поддержания постоянства э. д. с. за переходным реактанцем (в установившемся режиме), то, как показывает неравенство (25), в этом случае система также окажется неустойчива, и генератор будет раскачиваться. На рис. 5 показаны два случая изменения  $\Delta E_{de}$ , дающие устойчивую и неустойчивую работу. Построение этих кривых произведено тем же методом, который был применен для качественного анализа регуляторов с зоной нечувствительности. Таким образом изменение  $\Delta E_{de}$  должно происходить так, чтобы избытки мощности установившегося режима  $\Delta P_e$  находились в заштрихованной области рис. 5, б.

**Необходимая величина коэффициента статизма.** Не-

трудно убедиться, что коэффициент  $\frac{1}{b}$  электронного регулятора желательно брать наименьшим, так как в этом случае с увеличением нагрузки будет иметь место наименьшее снижение напряжения генератора, а следовательно, при одном и том же угле будет получаться большая мощность.

Для качественной оценки разберем работу генератора через чистый реактанс на шины бесконечной мощности (рис. 6).

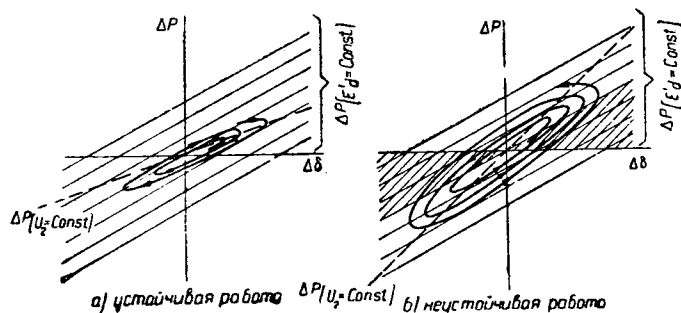


Рис. 5. Работа в области искусственной устойчивости при регулировании электронным регулятором

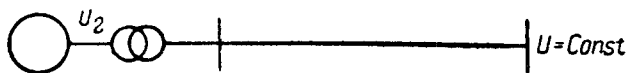


Рис. 6. Схема системы передачи на шины бесконечной мощности

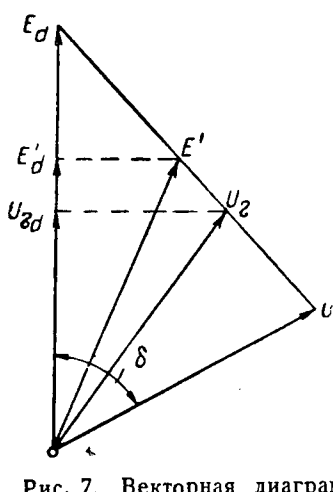


Рис. 7. Векторная диаграмма

Регулирование будем считать происходящим по продольной составляющей напряжения  $U_{2d}$  (рис. 7). Мощность в зависимости от угла  $\delta$  в этом случае будет:

при постоянстве э. д. с. холостого хода

$$P_{(E_d = \text{const})} = \frac{E_d U}{X_d} \sin \delta; \quad (26)$$

при постоянстве э. д. с. за продольным переходным реактанцем

$$P_{(E'_d = \text{const})} = \frac{E'_d U}{X'_d} \sin \delta - \frac{U^2 (X_d - X'_d)}{2 X_d X'_d} \sin 2\delta. \quad (27)$$

При постоянстве продольной составляющей клеммного напряжения генератора

$$P_{(U_{2d} = \text{const})} = \frac{U_{2d} U}{X_{\Sigma H}} \sin \delta - \frac{U^2 (X_d - X_{\Sigma H})}{2 X_d X_{\Sigma H}} \sin 2\delta.$$

Из этих уравнений получим следующие значения частных производных для неравенства (20):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) &= \frac{E_{d0} U}{X_d} \cos \delta_0; \\ \frac{\partial P}{\partial E_d} &= \frac{U}{X_d} \sin \delta_0; \\ \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const}) &= \frac{E'_{d0} U}{X'_d} \cos \delta_0 - \frac{U^2 (X_d - X'_d)}{X_d X'_d} \cos 2\delta_0; \\ \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_{2d} = \text{const}) &= \frac{U_{2d0} U}{X_{\Sigma H}} \cos \delta_0 - \frac{U^2 (X_d - X_{\Sigma H})}{X_d X_{\Sigma H}} \cos 2\delta_0; \\ \frac{\partial P}{\partial U_{2d}} &= \frac{U}{X_{\Sigma H}} \sin \delta_0. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$E'_{d0}$  и  $U_{2d0}$  можно выразить через  $E_{d0}$ :

$$E'_{d0} = E_{d0} \frac{X'_d}{X_d} + \frac{U (X_d - X'_d)}{X_d} \cos \delta_0;$$

$$U_{2d0} = E_{d0} \frac{X_{\Sigma H}}{X_d} + \frac{U (X_d - X_{\Sigma H})}{X_d} \cos \delta_0.$$

Подставляя эти величины в (29), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const}) &= \frac{E_{d0} U}{X_d} \cos \delta_0 + \frac{U^2 (X_d - X'_d)}{X_d X'_d} \sin^2 \delta_0 = \\ &= \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) + \frac{U^2 (X_d - X'_d)}{X_d X'_d} \sin^2 \delta_0, \\ \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_{2d} = \text{const}) &= \frac{E_{d0} U}{X_d} \cos \delta_0 + \frac{U^2 (X_d - X_{\Sigma H})}{X_d X_{\Sigma H}} \sin^2 \delta_0 = \\ &= \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) + \frac{U^2 (X_d - X_{\Sigma H})}{X_d X_{\Sigma H}} \sin^2 \delta_0. \end{aligned}$$

При этих значениях частных производных неравенство (20) дает:

$$\frac{-1}{\frac{X_{\Sigma H}}{X_d} + \frac{U}{E_{d0}} \frac{(X_d - X_{\Sigma H})}{X_d} \frac{\sin^2 \delta_0}{\cos^2 \delta_0}} < b < \frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_{\Sigma H}}.$$

Минимальная величина коэффициента статизма  $\left(\frac{1}{b}\right)_{\min}$  получается, приравняв  $b$  правой части неравенства:

$$\left(\frac{1}{b}\right)_{\min} = \frac{X'_d - X_{\Sigma H}}{X_d - X'_d} = \frac{X'_{d_{2\text{ген}}}}{X_{d_{2\text{ген}}} - X'_{d_{2\text{ген}}}},$$

где  $X_{d_{2\text{ген}}}$  и  $X'_{d_{2\text{ген}}}$  — синхронный и переходный реактансы генератора (без внешнего реактанта).

При этом значении коэффициента статизма изменение мощности в зависимости от угла  $\delta$  будет протекать по кривой, построенной для постоянства э. д. с. за переходным реактанцем  $(P_{(E'_d = \text{const})})$ . Как было показано ранее [ур-

авне (25)], левая часть неравенства (33) будет соблюдаться вплоть до момента максимума мощности  $P_{(E'_d = \text{const})}$ .

Таким образом при величине коэффициента статизма, определенном по уравнению (34), максимальная мощность и максимальный угол получаются из условия постоянства э. д. с. за переходным реактанцем генератора.

По мере увеличения нагрузки генератора напряжение его клеммах будет падать вследствие наличия статизма.

электронного регулятора, необходимого для сохранения устойчивости. Максимальная мощность получится, исходя из условия постоянства э. д. с. за переходным реактансом (рис. 8,  $P_{\max} E'_d = \text{const}$ ). Если бы можно было создать устойчивый режим при условии поддержания постоянства клеммового напряжения, то предельная мощность получилась бы значительно больше (рис. 8,  $P_{\max} U_{2d} = \text{const}$ ). Однако на сегодняшний день это не достигнуто. Чтобы увеличить предельную мощность, можно дать астатическую поправку электронному регулятору. В этом случае внутренняя характеристика генератора будет являться характеристикой, построенной, исходя из постоянства э. д. с. за переходным реактансом, обеспечивающая устойчивую работу в области искусственной устойчивости. Внешней же будет характеристика, построенная из условия постоянства клеммового напряжения  $U_{2d}$ . Предельная мощность получится,  $\frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const})$  (аналогично внутреннему пределу мощности). Эта предельная мощность обозначена на рис. 8 —

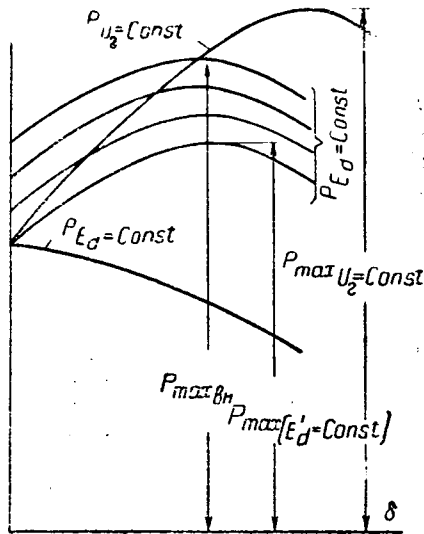


Рис. 8. Мощность в зависимости от угла  $\delta$

те же результаты можно получить, если статические характеристики электронного регулятора будут астатичны (практически с небольшим статизмом), а динамические характеристики будут иметь статизм, определяемый уравнением (34).

Приведенный анализ регулирования по продольной составляющей напряжения дает наиболее простые и наглядные выводы. Однако практически значительно проще вести регулирование непосредственно по клеммовому напряжению. Математический анализ в этом случае осложняется тем, что зависимость активной мощности от угла  $\delta$  при постоянстве клеммового напряжения имеет более сложный вид:

$$P_{(U_2 = \text{const})} = \frac{U_2 U}{X_{\text{вн}}} \sin \delta \sqrt{1 - A^2 \sin^2 \delta} - \frac{U^2 (X_d - X_{\text{вн}})}{2 X_d X_{\text{вн}}} \sin 2\delta \quad (35)$$

$$A = \frac{U}{U_2} \frac{(X_d - X_{\text{вн}})}{X_d}$$

Определяя частные производные и подставляя их в правую часть неравенства (20), получим минимально допустимое значение коэффициента статизма:

$$\left(\frac{1}{b}\right)_{\min} = \left(\frac{X'_d - X_{\text{вн}}}{X_d - X'_d}\right) \sqrt{1 - A^2 \sin^2 \delta} - \frac{(X_d - X_{\text{вн}})^2}{(X_d - X'_d)^2} \frac{X'_d}{X_d} \frac{U}{U_2} \cos \delta. \quad (36)$$

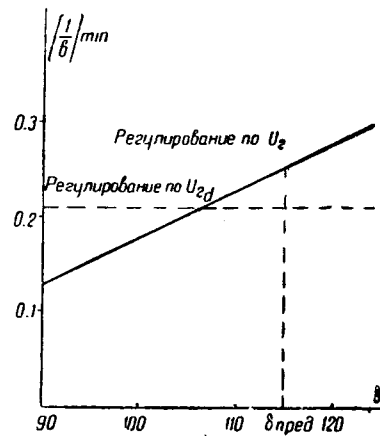


Рис. 9. Изменение минимально допустимого статизма при изменении угла  $\delta$

Из последнего уравнения следует, что в этом случае величина минимально допустимого коэффициента статизма определяется не только реактансами генератора, как это имело место при регулировании по продольной составляющей напряжения, — но и внешним реактансом, а также режимом работы  $\left(\frac{U}{U_2} \text{ и } \delta\right)$ . Изменение минимально допустимого коэффициента статизма в зависимости от угла  $\delta$  для одного конкретного случая дано на рис. 9. Пунктиром дано его значение при регулировании по продольной составляющей напряжения. Предельный угол (максимум мощности при постоянстве  $E'_d$ ) равен  $115^\circ$ . Как видно из рис. 8, расхождение минимального коэффициента статизма при регулировании по клеммовому напряжению и по продольной составляющей его при предельном угле сравнительно невелико.

Чтобы дойти до предельного угла, необходимо коэффициент статизма электронного регулятора выбирать равным его значению при этом угле. Так как при меньших углах для поддержания постоянства э. д. с. за переходным реактансом требуется меньшее значение коэффициента статизма, то при постоянстве его при возрастании угла э. д. с. за переходным реактансом будет несколько уменьшаться, и предельная мощность получится меньше, чем при регулировании по продольной составляющей. Этот вывод справедлив лишь при условии отсутствия астатической поправки у электронного регулятора. Если же имеется астатическая поправка, то изменение минимально допустимого коэффициента статизма с изменением угла не оказывает влияния, и в этом случае регулирование по клеммовому напряжению даст большую предельную мощность, чем регулирование по продольной его составляющей (внешняя характеристика  $P_{U_2 = \text{const}}$  идет круче, нежели  $P_{U_{2d} = \text{const}}$ ).

Кроме того, такое регулирование гораздо удобнее в эксплуатационном отношении.

Учет конечной скорости изменения напряжения на зажимах возбудителя. Выше принималось, что напряжение на зажимах возбудителя  $\Delta E_{de}$  следовало за изменением напряжения генератора без запаздывания ( $\Delta E_{de} = -b \Delta U_2$ ). В действительности электронный регулятор действует на обмотку возбуждения возбудителя, и вследствие магнитной инерции цепи возбуждения напряжение на его зажимах несколько запаздывает от изменения напряжения на клеммах генератора.

Уравнение возбудителя будет:

$$\Delta E_{de} + T_e \dot{\Delta E}_{de} = \Delta E_{de \infty}, \quad (37)$$

где  $\Delta E_{de}$  — изменение напряжения на зажимах возбудителя в каждый рассматриваемый момент;

$\Delta E_{de \infty}$  — его значение при установившемся режиме;

$T_e$  — постоянная времени обмотки возбуждения.

Уравнение регулирования в отличие от (15) будет:

$$\Delta E_{de \infty} = -b \Delta U_2. \quad (38)$$

Решая совместно уравнения (12), (13), (14), (16), (37) и (38),



получим следующее дифференциальное уравнение регуляционного процесса:

$$\begin{aligned} & \Delta \ddot{\delta} + \left( \frac{1}{T_e} + \frac{1}{T'_d} \right) \dot{\Delta \delta} + \\ & + \left( \frac{1}{T_e T'_d} + \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const})}{M} + \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{T_e T'_d \frac{\partial P}{\partial U_z}} \right) \Delta \dot{\delta} + \\ & + \left( \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const})}{T_e M} + \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const})}{T'_d M} \right) \Delta \delta + \\ & + \frac{1}{M T_e T'_d} \left( \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}) + \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta}(U_z = \text{const}) \right) \Delta \delta = 0. \quad (39) \end{aligned}$$

при котором  $\frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const}) = 0$ , а предел устойчивой работы наступит раньше. Обычно  $T_e$  значительно меньше  $T'_d$  и практически это условие может дать лишь незначительное уменьшение предельной мощности.

По второму условию устойчивости — уравнение (41), подставляя значение коэффициентов и решая неравенство относительно  $b$ , получим:

$$b > \frac{-\frac{\partial P}{\partial U_z}}{\frac{\partial P}{\partial E_d}} \left[ 1 + \frac{\left( \frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}) \right) T'_d}{M (T_e + T'_d)} \right]$$

Так как  $b$  положительно, а правая часть неравенства всегда отрицательна, то это условие практически всегда соблюдается.

Третье условие устойчивости (42) дает:

$$\frac{1}{b} > \frac{\frac{\partial P}{\partial E_d} \left[ \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(U_z = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const})}{T'_d} + \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(U_z = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const})}{T_e} \right]}{\frac{\partial P}{\partial U_z} \left[ \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const})}{T_e} + \frac{T_e \left( T'_d \frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const}) + T_e \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}) \right)}{M (T_e + T'_d)} \right]}$$

Для уравнения типа:

$$y^{IV} + a_1 \ddot{y} + a_2 \ddot{y} + a_3 \dot{y} + a_4 y = 0$$

условия устойчивости будут:

$$a_1, a_2, a_3, a_4 > 0; \quad (40)$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & 1 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_3 > 0; \quad (41)$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & 1 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & a_4 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_3^2 > 0. \quad (42)$$

В уравнении (39) отрицательное значение имеет лишь величина  $\frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const})$ , и, следовательно, необходимо, чтобы:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const})}{T_e} + \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const})}{T'_d} > 0; \\ & \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const})}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} + \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta}(U_z = \text{const}) > 0. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Из этих двух неравенств получаем:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const}) > -\frac{T_e}{T'_d} \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}); \quad (44)$$

$$b > \frac{-\frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}) \cdot \frac{\partial P}{\partial U_z}}{\frac{\partial P}{\partial \delta}(U_z = \text{const}) \cdot \frac{\partial P}{\partial E_d}}. \quad (45)$$

Последнее неравенство [сравнивая с уравнением (20)] аналогично условию устойчивости при бесконечно большой скорости изменения напряжения возбудителя ( $T_e = 0$ ) и, как это было показано ранее, соответствует условию  $\Delta P_e > 0$ .

Неравенство (44) показывает, что при конечной скорости изменения напряжения возбудителя нельзя дойти до угла,

Обычно  $T_e$  бывает мало и можно пренебречь в знаменателе величиной

$$\frac{T_e \left( T'_d \frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const}) + T_e \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}) \right)}{M (T_e + T'_d)}$$

по сравнению с  $\frac{1}{T_e}$ . Необходимо отметить, что это умножение повышает запас устойчивости. Тогда

$$\frac{1}{b} > \frac{\frac{\partial P}{\partial E_d} \left( \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(U_z = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const})}{T'_d} + \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(U_z = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const})}{T_e} \right)}{\frac{\partial P}{\partial U_z} \left( \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const})}{T_e} + \frac{T_e \left( T'_d \frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const}) + T_e \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}) \right)}{M (T_e + T'_d)} \right)} \times$$

Сравнивая это соотношение с неравенством (20), можно заключить, что выражение перед квадратными скобками представляет предельное значение коэффициента статизма при бесконечно большой скорости изменения напряжения ( $T_e = 0$ ), и, следовательно,

$$\frac{1}{b} > \left( \frac{1}{b} \right)_{\text{пред}} \quad \text{при } T_e = 0 \left[ 1 + \frac{T_e}{T'_d} \frac{\left( \frac{\partial P}{\partial \delta}(U_z = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}) \right)}{\left( \frac{\partial P}{\partial \delta}(U_z = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const}) \right)} \right]$$

Чтобы оценить количественное влияние конечной скорости изменения напряжения возбудителя на величину максимально допустимого статизма, разберем случай регулирования по продольной составляющей напряжения генератора ( $U_{zd}$ ) при работе его на шины бесконечной мощности и чистый реактанс. Подставляя в (49) значения частных

Из уравнений (29), (31), (32), получим:

$$\frac{1}{b} > \left( \frac{1}{b} \right)_{\text{пред}} \cdot \left[ 1 + \frac{T_e}{T_0} \frac{(X_d - X_{вн})}{(X'_d - X_{вн})} \right] \quad \text{при } T_e = 0$$

$$\frac{1}{b} > \left( \frac{1}{b} \right)_{\text{пред}} \cdot \left[ 1 + \frac{T_e}{T_0} \frac{X_{d_{ген}}}{X'_{d_{ген}}} \right], \quad (50)$$

где  $X_{d_{ген}}$  и  $X'_{d_{ген}}$  — синхронный и переходный реактансы генератора (без внешнего реактанта).

Вводя постоянную времени при к. з. на клеммах генератора —  $T'_{d_{ген}} = T_0 \frac{X'_{d_{ген}}}{X_{d_{ген}}}$ , получим:

$$\frac{1}{b} > \left( \frac{1}{b} \right)_{\text{пред}} \cdot \left[ \frac{T'_{d_{ген}} + T_e}{T'_{d_{ген}}} \right]. \quad (51)$$

Это выражение показывает, что влияние конечной скорости подъема напряжения возбудителя на минимально допустимое значение коэффициента статизма сравнительно невелико.

## Экспериментальное исследование статической и искусственной устойчивости в электросистемах

П. И. Сазанов  
ВЭИ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ анализ<sup>1</sup> показал, что при регулировании напряжения электронным регулятором возможно обеспечить работу генератора в области искусственной устойчивости без аварий, если при этом регулятору будет дана определенная статическая зависимость между регулируемым напряжением и током возбуждения генератора.

При анализе рассматривалась скорее качественная картина и не учитывался ряд факторов (переходные процессы в статорной обмотке, явления в цепях железа ротора и пр.). Поэтому порекомендовались известные коррективы на экспериментальной базе.

Лабораторная установка (рис. 1а) представляла собой мотор-генераторный агрегат 7,5 kVA, работающий параллельно сети Мосэнерго, через внешний реактанс.

Испытанный генератор имеет синхронный (невысеченный) реактанс  $x = 9,66 \Omega$ ;  $r_{як} = 0,47 \Omega$ ;  $T_e = 0,12 \text{ sec}$ ;  $x'_d = 3,5 \Omega$ . Внешний импеданс его  $Z = 1,34 \Omega$  и  $r_{вн} = 0,536 \Omega$ .

Постоянная времени генератора примерно в 15 раз меньше, чем у больших машин. Для увеличения ее было применено устройство по теме рис. 16.

Эта статья проф. С. А. Лебедева «Анализ искусственной устойчивости генераторов» в этом номере.

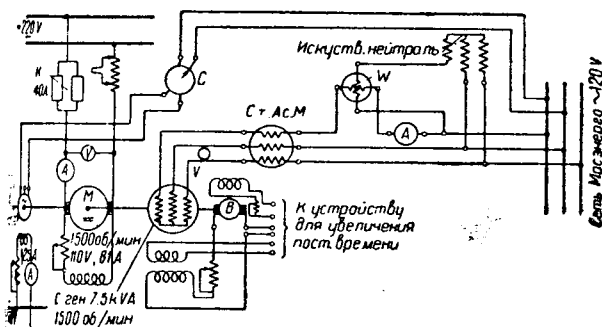


Рис. 1а. Схема лабораторной установки для опытов по искусственной устойчивости

— мотор постоянного тока, С — синхроноскоп, К — колонка 110 В, 40 А; — синхронный мотор с вынутым ротором (использовался как промежуточный реактанс)

Устройство состоит из фазового мостика, силовой выпрямительной части и обратной связи. В фазовом мостике роль переменного сопротивления выполняет лампа СО-118, на сетку которой, кроме регулируемого отрицательного напряжения (величину его определяет ток возбуждения при стационарном режиме), подается напряжение обратной связи. Обратная связь осуществлена при помощи добавочной обмотки, намотанной на индуктор генератора. Фазовый мост управляет открытием тиратрона (силовая часть), выпрямленный ток которого питает обмотку возбудителя. Потенциометр в сеточной цепи лампы СО-118 устанавливается при нормальном режиме генератора таким образом, чтобы тиратрон был открыт приблизительно наполовину; обратная связь при этом в состоянии управлять током возбуждения генератора в обе стороны — уменьшать и увеличивать его.

Пусть по какой-либо причине внезапно изменится режим работы генератора со стороны якоря, тогда в индукторной обмотке генератора наведется свободный ток. При затухании он наведет э. д. с. в обмотке обратной связи.

Если ток в индукторной цепи уменьшится, то отрицательное напряжение на лампе СО-118 изменится в сторону открытия тиратрона ТГ-160, что приведет к возрастанию тока возбуждения, в противном случае будет иметь место обратная

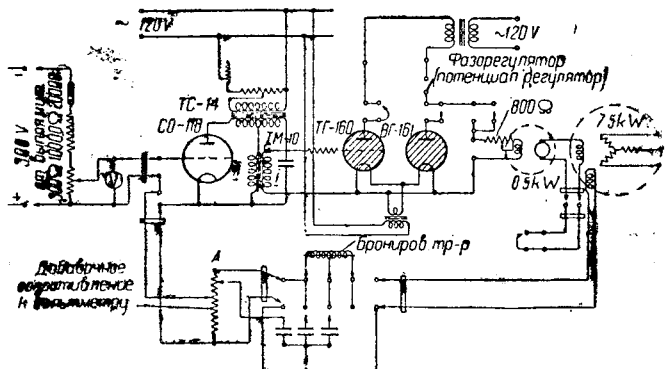


Рис. 16. Устройство для увеличения постоянной времени генератора



Таблица 1

Регулятор и способ регулирования	$U_2$ V	$I_2$ A	$U_c$ V	Предельная мощность генератора $P_{пр}$ , kW	%	Угол между $E$ и $U_c$	Угол между $E'$ и $U_c$	Поведение машины
Без регулирования ( $i_s = 0,75$ A)	$\frac{127}{126}$	14,4	130,5	$\frac{3,222}{3,224}$	100	$\frac{94^\circ}{93,5^\circ}$	$77^\circ$	Машина оставалась в работе (мощность была немного меньше предельной)
Угловой; регулирование по $U_2$ (нечувствительность 1,5%)	$\frac{127}{125}$	22	$\frac{131,5}{131}$	$\frac{5,17}{5,208}$	163	$\frac{106^\circ}{109^\circ}$	$85^\circ$	Машина выпадала из синхронизма при слабом толчке нагрузки
Электронный; регулирование по $U_2$ (статизм 3%) . . . . .	$\frac{127}{121}$	28	131	$\frac{6,765}{6,834}$	210	$\frac{119^\circ}{118^\circ}$	$91^\circ,5$	Машина была выведена из синхронизма снижением тока возбуждения при угле $130^\circ$

Таблица 2

№ п/п	Первоначальная мощность генератора, kW	Первоначальный угол генератора, $\angle EU_c$	Запас мощности без регулятора kW	%	Толчок мощности, kW	%	Мощность генератора после толчка, kW	Угол генератора после толчка	Поведение машины
1	3,475	$75^\circ$	0,195	5,6	0,28	8,05	3,755	$85^\circ$	Качения затухающие; синхронный ход
2	3,475	$75^\circ$	0,195	5,6	0,60	17,25	4,075	$93^\circ$	То же
3	3,475	$75^\circ$	0,195	5,6	1,00	29,75	4,475	$107^\circ$	" "
4	3,475	$75^\circ$	0,195	5,6	1,25	36,00	4,725	$120^\circ$	" "
5	3,475	$75^\circ$	0,195	5,6	1,445	41,6	—	—	Машина выпала из синхронизма
6	4,285	$85-90^\circ$	0,06	1,4	0,34	7,94	4,625	$95^\circ$	Качения затухающие; синхронный ход
7	4,285	$85-90^\circ$	0,06	1,4	0,625	14,6	4,910	$105^\circ$	То же
8	4,285	$85-90^\circ$	0,06	1,4	0,925	21,6	5,21	$115^\circ$	" "
9	4,285	$85-90^\circ$	0,06	1,4	1,215	28,4	—	—	Машина выпала из синхронизма

Действие электронного регулятора было проверено также и в условиях динамического нарушения режима генератора, создавшегося внезапным повышением мощности первичного двигателя резкими скачками порядка  $10-35\%$  от первоначально установленной мощности (статизм регулятора —  $3\%$ ). Мощность генератора до скачка была близка к идеальному пределу мощности (при  $\angle EU_c = \delta = 75-85^\circ$ ). Результаты опытов сведены в табл. 2.

**Опыты в системе Мосэнерго.** Для проведения опытов Мосэнерго выделило 50-MW машину на Сталиногорской грэс, работавшей во время испытаний параллельно с системой Мосэнерго по специальной схеме.

Опыты с электронным регулятором напряжения проводились при работе выделенной машины по схеме рис. 3. Бустерный выключатель БМВ во время опытов был выключен. Испытуемая машина (левая, рис. 3) работала на 110-kV шины Москвы по изолированной одноцепной 110-kV линии передачи.

Принципиальная схема измерительных цепей и других электрических соединений, осуществленная во время испытаний, показана на рис. 4.

Для измерения угла и скорости испытуемой машины на ее вал насаживалась упомянутая выше синхронная машинка. Угол измерялся осциллографом по специальной потенциометрической схеме,

показанной на рис. 4 (схема выделена пунктиром), и синхроноскопом.

Потенциометры присоединились к двум источникам напряжения: к вспомогательной машинке и к шинам Сталгрэс, на которые работали не участвовавшие в испытании генераторы станции (последние были электрически жестко связаны с Московскими шинами 110 kV).

Шлейфа осциллографа, измерявшая угол, присоединялась на геометрическую разность напряжений потенциометров, пропорциональную двойному синусу половины измеряемого угла.

В целях сглаживания высших гармонических вспомогательной машинки потенциометр схемы измерения угла присоединялся к ней через фильтр — резонансный контур (рис. 4), настроенный на частоту 50 Hz.

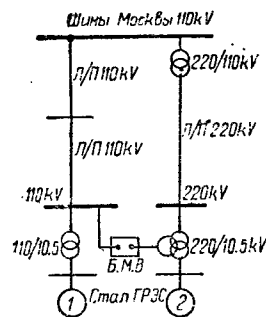


Рис. 3. Принципиальная схема участка системы Мосэнерго, выделенного для опытов по искусственной устойчивости

1 — испытуемый генератор 55 MVA, 10,5 kV, 1500 об/мин,  $\cos \varphi = 0,85$ , 2 — генератор 55 MVA, 1500 об/мин, 10,5 kV,  $\cos \varphi = 0,85$

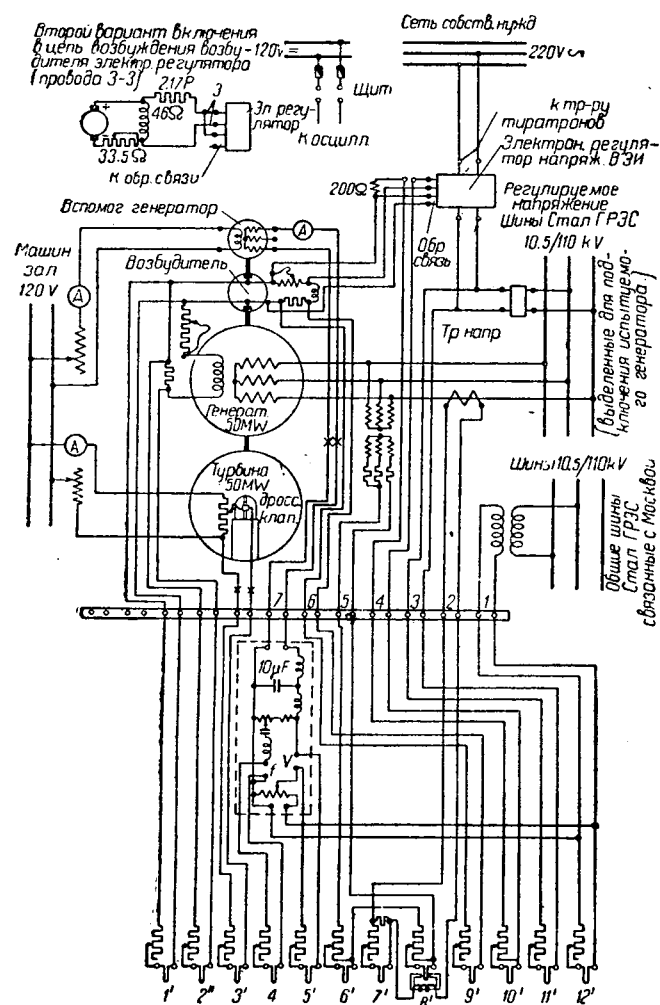


Рис. 4. Принципиальная схема соединений для измерений в опытах по искусственной устойчивости на Сталгрэс

При измерении угла синхроскопом последний непосредственно присоединялся к клеммам вспомогательной синхронной машинки и к шинам Сталгрэс, жестко электрически связанным с шинами Москвы; на последние изолированно работала испытываемая машина.

При таком способе измерения угла между ротором испытываемой машины и вектором напряжения шин Москвы (шины бесконечной мощности) необходимо было считаться с наличием собственного угла самой измерительной схемы. Угол этот обусловлен, во-первых, несовпадением при насадке осей полюсов вспомогательной машинки и испытываемого генератора, во-вторых, наличием на вспомогательной машинке определенной нагрузки от присоединенных к ней схем и приборов, сдвигающей подаваемое от ее клемм напряжение по отношению к ее э. д. с., и, в-третьих, сдвигом аз между вектором напряжения шин Сталгрэс подававшимся на устройство для измерения угла) вектором напряжения шин Москвы. Этот сдвиг аз был во время опытов постоянен ввиду поддержания неизменным нагрузочного режима на линиях передачи, связывающих эти шины Сталгрэс шинами Москвы.

Отсчет углов производился от условного нуля, т. е. с учетом определенного предварительно собственного угла.

Для измерения скорости машины применялся специальный резонансный контур, питавшийся с потенциометра, присоединенного к напряжению вспомогательной машинки. Контур был настроен в резонанс с частотой 53 Hz и имел крутопадающую характеристику тока в пределах частот 46—53 Hz.

Контур был встроен в устройство для измерения угла. Его выход присоединялся к шлейфу осциллографа (рис. 4).

Регулирование велось по  $U_2$  со статизмом 4—6%. При опытах регулятор работал по дополнительной схеме рис. 4.

Кроме опытов по искусственной устойчивости с электронным регулятором, на Сталгрэс была также проведена проверка эффективности частотного сброса паровой мощности с помощью сервомотора синхронизатора как средства для сохранения статической устойчивости при выключении одной из цепей передачи.

Для проведения второй части опытов была осуществлена специальная схема (рис. 5) автоматического управления сервомотором синхронизатора. Сброс происходил вслед за размыканием связи между линиями 110 и 220 kV (рис. 3).

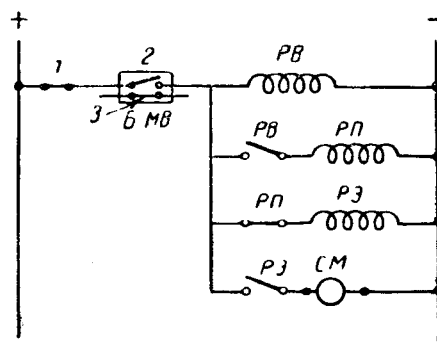


Рис. 5. Схема автоматического управления сервомотором синхронизатора, БМВ — бустерный масляный выключатель 1 — однополюсный рубильник для размыкания вручную цепей PB и ПП, блокирующий контакт, 2 — силовой контакт БМВ, 3 — промежуточный, РЭ — пусковое, СМ — сервомотор синхронизатора.

Схема приходит в действие в момент размыкания бустерного выключателя 3, сопровождающегося замыканием блокирующего контакта 2. Через контакт 2 подается одновременно плюс на реле PB и РЭ. Выдержка реле времени выбиралась в зависимости от первоначальной нагрузки машины (до разрыва связи) и требовавшегося по условиям опыта снижения паровой мощности. По истечении выдержки времени подавался плюс на реле РП. Будучи возбуждено, это реле размыкало контакты РП, снимая плюс с пускового реле.

Контакт пускового реле размыкался, прекращая работу сервомотора. Рубильник 1 служил для снятия вручную напряжения с реле PB и РП.

**Определение статического предела мощности при работе с электронным регулятором.** Чтобы иметь возможность при опыте подойти ближе действительному предельному режиму синхронной работы генератора с электронным регулятором, решено было опыт вести при постоянстве активной мощности. Изменение угла между э. д. генератора и напряжением приемного конца с

смы достигалось постепенным снижением напряжения на клеммах генератора. Это снижение в свою очередь достигалось изменением напряжения задаваемого для поддержания электронному регулятору. Изменением от руки заданного напряжения на электронном регуляторе вызывалось действие его на возбуждение генератора.

При углах  $\delta$ , меньших  $90^\circ$ , регулятор должен был действовать все время в сторону понижения тока возбуждения. При углах, больших  $90^\circ$ , регулятор должен был действовать все время в сторону повышения тока возбуждения.

При углах  $\delta$ , больших  $90^\circ$ , регулятор при понижении заданного ему напряжения от руки сна- чала действует в сторону понижения тока возбуждения генератора. В дальнейшем же по мере роста угла вследствие небаланса между постоянной активной мощностью и уменьшившейся мощностью генератора регулятор будет работать на повышение тока возбуждения.

Этот необычный на первый взгляд процесс объясняется тем обстоятельством, что клеммовое напряжение генератора с ростом угла имеет тенденцию к дальнейшему понижению, регулятор же стремится поддерживать его и вызовет увеличение тока возбуждения.

По условиям, продиктованным режимом работы машины, испытуемый генератор мог взять на себя не более 35 MW. Эта мощность и поддерживалась постоянной во время опыта. Первоначальное напряжение на клеммах было установлено 9 kV. Изменение режима испытуемого генератора с изменением его клеммового напряжения было предельно аналитически рассчитано. По результатам расчета были заранее построены кривые (рис. 6а) изменения всех величин, характеризующих режим генератора в функции клеммового напряжения.

Во время опыта через определенные интервалы

снижалось напряжение на клеммах испытуемого генератора и велась запись по приборам всех электрических величин, характеризующих режим опытного участка.

По данным этих записей на те же кривые рис. 6а наносились (кружки) опытные значения.

Следует отметить, что в процессе опыта при достижении угла в  $110^\circ$  начались небольшие качания генератора, повидимому, вызванные недостаточной стабильностью регулирования в этой зоне углов. После увеличения статизма регулятора до 6% эти колебания стали исчезающе малыми.

Как видно из рис. 6а, эксперимент показал весьма удовлетворительное совпадение опытных величин с расчетными.

Предельный режим, достигнутый при опыте, характеризуется нижеследующей таблицей.

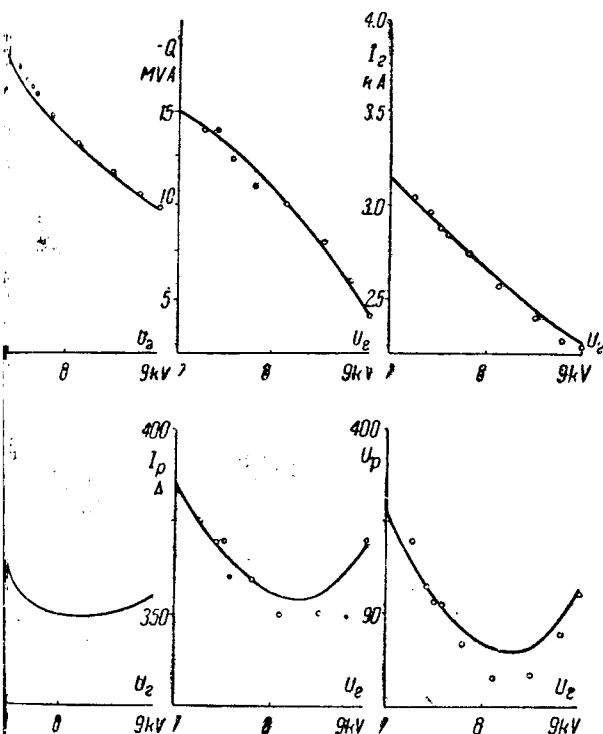
Величины	$P_{пр}$ MW	$\delta$	$U_2$ kV	$E_d$ kV	$I_2$ A	$Q$ MW	$U$ V	$I_p$ A
Опыт . . . . .	35	$117^\circ$	7,23	157,5	3040	-14	94	375
Расчет . . . . .	35	$114^\circ$	7,23	157,5	3040	-14	93	375

При данном режиме машина продолжала оставаться в синхронной работе. По эксплуатационным условиям опыты продолжать дальше нельзя было (перегрузка статора).

Для оценки прироста мощности, достигаемого с помощью электронного регулятора, над внутренним пределом мощности при работе с обыкновенными регуляторами напряжения была построена по данным опытов и аналитических расчетов кривая рис. 6б. Кривая дает зависимость активной мощности от угла между э. д. с. генератора и напряжением приемного конца при постоянстве напряжения  $U_2$ , равного 7,23 kV.

Согласно кривой внутренний предел мощности при  $U_2 = 7,23$  kV составляет 11,6 MW. Таким образом прирост мощности, достигнутый с помощью электронного регулятора, составляет 23,4 MW, или 202%.

Следует, конечно, иметь в виду, что этот прирост получен при значительно пониженном



6а. Результаты опытов с электронным регулятором

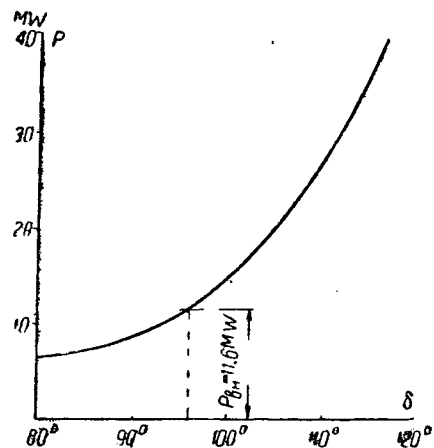


Рис. 6б. Активная мощность в зависимости от угла  $\delta$  при напряжении генератора  $U_2$ , 7,23 kV



напряжении на клеммах машины по сравнению с его нормальным значением ( $10 \div 10,5$  kV). При таком напряжении магнитная цепь машины почти не насыщена, чем облегчается форсировка возбуждения электронным регулятором.

В эксплуатационных условиях следует ожидать несколько меньшего эффекта.

**Частичный сброс паровой мощности.** Для проведения этого опыта была снята характеристика скорости действия сервомотора синхронизатора испытуемой турбины. Характеристика снималась при двух мощностях агрегата (предшествовавших сбросу мощности) — 30 и 40 MW. При снятии характеристики испытуемый агрегат работал по нормальной схеме станции.

Управление сбросом мощности осуществлялось с помощью схемы рис. 5 (при выключенном бустерном выключателе *БМВ*), периодическим замыканием и размыканием рубильника 1.

Продолжительность импульса, подававшегося от сети постоянного тока на сервомотор синхронизатора, регулировалась изменением выдержки времени реле *РВ* (рис. 5) от 0,5 до 3 сек.

Снятие характеристики производилось следующим образом.

Сначала с помощью секундомера проверялась работа реле времени и собственное время действия самой схемы рис. 5. Затем на испытуемом агрегате устанавливалась вручную первоначальная мощность — в 30 MW. На реле времени ставилась выдержка 0,5 сек. Включался рубильник 1; после автоматического выключения сервомотора синхронизатора из работы выключался рубильник 1: замерялась и записывалась мощность агрегата. Затем мощность агрегата восстанавливалась от руки до нормальной (30 MW). На реле времени устанавливалась выдержка 1,0 сек, снова включался рубильник 1 и т. д. Та же процедура повторялась при новой первоначальной мощности в 40 MW.

При проверке действия схемы автоматического управления сервомотором синхронизатора было установлено, что пусковое реле имеет собственное время 0,5 сек после замыкания рубильника 1. Размыкание контакта *РЭ* запаздывало на 0,5 сек. Общее время действия сервомотора сохранялось равным установленному на реле времени. Однако запаздывание вступления в действие сервомотора синхронизатора на 0,5 сек следует иметь в виду при расшифровке осциллограмм.

Характеристика работы сервомотора испытуемого агрегата, снятая описанным выше образом, показана на рис. 7. Как видно из кривых рисунка, скорость работы сервомотора на убавление паровой мощности в сильной степени зависит от первоначальной нагрузки турбины: чем она больше, тем меньше скорость убавления пара. С этим обстоятельством необходимо считаться при определении длительности импульса на сервомотор синхронизатора для снижения пара.

Во время проведения испытуемый агрегат работал вначале по схеме и в режиме, показанном на рис. 8. Бустерный выключатель при этом был включен. По связи 110—220 kV протекала активная мощность 8 MW от испытуемого генератора в 220-kV линию передачи и к испытуемому гене-

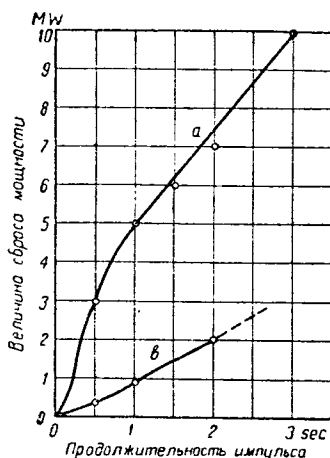


Рис. 7. Характеристика работы сервомотора синхронизатора на убавление паровой мощности при первоначальных нагрузках агрегата 30 и 40 MW (а)

ратору от второго генератора реактивная мощность — 12 MVA. В схеме автоматического управления сервомотором рубильник 1 был замкнут. Контакт 2 разомкнут. На реле времени была установлена выдержка времени 5 сек.

Регулятор напряжения был выключен.

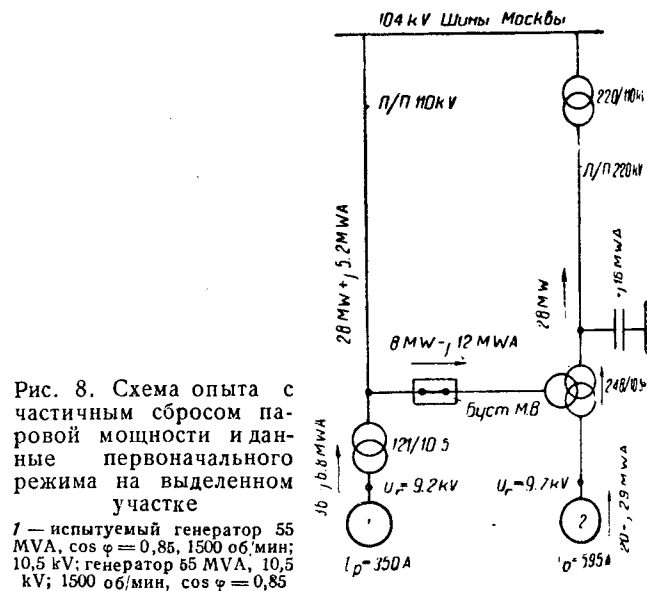
По расчетам и по прибору угол, соответствующий указанному на схеме режиму, был равен  $75 \div 78^\circ$ .

Запас мощности, которым обладал агрегат при этом угле, был меньше 2,3 MW. Выключение связи 110—220 kV с помощью бустерного выключателя неминуемо должно было привести к нарушению статической устойчивости испытуемого генератора, если бы не было предусмотрено автоматическое управляемое частичное сбросе мощности.

После того как режим был установлен, проведена была подготовка к выключению связи с помощью *БМВ*; предварительно были нушены: ход осциллографы, регистрировавшие все величины, характеризующие режим агрегата. Затем было произведено выключение. Спустя 15 сек после выключения *БМВ* осциллографы были выключены. Агрегат остался в синхронной работе.

Активная мощность снизилась с 35,4 до 22 MW — на 13,4 MW (рис. 9).

Выключение связи, сопровождавшееся спустя 0,5 сек, работой сервомотора на убавление пара



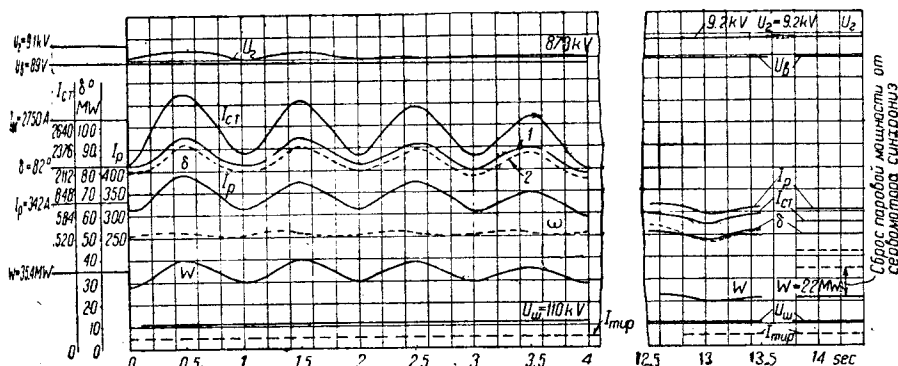


Рис. 9. Результаты расшифровки осциллограммы. Выключение связи и частичный сброс паровой мощности от сервомотора синхронизатора

вызвало лишь незначительные по амплитуде качания, затухшие спустя 15—20 сек от момента выключения.

Опыты по искусственной устойчивости с электронным регулятором, проведенные на машине 50 MW Сталгрэс, подтвердили возможность спокойной работы (без качания) в области искусственной устойчивости при углах порядка 110—120°, при регулировании по клеммовому напряжению генератора при небольшой величине (порядка 3—6%) статизма электронного регулятора. Таким образом результаты опытов, проведенные как на малой, так и на большой машине, значительно превзошли предсказывавшиеся теоретическим исследованием искусственной устойчивости.

Электронный регулятор весьма эффективно стабилизирует работу машины и в условиях динамического роста нагрузки (скачками в 20—30% от первоначальной мощности машины) на машине, работающей до скачка мощности, вблизи идеального статического предела мощности при

времени напряженным состоянием статической устойчивости (работа на углах порядка 50—65°), дает кардинальное решение статической устойчивости. Электронный регулятор в дальних передачах (например Куйбышев — Москва) позволит заметно улучшить статическую устойчивость этих передач.

Частичный сброс пара следует признать также достаточно эффективной мерой обеспечения статической устойчивости для случаев выключения одной из цепей в двухцепных передачах. Однако вопрос этот нуждается в дальнейшей экспериментальной разработке.

Кроме автора, в работе принимали участие сотрудники лаборатории электрических систем и автоматики ВЭИ А. Васильев, Г. Р. Герценберг, Д. А. Городский, П. В. Чебышев. Работа велась под руководством и при непосредственном участии проф. С. А. Лебедева.

В постановке и проведении опытов на Сталиногорской грэс большую помощь и поддержку оказали Мосэнерго и его работники.

## Электронно-ионный регулятор напряжения для машин переменного тока

Г. Р. Герценберг  
ВЭИ

ПОМИМО РЯДА известных преимуществ, электронный регулятор напряжения обладает еще одним ценным свойством. Как показали теоретические исследования Лаборатории электрических систем и автоматики ВЭИ [1], генератор переменного тока может устойчиво работать в зоне искусственной устойчивости при условии, если он снабжен регулятором напряжения, имеющим зону нечувствительности, равную нулю. Электронный регулятор напряжения как раз и обладает этим свойством.

В связи с работами по искусственной устойчивости в лаборатории был построен экспериментальный образец электронно-ионного регулятора напряжения, который испытывался в лаборатории, а затем на генераторе 50 MW, на Сталиногорской грэс. Опытные данные полностью подтвердили теоретические исследования по искусственной устойчивости. Генератор при наличии элект-

ронного регулятора устойчиво работал при углах 115—120°.

Ниже дается описание опытного образца электронно-ионного регулятора напряжения, разработанного в лаборатории и испытанного на Сталиногорской грэс.

Электронный регулятор состоит из четырех основных элементов: 1) измерительный; 2) усиленный; 3) силовая часть и 4) противоколебательный элемент.

**Измерительный элемент.** Назначение измерительного элемента — создать на выходе напряжение, пропорциональное отклонению регулируемого напряжения от заданного. Из существующих двух основных методов измерения, применяемых в технике регулирования, — компенсационного и параметрического, — был выбран второй.

При использовании для измерительного элемента параметрического принципа, измеряемое

напряжение после выпрямления подается на клеммы моста (рис. 1), составленного из линейных и нелинейных сопротивлений. Мост оказывается сбалансированным, т. е. напряжение на клеммах  $ab$  равно нулю, только при вполне определенном напряжении на входе его.

Анализ показывает [2], что при использовании для нелинейного моста ламп накаливания, тайрита и т. д., чувствительность его по напряжению<sup>1</sup> будет всегда меньше единицы, даже при наиболее выгодных комбинациях подобных сопротивлений<sup>2</sup>.

Чувствительность больше единицы можно достичь, применяя сопротивления, имеющие характеристику дуги.

При выборе измерительного элемента рассматривались два варианта. Первый, обеспечивающий простоту схемы, и второй, дающий максимальную чувствительность.

В первом варианте использовался мост из угольных ( $F$ ) и вольфрамовых ( $E$ ) ламп (рис. 2).

Благодаря тепловой инерции ламп мост этот может работать на переменном токе. Лампы в этой схеме находятся под половинным напряжением, благодаря чему срок службы их значительно удлиняется и обеспечивается стабильность работы. Напряжение на выходе моста можно повысить при помощи трансформатора. Схема эта к тому же не зависит от частоты.

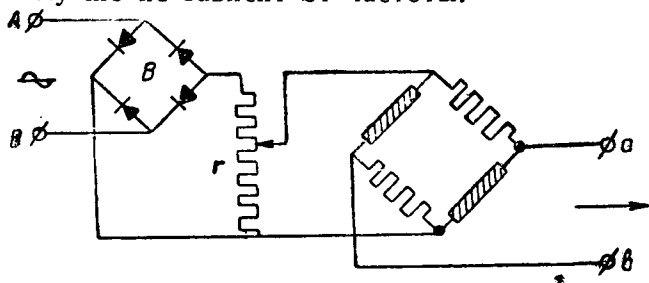


Рис. 1

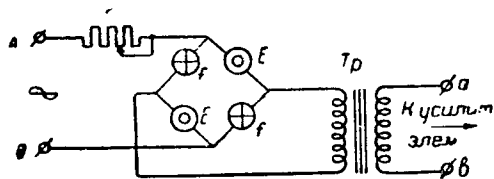


Рис. 2

Недостаток такого моста — его инерционность.

При синусоидальном напряжении на мосте и отсутствии потребления в диагонали напряжение на ней будет (рис. 2):

$$u_d = \frac{u_m}{R_A + R'_A} (R_A - R'_A) \sin \omega t. \quad (1)$$

Сопротивление вольфрамовой лампы

$$R_A = R_0 - \Delta R \cos (2\omega t - \varphi), \quad (2)$$

сопротивление угольной лампы [3]

$$R'_A = R'_0 - \Delta R' \cos (2\omega t - \varphi_1). \quad (3)$$

<sup>1</sup> Чувствительностью нелинейного моста по напряжению называется отношение изменения напряжения на выходе моста к изменению напряжения на входе его при небольших отклонениях напряжения от напряжения, соответствующего балансу моста.

<sup>2</sup> Исключением является феррорезонансный контур, с помощью которого можно достичь чувствительности больше единицы.

Подставим (2) и (3) в формулу (1) и пренебрежем в знаменателе суммой  $\{\Delta R \cos (2\omega t - \varphi) + \Delta R' \cos (2\omega t - \varphi_1)\}$  по сравнению с  $(R_0 + R'_0)$ . Кроме того, положим  $\varphi \approx \varphi_1 \approx 90^\circ$ , что имеет место в действительности. Тогда получим:

$$u_d = \frac{u_m}{R_0 + R'_0} \left\{ (R_0 - R'_0) \sin \omega t + \frac{1}{2} (\Delta R - \Delta R') [\cos \omega t - \cos 3\omega t] \right\}. \quad (4)$$

Первый член правой части формулы (4) представляет полезное напряжение. Второй член обусловлен несовершенством моста. Благодаря конечному значению тепловой инерции ламп в диа-

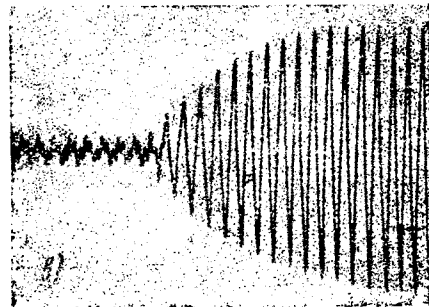


Рис. 3

гонали моста практически ни при каких значениях приложенного напряжения нельзя получить напряжение, равно нулю. Напряжение в диагонали, даже при равенстве средних значений сопротивлений плеч, всегда имеет составляющую, состоящую из суммы напряжений первой и третьей гармоник, сдвинутых на  $90^\circ$  относительно приложенного напряжения. Амплитуда этих гармоник постоянна и практически не зависит от разбаланса.

Величина этой составляющей зависит от мощности ламп и температуры нити. В рассматриваемой схеме были применены две вольфрамовые лампы по 40 W и две угольные по 32 свечи.

Эффективное значение напряжения  $U_d$  при  $R_0 = R'_0$  в этом случае было равно 0,1 V.

Запаздывание, вызываемое инерцией нити, зависит от мощности ламп. На рис. 3 приведена осциллограмма изменения напряжения в диагонали моста при мгновенном изменении напряжения на мосте на 6% относительно напряжения баланса. Запаздывание схемы достигает 0,3–0,4 sec.

Чувствительность моста зависит от напряжения, при котором балансируется мост, мощности ламп и т. д. Для моста рис. 2 при примененных в нем лампах и напряжении баланса 90 V чувствительность составляла 0,33.

Напряжение диагонали повышалось при помощи трансформатора с коэффициентом трансформации 1:10. Следовательно, при изменении регулируемого напряжения на 1 V<sub>эф</sub> (напряжение баланса 100 V<sub>эф</sub>) на выходе измерительного элемента возникало напряжение около 3 V<sub>эф</sub>.

Сопротивление  $r$  служит для установки регулируемого напряжения. Потребление схемы — 35 VA.

<sup>3</sup>  $\Delta R$  не превосходит практически 0,005  $R_0$ .

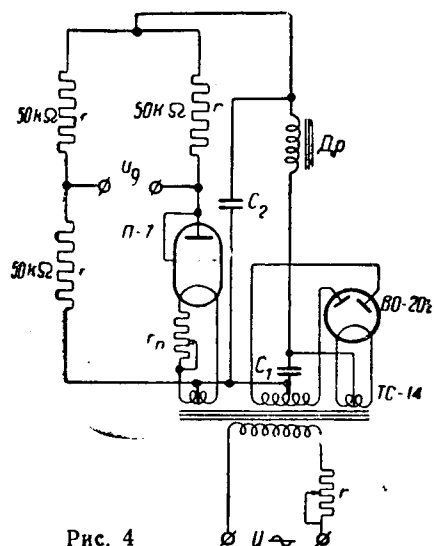


Рис. 4

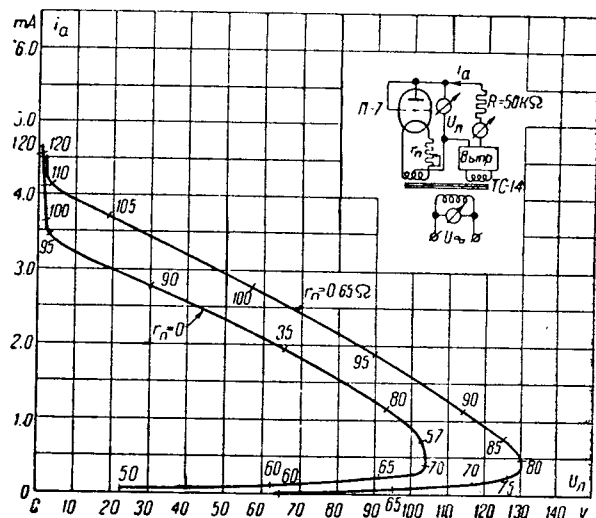


Рис. 5

Рассмотрим второй вариант измерительного элемента.

Как уже указывалось, чувствительность моста больше единицы можно получить при нелинейном элементе с характеристикой, аналогичной характеристике дуги. Таким свойством обладает диод, работающий в режиме насыщения и включенный согласно схеме рис. 4.

В качестве диода применена лампа П-7 с вольфрамовым катодом, обладающая устойчивой эмиссией. Сетка соединена непосредственно с анодом. На рис. 5 дана вольтамперная характеристика диода, работающего по этой схеме. Одновременно с изменением напряжения сети изменяется напряжение на аноде. При этом благодаря жесткой связи между напряжениями сети и накала лампы также и напряжение накала. Как видно на рис. 5, характеристика имеет значительный падающий участок (напряжения сети, при которых производились измерения, отмечены на вольтамперной характеристике).

На рис. 4 дана также полная схема измерительного элемента<sup>4</sup>. Напряжение сети выпрямляется электронным выпрямителем и подается на мостик, в одном плече которого находится лампа П-7. Реостат  $r$  служит для установки регулируемого напряжения. Возможно также использовать для этой цели реостат в цепи накала диода.

На рис. 6 дана зависимость напряжения на диагонали моста от напряжения сети для двух значений сопротивления в цепи накала лампы. Чувствительность схемы оказалась приблизительно равной 5,5.

Для нормальной работы схемы необходимо, чтобы рабочей частью характеристики рис. 6 была верхняя ее часть. Регулятор с измерительным элементом по второму варианту регулирует напряжение по эффективному значению. Потребление схемы весьма незначительно — 7,5 ВА.

Характеризуя этот вариант измерительного элемента, необходимо отметить следующие его недостатки и достоинства.

Эксплуатационная надежность схемы благодаря применению двух электронных ламп меньше, чем в первом варианте, однако схема обладает боль-

шей чувствительностью (около 5,5); на выходе измерительного элемента получается постоянное напряжение, что ведет в целом к более спокойной работе регулятора. Работа регулятора не зависит от фазы измеряемого напряжения относительно питающего напряжения, что имеет в некоторых случаях существенное значение. Наконец, схема имеет меньшее запаздывание.

Для построенного и опробованного регулятора был принят второй вариант измерительного элемента, так как при этом варианте, как указано выше, характеристики регулятора не зависят от фазы питающего напряжения, что существенно при использовании регулятора для поддержания искусственной устойчивости. Однако в случае, если этот фактор не имеет значения и от регулятора не требуется большой точности, — может быть использован первый вариант как более простой и надежный.

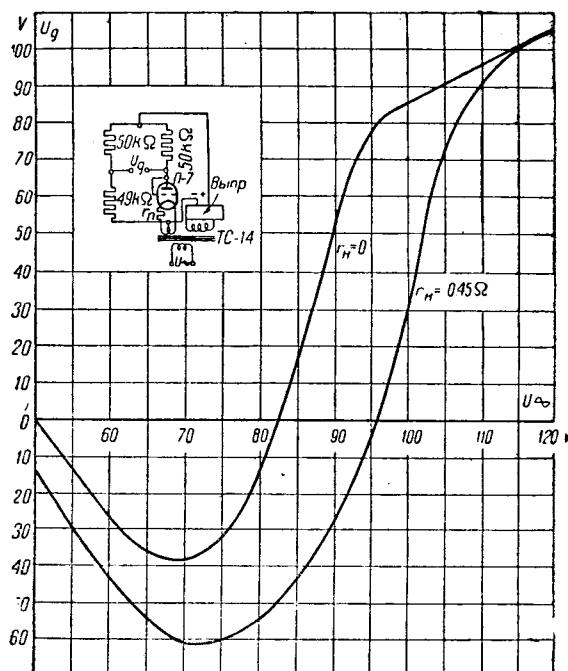


Рис. 6

<sup>4</sup>Предложена А. И. Васильевым.



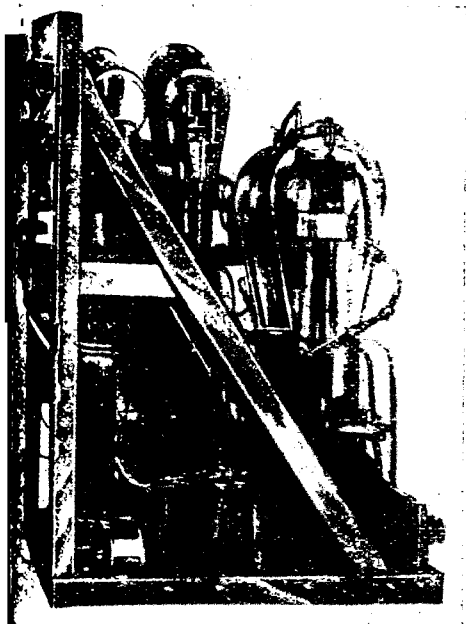


Рис. 9

с обоими описанными выше измерительными элементами. При элементе из ламп накаливания питание силовой части должно происходить от трехфазного напряжения. Испытания показали, что как в отношении точности регулирования, так и по устойчивости схема, использующая насыщенный диод, является более совершенной. Так например, точность регулирования при использовании диода получилась порядка  $\pm (0,3 - 0,4\%)$ , в то время как при элементе из ламп точность регулирования не превосходила  $\pm 0,6\%$ .

На рис. 10 и 11 приведены осциллограммы включения и выключения нагрузки на генератор. Силовая часть питалась от самого генератора. В таблице приведены данные опыта до и после включения нагрузки.

Таблица

	Напряжение генератора, V	Ток генератора, A	$\cos \varphi$	Ток возбуждения, A	Напряжение возбуждения, V	Ток возбуждения, A	Время регулирования, sec
до нагрузки *	110,5	0	—	0,65	42	0,11	Включения 0,6
после нагрузки	109,9	23,5	0,85	1,48	97	0,55	Выключения 0,8÷0,9

\* Фактически генератор был нагружен на трансформатор, питающий регулятор напряжения.

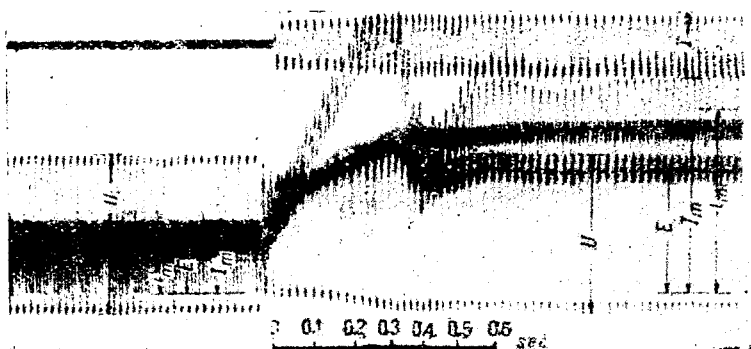


Рис. 10

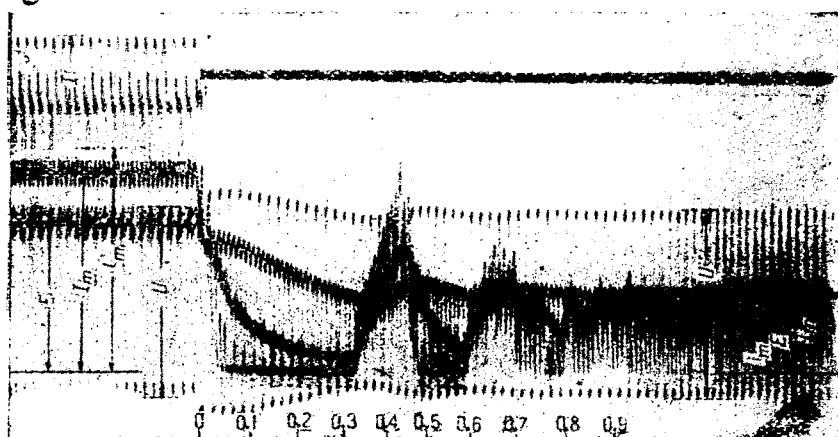


Рис. 11

Регулятор работал без качаний. Наилучшие результаты для данного генератора в отношении быстроты установления напряжения были получены при емкости  $C_3 = 2,5 \mu F$  и сопротивлении  $r_2 = 150\,000 \Omega$ .

С этим же регулятором были произведены опыты по искусственной устойчивости на генераторе 50 MW Сталиногорской грэс [4].

В настоящее время разрабатывается промышленный образец электронного регулятора, предназначенного для установки на Сталиногорской грэс. Он будет снабжен защитой, которая при выходе регулятора из строя обеспечит нормальный режим генератора<sup>5</sup>.

#### Литература

1. Лебедев С. А., Теоретическое исследование искусственной устойчивости. "Электричество" № 4, 1938.
2. Гольдфарб Л. С., Электронно-ионный регулятор для машин постоянного тока. "Электричество" № 16, 1937.
3. Голдовский Е. М., Шум ламп в звуковом кино. Гизлегпром, изд. 1934 г., стр. 95.
4. Сазанов П. И., Экспериментальное исследование статической и искусственной устойчивости. "Электричество" № 4, 1938.

<sup>5</sup> Публикуемая работа была проведена автором под руководством ст. научного сотрудника Л. С. Гольдфарба.



# АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВЕ

## Автоматизация управления уличным освещением

Л. П. Лигонин  
Киев

**В** НАСТОЯЩЕЕ время назрела необходимость устройства в городских и промышленных центрах СССР централизованного управления уличным освещением.

Современная техника располагает шестью способами централизованного управления уличным освещением в городских электросетях, а именно: при помощи токов высокой частоты, фотоэлементов, часов-автоматов, контакторов для дистанционного управления, самостоятельной высоковольтной сети и специальных трансформаторных киосков, оборудованных исключительно для питания уличного освещения, телефонных коммутаторов и специальной сети к ним.

Управление уличным освещением при помощи контакторов является способом, наиболее приемлемым для большинства наших небольших и средних городов. Он легко может быть реализован и, кроме голых проводов или же подземного низковольтного кабеля (в зависимости от принятой системы распределения энергии в низковольтной сети — воздушная или кабельная) и автоматов-контакторов для дистанционного управления, ничего не потребует. Наружная сеть уличного освещения не изменяется. В трансформаторных киосках устанавливаются лишь автоматы-контакторы, связанные друг с другом по схеме «цепочка» при помощи голых проводов, прокладываемых по столбам существующей низковольтной сети или же подземными кабелями.

Система включения контакторов принята замкнутой цепочкой, причем шлейф замыкается на центральном городском пункте управления освещением, питая при нормальных условиях работы сеть контакторов управления и контрольную лампу на щите. Помимо этого, в целях придания большей надежности и гибкости системе управления она разбивается на несколько совершенно самостоятельных и независимых друг от друга секторов.

Контакторы управления в каждом секторе включаются в свой шлейф. Для небольших и средних городов, при числе пунктов управления порядка 20—25 шт., число контакторов на одном шлейфе не должно превышать в целях удобства эксплуатации 5—7.

Крупные городские центры разбиваются на несколько независимых районов управления, идентичных районированию городской электросети, связанных с центральным диспетчерским пунктом энергоснабжающей системы города при помощи телефонов и спецсигнализации. Оборудование

района большого города аналогично оборудованию небольших городов. В случае какой-либо неисправности или аварии в фонарной сети управления лишается наружного освещения не весь город, а лишь поврежденный сектор.

При централизации управления уличным освещением города и сосредоточении его в одном пункте все наружное освещение может быть легко выключено одним лишь главным рубильником, питающим все шлейфы цепи управления контакторами.

В качестве автоматов для дистанционного управления уличным освещением города могут быть применены магнитные контакторы переменного тока, нормально открытые с магнитным влиянием поля — типа КТ, изготавливаемые Харьковским электромеханическим заводом. Такие контакторы для своей работы не требуют постоянного тока, довольно портативны, устойчивы к перегрузкам и расходуют мало энергии при включенном положении. Параметры контактора должны быть выбраны, исходя из нагрузки (в амперах), приходящейся на отдельные киоски.

Так как нагрузка уличного освещения на контактор задается на все 3 фазы (выводы из киосков для питания фонарной сети обычно выполняются трехфазными), то ток, приходящийся на полюс контактора, может быть определен по обычной формуле, но с учетом возможной несимметрии загрузки отдельных фаз фонарями, а также возможных отклонений по мощности на практике против проектных. Это обстоятельство учитывается при определении расчетного тока контактора путем введения коэффициента 1,3.

Принципиальная схема включения контакторов показана на рис. 1. Управление централизованным освещением сосредоточивается в одном пункте, расположенном в центре городской электросети. В пункте управления устанавливается щит, смонтированными на нем: вольтметром, по возможности часами-автоматом, рубильниками однополюсными по количеству шлейфов и двухполюсным — главным. Помимо этого, на щите монтируется комплект сигнальных ламп, сигнализирующих правильность работы шлейфа.

Поясним работу схемы управления контакторами (рис. 1). При включении главного переключателя двухполюсного рубильника<sup>1</sup> часы-автомат и шины щита управления находятся под напряжением.

<sup>1</sup> В целях придания большей надежности работе пункта управления питание его осуществляется из двух киосков

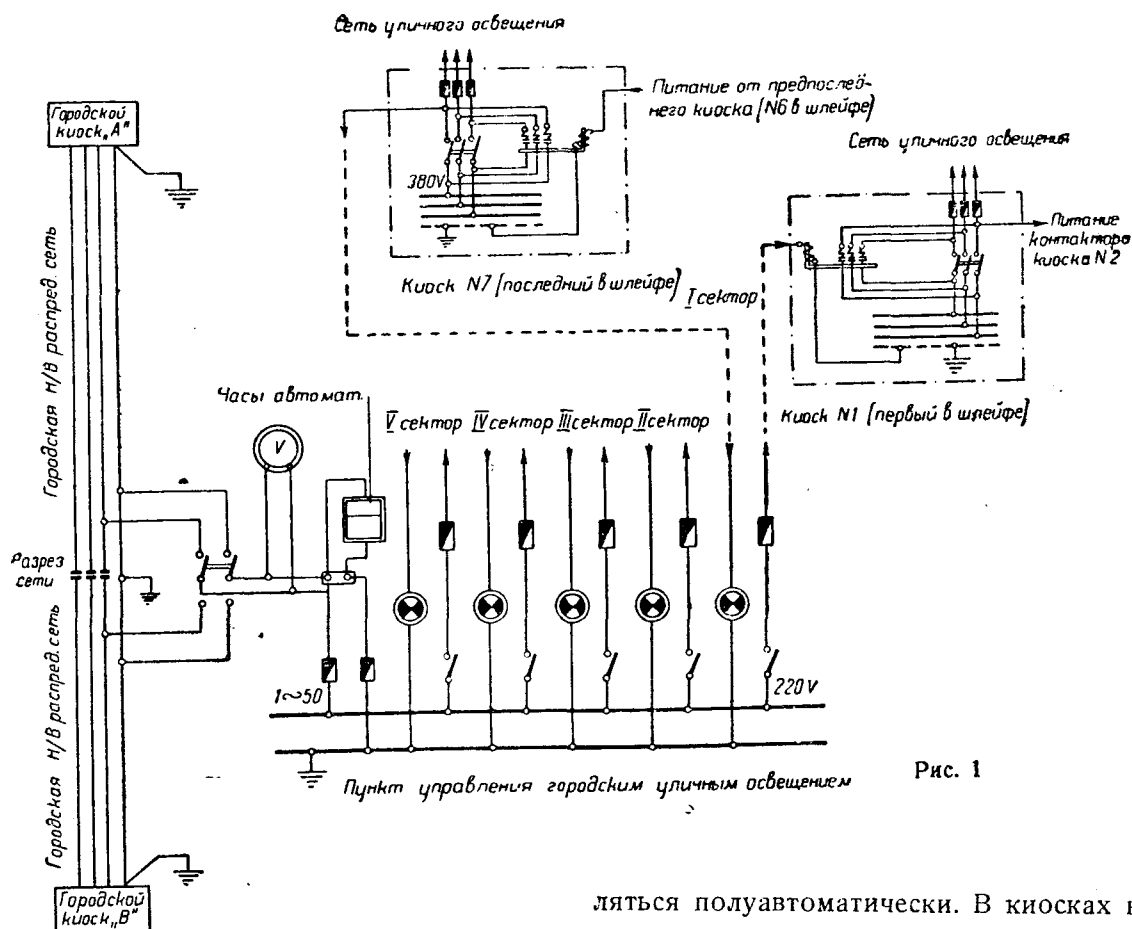


Рис. 1

и, вольтметр дает показания. Нормально главный рубильник всегда включен. Для зажигания уличного освещения достаточно включить лишь соответствующие рубильники, либо должны сработать часы-автомат. Тогда по проводам, соединяющим щит управления с ближайшими к нему киосками, потечет ток и оживит включающие катушки контакторов и, таким образом, включит уличное освещение, а также даст питание контакторам соседних киосков и т. д. Обратные провода при этой схеме отсутствуют — их заменяют главные точки силовых трансформаторов, установленных в киосках. Обычно в городских распределительных низковольтных сетях все нулевые провода между собою электрически связаны в одну точку и надежно заземлены (380/220 В), поэтому нет смысла прокладывать специальные обратные провода. Последний контактор, установленный в шлейфе, зажигая уличное освещение, одновременно зажжет и контрольную лампу на щите управления и тем самым покажет, что цепь управления сработала правильно. При неисправности контактора линейный персонал при обходе киосков может легко от руки включить в кассе шунтирующий рубильник уличного освещения и тем самым пошлет ток дальше по цепи контактора; следовательно, управление временно, лишь до устранения дефектов, будет осуществ-

ляться полуавтоматически. В киосках контакторы устанавливаются на изоляционных плитках и должны быть подключены параллельно к существующим рубильникам уличного освещения.

Параллельное подключение всех контакторов к шлейфу в данном случае не подходит, так как шлейф может иметь длину в несколько километров, благодаря чему потребуется увеличить сечение соединяющих проводов цепи управления. С другой стороны, параллельное подключение контакторов не позволит наблюдать за правильностью работы схемы по контрольным лампам. Возможно было бы в качестве соединяющего провода между контакторами частично использовать один из фазных проводов сети уличного освещения, однако, принимая во внимание необходимость обеспечения надежности работы цепи управления, этого не следует делать, так как нежелательно связывать цепь управления с общештатной сетью, где возможны частые мелкие сетевые неполадки.

Дежурный персонал в случае необходимости выключает у себя на щите управления один лишь главный рубильник и тем самым мгновенно лишает напряжения все контакторы (время действия их измеряется долями секунды) и наружное освещение города гаснет.

При нормальной работе контакторов шунтирующие рубильники в киосках, как правило, должны быть всегда выключены.

Расчет электрической схемы сети управления уличным освещением при помощи контакторов необходимо производить, исходя из допустимых величин потери напряжения. Контактры типа КТ нормально включают при напряжении у зажимов не ниже 85% номинального, а удерживаются во включенном состоянии при напряжении 50—60% номинального. Таким образом можно допустить максимально потерю напряжения в сети управления контакторами до 15%. Однако, осторожности ради, мы в своих расчетах принимаем величину потери напряжения не выше 10%, помня, что контакторы будут включаться в часы вечернего максимума, когда напряжение в сети вообще может быть несколько понижено (на 5%).

В случае применения, например, контактора типа<sup>2</sup> КТ-32 ток включения катушки может быть принят с известной точностью равным 15А при  $\cos \varphi = 0,3$ ; столь низкий коэффициент мощности объясняется большим реактивным сопротивлением катушки включения контактора.

Подсчет потери напряжения в проводах на 1 км производится по обычной формуле с учетом реактивного сопротивления сети ввиду наличия низкого коэффициента мощности ( $\cos \varphi = 0,3$ ), а также с введением коэффициента, учитывающего возможность смещения нулевой точки силового

трансформатора вследствие несимметрии нагрузки.

Предельные расстояния между киосками, решаящие не применять промежуточных при напряжении 220 В (при  $P_{\%} = 10\%$ ), следующие (см. таблицу).

№ п/п	Марка и сечение провода	Предельное расстояние км	Примечание
1	Ж6	0,10	Железные провода диаметром 4 и 5 мм не применяются
2	Ж35	0,45	
3	Ж50	0,80	
4	М6	1,00	
5	М10	1,70	
6	М16	2,20	Цифры предельных расстояний округлены
7	А16	1,35	
8	А25	2,10	
9	А35	2,50	

Опасаться ненадежной работы контакторов эксплуатации не приходится, так как вся электроавтоматика металлургии, угольной промышленности и т. д. в основном зиждется на контакторах и разного рода реле, работающих без казны в более тяжелых условиях, нежели управление уличным освещением, где число включений и выключений весьма ограничено. Описанная выше схема может быть также применена и к управлению наружным освещением промышленных предприятий.

<sup>2</sup> Рабочие контакты его рассчитаны на пропуск тока до 75 А, что при напряжении 380/220 В даст пропускную мощность на 3 фазы около 50 кВт.

## Прибор для дистанционного наблюдения за коммутацией

Б. А. Талалай

Центральный аэрогидродинамический институт

НАИБОЛЕЕ капризным звеном коллекторных машин является контакт коллектор-щеткой. Весьма часто тяжелые условия коммутации требуют постоянного наблюдения за работой коллектора, однако в целом ряде случаев доступ к машине затруднен.

Проф. Г. Х. Сабинин предложил контролировать коммутацию при помощи радиоволн, излучаемых якорем.

На базе этого принципа автор разработал прибор для дистанционного наблюдения за коммутацией.

Принцип действия прибора заключается в следующем.

Электрическая искра на коллекторе вызывает излучение электромагнитных волн. Воспринимая эти волны на радиоприемник, мы на выходе радиоприемника будем получать сигналы, индикатором которых может служить электроизмерительный прибор, присоединенный к выходу.

Для разработки прибора предварительно необходимо было определить диапазон радиоволн, излучаемых при коммутации электромотора, установить максимум интенсивности излучения сигналов. Для этого было проведено специальное исследование<sup>1</sup>.

Испытание велось с электромотором постоянного тока мощностью 650 л. с., 410 об/мин, 20 производства завода «Динамо».

Периодическое возмущение излучаемых при коммутации электромотора радиоволн принималось на волнах 300, 600, 1000, 3000, 5000, 10 000 м приемником 4ПД-С и на волнах 185, 39,2 и 28,1 м приемником КУБ-4. Антенна длиной около 5 м подвешивалась над мотором на высоте приблизительно 20 см от верхней точки станка мотора. Приемники питались от анодных батарей и аккумуляторов (накал). Мощность на выходе

<sup>1</sup> Исследование проводилось ст. техником Булычевым руководством ст. инж. Какурина.

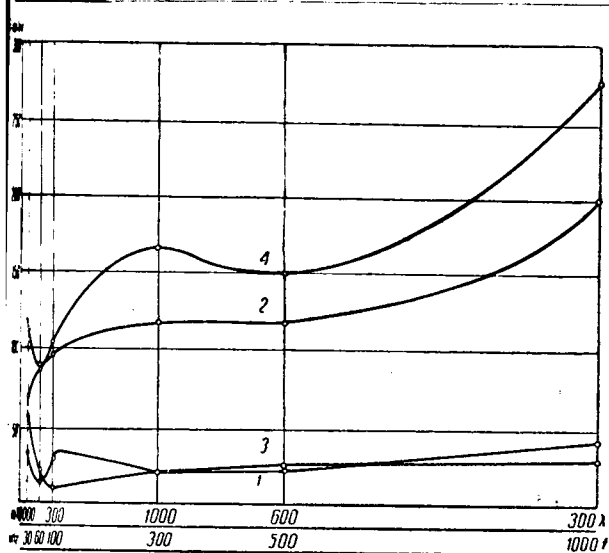


Рис. 1. График сигналов, принимаемых приемником 4ПД-С, № 606

1—отсутствие искрения (щетки не смещены), нагрузка 900 А, 270 об/мин.  
2—щетки не смещены, нагрузка 1200 А, 315 об/мин, 2—щетки смещены  
искрение, нагрузка 900 А, 270 об/мин, 4—щетки смещены, нагрузка 1200 А,  
315 об/мин

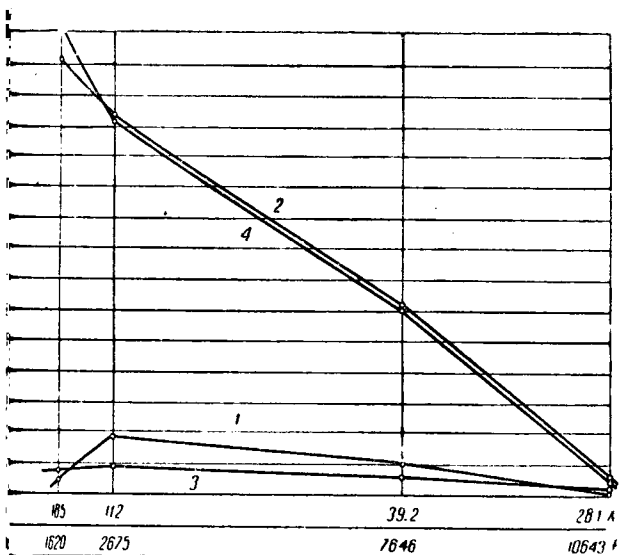


Рис. 2. График сигналов, принимаемых приемником КУБ-4, № 1222

1—отсутствие искрения (щетки не смещены), нагрузка 900 А, 270 об/мин.  
2—щетки не смещены, нагрузка 1200 А, 315 об/мин, 2—щетки смещены  
искрение, нагрузка 900 А, 270 об/мин, 4—щетки смещены, нагрузка 1200 А,  
315 об/мин

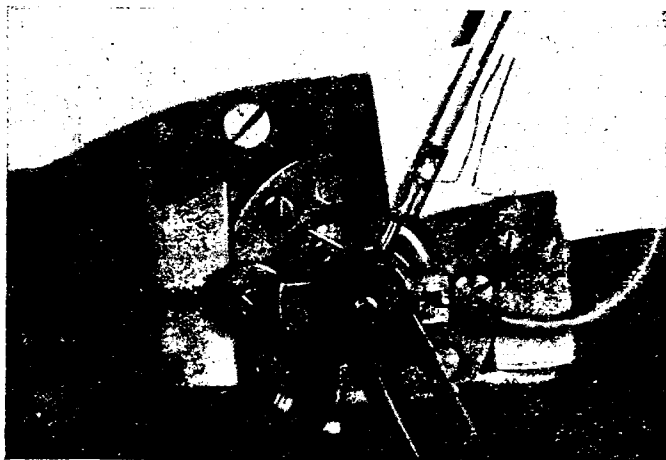


Рис. 3

измерялась специальным измерителем мощности типа 583-А, № 221 производства GR, параллельно которому для контроля были включены телефонные трубки ( $R = 4000 \Omega$ ,  $Z = 15\,500 \Omega$ ).

При работе с приемником КУБ-4 для исключения постоянной слагающей анодного тока на выход был включен трансформатор низкой частоты типа 541-8 производства GR.

Для снижения уровня помех окружающих промышленных установок корпус испытуемого мотора соединялся с антенной приемника. При всех измерениях обратная связь приемников бралась соответствующей максимуму показаний измерителя мощности на выходе. Мощность отсчитывалась в милливаттах.

Искрение на коллекторе мотора создавалось смещением щеточной звезды мотора. Измерения

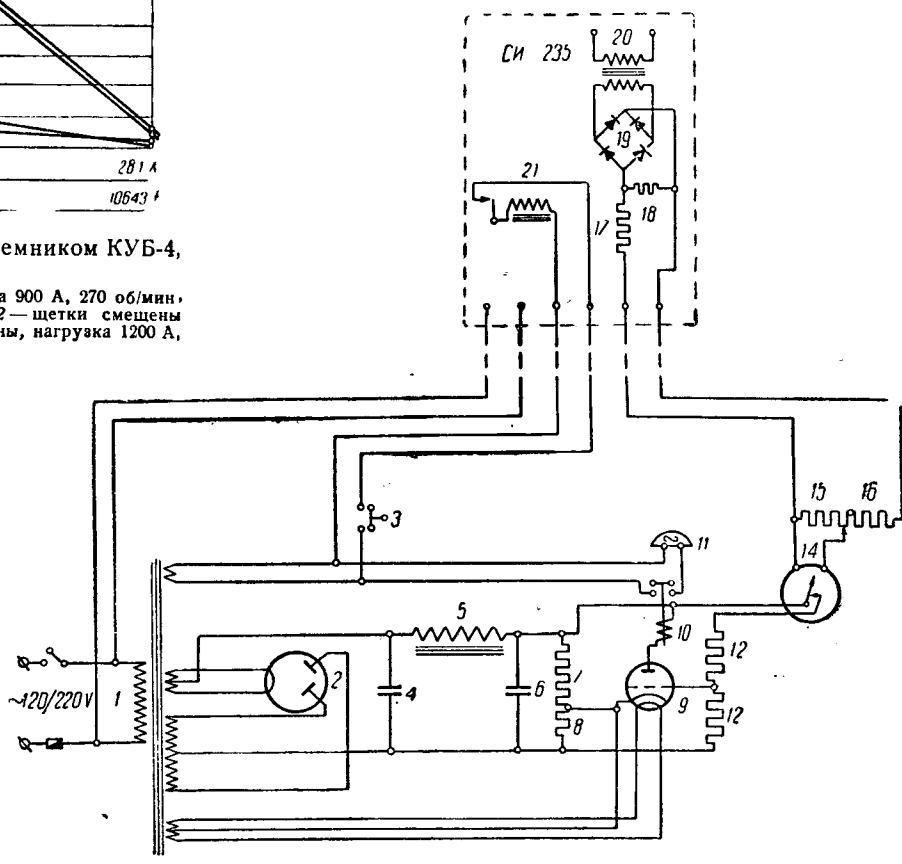


Рис. 4

1—трансформатор, 2—кенотрон ВУ-116, 3—кнопка, 4—конденсаторы 1,5 и 2,5  $\mu F$ , 5—дроссель фильтра, 6—4 и 18—сопротивления Каминского 150 000  $\Omega$ , 7—200, 5000  $\Omega$  и 1,5 М $\Omega$  соответственно, 9—лампа, 10—реле, 11—электрический звонок, 12—амперметр с контактным устройством, 13—сопротивление переменное (проволочное) 2000  $\Omega$ , 14—сопротивление постоянное (проволочное) 2000  $\Omega$ , 15—выпрямитель, 16—трансформатор выходной  $1/3$ , 17—зуммер

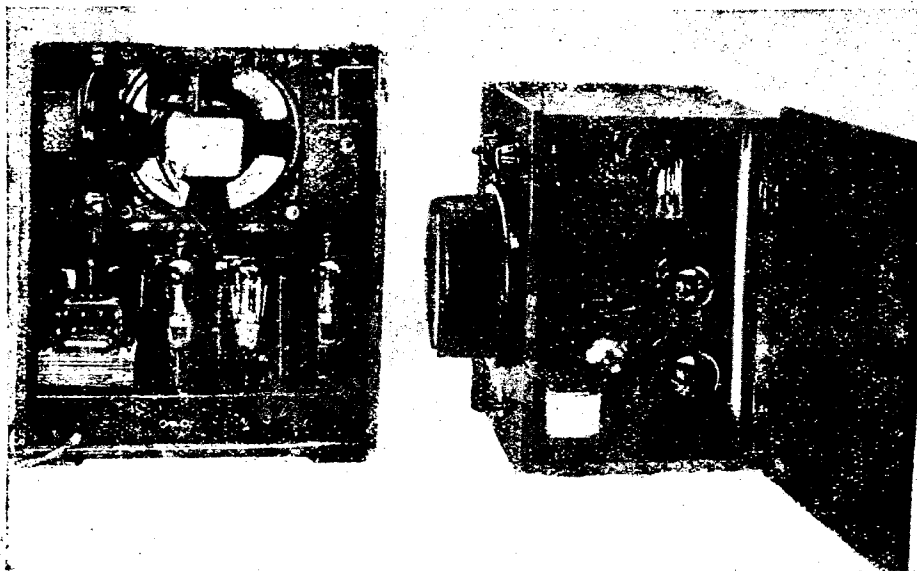


Рис. 5

производились при половинной (900 А) и полной нагрузке мотора (1200 А).

Результаты испытания приведены на рис. 1 и 2.

Из рисунков видно, что мощность принятых приемником излучений в значительной мере зависит от качества коммутации. При небольшом искрении мощность приема увеличивается от 6 до 14 раз по сравнению с нормальной коммутацией, и максимальная интенсивность излучений при искрении лежит в пределах <sup>2</sup> 150—300 м.

Из приведенных выше исследований следует, что для приема излучений, имеющих место при искрении коллекторных машин, вполне пригоден стандартный радиоприемник, построенный на широкоспешательный диапазон.

При проектировании прибора для дистанционного наблюдения за коммутацией были поставлены следующие основные технические требования:

- 1) наблюдательный пункт может быть удален от контролируемой машины на расстояние от нескольких десятков до нескольких сот метров;
- 2) при появлении искрения, кроме показаний визуального прибора, должен даваться фонический сигнал (сирена, звонок);
- 3) прибор должен быть снабжен устройством, позволяющим в любой момент проверить исправность его;
- 4) он должен допускать регулировку чувствительности в широких пределах;
- 5) питание прибора должно осу-

<sup>2</sup> Примерно те же результаты в отношении диапазона длин излучаемых радиоволн были получены при опытах с моторчиком постоянного тока мощностью 0,25 кВт.

ществлять от сети переменного тока 120/220 В.

Чтобы по возможности исключить влияние соединительных проводов длиной до нескольких сот метров на показания прибора, желательно было осуществить выпрямление (купроксным выпрямителем) тока на выходе радиоприемника.

Стандартные приемники (СИ-235, ЭЧС-3 и т. д.) дают на выходе мощность порядка 0,5—1 Вт. Опыты показали, что этой мощности недостаточно для уверенного срабатывания реле, способного надежно размыкать цепь сигнальной электрической сирены. Поэтому решено было добавить промежуточное электронное реле, включаемое контактами, укрепленными на стрелке визуального прибора (рис. 3).

Для возможности проверки в любой момент исправности прибора в радиоприемнике был смонтирован специальный зуммер. При включении зуммера (нажимом кнопки) из наблюдательного пункта радиоволны, излучаемые им, воздействовали на приемник и вызывали срабатывание прибора в случае его исправности и сигнал на наблюдательном пункте.

В соответствии с техническими условиями питание прибора было осуществлено от сети переменного тока.

Электронное реле питалось от специального кенотронного выпрямителя.

Полная принципиальная схема прибора приведена на рис. 4.

На рис. 5 дана фотография прибора в раскрытом виде.

Из рис. 5 видно, что прибор смонтирован в двух ящиках; один ящик, левый (радиоприемник), помещается около машины, другой (контрольно-измерительный пульт) находится в месте наблюдения.

Испытание построенного прибора в условиях практической эксплуатации показало хорошую работу его. Практика работы с прибором показала, что целесообразно применять весьма малые антенны (0,5—1,5 м), помещаемые возможно ближе к машине, с одновременным уменьшением путем регулировки, усиления приемника. Это позволяет свести практически к нулю влияние посторонних промышленных помех.

# ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВЕ

## Автоматическое защитное выключение в электрических ручных инструментах

С. В. Соколов

Электротехническая лаборатория Ленинградского  
института охраны труда

РАЗРАБОТАННОЕ нами реле для автоматического защитного выключения при замыкании на корпус<sup>1</sup>, применяемое в установках низкого напряжения вместо защитного заземления, обладает очень ценной с защитной и эксплуатационной точки зрения зависимостью времени действия реле  $T_p$  от величины сопротивления  $R_{HE}$  вспомогательного заземления. Из рис. 1 видно, что время  $T_p$  очень незначительно возрастает, если сопротивление  $R_{HE}$  станет равным даже нескольким тысячам ом. Практически же такие высокие значения сопротивления для вспомогательного заземления мало вероятны. Эта особенность позволяет использовать реле без существенного увеличения времени действия его по предлагаемой нами групповой схеме защиты (рис. 2) при замыкании на корпус в электроинструментах, так как часто оборудование такого рода приемников индивидуальным реле технически неудобно.

На рис. 2 представлена предлагаемая схема защиты автоматическим выключением в группе электрических дрелей трехфазного тока. Провода 8 в питающих дрели кабелях 5, предназначенные для заземления корпусов дрелей 4 и корпусов штепсельных соединений 7 (заземляющие провода), в этой схеме присоединяются к реле. Соединение может быть или непосредственное или же через специальные высокоомные сопротивления 6, назначение которых будет выяснено ниже. Схема реле имеет так называемое вспомогательное заземление  $HE$ . Через это заземление в момент срабатывания реле прохо-

дит ток порядка 1 МА. Сопротивление  $R_{HE}$  заземления  $HE$ , играющего вспомогательную роль, может быть несколько тысяч ом, и увеличения его в практически возможных при эксплуатации пределах, как видно из рис. 2, незначительно влияют на время срабатывания реле.

При замыкании на корпус в любой из фаз обмотки у какой-либо дрели группы (или же при замыкании на корпус в каком-либо штепсельном соединении) с появлением на корпусе ее напряжения  $U_E$  относительно земли, превосходящего допустимого нормами, реле 3, воздействуя на нулевую или включающую катушку 2 автомата 1, отключит дрели от питающей сети. Полное время срабатывания защиты  $T$ , как видно из приведенной ниже осциллограммы (рис. 7), складывается из времени действия реле  $T_p$  и собственного времени действия автоматического выключателя  $T_B$ . Время действия реле, как показали исследования, определяется напряжением на корпусе  $U_E$ , появляющимся в момент аварии.

<sup>1</sup> С. В. Соколов, Реле для автоматического защитного выключения при замыкании на корпус. "Электричество" № 5, 1947. Авторское свидетельство по заявке № 170974.

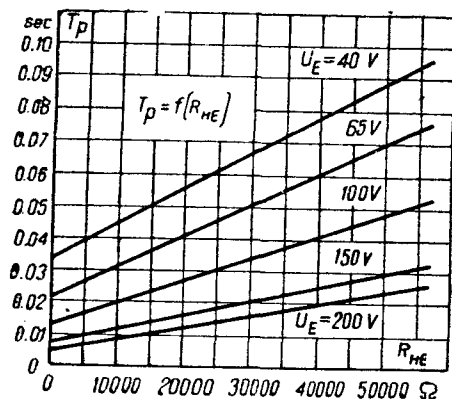


Рис. 1

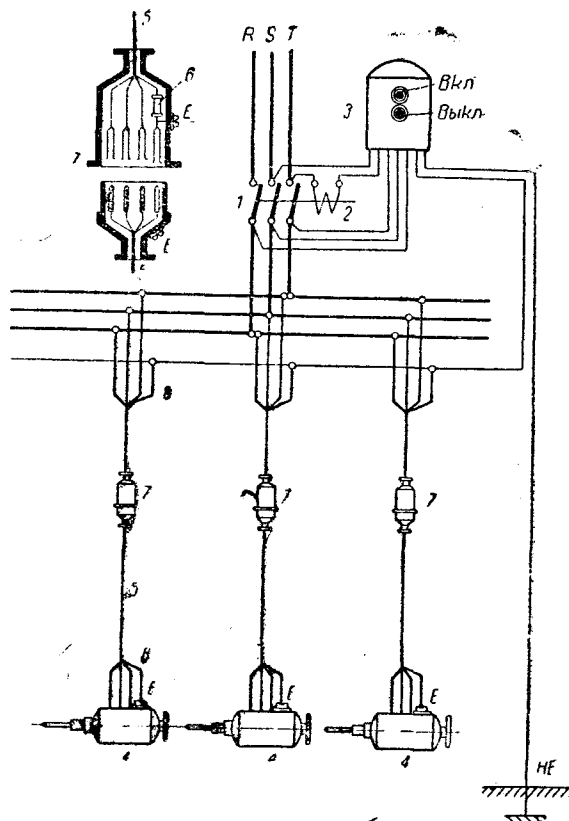


Рис. 2



Принципиально нежелательное обстоятельство — одновременное выключение всей группы дрелей — при замыкании на корпус одной из них не может сказаться обременительно для технологического процесса, так как замыкания на корпус происходят сравнительно не часто и к тому же отыскать дефектную дрель при предлагаемой схеме защиты можно очень быстро поочередным выключением дрелей в штатных соединениях 7. Защита допустит повторное включение автоматического выключателя 1 только после выключения дефектной дрели. Автоматический выключатель и реле могут быть установлены в цехах на колоннах, в территориальном центре группы. Такая схема взаимного расположения приемников и защитной аппаратуры может быть очень удобна, например, для цехов, в которых производится обработка (шлифование) швов сварных конструкций ручными шлифовальными машинами, при работе с электролопатами на судостроительных верфях, при обработке кож ручными электрическими инструментами, для сборочных станков вагоностроительных и авиационных заводов и тому подобных случаев.

При защите заземлением в случае, если напряжение корпуса какой-либо дрели группы превышает допустимое, что будет установлено в лучшем случае ощущением ударов электрическим током, дальнейшая работа становится невозможной также и для всех остальных дрелей, так как корпуса их связаны общим заземляющим устройством.

Отыскание дефектной дрели среди всех связанных общей заземляющей цепью в этом случае будет более сложным и должно производиться измерительным прибором<sup>2</sup>.

При защите же автоматическим выключением сама защитная аппаратура, как было указано выше, служит и средством для отыскания дефектного приемника.

<sup>2</sup> Обычно применяется совершенно недопустимый способ — проба на ощущение тока.

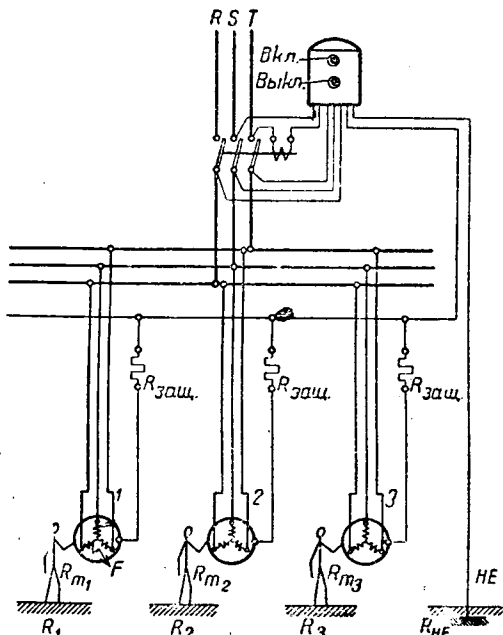


Рис. 3

Пусть при замыкании на корпус в какой-либо точке  $F$  обмотки дрели 1 (рис. 3) на корпусе появилось некоторое напряжение относительно земли  $U_{E1}$ . При непосредственном соединении корпусов дрелей с реле, как нетрудно видеть, напряжения корпусов всех дрелей относительно земли будут одинаковы. Если же в проводящие соединяющие корпуса с реле, ввести защитные сопротивления  $R_3$ , то напряжения прикосновения для дефектного приемника 1

$$U_{B1} = \frac{U_{E1}}{1 + \frac{R_1}{R_{m1}}};$$

для приемника 2

$$U_{B2} = \frac{U_{E1} - \frac{U_{B2} 2R_3}{R_{m2}}}{1 + \frac{R_2}{R_{m2}}};$$

для приемника 3

$$U_{B3} = \frac{U_{E1} - \frac{U_{B3} 2R_3}{R_{m3}}}{1 + \frac{R_3}{R_{m3}}}.$$

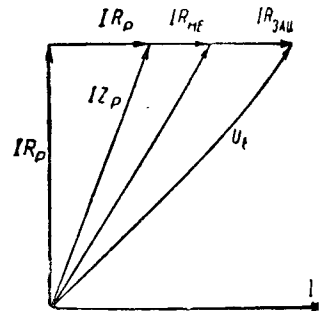


Рис. 4

Для упрощения можно положить равным сопротивлению тела  $R_m$  и переходные сопротивления от тела человека к земле. Тогда

$$U_{B1} = \frac{U_E}{1 + \frac{R}{R_m}};$$

$$U_{B2} = U_{B3} = \frac{U_E}{1 + \frac{R}{R_m} + \frac{2R_3}{R_m}}.$$

Как видно из (1), (2), применением соответствующих защитных сопротивлений можно напряжение прикосновения всех недефектных приемников группы значительно понизить. Это положение подтвердилось и экспериментально (см. ниже на рис. 7 кривые  $U_{E1}$  и  $U_{E2}$ ).

Посмотрим теперь, как влияет на работу реле присутствие в схеме защитных сопротивлений.

Как видно из рис. 3, при замыкании на корпус любого приемника группы появляющееся напряжение  $U_E$  воздействует на реле через сопротивление  $R_3$ . Проще всего можно оценить степень влияния этого сопротивления, определив, насколько изменится напряжение на зажимах реле ( $U_P$ ) благодаря присутствию  $R_3$ .

Из диаграммы напряжений цепи корпус-земля (рис. 4) можно найти, что

$$U_P = \frac{U_E}{\sqrt{1 + \frac{R_{HE}^2 + 2R_P R_{HE}}{Z_P^2} + \frac{2(R_P + R_{HE})R_3}{Z_P^2} + \frac{R_3^2}{Z_P^2}}}$$

Здесь  $R_P$ ,  $X_P$  и  $Z_P$  — сопротивления восприимчивой системы реле.

Для данного реле величина  $Z_P = 50\,000 \, \Omega$ ;  $R_3$  практически достаточно взять равным  $5000 - 10\,000 \, \Omega$ . При этих значениях  $Z_P$  и  $R_3$ , повидимому, влия-

на напряжение реле  $U_P$ , а следовательно, и защитные характеристики его, будет весьма значительным. В соотношении же (2)  $R_3$  входит с коэффициентом 2, и присутствие его скажется весьма существенно на величину напряжения прикосновения, так как сопротивление тела человека  $R_m$  в наиболее неблагоприятных случаях будет одного порядка с  $R_3$  или даже меньше его. Рассмотрим числовой пример.

Положим, что сопротивление тела человека  $R_m = 2000 \Omega$ ;  $R_3 = 5000$ ; переходное сопротивление от тела человека к земле  $R = 1000 \Omega$ ;  $R_{HE} = 1000 \Omega$ .

Пусть при замыкании на корпус в (1) приемнике (рис. 3) на корпусе его появилось напряжение относительно земли —  $U_A = 100$  V. Тогда напряжение прикосновения на аварийном приемнике  $U_B$  согласно формуле (1) будет  $U_B = 67$  V. Напряжения прикосновения недефектных приемников [формула (2)]

$U_{B_1} = U_{B_2} = 15,4$  V, т. е. почти в 4 раза меньше, чем для приемника аварийного.

Собственное время  $T_B$  обычных автоматических выключателей, применяемых в сетях низкого напряжения, может быть практически взято равным 0,03 сек (см. таблицу). Время срабатывания реле для данных значений  $U_E$ ,  $R_3$ ,  $R_{HE}$  согласно п. 2, будет 0,017 сек.

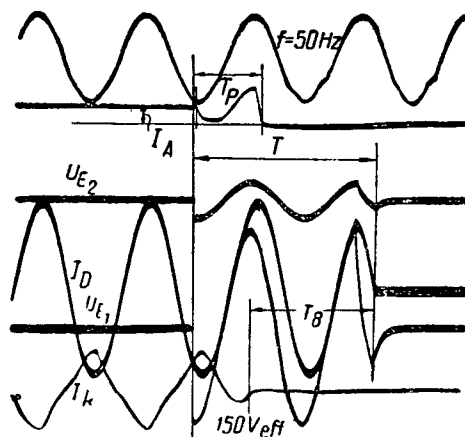
Следовательно, время существования напряжения на корпусах приемников — время срабатывания защиты,

$$T = T_B + T_P = 0,03 + 0,017 = 0,047 \text{ sec.}$$

Подсчет по формуле (3) дает  $U_P = 97,3$  V. Как видно при наличии в схеме  $R_3 = 5000 \Omega$  и  $R_{HE} = 1000 \Omega$ , напряжение на зажимах реле очень сильно отличается от напряжения  $U_E$ . При отсутствии защитного сопротивления напряжение на реле было бы  $U'_P = 99,2$  V, т. е. всего лишь на 2 больше.

Вызываемое уменьшением напряжения на зажимах реле увеличение времени срабатывания можно найти по соответствующей характеристике реле или же по рис. 2, отложив по оси абсцисс величину защитного сопротивления и пользуясь соответствующей кривой напряжения  $U_E$ . Для нашего примера увеличение времени  $T_P$  равно 0,002 сек (12%), что составляет всего лишь 5% времени срабатывания защиты.

Защитная схема и аппаратура были всесторонне



$$R_{HE} = 10000 \Omega, u = 3$$

Рис. 5

исследованы. На рис. 5 приведена одна из осциллограмм процесса работы защиты. На рисунке  $U_{E_1}$  и  $U_{E_2}$  — напряжения прикосновения дефектного и неаварийного приемников;  $I_D$  — рабочий ток приемников группы;  $I_K$  — ток нулевой катушки автоматического выключателя;  $I_A$  — анодный ток реле. Момент замыкания на корпус отмечен вертикальной прямой, пересекающей линии всех шлейфов осциллограммы. Масштаб времени дан кривой  $f = 50$  Hz.

В таблице приведены некоторые данные исследования, имеющие практическое значение.

В схеме исследования было применено реле для автоматического защитного выключения при замыкании на корпус, изготовленное в Электротехнической лаборатории института, и автоматический выключатель типа «MSB/AMSB-60» фирмы AEG, 60 A, 220 V с нулевой катушкой.

Разработанное нами реле для автоматического защитного выключения при замыкании на корпус и предлагаемое для описанной здесь защитной схемы выполняется в виде одного блока.

На кожухе реле имеются две кнопки «пуск» и «стоп». Кнопка «стоп» служит также для проверки действия защиты.

Для защитного сопротивления могут быть использованы высокоомные сопротивления, применяемые в радиотехнических установках. Как уже было выяснено раньше, через эти сопротивления

Осциллограммы	$U_{E_1}$ V	$U_{E_2}$ V	$R_{m_1}$ $\Omega$	$R_{m_2}$ $\Omega$	$R_1$ $\Omega$	$R_2$ $\Omega$	$R_{3_1}$ $\Omega$	$R_{3_2}$ $\Omega$	$R_{HE}$ $\Omega$	$T_P$ sec	$T_B$ sec	$T$ sec
1	40	<5	3000	2000	1000	1000	50 000	50 000	1000	0,092	0,022	0,114
2	40	<5	3000	2000	1000	1000	50 000	50 000	1000	0,091	0,022	0,113
3	65	<5	3000	2000	1000	1000	10 000	10 000	1000	0,036	0,022	0,058
4	65	<5	3000	2000	1000	1000	20 000	20 000	1000	0,043	0,026	0,069
5	100	5	3000	2000	1000	1000	10 000	10 000	1000	0,014	0,028	0,042
6	100	5	3000	2000	1000	1000	10 000	10 000	1000	0,018	0,028	0,046
7	150	12	3000	2000	1000	1000	10 000	10 000	1000	0,012	0,028	0,040
8	150	12	3000	2000	1000	1000	10 000	10 000	1000	0,012	0,027	0,039
9	200	30	3000	2000	1000	1000	5 000	5 000	1000	0,007	0,028	0,035
10	200	12	3000	2000	1000	1000	10 000	10 000	1000	0,008	0,028	0,036
11	200	<5	3000	2000	1000	1000	40 000	40 000	1000	0,021	0,027	0,048

только в момент срабатывания реле проходит ток порядка 1 мА. Габаритные размеры сопротивлений настолько незначительны, что они легко могут быть встроены в штепсельное соединение для дрейлей и переносных ручных инструментов, как показано на рис. 2 (6).

В качестве автоматического выключателя в схеме могут быть использованы автоматы, предназначенные для максимальной защиты электро-

двигателей, имеющие нулевую или включающую катушку, или же магнитные пускатели, изготовляемые Харьковским электромеханическим заводом, если их собственное время действия будет порядка 0,03 сек.

Выполнение вспомогательного заземления со сопротивлением в несколько сот ом и на ток около 1 мА, очевидно, не представит никаких затруднений.

## Защита электровозов от атмосферных перенапряжений

Я. И. Мирер

Электродено ст. Чусовская ж. д.  
им. Кагановича

**З**А ГРОЗОВОЙ сезон 1937 г. на электрифицированном участке (напряжение контактной сети — 3000 В) Свердловск — Кизел ж. д. им. Кагановича наблюдались повреждения аппаратуры электровозов, вызванные атмосферными перенапряжениями.

По роду пострадавшей аппаратуры распределение всех случаев повреждений таково (см. таблицу).

Серия электровоза	Вольтметры	Алюминиевые разрядники	Силовая аппаратура
Сс11 . . . . .	4*	2	4*
ВЛ19 . . . . .	4	3	1

\* Всего пострадало 5 вольтметров и 7 силовых аппаратов (включая тяговый двигатель).

Из таблицы видно, что силовая аппаратура электровозов ВЛ19 пострадала значительно меньше, чем электровозов Сс11.

Из нее же видно, что защита вольтметров на электровозах обеих серий является недостаточной и что сами разрядники подвержены повреждениям.

Несовершенство защиты силовой (высоковольтной) аппаратуры и вольтметров на электровозах объясняется по нашему мнению неправильной

схемой включения алюминиевого разрядника и Сс11 и вольтметров на ВЛ19.

Из схем (рис. 1 и 2) видно, что алюминиевый разрядник на электровозе (Сс11 включен после катушек быстродействующего выключателя (БВ) и реле вспомогательных машин (РВМ), имеющие известную индуктивность, а на электровозе ВЛ19 — параллельно БВ. Как мы увидим далее, наличие индуктивного сопротивления перед разрядником на электровозе Сс11 и является основной причиной подверженности силовой аппаратуры воздействию атмосферных перенапряжений.

**Силовая аппаратура.** 1. При следозании электровоза Сс11 с поездом по перегону в момент грозового разряда пробило изоляцию высоковольтного кабеля (у самого наконечника), идущего от пантографа к силовой катушке вспомогательных машин.

Механизм пробоя кабеля таков: волна атмосферного перенапряжения, пройдя индуктивность силовых катушек БВ, отразилась от индуктивности катушки реле вспомогательных машин. При этом амплитуда волны возросла. В результате повышения потенциала кабеля относительно корпуса электровоза (земли) пробилась его изоляция в месте касания о корпус. Часть отраженной волны прошла катушку РВМ на разрядник — последний сработал. Отключение РВМ вызвано большой величиной тока, проходившего через алюминиевый разрядник при его срабатывании.

2. Во время сильной грозы на электровозе Сс11, ведущем поезд, отключился быстродействующий выключатель. Машинист заметил это в высоковольтной камере. При осмотре оказа-

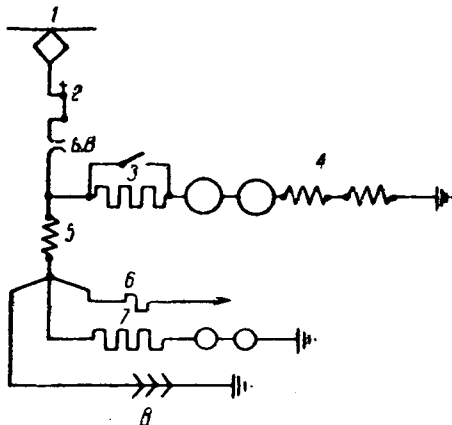


Рис. 1. Схема электровоза Сс11

1 — контактный провод, 2 — главный разъединитель, 3 — пусковые сопротивления, 4 — цепь тяговых двигателей, 5 — цепь вольтметров, 6 — цепь катушки РВМ, 7 — цепь вольтметров, 8 — алюминиевый разрядник

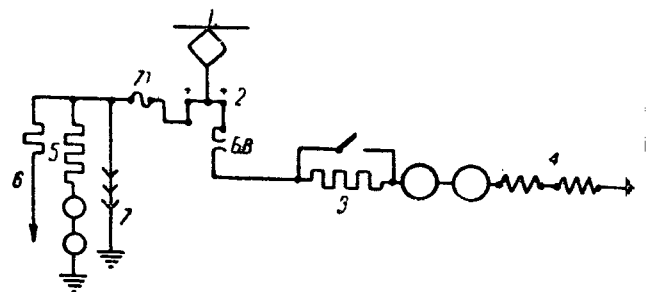


Рис. 2. Схема электровоза ВЛ19

1 — контактный провод, 2 — главный разъединитель, 3 — пусковые сопротивления, 4 — цепь тяговых двигателей, 5 — цепь вольтметров, 6 — цепь катушки РВМ, 7 — цепь вольтметров, 8 — алюминиевый разрядник

лось, что перегорели подводящие концы (и контакты) к панели сопротивлений вольтметров и счетчика. Эти концы кабельков были отобраны и заизолированы. *БВ* включили. Через некоторое время в момент следующего грозового разряда снова сработал *БВ*; был обнаружен электрический пробой на корпус электровоза изоляции силового кабеля *РВМ*, идущего к демпферному сопротивлению вспомогательных машин.

После того как кабель был заизолирован и *БВ* включен, при переводе главной рукоятки контроллера на первую позицию, было обнаружено короткое замыкание в силовой цепи: миканитовая трубка ящика пусковых сопротивлений пробилась на корпус.

Установлено, что разрядник не сработал. Объяснение этих явлений кроется в следующем. При первом грозовом разряде падающая волна атмосферного перенапряжения в большей своей части отразилась от индуктивностей *БВ* и *РВМ*. Часть волны была ими поглощена. Оставшаяся часть волны оказалась по амплитуде меньше напряжения срабатывания разрядника (порядка 9 кВ, почему разрядник и не сработал), но достаточной, чтобы перекрыть изоляционную стойку сопротивлений вольтметров. При этом электрические заряды стекали у контактов подводящих кабельков, вызвав их обгорание<sup>1</sup>.

При втором разряде явление характерно тем, что так же, как и раньше благодаря сильно сглаженному фронту волна не в состоянии была воздействовать на разрядник и отраженная от индуктивности вспомогательных машин электровоза пробилла кабель, идущий к демпферному сопротивлению.

Часть волны, отраженная от индуктивности тяговых двигателей, получила выход в электрическом пробое миканитовой трубки ящика пусковых сопротивлений.

3. При маневрировании поезда (электровоз *Сс11*) на станции во время грозы в результате атмосферных перенапряжений пробилла изоляционную стойку главного разъединителя. После этого разъединитель был отсоединен и закорочен. При следующем разряде сторела перемычка между ящиками пусковых сопротивлений. При осмотре изоляторов одного ящика был установлен электрический переброс на корпус — раму высоковольтной камеры. После смены перемычки при переводе главной рукоятки контроллера несколько раз отключило реле перегрузки первого и второго моторов. В депо при осмотре первого мотора установлено короткое замыкание одной секции на железо якоря и что две секции проводящего бандажа, охватывающие место короткого замыкания, прожжены и размотались.

Повидимому, при первом разряде волна, отразившись от *БВ* и *РВМ*, возросла (удвоилась) и пробилла стойку главного разъединителя. В этом случае разрядник, вероятно, не сработал.

При втором разряде значительная часть волны, поглощенная индуктивностью *БВ* и *РВМ*, отразилась от индуктивности катушек полюсов. Ам-

плитуда ее возросла. Часть волны пробилла изоляцию секции на железо якоря и перекрыла изолятор ящика пусковых сопротивлений. Другая часть волны воздействовала на разрядник, и он сработал.

Вследствие грозового разряда на электровозе ВЛ19, следовавшем с поездом по перегону, отключилось реле перегрузки третьего и четвертого моторов. При осмотре был обнаружен пробой изоляторов плюсовых и минусовых щеткодержателей третьего мотора.

Этому повреждению можно дать такое объяснение: волна перенапряжения после пантографа разбилась на две; одна воздействует на разрядник, другая, дойдя до индуктивностей катушек полюсов и отразившись от них, пробивает изоляторы кронштейнов щеткодержателей.

Количественное сравнение повреждений на электровозах *Сс11* и ВЛ19 показывает, что защита силовой аппаратуры на *Сс11* значительно менее совершенна, чем на ВЛ19. Поэтому мы считаем необходимым, чтобы разрядник был включен до *БВ*. В этом случае волна при отражении от *БВ* попадает на разрядник.

**Вольтметры.** Рассмотрим сперва повреждения вольтметров на электровозе *Сс11*. Наиболее интересен здесь самый характер повреждений. Во всех четырех случаях наблюдалось электрическое перекрытие эбонитовых изоляторов, поддерживающих катушки сопротивлений, обгорание клемм контактов панели сопротивлений и подводящих кабельков (в трех случаях пострадали и спирали приборов).

Повреждения вольтметров можно объяснить тем, что волна перенапряжения, пройдя *БВ* и *РВМ* и отразившись от индуктивностей машин, имеет для выхода два пути: вольтметры и алюминиевый разрядник. Волна атмосферного перенапряжения отраженная делится на две части: одна идет на разрядник, другая на вольтметры. При этом последняя полуволна отражается от индуктивности катушек сопротивлений. В силу наличия контактов у панели сопротивлений вольтметров и металлического днища (земля через вольтметр) электрические заряды стекают у клемм на днище, обжигая их, и далее через спирали прибора проходят на корпус.

Нам представляется, что наилучший выход из положения, обеспечивающий надежную защиту вольтметров, это включение вольтметров после катушки *РВМ* (после индуктивности — как и теперь), но при обязательном перемещении разрядника в схему до *БВ*.

На электровозах серии ВЛ19 аварии также объясняются частичным выходом волны через вольтметры. Защитить<sup>2</sup> вольтметры возможно включением их после *БВ* (после индуктивности).

**Алюминиевые разрядники.** Объяснение аварий с разрядниками кроется по нашему мнению в следующем.

Наиболее вероятным является случай, когда после срабатывания разрядника электролит не восстанавливает быстро своей пленки. Если реле вспомогательных машин (на электровозах *Сс11*)

<sup>2</sup> На итальянских электровозах вольтметры защищены плавкими предохранителями (серебряная проволока  $d = 0,1$  mm). Насколько эта защита совершенна, у нас данных нет.

<sup>1</sup> Возможно и другое объяснение: замедленность перенапряжения вследствие прохождения через индуктивность не позволила разряднику сработать (даже при общем напряжении 9 кВ; см. Баев и Конышев, Алюминиевые разрядники для электровозов, изд. ОНТИ, 1937).

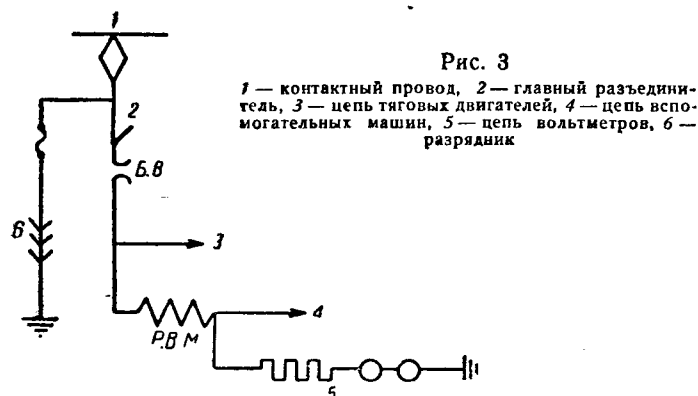


Рис. 3

1 — контактный провод, 2 — главный разъединитель, 3 — цепь тяговых двигателей, 4 — цепь вспомогательных машин, 5 — цепь вольтметров, 6 — разрядник

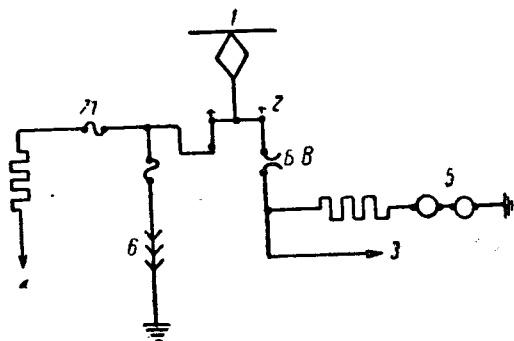


Рис. 4

1 — контактный провод, 2 — главный разъединитель, 3 — цепь тяговых двигателей, 4 — цепь вспомогательных машин, 5 — цепь вольтметров, 6 — разрядник

или общая вставка 71 (на электровозах ВЛ19) замедлит почему-либо свое действие, через разрядник проходит ток порядка сотен ампер, вызывающий оплавление электродов и чрезмерный нагрев банок — банки лопаются.

В тех случаях, когда лопаются первые банки, причиной, повидимому, является весьма крутой фронт волны или прямой удар грозowego разряда, пробивающий электролит.

Для разрыва вольтовой дуги, возможно, надо пойти по пути применения менее мощного предохранителя<sup>3</sup>, чем вставка 71, номинальный ток которой  $I_n = 60$  А. Этим будет достигнуто более быстрое его срабатывание. Конструкция этого предохранителя должна быть весьма совершен-

ной, так как практика показала, что при срабатывании плавкого предохранителя 71 (цинковая вставка в фибровой трубке) сгорание «мостиков» сопровождается рядом нежелательных явлений: сгоранием фибровой трубки, обгоранием ящика, в котором находится предохранитель, и т. п.

Установка быстродействующих автоматов для разрыва дуги крайне затруднена из-за отсутствия места на электровозах для них. Сглаживание крутых фронтов путем включения разрядника после катушек БВ (и РВМ) недопустимо по указанным выше причинам.

Решение вопроса, видимо, упирается в усовершенствование самой конструкции разрядника.

Предлагаемые нами схемы включения разрядника и вольтметров показаны на рис. 3 и 4.

<sup>3</sup> На итальянских электровозах применяется плавкий предохранитель из серебряной проволоки  $d = 0,2$  мм.

## НОВЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

### Устойчивость опоры контактной линии электрических железных дорог

С. М. Кудряв  
Ленинград

ОПОРЫ контактных линий электрифицируемых ж. д. нередко попадают на край кювета или в самый кювет. При этом возникает затруднение в вопросе об устойчивости опоры и оно не уничтожается совершенно в случае обвода или небольшого отнесения кювета от оси пути. С другой стороны, вполне возможно некоторое уменьшение длины требуемых столбов и даже небольшая экономия средств, если несколько повысить уровень грунта вокруг опоры путем досыпки его. Условия устойчивости в этом случае будут подобны случаю с кюветом, почему в настоящей статье разбирается вопрос об устойчивости деревянных опор в том и другом случае совместно. Предлагаемый способ расчета основан на достаточно известном методе автора — расчете по предельной устойчивости и наперед заданным коэффициентом запаса ее; предварительное общее знакомство с этим методом необходимо для понимания дальнейшего<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> См. книгу автора «Устойчивость опор в грунтах», ч. 1, 1936, в частности, § 32, 33, 45 и 46, а также составленный автором раздел IX Норм механического расчета линий сильного тока с инструкцией к нему (§ 1, 2 и 7 Инструкции) — сборник «Электротехнические правила и нормы», ч. 1, 1933. Более подробное изложение вопроса, послужившего темой для на-

Условия работы опоры и обоснования метода расчета. При электрификации одного из участков Кировской ж. д. была сделана попытка укорочения опоры до 11 м от части пута урезки опоры сверху с перестановкой фидерной консоли ниже, но, главным образом, урезкой снизу, причем для получения достаточной глубины заложения предполагалась сыпка балластного слоя с отнесением кювета в сторону (рис. 1). Но при этом условия устойчивости опоры будут иные, чем при поверхности грунта, простирающейся в обе стороны горизонтально и достаточно далеко.

Этот случай является усложнением обычного, когда опора стоит на краю кювета.

Автором настоящей статьи была доказана практическая возможность такой установки опоры при сравнительно небольшом увеличении лежней и даны методы расчета, годные как для обычной установки у самого кювета, так для случая досыпки.

стоящей статьи, см. в работе автора «Устойчивость промывочной контактной опоры на краю кювета, применение сыпки грунта и необходимые исследования вопроса» представленной в НИС Ленинградского института инженеров ж.-д. транспорта в 1937 г.





В результате, если взять для обычного случая горизонтальной поверхности зависимость вида  $Ay$ , то в данном случае придется допустить, что временное сопротивление изменяется по некоторой кривой  $O_1e$ , которая на глубине асимптотически приближается к нормальной зависимости  $O_2c_3$ . Но будет вредной фантазией создание „точных“ теорий о виде этой кривой. Нужно помнить, что основная зависимость  $Ay$  является приближенной и упрощенной, тогда как истинная — неизвестна.

Примем упрощенно изменение временного сопротивления по прямой  $O_2c_3$ ; повышение сопротивления благодаря досыпке компенсирует понижение его вследствие наличия кювета. При отсутствии досыпки точку  $O_2$  примем на уровне дна кювета.

Тогда временные сопротивления с обеих сторон будут (рис. 4):

$$\sigma_{\text{верм}} = Ay; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{зверм}} = A(y - r), \quad (2)$$

где  $r$  — разность обоих уровней расчетных поверхностей грунта<sup>5</sup>.

Вид опоры напряжений в предельном состоянии и будет в основном, конечно, таков, как и в обычном случае одной горизонтальной поверхности. Поэтому мы разберем вопрос только с точки зрения особенностей его при двух разных поверхностях.

Будем рассматривать параллельно случаи опрокидывания на путь и от пути. При опрокидывании от пути, т. е. влево, эпюра будет вида  $a$  рис. 5. Так как воспринимаемая горизонтальная сила  $P$  по условиям равновесия равна разности обеих реакций, то одна из площадей эпюры напряжений грунта будет больше другой. Если момент приведенной пары  $M''$  перемещает верхнюю часть столба в ту же сторону, как и приведенная сила  $P''$ , то большую величину будет иметь верхняя реакция (верхняя площадка). То же самое получится и при опрокидывании на путь (рис. 5, б). Если же сила и момент будут перемещать верхушку опоры в разные стороны, то верхняя реакция (верхняя площадка) будет меньше. Применительно к опрокидыванию на путь такой случай показан на рис. 5, в; понятно, аналогичную картину мы получим при опрокидывании от пути. Такие комбинации мы условились называть случаем „отрицательной“ силы, так как момент мы всегда считаем существенно положительным<sup>6</sup>. У контактных опор, установленных на путях (за пределами станций), этого случая обычно не бывает. Поэтому на рассмотрении его не будем особо останавливаться. Заметим лишь, что уравнения, выведенные далее, имеют общее значение: при отрицательной силе  $P$  ее численную величину нужно подставить с минусом.

Рассмотрим частный случай эпюры при опрокидывании на путь. Из рис. 5, в легко заметить

<sup>5</sup> Более подробные обоснования положений этого параграфа см. в работе, указанной в конце сноски 1.

<sup>6</sup> Подробный разбор эпюр при отрицательной силе применительно к параболической эпюре см. „Устойчивость опор в грунтах“, стр. 189—191; вообще об „отрицательной“ силе см. там же, стр. 99 и 168.

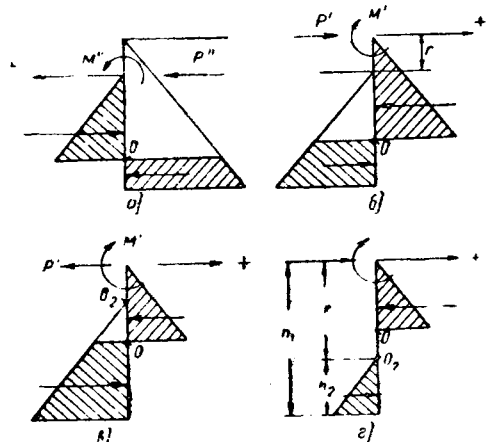


Рис. 5. Частные случаи эпюры напряжений  
а — опрокидывание от пути,  $P > 0$ ; б и в — опрокидывание на путь,  $P > 0$  и  $P < 0$  соответственно; г — частный случай

следующее. При отрицательной силе  $P'$ , достаточно большой (т. е. при малом моменте  $M'$ ), может оказаться, что левая точка эпюры  $O$  как раз совпадет с точкой  $O_2$ . Тогда нижняя реакция достигнет наибольшей возможной величины. Если сила  $P$  станет еще больше, то для уравновешивания верхняя реакция должна уменьшиться, при этом нулевая точка  $O$  правой площадки поднимется выше точки  $O_2$ , что показано (уже для случая положительной силы) на рис. 5, г. Ясно, что при  $P < 0$  такой случай, вообще говоря,

может наступить при любом  $\frac{r}{h_1}$ ; но он более вероятен, если

да  $r$  велико, т. е. когда  $\frac{r}{h_1}$  приближается к единице. Наконец, в случае  $P = 0$ , совпадение точек  $O_2$  и  $O$  получится

только лишь при  $r = \frac{h}{2} = h_2$ ; однако при  $r > h_2$  (рис. 5, г) отрыв точки  $O$  от точки  $O_2$  не только возможен, но неизбежен. Это же последнее условие также необходимо (но не достаточно) для возможности отхода точки  $O$  вверх, если  $P' > 0$ . Заметим еще, что эпюры такого вида возможны только при опрокидывании на путь; это легко уяснить, если начать мысленно перемещать точку  $O$  на рис. 5, а вверх и вниз. Эпюру этого вида применительно к контактным опорам можно не рассматривать подробнее, но в других случаях строительства она имеет некоторое значение.

При выводе расчетных формул мы будем считать исходным случай опрокидывания на путь при положительной силе  $P$  (рис. 6); все величины, относящиеся к правой части эпюры, пока обозначим индексом 1, а для левой — индексом 2, или же соответственно ' и ''.

По условиям равновесия

$$\Sigma X = P_{np} - X_{1np} + X_{2np} = 0;$$

$$\Sigma M = M_{np} + M_{1np} - M_{2np} = 0,$$

где через  $M_1$  и  $M_2$  мы временно обозначим моменты устойчивости, создаваемые реакциями  $X_1$  и  $X_2$ ; индекс  $np$  опускаем.

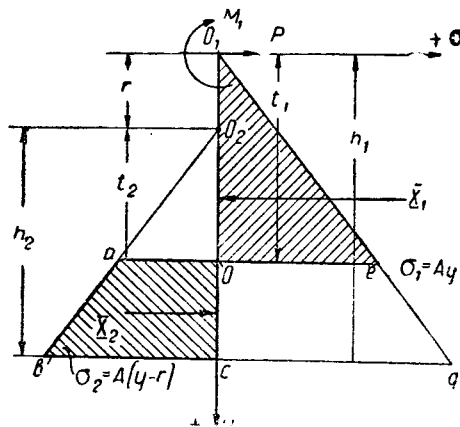


Рис. 6. К выводу расчетных уравнений

По первому условию

$$P = X_1 - X_2.$$

Обозначая расчетную ширину опоры (параллельно пути) через  $b$ , имеем:

$$X_1 = \frac{Abt_1^2}{2}.$$

Введем обозначение

$$\theta = \frac{t}{h},$$

тогда

$$t_1 = \theta_1 h_1,$$

где

$$X_1 = E_1 \theta_1^2.$$

представляет собой предельную силу

$$E_1 = \frac{Abh_1^2}{2},$$

которая получилась бы, если бы столб перемещался поступательно вправо.  
Данная сила

$$X_2 b \cdot \text{пл. } Oabc = b \cdot \frac{\overline{Oa} + \overline{bc}}{2} \cdot \overline{Oc} =$$

$$= b \cdot \frac{At_1 + Ah_2}{2} (h_2 - t_2) = Ab \cdot \frac{(t_1 - r) + (h_1 - r)}{2} (h_1 - t_1)$$

и после введения  $\Theta$ , перемножения и подстановки  $E_1$ :

$$X_2 = E_1 \left[ (1 - \Theta_1^2) - 2 \frac{r}{h_1} (1 - \Theta_1) \right]. \quad (8)$$

Подставляя  $X_1$  из (6) и  $X_2$  из (8) в выражение (5), получим:

$$P_{np} = E_1 \left[ (2\Theta_1^2 - 1) + 2 \frac{r}{h_1} (1 - \Theta_1) \right]. \quad (9)$$

По второму условию равновесия имеем:

$$M_{np} = M_{1np} + M_{2np}. \quad (10)$$

Непосредственно из рисунка и формулы (6) имеем момент:

$$M_1 = \frac{2}{3} t_1 X_1 = \frac{2}{3} E_1 h_1 \Theta_1^3. \quad (11)$$

Далее

$$M_2 = \int_{t_1}^{h_1} y \sigma_2 dy \cdot b = b \int_{t_1}^{h_1} y A(y - r) dy.$$

Выполнение интегрирования и несложные преобразования дают:

$$M_2 = \frac{2}{3} E_1 h_1 \left[ (1 - \Theta_1^3) - \frac{3}{2} \frac{r}{h_1} (1 - \Theta_1) \right]. \quad (12)$$

Подставляя  $M_1$  и  $M_2$  из (10) и (11) в (4), получим:

$$M_{np} = \frac{2}{3} E_1 h_1 \left[ (1 - 2\Theta_1^3) - \frac{3}{2} \frac{r}{h_1} (1 - \Theta_1) \right]. \quad (13)$$

Полученные формулы перепишем без индекса 1:

$$\left. \begin{aligned} P_{np} &= E \left[ (2\Theta^2 - 1) + 2 \frac{r}{h} (1 - \Theta) \right]; \\ M_{np} &= \frac{2}{3} E h \left[ (1 - 2\Theta^3) - \frac{3}{2} \frac{r}{h} (1 - \Theta) \right] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

удобнее, так как при определении устойчивости в наклоне от пути формулы останутся справедливыми, если оставить в них величину  $r$  с минусом, а величины  $E$  и  $h$  оставить те, которые соответствуют левой части эпюры. При  $r = 0$  вторые члены в квадратных скобках пропадают, получаются обычные формулы для горизонтальной поверхности, выведенные автором ранее в неоднократно упомянутой книге.

Наиболее простым и в то же время вполне отвечающим практическому ходу проектирования опоры будет такой прием расчета. В первое уравнение подставляют заданную глубину  $P$ , желаемую глубину  $h$  и т. д. и находят  $\Theta$ . Тогда во втором уравнении находят предельный момент устойчивости. Для этого удобно придать формулам (14) несколько иной вид, так что в совокупности получается такой комплекс расчетных формул:

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{Abh^2}{2}; \quad \Theta^2 - \frac{r}{h} \Theta - \left( 0,5 + \frac{P_{np}}{2E} - \frac{r}{h} \right) = 0; \\ M_{np} &= \frac{Eh}{0,75} \Delta_3 - Er^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\Delta_3 = 0,5 - \Theta^3$$

$$t_2 = 1 - \Theta^2$$

цели для уменьшения вычислительных ошибок и ускорения расчета. Для них составлена табл. 2, в которой даны типовые значения обеих функций  $\Theta$ .

Более удобные таблицы этих и других функций  $\Theta$  че-  
0,001 аргумента см. в статье автора „Вспомогательные  
мны для расчета предельной устойчивости опор“ 1937,  
патающейся в Сборниках Ленинградского института инже-  
ров ж.-д. транспорта.

Таблица 2

Функции  $\Theta$ 

$\Theta$	$\Delta_3=0,5-\Theta^3$	$t_2=1-\Theta^2$	$\Theta$	$\Delta_3=0,5-\Theta^3$	$t_2=1-\Theta^2$
0,500	0,375 <sub>-8</sub>	0,750 <sub>-10</sub>	0,750	0,078 <sub>-17</sub>	0,437 <sub>-15</sub>
510	357 <sub>-8</sub>	740 <sub>-10</sub>	760	061 <sub>-18</sub>	422 <sub>-15</sub>
520	359 <sub>-8</sub>	730 <sub>-11</sub>	770	043 <sub>-18</sub>	407 <sub>-15</sub>
530	351 <sub>-8</sub>	719 <sub>-11</sub>	780	025 <sub>-18</sub>	392 <sub>-16</sub>
540	343 <sub>-9</sub>	708 <sub>-11</sub>	790	+0,007 <sub>-19</sub>	376 <sub>-16</sub>
0,550	0,334 <sub>-10</sub>	0,697 <sub>-11</sub>	0,800	-0,012 <sub>19</sub>	0,360 <sub>-16</sub>
560	324 <sub>-9</sub>	686 <sub>-11</sub>	810	031 <sub>20</sub>	344 <sub>-16</sub>
570	315 <sub>-10</sub>	675 <sub>-11</sub>	820	051 <sub>21</sub>	328 <sub>-17</sub>
580	305 <sub>-10</sub>	664 <sub>-12</sub>	830	072 <sub>21</sub>	311 <sub>-17</sub>
590	295 <sub>-11</sub>	652 <sub>-12</sub>	840	093 <sub>21</sub>	294 <sub>-17</sub>
0,600	0,284 <sub>-11</sub>	0,640 <sub>-12</sub>	0,850	-0,114 <sub>22</sub>	0,277 <sub>-17</sub>
610	273 <sub>-11</sub>	628 <sub>-12</sub>	860	136 <sub>23</sub>	260 <sub>-17</sub>
620	262 <sub>-12</sub>	616 <sub>-13</sub>	870	159 <sub>22</sub>	243 <sub>-17</sub>
630	250 <sub>-12</sub>	603 <sub>-13</sub>	880	181 <sub>24</sub>	226 <sub>-18</sub>
640	238 <sub>-13</sub>	590 <sub>-13</sub>	890	205 <sub>24</sub>	208 <sub>-18</sub>
0,650	0,225 <sub>-12</sub>	0,577 <sub>-13</sub>	0,900	-0,229 <sub>25</sub>	0,190 <sub>-18</sub>
660	213 <sub>-14</sub>	564 <sub>-13</sub>	910	254 <sub>25</sub>	172 <sub>-18</sub>
670	199 <sub>-13</sub>	551 <sub>-13</sub>	920	279 <sub>25</sub>	154 <sub>-19</sub>
680	186 <sub>-15</sub>	538 <sub>-14</sub>	930	304 <sub>27</sub>	135 <sub>-19</sub>
690	171 <sub>-14</sub>	524 <sub>-14</sub>	940	331 <sub>26</sub>	116 <sub>-19</sub>
0,700	0,157 <sub>-15</sub>	0,510 <sub>-14</sub>	0,950	-0,357 <sub>28</sub>	0,097 <sub>-19</sub>
710	142 <sub>-15</sub>	496 <sub>-14</sub>	960	385 <sub>28</sub>	078 <sub>-19</sub>
720	127 <sub>-16</sub>	482 <sub>-15</sub>	970	413 <sub>28</sub>	059 <sub>-19</sub>
730	111 <sub>-16</sub>	467 <sub>-15</sub>	980	441 <sub>29</sub>	040 <sub>-20</sub>
740	095 <sub>-17</sub>	452 <sub>-15</sub>	990	470 <sub>30</sub>	020 <sub>-20</sub>
0,750	0,078 <sub>-17</sub>	437 <sub>-15</sub>	1,000	-0,500 <sub>30</sub>	0,000 <sub>-20</sub>

Табличные разности, проставленные со знаком минус, дают пропорциональные части, которые следует вычитать из предыдущего значения функции; при отсутствии минуса пропорциональные части прибавляются к абсолютному значению функции.

При расчете устойчивости опоры, установленной непосредственно на краю кювета или вблизи него, расчетными уровнями будут дно кювета и поверхность земли.

Рассмотрим теперь расчет лежней. Применение лежней в рассматриваемом случае установки контактной опоры неизбежно, если не допускать невыгодную чрезмерную глубину. Кроме того, благодаря лежням при одинаковой суммарной предельной устойчивости отклонения опоры должны получаться меньшими, чем у глубоко заделанного столба без лежней; это обстоятельство существенно для опор контактных проводов. Необходимость расхода болтов не имеет большого значения в данном случае, так как для укрепления лежней в значительной степени должны быть использованы болты, сплачивающие оба столба опоры между собой. В частности, нижний лежень следует устанавливать не сбоку, как это до сих пор почему-то делают, а в вырубке между столбами (рис. 7); при этом лежень работает в обе стороны на прижатие к столбу (правому или левому) и, кроме того, достигается экономия в среднем около 20 см длины болта.

Вопрос о лежнях вообще имеет значения для всех видов опор, и мы не можем останавливаться на нем здесь подробно. Приводим лишь общие указания применительно к данному случаю.

Если, например, размеры обоих лежней таковы, что обе реакции  $R_{np}$  на них равны, то эти реакции дадут пару сил. Следовательно, столб должен будет принять на себя, кроме части приложенного предельного момента, еще и всю предельную силу, причем нулевая точка  $O$  (рис. 6) окажется такой, чтобы

$$X_{1np} - X_{2np} = P_{np}$$

но если увеличить поверхность верхнего лежня так, чтобы он принял на себя еще и всю силу  $P_{np}$ , то положение точки  $O$  и реакции  $X_{np}$  изменятся так, что столб возьмет на себя часть момента, большую, чем раньше. Таким приемом мы воспользуемся в данном случае и произведем далее расчет для двух указанных вариантов, оставив в стороне другие возможные комбинации.

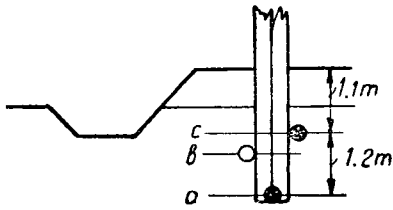


Рис. 7. К установке лежней

Если  $y$  — глубина оси лежня;  
 $b$  — расчетная ширина его;  
 $l$  — свободная длина его, то расчетная свободная площадь лежня

$$bl = \frac{R_{np}}{Ay} \quad (16)$$

**Пример.** Из табл. 1 видно, что нагрузки без гололеда больше, чем гололедные. Но ветер 35 м/сек (ураган 12 баллов Бофора) — явление еще более редкое, чем комбинация гололеда и ветра 20 м/сек. Поэтому для безгололедной нагрузки следует взять меньший коэффициент запаса. Учитывая еще, что обе нагрузки являются кратковременными, примем

при ветре 35 м/сек  $S = 2,5$   
 „ 20 „ и гололеде  $S = 3,0$

Вообще коэффициенты запаса должны определяться на научной основе, но здесь мы не можем вдаваться в этот вопрос и заметим лишь, что в первом случае даже при комбинации всех ошибок (от обычной нормальной неточности оценки грунта, от погрешностей метода и т. д.) в одну сторону все же получится фактический запас около 1,4, а при вероятной комбинации этих ошибок — 1,8. Этого достаточно, чтобы в условиях урагана предусмотренной силы не произошло бы падения надлежаще установленных опор или очень большого остающегося наклона их.

Соответственно этому мы получаем предельные расчетные нагрузки (на основе цифр табл. 1) согласно табл. 3.

Таблица 3

Предельные расчетные нагрузки

Направление опрокидывания	Нагрузка	$M_{np}$ тм	$P_{np}$ т
От пути	Ветер 35 м/сек . . . . .	7,4	1,2
	Гололед, ветер 20 м/сек . . . . .	5,3	1,0
На путь	Ветер 35 м/сек . . . . .	9,6	1,2
	Гололед, ветер 20 м/сек . . . . .	9,6	1,0

Из табл. 3 видно, что большими получаются нагрузки без гололеда. Но при этом нужно еще сообразовать нагрузки с состоянием грунта<sup>8</sup>.

Ветер 35 м/сек предполагается при  $+5^\circ$ , а гололед — при  $-5^\circ$ . Вероятность того, что при  $-5^\circ$  грунт окажется замёрзшим, больше, чем при  $+5^\circ$  (воздуха). Следовательно, при гололеде грунт может оказаться прочнее, чем при ветре 35 м/сек, и во всяком случае не слабее; нагрузки же при гололеде меньше. Таким образом во всех отношениях худшим случаем будет нагрузка без гололеда. При ней

Горизонтальная сила . . . 1,2 т  
 Момент от пути . . . . 7,4 тм (относительно  $O_2$ )  
 „ на путь . . . . . 9,6 „ ( „ „  $O_1$ )

<sup>8</sup> См. подробнее „Устойчивость опор в грунтах“, § 19, стр. 80 — 84.

Грунт — песок с валунами. Так как валуны подкрепляют грунт, а влажность его, вероятно, средняя, что увеличивает прочность песка, то примем<sup>9</sup>

$$A = 12 \text{ т/м}^2$$

На основании некоторых косвенных результатов испытаний Dögg автором настоящей статьи была принята для круглых столбов в сильно утрамбованном песке расчетная ширина  $b = 2d$  (с преумножением против получавшейся  $2,7 \div 2,8d$ ). Позднейшие прямые опыты автора дали  $3 \div 3,5$  в песке (слегка уплотненном утаптыванием и легким трамбованием сверху), так что можно было бы принять  $b = 3d$  или же точнее

$$b = 1,5(1 + f)d,$$

где  $f$  — коэффициент трения. Однако, учитывая, что нормы в издании 1933 г. еще не отменены, в расчет была введена величина  $b = 2d$ .

Расчетная ширина столба при среднем диаметре нижней части в 26 см равна

$$b = 2d = 2 \times 26 = 0,52 \text{ м.}$$

Определим устойчивость столба. Предварительно найдем вспомогательные величины (табл. 4).

Таблица 4

Численные величины к уравнению (15)

Величина	От пути	На путь
$r$ . . . . . м	-0,7	+0,7
$h$ . . . . . м	1,7	2,4
$r:h$ . . . . .	-0,412	+0,292
$P_{np}$ . . . . . т	1,2	1,2
$E = \frac{Abh^2}{2} = \frac{12 \cdot 0,52}{2} h^2$ . . . т	9,0	18,0
$P_{np} = 2E$ . . . . .	0,067	0,033
$\frac{4}{3} Eh$ . . . . .	20,4	57,7
$Er$ . . . . .	-6,30	12,6

Расчет лежней выполнен в табл. 5. При этом в случае передачи  $P_{np}$  на верхний лежень эта добавочная реакция даст добавочный отрицательный момент, равный (относительно той же оси  $O_2$ , для которой берутся все моменты при опрокидывании от пути):

$$1,2 \cdot (1,1 - 0,7) = 0,48 \text{ тм} \approx 0,5 \text{ тм.}$$

Таблица 5

Расчет лежней

$P_{np}$ передано	Предельные моменты, тм				Нижний лежень		Верхний лежень	
	на опоре	на столбе	остаток	на лежне	$R_{2np}$	$b_2 l_2$	$R_{1np}$	$b_1 l_1$
На столб	7,4	1,8	5,6	5,6	4,7	0,17	4,7	0,17
На лежень	7,4	3,4	4,0	4,5	3,8	0,14	5,0	0,15

По первому варианту свободная площадь обоих лежней  $0,17 + 0,36 = 0,53 \text{ м}^2$ ,

<sup>9</sup> Там же, табл. 31.

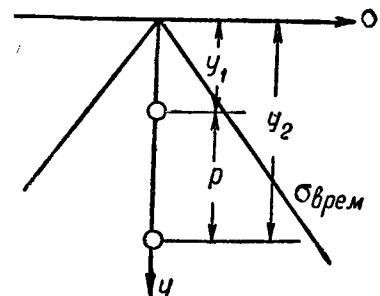


Рис. 8. К расчету лежней

Вычисление моментов столба

Таблица 6

Опрокидывание	$P_{np}$ ложится на:	$\theta$	$\Delta_3$	$\frac{Eh}{0,75}$	Столбцы (2) $\times$ (3)	$\sigma_2$	$Er$	Столбцы (5) $\times$ (6)	Столбцы (4) — (7)
		1	2	3	4	5	6	7	8
От пути	Столб . . . . .	0,804	—0,020	20,4	—0,41	0,354	—6,30	—2 23	1,82
	Лежни . . . . .	0,771	0,041	20,4	0,84	0,406	—6,30	—2,56	3,40
На путь	Столб . . . . .	0,654	0,220	57,7	12,70	0,572	12,6	7,20	5,50
	Лежни . . . . .	0,620	0,262	57,7	15,14	0,616	12,6	7,75	7,39

по второму

$$0,14 + 0,38 = 0,52 \text{ м}^2;$$

из этих цифр видно, что второй вариант в данном случае лишь немного выгоднее.

Цифры последнего столбца дают предельный момент, воспринимаемый столбом. В сторону пути предельная нагрузка, приложенная к опоре, составляет 9,6 тм и 1,2 т; так как при опрокидывании на путь столб сам по себе дает значительный момент, то лежни, обеспечивающие недостающую устойчивость, в обратном направлении, как это видно из табл. 3 и 5, могут дать избыток устойчивости. Поэтому дальнейший расчет лежней производим только по устойчивости от пути.

Нижний лежень ставим вровень с подошвой опоры в вырезке (рис. 7). Верхний же лучше было бы поместить слева (рис. 7), чтобы при опрокидывании от пути (когда реакция на лежне больше) он работал на прижатие, а не на отрыв. Но при этом он будет находиться близко к откосам кювета досыпки, причем над ним будет только выступ досыпки, а не баласт пути. По соображениям, изложенным ранее, придется расчетный уровень грунта считать по почве, а не по досыпке и лежень ставить в *b*. Если же поставить лежень справа, то его рабочая поверхность окажется (считая пока диаметр лежня около 20 см) на

$$0,20 + 2 \cdot 0,26 = 0,72 \text{ м}$$

выше от откосов, причем до них остается приблизительно полуторная глубина, считая от уровня баласта (*c* на рис. 7). Кроме того, лежень приходится близко к баластному слою. Поэтому здесь без большой натяжки можно принять расположение на уровне *c*, а поверхность грунта считать от уровня досыпки.

Рассматриваем параллельно устойчивость в обе стороны при передаче всей силы  $P_{np}$  на столб или же на лежни. Соответственно имеем четыре уравнения:

$$\begin{aligned} \theta^2 + 0,412\theta - (0,500 + 0,067 + 0,412) &= 0; \\ + 0,412 - (0,500 + 0 + 0,412) &; \\ - 0,292 - (0,500 + 0,033 - 0,292) &; \\ - 0,292 - (0,500 + 0 - 0,292) &. \end{aligned}$$

туду получаем:

$$\begin{aligned} \theta &= -0,206 \pm 1,010; \\ &= -0,206 \pm 0,977; \\ &= 0,146 \pm 0,508; \\ &= 0,146 \pm 0,474. \end{aligned}$$

Выбирая только положительные корни, сводим далее все вычисления в табл. 6.

В данном случае нижний лежень получается столь малым, что по конструктивным соображениям его придется взять больше. Поэтому есть смысл определить размеры верхнего лежня по первому варианту.

Принимая лежни с наименьшим диаметром 18 см, получим свободные длины их:

$$\frac{0,17}{2 \cdot 0,18} = 0,47 \text{ м}.$$

и

$$\frac{0,36}{2 \cdot 0,18} = 1,00 \text{ м}.$$

а полные длины при минимальной длине 0,8 м и грациях через 20 см:

$$\begin{aligned} 0,47 + 0,26 &= 0,73 \text{ м, примем } 0,8 \text{ м;} \\ 1,00 + 0,26 &= 1,26 \text{ м, примем } 1,2 \text{ м.} \end{aligned}$$

Из изложенного ясно, что вопросы устойчивости при наличии кювета, а также досыпки легко разрешаются, и те затруднения, которые у нас встречались в этих случаях, могут быть легко изжиты. Заметим еще во избежание недопониманий, что другой большой вопрос — устойчивость опор на склоне — требует особого рассмотрения.

Мы дали пример использования предлагаемого метода расчета в наиболее сложном случае, когда имеются и кювет и досыпка. Теперь остановимся несколько на последней. Она дает экономию древесины и пропиточных материалов порядка 20% за счет применения менее ценных коротких столбов несколько меньшего (из-за повышения опасного сечения) диаметра, ускоряет и облегчает монтаж (благодаря меньшему весу опоры и меньшей глубине котлована), уменьшает повреждение земляного полотна, но имеет недостаток — высокую стоимость досыпки. Подсчет, произведен-

Таблица 7

Подсчет стоимостей при досыпке

Р а с х о д	Перерасход руб.	Экономия руб.
Лежни (с пропиткой и доставкой)	0,7	—
Столбы ( . . . . . )	—	24,8
Котлован . . . . .	—	7,9
Досыпка баластом (с работой и материалом) . . . . .	21,3	—
Итого . . .	22,0	32,7
Всего . . .	—	10,7

ный в табл. 7, показывает, что при двухстолбовой опоре все же возможна и некоторая денежная экономия, при одностолбовой стоимость будет приблизительно одинакова, а в случае применения местного грунта (вместо баласта) также возможна экономия.

# Аналитическое выражение намагничивающего тока с учетом гистерезисной петли

Н. Ф. Байдак

Одесский индустриальный институт

**СУЩЕСТВУЮЩИЕ** в литературе методы аналитического определения намагничивающего тока<sup>1</sup> основываются только на начальной кривой намагничивания и дают поэтому грубое представление о его характере, что при больших индукциях влечет за собой заметную погрешность. Автор выводит уравнение гистерезисной петли для любой максимальной индукции и всех сортов стали, посредством которого аналитически выражается намагничивающий ток с составляющими гармониками.

Известно, что на практике можно получить начальную кривую намагничивания и петлю для ферромагнитных материалов только с помощью постоянного тока. Для переменного тока гистерезисную петлю можно найти косвенным методом, зная характер изменения тока, заснятого осциллографом, и закон изменения индукции. Полученная петля будет в большей или меньшей степени приближаться к истинной петле металла.

Изучая гистерезисную петлю (рис. 1), заснятую на постоянном токе, мы замечаем, что восходящая  $B$  и нисходящая  $C$  ветви в области средних и высоких индукций подчиняются той же закономерности, что и начальная кривая  $A$ , только их крутизна различна, т. е. изменяются коэффициенты пропорциональности между индукцией и  $W/\text{см}$ . Начальные углы наклона можно с достаточной точностью полагать равными (рис. 1):

$$\alpha_1 = \alpha_2 > \beta. \quad (1)$$

Так как восходящая ветвь  $B$  довольно близко подходит к  $A$ , можно считать, что в их уравнениях коэффициенты при высших степенях индукции будут одинаковы. Кроме того, мы воспользуемся еще тем, что площадь петли пропорциональна потерям на гистерезис.

Базируясь на этих соображениях, можно, зная уравнение первоначальной кривой намагничивания, найти наиболее вероятную гистерезисную петлю, которую будем называть «эквивалентной петлей», а ее площадь должна быть равна площади истинной петли.

На рис. 2 представлены кривые намагничивания<sup>2</sup>  $B = f(aw)$  для союзной трансформаторной стали толщиной 0,5 и 0,35 мм. Исследование этих кривых позволило автору найти

коэффициенты и показатели степени уравнения<sup>3</sup>:

$$aw = aB + bB^x.$$

Для железа толщиной 0,5 мм —  $a = 0,4$ ,  $b = 0,35 \cdot 10^9$  и  $x = 9$  при толщине 0,35 мм —  $a = 0,4$ ,  $b = 0,43 \cdot 10^9$  и  $x = 9$ .

Кривые шлейфа выражаются подобного вида уравнениями, только они содержат еще постоянную составляющую, представляющую

ставящую  $\frac{aw}{\text{см}}$  от коэрцитивной силы.

Рассмотрим теперь две кривых  $A$ ,  $B$  (рис. 3), которые подчиняются закону

$$x = ay + by$$

и отличаются только коэффициентами, стоящими при  $y$  в первой степени:  $a_B < a_A$ , т. е. угол наклона касательной к кривой  $B$  больше угла наклона касательной к  $A$  ( $\alpha > \beta$ ). Эти кривые пересекаются между собой.

Для произвольного значения:  $y_1$

$$x_A = a_A y_1 + b_A y_1^x;$$

$$x_B = a_B y_1 + b_B y_1^x.$$

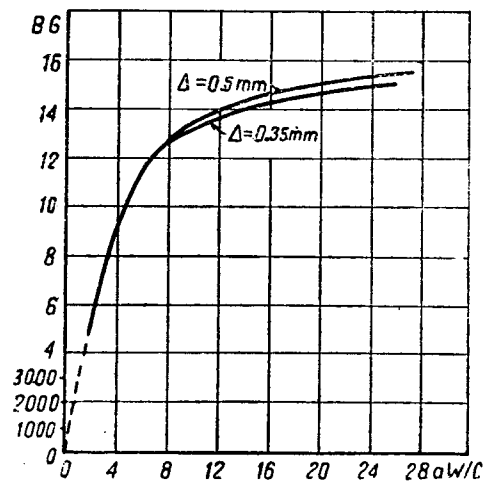


Рис. 2. Кривые намагничивания для стали ЕС4А

Так как

$$x_A = x'_A + x''_A;$$

$$x_B = x'_B + x''_B,$$

то

$$x''_A = x_B.$$

Присматриваясь к рис. 3, видим, что кривая  $B$  очень близко подходит к  $A$  и напоминает нам восходящую ветвь гистерезисной петли, а кривая  $A$  — начальную кривую намагничивания. При исследовании ряда гистерезисных шлейфов выяснилось, что восходящая ветвь действительно очень близко подходит к закону изменения кривой  $B$  рис. 3.

Таким образом, если положить, что коэффициент  $b_1$  и показатель  $x$  для кривой  $B$  те же, что и для  $A$ , то, чтобы записать уравнения для  $B$ , нужно лишь определить коэффициент  $a_1$  и свободный член  $c$ .

Далее, мы выше приняли, что наклоны восходящей и нисходящей кривых ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ) одинаковы. Иначе говоря,  $a_1 = a_2$ . Следовательно, кривая  $C$  отличается от  $B$  лишь коэффициентом  $b_2$ . В результате аналитическое определение петли

<sup>3</sup> К выражению такого вида впервые пришел Bergtold (см. сноску 1).

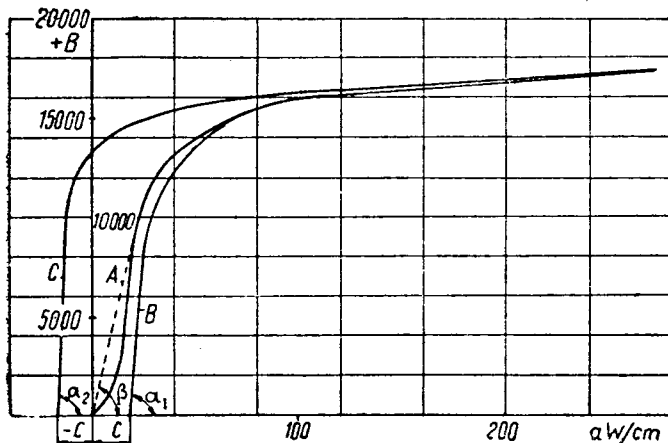


Рис. 1. Петля гистерезиса эталонного образца



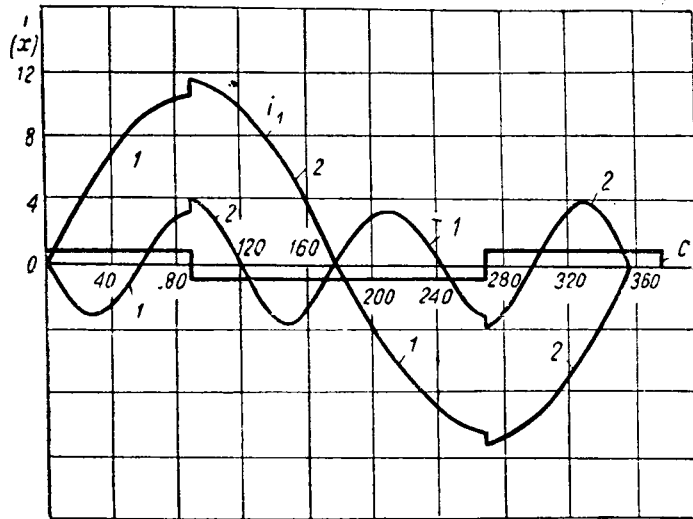


Рис. 6. Высшие гармонические намагничивания тока и постоянная составляющая

Разность этих амплитуд

$$\Delta I_{mn} = I'_{mn} - I''_{mn} = k_n B_m^x (b_2 - b); \quad (22)$$

или так как  $B_m^x (b_2 - b) = 2c$ ,

то

$$\Delta I_{mn} = 2ck_n. \quad (23)$$

Из (23) следует, что разность амплитуд прямо пропорциональна коэрцитивным ампервиткам и коэффициенту  $k_n$ , зависящему от загиба первоначальной кривой намагничивания.

На рис. 6 представлены первая и третья гармоники намагничивающего тока. Скачки для подобно изображенным на рисунке второй и третьей компонент наблюдаются в точке максимума и остальных гармоник намагничивающего тока. Величина скачка для любой гармоники определяется уравнением (23). Очевидно, результирующий ток не будет скачкообразным. Переход в максимуме будет плавным (рис. 7) благодаря наличию постоянной составляющей  $C$ , которая изменяет свой знак в фазе с э. д. с., индуктируемой в аппарате.

Таким образом реальный намагничивающий ток содержит активную компоненту, идущую на покрытие потерь гистерезиса. Мощность постоянной составляющей  $C$  и определяет собой, как увидим ниже, потери на гистерезис. Активная составляющая тока, соответствующая потерям от гистерезиса, определяется коэрцитивной компонентой  $c$ . Если мы заменим скачкообразные гармоники тока на эквивалентные синусоиды, то получим идеальные эквивалентные гармоники намагничивающего тока. Амплитуда отдельных гармоник идеального намагничивающего тока:

$$I_{mn} = \sqrt{\frac{I'^2_{mn} + I''^2_{mn}}{2}}. \quad (24)$$

Эффективное значение эквивалентной синусоиды идеального намагничивающего тока

$$I_\mu = \sqrt{\frac{\sum I_{mn}^2}{2}}. \quad (25)$$

Для  $n$ -й гармоники имеется своя кривая  $k_n = f(x)$ , зная, легко найти ( $k_n$ ).

Баланс потерь на гистерезис. Найдем мощность компоненты  $C$ . Она совпадает по фазе с э. д. с. Поэтому

$$P_c = -e c \frac{l}{w}.$$

$$-e = E_m \cos \omega t.$$

Следовательно,

$$P_c = \frac{2}{\pi} \frac{l}{w} c E_m,$$

где

$$E_m = 2\pi f w B_m Q \cdot 10^{-5}.$$

Подставляя в выражение для  $P_c E_m$  и  $c$  [формула (1) после преобразований] получим:

$$P_c = \frac{x+1}{x} P_h.$$

Как видно, мощность коэрцитивной компоненты намагничивающего тока несколько превышает мощность потерь гистерезиса. Но суммарная мощность намагничивающего тока равна мощности потерь на гистерезис. Так как  $P_c > P_h$ , очевидно, мощность второй и третьей компонент тока отрицательна, как в этом легко убедиться из рис. 6, — четверть волн неодинаковы.

**Пример.** Для простоты положим  $\frac{w}{l} = 1$ , тогда  $i' = i$ . Трансформаторной стали толщиной 0,5 (рис. 2)  $a = b = 0,35 \cdot 10^{-9}$ ,  $x = 9$ . Индукцию в магнитопроводе примем  $B_m = 14,5$  кГ. Удельные потери на гистерезис  $P_h \approx c_h B_m^2$ . Для выбранной трансформаторной стали и частоты  $f = 50$   $c_h = 0,1125$ . Тогда  $p_h = c_h B_m^2 = 0,1125 \cdot 14,5^2 = 23,6 \frac{\text{Вт}}{\text{дм}^3}$ . По уравнению (3):

$$c = \frac{p_h (x+1)}{2x B_m} = \frac{23,6 (9+1)}{2 \cdot 9 \cdot 14,5} = 0,905.$$

Согласно (14)

$$a_1 = a - \frac{c}{B_m} = 0,4 - \frac{0,905}{14,5} = 0,3375,$$

а из (15):

$$b_2 = b + \frac{2c}{B_m^x} = 0,35 \cdot 10^{-9} + \frac{20,905}{14,5^9} = 0,414 \cdot 10^{-9}.$$

Амплитуды отдельных гармоник второй и третьей компонент [формулы (21), (22)]:

$$I'_{m_1} = 10,3, \quad I'_{m_3} = 3,26, \quad I'_{m_5} = 1,37, \quad I'_{m_7} = 0,348,$$

$$I'_{m_9} = 0,0487 \text{ А.}$$

$$I''_{m_1} = 11,2, \quad I''_{m_3} = 3,87, \quad I''_{m_5} = 1,65,$$

$$I''_{m_7} = 0,413 \text{ и } I''_{m_9} = 0,0578 \text{ А.}$$

По уравнению (24) амплитуды отдельных гармоник

$$I_{m_1} = 10,75, \quad I_{m_3} = 3,58, \quad I_{m_5} = 1,515,$$

$$I_{m_7} = 0,382 \text{ и } I_{m_9} = 0,0535 \text{ А.}$$

Намагничивающий ток, уравнение (25):

$$I_\mu = \sqrt{\frac{\sum I_{mn}^2}{2}} = 8,1 \text{ А.}$$

Приведенные на рис. 6 кривые первой и третьей гармоник тока и намагничивающий ток рис. 7 построены на основе данных этого примера.

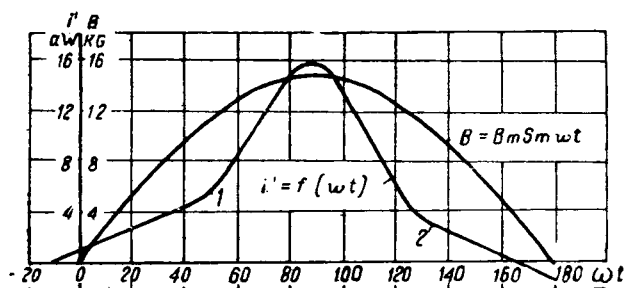


Рис. 7. Намагничивающий ток —  $i = f(\omega t)$ ;  $B = f(\omega t)$

Наименование гармоник тока	$I_{m_1}$	$I_{m_3}$	$I_{m_5}$	$I_{m_7}$	$I_{m_9}$
С учетом петли гистерезиса . . . . .	10,75	3,58	1,515	0,382	0,0535
Без учета петли . . . . .	10,65	3,26	1,37	0,348	0,0487
Разница в % . . . . .	0,94	9,82	10,6	9,78	9,85



Чтобы иметь представление, в какой мере уточняется расчет результирующего размагничивающего тока и его гармонических, в таблице сопоставлены расчеты размагничивающего тока с учетом петли гистерезиса и без учета ее, исходя только из начальной кривой намагничивания. Исходные данные взяты из вышеприведенного примера.

При рассмотрении таблицы видно, что результирующий ток с учетом петли гистерезиса получается несколько выше (на 1,88%). Заметная разница получается между высшими гармоническими (в среднем 10%). При более высоких, чем в примере, индукциях эта разница, несомненно, особенно для высших гармонических тока будет больше\*. Следовательно, расчет намагничивающего тока с учетом гистерезисной петли по вышеизложенному методу дает возможность более точно определить как высшие гармонические так и результирующий намагничивающий ток. В случае неоднородного магнитопровода его необходимо разбить на участки и для каждого участка магнитной цепи определять намагничивающий ток как для однородной магнитной цепи.

\*С ухудшением качества стали, очевидно, разница будет еще более заметной.

### Литература

1. Проф. Г. Н. Петров. Трансформаторы, 1934, стр. 183, § 60.
2. F. Bergtold. Über die Einzelwellen des Magnetisierungsstromes, ETZ, 1928, 1847.
3. G. Grobe. Ein analytische Ausdruck für die Histeresischleife, ETZ, H. 203, 1934.
4. Launence. A Theoretical Expression for the Magnetising curve of the Machine, Met. Gaz. № 273, 1936.
5. M. Deri. Eine neue Formel für die Magnetisierungskurve ETZ, H. 218, 1928.
6. H. Sequenz. Beiträge zur Gleichung der Hysteresis-schleife, Arch. El. H. 29, 1935, S. 387.

## Определение потерь синхронного генератора методом выбега

И. А. Сыромятников  
Баку, Азэнерго

АВТОР ПРЕДЛОЖИЛ использовать для определения постоянной опыт разбега генератора при сбросе нагрузки. Этот метод был применен электроцехом Оргрэса при испытании генераторов и показал свою полную пригодность. Из уравнения динамики следует:

$$P_T - P_n = g\omega J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где  $P_T$  — мощность турбины на валу;  $P_n$  — мощность потерь  $\xi$  — ускорение силы тяжести;  $\omega$  — угловая скорость;  $J$  — момент инерции;  $t$  — время.

Заменяя

$$J = \frac{GD^2}{4g}; \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}; \quad \frac{\omega}{\omega_n} = v;$$

$$\frac{P_m}{P_n} = p_m; \quad \frac{P_n}{P_n} = p_n,$$

получим:

$$dt = T_a \frac{v dv}{P_T - P_n}, \quad (2)$$

где  $T_a = \frac{GD^2 \pi^2}{60^2} \frac{n^2}{P_n}$  — механическая постоянная времени.

Разность  $P_T - P_n$  можно представить как степенную функцию числа оборотов:

$$P_T - P_n = p_0 v^a.$$

Тогда

$$dt = \frac{T_a}{p_0} v^{1-a} dv. \quad (3)$$

Интегрирование дает

$$p_0 = \frac{T_a}{t} \frac{v_1^{2-a} - v_2^{2-a}}{2-a}. \quad (4)$$

На рис. 1 даны кривые разбега и выбега для разных значений  $a$ .

Из уравнения (3) следует, что при номинальных оборотах ( $v=1$ )

$$p_0 = p_n \frac{T_a}{\left(\frac{dt}{dv}\right)_{v=1}}. \quad (5)$$

Таким образом для определения мощности  $p_0$  необходимо определить тангенс угла наклона касательной кривой выбега или разбега.

Чтобы исключить необходимость в этих кривых, можно применить следующий метод.

Если измерить при выбеге  $\Delta t$  время изменения числа оборотов генератора от  $1 + \frac{\Delta v}{2}$  до  $1 - \frac{\Delta v}{2}$  (соответственно

при разбеге от  $1 - \frac{\Delta v}{2}$  до  $1 + \frac{\Delta v}{2}$ ), то отношение  $\frac{\Delta t}{\Delta v}$  дает с практической степенью точности величину  $\left(\frac{dt}{dv}\right)_{v=1}$ .

Например, для  $\frac{\Delta v}{2} = 0,025$  рис. 1 дает  $\frac{tp_0}{T_a} = 0,05$ . По формуле (4) при  $a=3$

$$\frac{tp_0}{T_a} = \frac{v_1^{2-a} - v_2^{2-a}}{2-a} = \frac{1,025^{-1} - 0,975^{-1}}{-1} = 0,050035.$$

Погрешность

$$\frac{0,050035 - 0,050000}{0,050000} 100 = 0,07\%.$$

При меньших значениях  $a$  погрешность будет еще меньше. Из опыта разбега имеем:

$$p_0 = p_{сбр} = \frac{P_{сбр}}{P_n} = \frac{T_a}{\left(\frac{\Delta t}{\Delta v}\right)_{сбр}}.$$

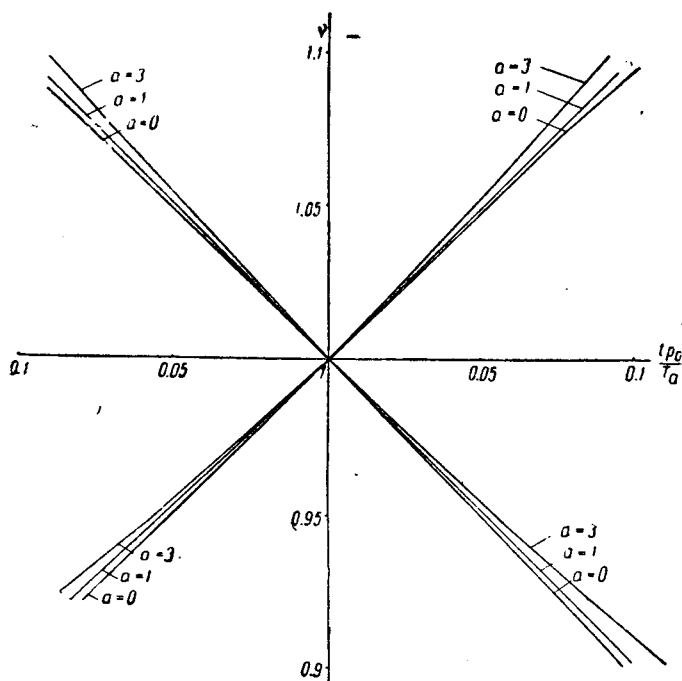


Рис. 1

Подставляя из этого соотношения значения  $T_a$  в формулу (5), находим:

$$P_0 = P_n = \frac{P_n}{P_n} = \frac{\left(\frac{\Delta t}{\Delta v}\right)_{сбр} P_{сбр}}{P_n \left(\frac{\Delta t}{\Delta v}\right)_n},$$

откуда

$$P_n = P_{сбр} = \frac{P_{сбр} \left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right)_{сбр}}{\left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right)_n}.$$

При  $\Delta n_{сбр} = \Delta n_n$

$$P_n = P_{сбр} \frac{(\Delta t)_{сбр}}{(\Delta t)_n}.$$

Опыт разбега производится при сбросе нагрузки около 10% от номинальной. Генератор выделяется на отдельный фидер, и по точным приборам, включенным на точные трансформаторы тока и напряжения, измеряется нагрузка при номинальных оборотах. Затем число оборотов снижается до 0,975 от номинального, выключается масляник и замеряется секундомером время, за которое генератор достигает числа оборотов, равного 1,025 номинального. После этого закрывают пар скоростным автоматом. При этом регулирование турбины должно быть заклинено.

В момент сброса нагрузки суммарные потери уменьшаются на потери в меди статора. Потери в меди пропорциональны квадрату тока, поэтому при нагрузке 10% потери будут составлять всего лишь 1% от потерь в меди при номинальном токе. По отношению к общим потерям это будет еще меньше, так как потери в меди при номинальном токе составляют примерно около 25% всех потерь.

Далее в момент сброса вследствие исчезновения реакции якоря ток возбуждения, стремясь поддержать магнитный поток генератора неизменным, уменьшится. Затем с постоянной времени цепи возбуждения при разомкнутой обмотке статора ток начнет восстанавливаться по экспоненциальному закону до своего прежнего значения, если не учитывать изменения оборотов генератора.

Таким образом потери возбуждения в момент сброса уменьшатся.

Ток возбуждения при нагрузке 10% составляет 1,1—1,15 от тока холостого хода. Если принять в первом приближении, что при сбросе нагрузки ток ротора изменится до тока холостого хода, то потери уменьшатся пропорционально квадрату тока, т. е. они будут равны  $0,825 \div 0,76$  потерь до сброса нагрузки. Абсолютная величина потерь на возбуждение при номинальной нагрузке составляет всего лишь около 10%, поэтому при нагрузке 10% они будут равны лишь 2—3%.

Потери в железе в момент сброса нагрузки останутся неизменными.

Следовательно, изменение потерь генератора в момент сброса нагрузки незначительно.

**Пример.** Генератор завода „Электросила“, тип Т $\frac{2270}{98}$ , 30 000 kVA, 6300  $\pm 5\%$  V, 3000 об/мин,  $\cos \varphi = 0,8$ .

Из заводского протокола испытания этого генератора известны отдельные потери при номинальной нагрузке:

Вентиляционные . . . . .	216 kW
Механические . . . . .	100 kW
В железе . . . . .	166 kW
Омические в статоре . . . .	54 kW
Добавочные потери к. з. . .	141 kW
Потери на возбуждение . . .	72 kW

Всего . . . . . 749 kW

При нагрузке 100% (24 000 kW) определяем по диаграмме ток ротора 346 А. Электродвижущая сила статора 7000 V и для нагрузки 10% (2400 kW) при  $\cos \varphi = 0,8$  ток ротора 145 А, и э. д. с. статора 6370 V. При номинальной нагрузке температура обмотки ротора — 125°, статора — 110°.

При нагрузке 10% температуры этих обмоток соответственно будут — 55 и 67°.

По этим данным определяем потери при нагрузке 10%

$$P_n = 216 + 110 + 166 \left(\frac{6370}{7000}\right)^2 + (54 + 141) \cdot 0,1^2 \times \\ \times \frac{234,5 + 67}{234,5 + 110} + 72 \cdot \left(\frac{145}{346}\right)^2 \cdot \frac{234,5 + 55}{234,5 + 125} = 465,9 \text{ kW}.$$

Вместе с нагрузкой это составит

$$2400 + 465,9 = 2865,9 \text{ kW}.$$

В момент сброса потери на возбуждение уменьшатся

$$10,2 \left(\frac{126}{145}\right)^2 = 7,73 \text{ kW}.$$

Новое значение потерь будет 461,7 kW, новая суммарная мощность — 2861,7 kW.

Таким образом уменьшение составит всего лишь

$$\frac{2865,9 - 2861,7}{2865,9} \cdot 100 = 0,15\%.$$

Такой погрешностью можно, конечно, пренебречь.

В первый момент после сброса нагрузки напряжение на клеммах генератора внезапно возрастет на величину вырванной потери напряжения в активном и реактивном сопротивлении. При нагрузке 10% эта потеря напряжения составляет всего лишь 1%. Вызванный исчезновением реакции якоря рост напряжения происходит постепенно, по экспоненциальному закону с постоянной времени цепи возбуждения при холостом ходе. Эта постоянная времени при разомкнутой обмотке статора составляет для турбогенераторов 7—10 sec.

В случае турбогенераторов при сбросе нагрузки 10% от номинальной время разбега до числа оборотов, превышающее номинальное на 2,5—5%, будет 3,5—7 sec.

Как уже указывалось выше, при нагрузке 10% ток возбуждения равен около 1,1—1,15 тока холостого хода. По характеристике холостого хода этому значению соответствует потеря напряжения в 10% от номинального.

Таким образом величина перенапряжения при времени разбега  $t = 7$  sec составит всего лишь 1,08 от номинального напряжения.

Если принять в самом худшем случае, что напряжение изменяется в зависимости от оборотов по закону третьей степени, то величина перенапряжения будет 1,08·1,26. Такое напряжение генератор безболезненно выдержит, так как при сбросе полной нагрузки перенапряжение составляет примерно 1,5 при повышении оборотов до 1,05 номинального.

# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ

## В КАПИТАЛИСТИЧЕСКИХ СТРАНАХ

### Электрификация и электростроительство фашистской Германии

Б. Л. Эрлихман  
Москва

Таблица 2\*

Группы потребителей	1930	1933	1935
Промышленность . . . . .	80,1	80,2	83
Транспорт . . . . .	5,6	6,1	5,1
Коммунально-бытовое потребление . .	11,8	11,8	10,1
Сельское хозяйство . . . . .	2,5	1,9	1,8
Всего . . . . .	100%	100%	100%

\* По данным W-ft und St. № 7, 1936, ETZ, 1933 и др.

роста электробаланса с соответствующим приростом потребления электроэнергии в промышленности<sup>2</sup> (в млн. MWh).

Таблица 3

Годы	1929	1933	1934	1935	1936
Суммарный прирост . . . . .	2,8	2,2	5,1	5,0	5,5
Прирост промышленного электропотребления . . . . .	2,3	2,1	4,4	4,5	4,9

Таким образом почти весь прирост электропотребления (80—90%) приходится на промышленность. Особенно сильно выросло электропотребление промышленности непосредственно военного значения. Для нужд электролиза и электропечей израсходовано<sup>3</sup> в 1929 г. около 3 млн. MWh, а в 1935 г. — уже 5,3 млн. MWh.

Из 386 MW прироста мощности фабрично-заводских станций в 1935 г. (по официальным данным) — несколько меньше половины падает на черную и цветную металлургию и химическую промышленность.

Рост электробаланса связан с увеличением за последние 5—6 лет производства алюминия в 3 раза, меди — почти в 2 раза и т. д.

Что касается покрытия электробаланса по видам энергоресурсов, то в последние годы имели место некоторый рост гидроэнергии (до 15—17% суммарного производства электроэнергии), стабилизация доли бурого угля (около 40%) и относительное снижение выработки станций на каменном угле. Это связано с ростом электроемких производств на базе гидроэнергии и стремлением к меньшей зависимости электроцентралей от дальнепривозного каменного угля.

Отчетные данные свидетельствуют также о даль-

СОВРЕМЕННОЕ развитие электрификации фашистской Германии, как и всего хозяйства этой страны, целиком подчинено задаче форсированной подготовки к большой войне и потребностям уже ведущихся германским агрессором войн. Известным законом Гитлера об энергоснабжении (декабрь 1935 г.) установлена военная организация энергетики страны.

Прирост электробаланса Германии за последние годы идет темпами, опережающими рост промышленной продукции, что свидетельствует о продолжающемся интенсивном процессе электрификации хозяйства страны (табл. 1 и рис. 1)<sup>1</sup>.

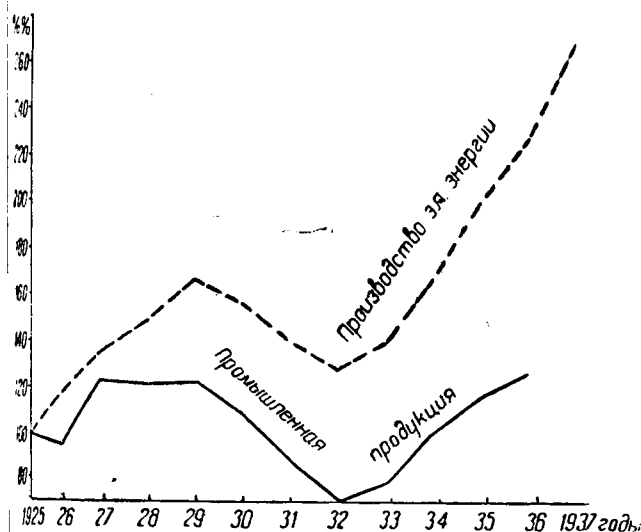


Рис. 1. Динамика индексов промышленной продукции и производства электроэнергии

Фашистские энергетики восхваляют прогрессивное значение электрификации в период гитлеровского господства для германского народа, ссылаясь на рост коммунально-бытового и сельскохозяйственного потребления электроэнергии. Между тем, фактическая динамика расходной части электробаланса (табл. 2) легко опровергает это демагогическое утверждение.

Еще более показательно сопоставление абсолютных цифр при-

Таблица 1

Годы	Выработка электроэнергии в млн. MWh
1925 . . . . .	18,3
1926 . . . . .	30,7
1927 . . . . .	23,5
1928 . . . . .	30,7
1929 (включ. Саар) . . . . .	37
1930 . . . . .	42,5
1931 . . . . .	около 50

<sup>1</sup> По данным Elektrizitätswirtschaft № 1, 1937, № 1 и 2, 1938, W-ft und St. № 7 и 22, 1936 и Annuaire St. de la Soc. des E. 1935/36.

<sup>2</sup> По данным St. Jahrb. d. D. R. и El. W. № 32, 1936.

<sup>3</sup> El. W. 1936, S. 446, RTA 1936, 15/IV.

нейшей централизации фашистского электрохозяйства и усилении позиций наиболее мощных капиталистических электрокомпаний.

На 7 крупнейших электросистем уже в 1929 г. приходилось около 27% всей мощности и около 30% всей выработки энергии электростанций Германии. В последующие годы доля этих систем продолжала возрастать.

Так, Рейнско-Вестфальская система за два последних года увеличила свой электробаланс на 45%, Электроверке — на 44%, MEW — на 41% и т. д., — что значительно превышает средние темпы роста электробаланса Германии. MEW присоединила к себе Поммеранскую систему, расширилось влияние Preag, Bewag и др.

Если докризисный период отмечен значительным ростом концентрации мощностей агрегатов и станций (агрегаты в 85 MW на станции Чорневиц), то нынешний этап электрификации свидетельствует о переходе, в основном, к средним мощностям станций и агрегатов.

Преимущественный рост промышленного электробаланса, централизация выработки энергии при частичной деконцентрации генерирующих мощностей, — таковы некоторые особенности электрификации последних лет.

Данные о росте мощности и размещении электростанций в последние годы в официальной фашистской статистике намеренно искажены (преуменьшены). Достаточно отметить, что рост мощности RWE за 1934/1935 г. составил 350 MW, тогда как материал о конкретных установках приведен в прессе лишь для 122 MW по всему Рейнскому району<sup>4</sup>. По станциям высокого давления данные приводятся в зашифрованном виде<sup>5</sup> (без указания названия станций). Разноречивы и путанный сведения о бездействующем резерве мощности и т. д.

Поэтому, приводимые ниже показатели по электростроительству явно неполны. Они достаточны, однако, для общих выводов о тенденциях строительства станций и сетей в последние годы.

В энергетической и военной фашистской печати подчеркивалось стратегически тяжелое положение Германии, с точки зрения энергоснабжения<sup>6</sup>. Именно этим объясняется стремление фашистов усилить электростроительство в большинстве районов прежде неплотного электроснабжения, связать все основные районы электропередачами, создать межрайонные резервы и надежное топливопитание и укрепить глубинные электропитающие районы.

В последние годы имели место возрастающие темпы ввода новой мощности электростанций (табл. 4). Если средний докризисный прирост мощности измерялся 6—9% в год, а в 1932—1933 г. он упал до отрицательной величины, то в 1934—1935 гг. прирост новой мощности достигает уже 4—5%, а в 1936—1937 гг. — 6—7%, т. е. приближается к докризисному уровню.

Наиболее значительно приращение установленной мощности по промышленным станциям. В то же время, выработка энергии интенсивнее возрастала по установкам общего пользования. По

Таблица 4

Динамика установленной мощности электростанций Германии за 1925—1937 г.\*

Г о д ы	Мощность станций в тысячах MW	То же в % (1925 г.—100%)
1925 . . . . .	8,7	100
1929 . . . . .	12,4	142,5
1932 . . . . .	12,9	148,5
1934 . . . . .	13,4	154
1935 ** . . . . .	14,2	163,5
1936 . . . . .	15,2	175
1937 . . . . .	около 16	около 185

\* Составлена по данным ETZ 1938, № 7.

\*\* Включая Саар.

росту электробаланса промышленные станции отстанут от общегерманского прироста, тогда как по электростроительству они опережают средние для всей Германии темпы увеличения мощности. Такая тенденция не имела места до кризиса и обусловлена строительством промышленных станций преимущественно как военно-резервных, «про запас».

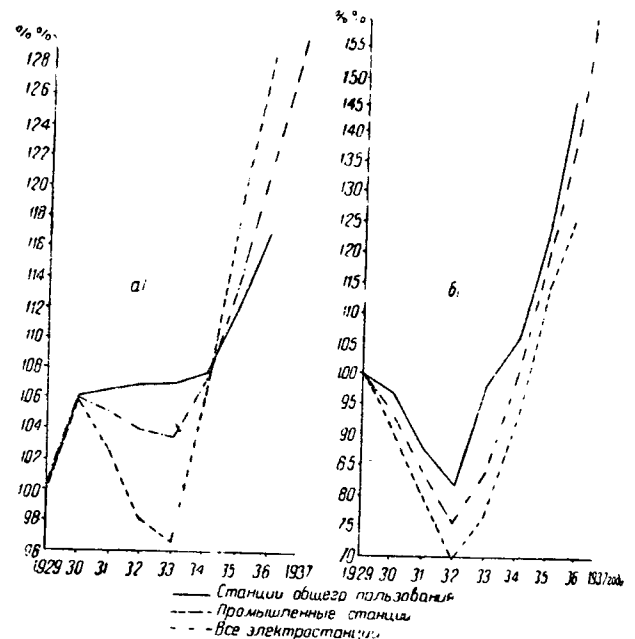


Рис. 2. б — динамика производства электроэнергии, а — динамика установленной мощности электростанций

Заметна тенденция к рассредоточению и деконцентрации электростроительства, пропагандируемая идеологами фашистского электрохозяйства. В качестве максимальной мощности станций выдвинута мощность в 150 MW, тогда как до кризиса были построены станции в 440 и 500 MW.

Все значительные промстанции («leistungsfähige Zechenkraftwerke») включаются в сеть общего пользования. Представитель фашистского руководства энергохозяйством Креке специально призывает к созданию двухсторонней электрической

<sup>4</sup> El. W. № 4, 1936.

<sup>5</sup> Ср. El. W., 1937, 25/I и VGI № 340, 1935.

<sup>6</sup> Ср. статьи Warrelmann, El. W., 1935, S. 681, майора W. Hedler, RTA 1936, 12/XII, Die Wärme № 14, 1937 и др.

связи промстанций с сетью общего пользования<sup>7</sup> и к построению сети трех напряжений: а) межрайонных передач в 100 и 220 kV («zwischen bezirklichen»), б) распределительной сети среднего — 30—80 kV («Orts-Mittelsspannung») со включением в нее, через повысительные подстанции, крупных силовых установок промышленности и в) сети низкого напряжения («Orts-Niederspannung»). Мероприятия указанного порядка обозначаются термином «Verbundwirtschaft».

Сдвиги в электростроительстве по районам особенно ярко иллюстрируют основные направления военной подготовки электрохозяйства.

**Берлин-Бранденбург.** Несмотря на значительные резервные мощности до кризиса (по Bewag — 275 MW, по Rewag — 350 MW, MEW — 60 MW и т. д.), продолжалось сооружение электроцентралей. В последние годы вступила гидроаккумуляторная станция Бобер (67 MW), ряд шахтных установок, турбины на машиностроительных заводах Сименса, Борзига (12,5 MW) и др. Большое значение с точки зрения надежности энергоснабжения придается строительству мелких тэц в Берлине. Центр тяжести в строительстве последних лет — усиление энергоснабжения северной части района и проведение высоковольтных линий к северу Германии (Финкенгерде — Ландсберг, Берлин — Гюстров) и др.

Параллельно с сооружением электростанций происходило строительство 220-kV линий, связывающих Берлин через Магдебург-Гарбке с западом Германии (Лерте — Ганновер). Линии эти являются резервными с возможностью пропуска по каждой цепи 150—200 MW и имеют ярко выраженный военный характер<sup>8</sup>.

**Бавария** — важнейший район избыточной гидроэнергии, развитой электрохимии и электрифицированных ж. д. Строительство гэс на Инне в последние годы вызвано потребностью в энергии алюминевых, карбид-кальциевых и других предприятий военного значения. Вступили в строй высоковольтные линии для питания электрифицированных ж. д. и соединения с сетью Бадена (Ашаффенбург), Вюртемберга, Саксонии и Центральной Германии (Гоф и Герластрион). Протяженность 100-kV сети достигла в 1935 г. 1400 km, а мощность подстанций — 543 MVA. Суммарная мощность вступивших в последние годы гэс равна 128 MW.

Электрификация ж. д. Германии осуществляется в последние годы преимущественно в Баварии. Протяженность электрических ж. д. Баварии и Вюртемберга возросла с 367 km в 1925 г. до 728 km в 1934 г. (т. е.  $\frac{1}{3}$  общегерманской). Расширена 100-kV сеть, питающая новые участки электрифицированных линий.

**Рейнско-Вестфальский район.** В последние два года шло интенсивное строительство станций и сетей как по RWE (рост установленной мощно-

сти за 1934—1935 гг. на 28%), так и по промстанциям. По данным Кепхена<sup>9</sup>, RWE увеличила отдачу только по одному алюминиевому заводу Эрфтверк с 13 до 450 тыс. MWh за 1933—1935 гг., что в свою очередь стимулировало новый ввод мощности. Рост отпуска с шин по той же системе за 1936/1937 г. составил 700 тыс. MWh в основном за счет промышленного электропотребления.

Усилилось также строительство высоковольтных воздушных и кабельных линий для питания алюминиевых заводов (125-kV кабель, 110-kV линия Нейенбург — Рейнфельден).

Помимо создания северного многоугольника 220-kV линий (Браувейлер-Иббенбюрен), завершена высоковольтная связь с швейцарскими гидроустановками, включаемыми в сеть RWE в качестве резерва. Наконец, соединение крайних западных точек Саара с 220-kV костяком линий и далее через Керстельбах — Ганновер — Магдебург с Берлином имеет целью обеспечение широтной высоковольтной резервной магистрали для всей Германии.

Из гидростанций Рейнско-Вестфальского района и Бадена, сооруженных или расширенных в 1929—1936 гг., отметим расширение гидроаккумуляторной станции Гердеке (до 140 MW), Шлюхзеверк (152 MW), гидроаккумуляторную гэс Эйхгольц (26 MW), законченную строительством в 1933 г. станцию Альбрук-Доггерн на швейцарской границе.

Значительные мощности вступили также по паровым станциям. В 1935 г. установлена турбина высокого давления в 50 MW на одной из западно-немецких установок. Установлена турбина в 20 MW в Мангейме, в 12 MW (120 at) в Вердене. Начато в 1935 г. расширение ст. Шольвен (на 46 MW) для питания химических предприятий. На трубопрокатном заводе в Гельзенкирхене смонтирована новая турбина в 20 MW, реконструирована тэц Крефельд для питания производства искусственного шелка и т. д. Суммарный прирост мощности электростанций района составил за 1935—1937 гг. около 800 MW<sup>10</sup>.

Ошибочно полагать, что вследствие перемещения части нового промстроительства в Центральную Германию Рейнско-Вестфальский район теряет свое относительное значение. Он охватывает крупнейшие энергоузлы, и в последние годы здесь сделаны дальнейшие усилия для объединения крупных силовых установок промышленности с высоковольтной сетью электросистем и усиления пограничного долготного косяка 220-kV линий.

**Саксен-Ангальт.** Центральное положение района в транспортных связях Германии и его тыловое значение способствовали превращению района в последние годы в центральный энергетический узел страны. Электростроительство направлено, главным образом, для обеспечения: 1) нужд новых предприятий электрохимии (Микрамаг в 68 MW для электроснабжения цинкового производства, промышленные станции); 2) электрифицируемой ж.-д. связи Мюнхен — Галле — Берлин (станция Мульдштейн и др.) и 3) для высоковольтной связи с другими районами и создания опорных пунктов

<sup>7</sup> ETZ 1937, 12/VIII, El. W. № 25, 1937. Ср. также статьи Schaly, Schleicher и др. о включении крупных промстанций в сеть общего пользования, El. W. № 19 и 21, 1937.

<sup>8</sup> Для линий в 220 kV применен алюминиевый провод сечением в 450 mm<sup>2</sup>. Неэкономичность линий, которые несут, якобы, для выпуска с арской энергии, отмечена в немецкой энергетике: «Die Übernahme... der Saarenergie... die deutsche El. W.-ft vom wirtschaftlichen Standpunkt... nur von diesem aus betrachtet ein Opfer bedeuten». El. W. 1935, S. 107.

<sup>9</sup> A. Koepchen, Die Aufgaben der deutschen, El. W., 1936.

<sup>10</sup> ETZ № 7, 1938.

220-kV линий (Блейлох—40 MW, Гарбке—30 MW). В последнее время район связан электропередачами также и с Северной Германией (через Реттмер). Установленная мощность станций увеличилась за 2 последних года на 130 MW.

**Саксония.** Заметно перемещение электростроительства от границы к северу района. В дополнение к пограничной 110-kV линии, связывающей Хемниц с Дрезденом, создана вторая северная параллельная связь с возможным продолжением к Средней Германии (Гессниц). Станция Бэлен расширена с 130 до 210 MW, Нидерварта — до 70. Общий рост новых мощностей за 1929—1936 гг. — около 470 MW. Центр района связан линиями в 110 kV с буроугольными станциями Электроверке (Лаухгаммер — Риза).

**Силезия.** Электростроительство в районе было сравнительно небольшим (150 MW прироста за 1929—1936 гг.) и осуществлялось, главным образом, по промстанциям. Намеченный ранее проект экспорта энергии на силезском каменном угле и штыбе в Центральную Германию оставлен. Заметна тенденция к созданию замкнутого электробаланса района при одновременном усилении высоковольтной связи с Центральной Германией в качестве резерва. Все указанные моменты определяются стратегическим положением района, вклиненного между Польшей и Чехословакией.

В районе усилена высоковольтная сеть путем проведения, помимо продольной связи в 100 kV, поперечных линий (Чехниц-Мольке) и линий на северо-западе Силезии.

Электроснабжение Вюртемберга в значительной степени обслуживает потребности предприятий военного значения. В последнее время здесь намечена электрическая связь Штуттгарт — Ульм и Аугсбург. Наряду с реконструкцией водных путей Некара идет и энергетическое использование многочисленных плотин<sup>11</sup>.

В Нижне-Саксонском и северо-западном районах в последние годы реконструирован ряд старых электростанций (рост мощности по Брауншвейгу на 13,5 MW, Кижо — 12,5 MW и др.). Для питания этих районов прежде неплотного электроснабжения имеют существенное значение 220-kV линия Лерте — Гарбке, 60-kV линия Унтервезер — Вульдсдорф на юг и т. д.

В Поммерании имело место строительство 30—100-kV линий, связывающих район с Берлином и Средней Германией (Берлин — Гюстров — Штральзунд, Финкенгерд — Пезевальк). Проведены и широтные линии на северо-восточном побережье (Анклам — Швинемюнде и Бельгард — Шивельбейн).

Реконструирована паровая централь Штеттина. Проложен 100-kV кабель, сооружена опытная подводная гЭС Персанте.

В Восточной Пруссии реконструкции подверглись северо-восточная станция Гумбинен, Эльбинг и др. Проведена 60-kV линия в Южном кольце района (Альштейн — Растенберг).

\*\*\*

Электростроительство истекшего 1937 г. в рассматриваемых районах еще более скудно отражено в энергетической печати. Прирост установ-

ленной мощности станций в 1937 г. был примерно таким же, как и в предыдущем году. Около 2/3 общего роста мощности дают промышленные электростанции, что подтверждает сделанные выше выводы.

Можно отметить следующие объекты, запроектированные или находившиеся в строительстве в 1937 г.: электростанция в 100 MW в Рурском районе, проектируемая для энергоснабжения производства искусственного бензина; расширение главной станции VEW на 50% в течение 1938 г. (нынешняя мощность ее 120 MW); проектируемое сооружение гЭС Enn (Steirische Wasserwerk Graz) с электропроизводством (по двум вариантам) от 180 до 450 тыс. MWh в год; проектируемое сооружение гЭС на Арген (Вюртемберг), а также между Ашаффенбургом и Вюрцбургом (на Майне).

Намечена дальнейшая реконструкция тепловой станции Герлиц, расширенной в 1935 г. (Силезия). На ст. Мюленбург (Восточная Пруссия) устанавливается новый агрегат.

Сооружается станция у Bleckenstedt для электроснабжения нового металлургического завода Salzgittergebiet<sup>12</sup>. На ст. Шольвен, снабжающей энергией химические предприятия, находится в строительстве котлы высокого давления и 2 турбины на 25 MW и т. д.

Продолжается экспансия RWE в направлении строительства ряда швейцарских установок (общей мощностью 345 тыс. л. с.) со включением их в высоковольтную сеть Германии<sup>13</sup>.

В строительстве тепловых станций последних лет растет удельный вес установок высокого давления. Около 745 MW приходится на турбины с давлением выше 60 ат. К началу прошлого года в эксплуатации и строительстве находилось 60 котлов на давление в 100 и выше атмосфер.

\*\*\*

Непосредственно до кризиса, т. е. в период наибольшего использования мощности электростанций, почти все системы и промстановки имели значительные резервы мощностей. Так, отношение установленной мощности к пиковой составляло: по Берлинской системе — 1,94, Электроверке — 1,4, MEW — около 1,6 и т. д. Тот же показатель по станциям общего пользования в среднем равнялся около 1,5. Для промстанций средний коэффициент был, естественно, гораздо выше.

За прошедшие от низшей точки кризиса годы выросли как выработка энергии электростанциями, так и ввод новых мощностей. В результате среднее число часов использования по всем станциям не намного превышало докризисный уровень (2800 ч в 1936 г. против 2470 в 1929 г.).

По данным W. u. St.<sup>14</sup> сумма максимумов электросистем составляла в 1935 г. около 65% установленной мощности. Если иметь в виду, что величина резервной мощности по промышленным станциям превышает резерв станций общего пользования, то от 1/4 до 1/3 установленной мощности всех станций Германии следует определять как постоянный резерв. Следовательно, интенсив-

<sup>12</sup> El. W. № 34, 1937.

<sup>13</sup> Материал о новом строительстве — по данным El. W. 1935, 25/XI, 15/VIII; VDI 1937, RTA № 45, 1936, а также El. W. 1938, 15.

<sup>14</sup> № 22, 1936. Ср. также El. W. № 32, 1936. W. Rohrbach Betriebsstatistik der Wirtschaftsgruppe, El. V. f. d. I. 1935, та же величина для 1934 г. составляла 61%, для 1932 г. — 51%.

<sup>11</sup> По данным Civil Engineering (1937, p. 244), среднегодовая мощность уже построенных гЭС — 44 MW.

Таблица 5

Сводка основных электростанций, сооруженных или находившихся в строительстве в Германии за 1929—1936 гг.

Название района	Название станции	Мощность MW	Тип станции	Характеристика и год строительства
Берлин-Бранденбург	Бобер	67	гидроаккумуляторная	Станция общего пользования, 1933—1937 гг.
"	Вест (г. Берлин)	228	тепловая на каменном рурском угле	Станция общего пользования для покрытия пиков и резерва, 1929—1932 гг.
Саксен-Ангальт	Микрамаг	68	тепловая на каменном угле	Для обслуживания химвпредприятий военного значения, 1932—1934 гг.
"	Гарбке	30	тепловая на каменном угле	1930—1934 гг.
"	Блейлох	40	гидростанция с гидроаккумулятором	Окончена в 1934/1935 г.
Саксония	Болен	210	тепловая на буром угле	Для обслуживания химпромышленности, 1929—1935 гг. В последние годы произведена реконструкция котельной
"	Нидерварта	70	гидроаккумуляторная	1930—1931 гг.
Бавария	Швандорф	60	тепловая	Станция общего пользования, 1930—1933 гг.
"	Иннверк (Тоттинг)	70	гидростанция	Расширение в 1936—1937 г. для питания алюминиевых предприятий
Рейнско-Вестфальский район	Гердеке	140	гидроаккумуляторная	Принадлежит RWE, 1929 г.
"	Альбрук Доггерн	100	гидростанция	Для питания южной части высоковольтной сети RWE, 1929—1933 гг.
"	Шольвен	46	тепловая на каменном угле	Для питания химвпредприятий. Расширение старой установки и переход на высокое давление в 1935—1937 гг. 2 турбины—25 MW в строительстве
"	Гельзенкирхен	20	тепловая	Для электроснабжения трубопрокатного завода. Турбина MAN на 160 t/h, 1936 г.
"	—	50	тепловая	Радиальная турбина CCB для электроснабжения промпредприятий
Силезия	Глейвитц	27	тепловая на каменном угле	Станция общего пользования. Расширена в 1935—1936 гг.
Баден	Маннгейм	32	тепловая	Расширение за счет установки турбины и котла высокого давления 112 ат в дополнение к установленной турбине в 12 MW в 1934—1935 гг.
"	Шлуксее Гаузерн	126	гидростанция	1929—1930 гг.
"	Эйхгольц	26	гидроаккумуляторная	1933—1934 гг.
Тессен	Вальдек	115	гидроаккумуляторная	Станция общего пользования, 1929—1933 гг.
Восточная Пруссия	Гумбинен	13	тепловая	Станция общего пользования, 1934—1935 г.
Нидерсаксен и Северо-запад	Ганновер	16	тепловая	Турбина Юнгстрема, 1935 г.
"	Гамбург	22	тепловая	Турбина 110 ат и 2 котла в 135 ат на станции общего пользования, 1935 г.

ное электростроительство последних лет не было вызвано снижением аварийного резерва, а напротив, само увеличивало размер последнего.

Бездействующий резерв электростанций Германии можно оценить в настоящее время цифрой порядка 4 тыс. MW.

Чтобы выявить степень мобильности нынешнего резерва мощностей, который мы определяем около 4 тыс. MW, следует оценить возможность двухсторонней связи сети общего пользования промстанциями, а также внутри- и межрайонной передачи энергии.

Двухсторонняя связь промстанций с сетями общего пользования позволяет использовать сосредоточенный у них резерв мощности. Высоковольтные сети дают возможность выпустить резервную мощность и энергию с запада к центру, из Средней Германии в Северную и т. д.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> В 1934 г. около 125 MW передавалось от северных электростанций RWE в Южную Германию. В многоводные годы передача идет в обратном направлении.

Наличие значительной доли амортизированных установок несколько снижает общий резерв. Однако за годы кризиса часть устарелого оборудования была демонтирована (около 250 MW). По данным официальной статистики постоянно бездействующий (законсервированный) резерв составляет около 1,3 тыс. MW. Если принять эту, несомненно преувеличенную цифру, то все же около 3 тыс. MW представляют собой вполне мобильный генерирующий аппарат.

Анализ эксплуатации оборудования по крупным системам также вскрывает мобильность бездействующей ныне мощности. В качестве кратковременного резерва (от получаса до 2—3 часов) могут быть использованы гидроаккумуляторы, число которых значительно возросло в большинстве районов (Нидерварта, Вальдек, Бобер, Эйхгольц, Гердеке и др.).

В Берлине бездействуют агрегаты в 34 MW на передовой станции Вест, в резерве находится по 1—2 агрегата (80—85 MW) на мощных станциях Клингенберг, Чорневиц и т. д.



Заемствованная из E. W.<sup>16</sup> диаграмма (рис. 3) свидетельствует о том, что в резерве находятся как старые, так и недавно пущенные агрегаты. Использование турбин установки 1933—1935 гг. не слишком разнится друг от друга (50—65%).

Приведенные материалы показывают, что мобилизация бездействующей мощности электростанций может генерировать дополнительно до 10 млн. MWh в год. Кроме того поднятие числа часов использования максимума работающей мощности на каждые сто часов может дать прирост электропроизводства почти на 1 млн. MWh. Число часов использования установленной мощности, достигнутое в 1937 г., — около 3000 h.

Приведенные данные о росте высоковольтных сетей, в частности, возможности передачи по каждой 220-kV цепи с запада к Центру около 150—200 MW, резерв в 5—6 линиях передачи от бурого угольных станций к Берлину (около 80—100 MW) и др. — свидетельствуют о создании резервов и в этом звене электрохозяйства.

Кроме того, новое электростроительство идет под знаком повышения надежности всех звеньев генерирующих станций от топливоподачи до

<sup>16</sup> 1937, S. 483.

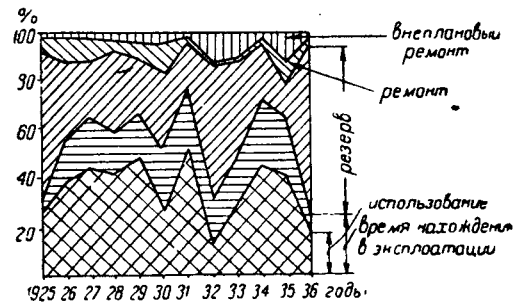


Рис. 3. Характеристика использования мощных турбин (от 10 MW) в зависимости от года установки

трансформаторов. Так, по многим из приведенных в табл. 5 вновь построенных станций обеспечено топливопитание с нескольких направлений, как водным, так и ж.-д. путем (Магдебург, Берлин и т. д.).

Анализ техно-экономических показателей электрификации Германии в последние годы ярко свидетельствует об усиленной мобилизации энергии для нужд войны, чему подчинена вся техническая политика электрификации и электростроительства.

## ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

### Дюфэ — основатель дуалистической теории электричества

М. И. Радовский

Ленинградский электротехнический институт инженеров сигнализации и связи

МИНУЛО два века с того времени, как Дюфэ опубликовал свои знаменитые «Сообщения об электричестве» (1733—1737). Этот юбилей прошел в литературе незамеченным.

Между тем с именем Дюфэ связана одна из самых блестящих страниц в истории учения об электричестве. В истории естествознания принято считать именно Дюфэ тем исследователем, который впервые пытался создать теорию электричества, основанную на данных, полученных в результате его многочисленных опытов. Выдвинутые Дюфэ положения и являются истоками так называемой дуалистической теории, развитие которой нашло свое выражение в трудах Эпинуса, Вилке и Симмера, противопоставлявших свои воззрения взглядам Франклина, основателя унитарной теории электричества.

Шарль-Франсуа де-Систерне Дюфэ (Charles-François de Cisternai Dufay) родился 14 сентября 1698 г. в Париже. Он происходил из старинной французской военной семьи. Отец, дед и предки Дюфэ были военными. Отец ученого — Шарль-Жером, потеряв на войне ногу, принужден был оставить военную службу и занял свой досуг собиранием редких книг и рукописей, общением и перепиской с библиофилами и учеными и устройством научных собраний в своем доме. Таким образом Шарль-Франсуа с раннего детства присутствовал при тех дискуссиях на научные и литературные темы, которые про-

исходили в доме его отца. Все его воспитание, казалось, было направлено не к военной карьере. Тем не менее уже мальчиком он был определен на военную службу. 14 лет он считался лейтенантом французской армии, а в 20 лет принимал участие в войне за испанское наследство. Но военная служба не могла подавить в нем интереса к науке, и он с молодого возраста занимался химией, которая была поистине его любимым занятием. Вскоре его обширные познания начали обращать на себя внимание ученых, и когда в 1723 г. в Парижской академии наук оказалось вакантное место, то, несмотря на военные обязанности, он был предпочтен многим другим претендентам.

В Академии наук Дюфэ успешно занимался, кроме химии, всеми изучавшимися там науками — анатомией, ботаникой, геометрией, астрономией и механикой, — и в течение короткого времени стал одним из видных французских академиков.

Первая печатная работа Дюфэ появилась в 1723 г., а в том же году он опубликовал произведение Дюфэ. Это были сочинения преимущественно по химии. С 1733 г. начал издаваться его исследование по электричеству.

Приступая к экспериментальным изысканиям, Дюфэ уже имел совершенно ясное представление о современном ему состоянии избранной им отрасли физики. Боль-

того, он, как никто другой до него, чрезвычайно вдумчиво изучил произведения предшественников, начиная с Гильберта и кончая работами своего современника — Стефана Грея. Таким образом Дюфэ является и первым историком учения об электричестве. Именно его перу принадлежит первое историческое сочинение в этой области. Первая его статья, появившаяся в органе французской Академии наук<sup>1</sup>, так и называется: «История электричества».

Статья эта представляет собой обзор работ почти всех авторов, занимавшихся вопросами электричества и обогащавших эту науку какими-либо новыми данными. Как ни краток очерк Дюфэ, он, несомненно, обладает рядом достоинств. Наибольшим из них является то, что Дюфэ первый собрал основные факты, добытые в течение более чем столетнего развития учения об электричестве. Для этого ему пришлось ознакомиться с огромной литературой, накопившейся за этот период, и тщательно в ней разобраться. Эту трудность он успешно преодолел. Как он сам подчеркивает, «если говорить о всех, кто занимался электричеством, то пришлось бы перечислить всех авторов, занимавшихся физикой», потому что «мало кто из них не останавливался на этом явлении и не старался по-своему его истолковать».

Дюфэ поставил перед собой задачу — дать связное изложение всех достижений, которыми обогатилось учение об электричестве. «Я останавливаюсь лишь на тех, — говорит он, — кто писал по данному вопросу с большой ясностью или сделал в этой области какое-либо значительное открытие, точность которого не подлежит сомнению».

Характерны первые строки статьи Дюфэ; она начинается с определения понятия электричества. Дюфэ первый в истории учения об электричестве попытался четко сформулировать то, что он понимал под термином электричества.

«Электричество, — писал он, — является свойством, общим нескольким веществам, и состоит в способности притягивать различные тела, находящиеся на некотором расстоянии от электрического тела после того, как оно было некоторым образом приготовлено». «Приготовление, — добавляет он, — заключается в простом натирании то тканью, бумагой, сукном, рукой и т. п.».

Возникшие перед учением об электричестве проблемы Дюфэ свел к шести задачам, которые изложены им в следующих словах:

1. Могут ли все тела стать электрическими сами по себе; если в некоторых из них нельзя возбудить эту силу, то не потому ли, что они не восприимчивы к соответствующему трению; является ли, наконец, электричество общим свойством для всех веществ?

2. Всякая ли материя способна приобрести эту силу непосредственным ли прикосновением к веревке или любому другому непрерывному телу или же простым приближением электрического тела?

3. Какие тела могут остановить или способствовать передаче этой силы, совершается ли она по веревке, по шнуре или при приближении трубки, и какие тела лучше всего притягиваются электричеством?

4. Что общего между силой притяжения и силой оттал-

кивания, связаны ли они друг с другом или независимы друг от друга?

5. При каких условиях увеличивается или уменьшается сила электричества, т. е. как влияют на него пустота, сжатый воздух, температура его и т. п.?

6. Какое отношение существует между электричеством и способностью излучать свет, присущей большей части электрических тел, и что можно вывести из этого отношения?»

Один лишь перечень задач уже характеризует интуицию, которой отличался Дюфэ. Вряд ли будет преувеличенным утверждение, что до Фарадея никто из исследователей в области электричества не чувствовал столь глубоко и в целом всю проблематику, которую выдвигало учение об электричестве.



Шарль-Франсуа де-Систерне Дюфэ

23 мая 1733 г. Дюфэ прочитал доклад в Парижской академии наук. Он опубликован под названием «Второе сообщение об электричестве»<sup>2</sup> и имеет следующий подзаголовок: «Тела чувствительные в отношении электричества». В этом докладе Дюфэ сообщает о результатах, которых он добился, пытаясь экспериментально получить ответ на первые два вопроса, так как он считает, что они «наиболее связаны между собою».

Все ли тела могут стать электрическими сами по себе? Ответить на этот вопрос — было задачей исключительно трудной. Для того чтобы получить достоверный ответ, необходимо было испытать все существующие в природе вещества и экспериментально доказать, возможно ли возбудить в них электрический заряд. Первым исследователям удалось наэлектризовать лишь некоторые вещества, и они полагали, что в природе существуют «электрические» и «неэлектрические» тела. В дальнейшем было установлено, что ряд тел, считавшихся

до того «неэлектрическими», удается наэлектризовать при известных условиях. Это и толкнуло на предположение: «если в некоторых из них нельзя возбудить эту силу, то не потому ли, что они невосприимчивы к соответствующему трению».

Иными словами, представлялось, что дело не в веществе, а в тех условиях, при которых происходит возбуждение «электрической силы».

Уже до Дюфэ было известно, что в некоторых телах можно возбудить электрические заряды, предварительно нагревая их. Следовательно, имели значение внешние условия, а не сами вещества. Кроме того, исследования в области электрической проводимости показали, что тела, в которых не удавалось возбудить электрических зарядов, становились наэлектризованными при приближении к ним наэлектризованных тел. Вот почему многие, как говорит Дюфэ, «склонны думать, что все тела могут стать электрическими сами по себе», т. е. что во всех телах можно трением возбудить электрические заряды.

Во времена Дюфэ это было только догадкой, но догадкой настолько глубокого значения, что она знаменует собою целую эпоху в естествознании. В цитированной работе Дюфэ пишет: «Электричество становится, как будто, всеобщим свойством». Стремясь к доказательству экспериментом, чтобы не оставить места никаким сомнениям, он из приведенного положения поставил себе целью удалить сомнительное «как будто».

<sup>1</sup> Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1733, pp. 35.

<sup>2</sup> Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1733, pp. 83—84.

Дюфэ сразу наметил ряд групп веществ и экспериментировал со многими из каждой группы.

Первая группа, о которой говорит Дюфэ, были «смолистые, битуминозные или жирные вещества». Те вещества из этой группы, которые «обладают достаточной твердостью, чтобы их можно было тереть», как, например, янтарь, агат, асфальт, копаловая смола, камедь, канифоль, сера, воск и т. д., уже были предметом исследования предыдущих испытателей и стали известны как «электрические тела», хотя и не все «одинаково электрические»: одни наэлектризовываются легко без предварительной подготовки, другие же требуют быть «предварительно нагретыми или по крайней мере хорошо высушенными». В этой группе имелись еще такие вещества, которые не обладают «достаточной твердостью», чтобы их можно было тереть, например, смола, скипидар; Дюфэ решил прибавлять к ним «достаточное количество толченого кирпича» для превращения их в твердое тело. Опыт показал, что и эти тела «становятся электрическими при натирании».

Последний опыт убедил Дюфэ в том, что если в ряде тел одной и той же группы удается возбудить электрические заряды, то, следовательно, все вещества, относящиеся к этой группе, обладают тем же свойством. «Таким образом, — писал он, — у нас теперь имеется общий класс веществ, способных делаться электрическими при трении».

Следующая группа, с которой экспериментировал Дюфэ, были камни. До него многие авторы утверждали, что в отличие от драгоценных камней непрозрачные камни «совершенно не могут стать электрическими». Дюфэ показал несостоятельность этого утверждения: все камни, с которыми он экспериментировал, обнаруживали свойство «стать электрическими сами по себе». «Верно, — добавляет он, — что можно различать два класса камней; одни становятся электрическими без всякой подготовки, кроме трения, другие требуют предварительного нагревания, а некоторые даже значительного, как яшмы; непрозрачные агаты, самые твердые мраморы, они должны быть очень горячими, их необходимо долго тереть и вызываемое в них электричество очень незначительно». Однако этого было достаточно для того, чтобы Дюфэ допустил, что «все камни способны к образованию электричества», что «это свойство общее всем камням».

Не менее внимательно Дюфэ испытывал множество других групп веществ: «всякого рода стекла всех цветов», прядильные вещества, травы, кости, деревья, соли, бумагу, пергамент, кожу, солому и многие другие, и убедился, что все они также относятся к «классу электрических веществ».

Одни лишь металлы давали отрицательные результаты. Все свое искусство одаренного экспериментатора употребил он на исследования этой группы веществ, но все попытки остались тщетными. Однако Дюфэ не склонен был сделать решительный вывод, что металлы представляют собою исключение из всех прочих тел природы. «Сколько я ни старался, — докладывал он Парижской академии наук, — я не мог сделать их (металлы) электрическими. Я их нагревал, тер, шлифовал, ковал — и не замечал электричества. Мне казалось, что в некоторых случаях имела очень слабая степень его, но при тщательном исследовании этого не подтвердилось. Я не буду утверждать, что они не могут стать электрическими, если применить какой-либо мною неиспользованный способ, что и будет когда-нибудь сделано, но я не считал возможным тратить время и труды на то, что может быть случай поможет мне открыть в тот момент, когда я меньше всего буду об этом думать».

Однако уже одно то, что приближение к металлам наэлектризованных тел обращало их также в наэлектризованные, укрепляло Дюфэ во мнении, что и металлы «следует отнести к классу тел, электрических самих по себе». Таким образом, устами Дюфэ было произнесено то слово, которое в развитии естествознания имело исключительное значение, а именно, он установил, что электричество является всеобщим свойством, что оно присуще всему существующему в природе.

Получив ответ на вопрос — «все ли тела могут стать электрическими сами по себе», Дюфэ перешел к исследованию второго вопроса, тесно связанного с первым, а именно: «всякая ли материя способна приобрести эту силу непосредственным ли прикосновением к веревке или любому другому непрерывному телу или же простым приближением электрического тела».

Этот вопрос был собственно решен современником Дюфэ Стефаном Греем, работы которого предшествовали исследованиям Дюфэ<sup>3</sup>. Последний отмечает это в своем докладе. «Мы решили исследовать теперь, могут ли тела стать электрическими, привязать ли их к концу веревки, соединенной с электрическим телом, прикасаться ли к ним или просто приближать к ним тело, в котором сильно возбуждена эта способность. Если ограничиться этим, то вопрос решается очень быстро, ибо г-н Грей говорит о множестве тел, которые он привязывал к концу веревки, соединенной с трубкой, и он всегда находил их электрическими». Дюфэ повторил опыты Грея, значительно их расширив, и получил те же результаты: «я не пытал то же самое, — пишет он, — и все тела, которые я привязывал, вплоть до воды, куда я опускал веревку, становились электрическими».

Замечательным моментом этого исследования Дюфэ было то, что он заметил влияние среды, в которой «передача совершается при одном приближении электрического тела без всякого соприкосновения». Он заметил, что материал столиков, «на которые кладут листочки фольги или другие предметы, подвергаемые действию электрических тел», играет очень большую роль в этом процессе.

Испытания различных веществ привели его в дальнейшем к исключительно важному заключению о двух народных электричествах: стеклянном и смоляном. Этот момент в его исследованиях будет подробнее рассмотрен ниже. Здесь же необходимо сказать, что опыты относительно того, могут ли жидкости стать электрическими, также дали утвердительные результаты; это окончательно убедило Дюфэ, что «все тела могут стать электрическими при приближении стеклянной трубки, достаточно натертой, чтобы возбудить в них эту силу».

Третья проблема, поставленная Дюфе: «какие тела могут остановить или способствовать передаче этой (электрической) силы, совершается ли она по веревке, по паке или при приближении трубки, и какие тела лучше всего притягиваются электричеством», другими словами, — проблема проводников и изоляторов, рассмотрена им в докладе Парижской академии наук 14 ноября 1733 г. Доклад опубликован в том же журнале<sup>4</sup> под названием: «О телах, сильнее всего притягиваемых электрическими веществами и обладающих наибольшей способностью передавать электричество».

С самого начала исследования Дюфэ повторил ошибку, допущенную Греем. В сочинениях последнего имеется следующее утверждение: «Все тела из одинаковой материи более или менее электричны в зависимости от цвета, в который они окрашены: так, красный, оранжевый, желтый притягивают по крайней мере раза в 3—4 больше, чем зеленый, голубой или пурпуровый». Дюфэ, отдавая должное своим предшественникам, никому из них не повторил на слово и тщательно повторял описываемые им опыты, каждый раз расширяя и разнообразя их. Так он пытался экспериментально установить влияние цвета на «электрическое состояние» вещества.

Ряд опытов также привел его к заключению, что «являются безусловные доказательства значительной роли цвета в явлениях электричества». Таким образом Дюфэ, подобно Грею, склонен был внести путаницу в область науки, им разрабатываемую.

Тщательное повторение опытов и их углубление окончательно убедили его в несостоятельности его первоначального вывода. В ложности его Дюфэ убедили и опыты на тему: «равное ли действие оказывают натуральные цвета и искусственные». «С этой целью, — пишет Дюфэ, — я взял мелкие кусочки цветов всех окрасок и приближал к ним натертую трубку. Я заметил, что все эти листочки или кусочки цветов притягивались одинаково и что самые легкие, какого бы они цвета ни были, притягивались на большее расстояние».

«Итак, — утверждает Дюфэ, — не приходится сомневаться, что ни аппаратура, ни ингредиенты, служащие для окраски, ни цвет сам по себе не делают тела более чувствительными к электричеству или способными задерживать электрические истечения».

Осуществляя свои опыты, Дюфэ, конечно, обнаружил, что различные вещества обладают неодинаковой способностью «передавать электричество на большие расстояния».

<sup>3</sup> См. нашу статью «Начальный этап в учении об электричестве». «Электричество» № 3, 1938.

<sup>4</sup> Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1733, т. 233—254.

ния». Он установил, что стеклянные трубки и шелковые веревки являются самыми дурными проводниками. Однако он не сделал должного вывода, не разделив четко все вещества на проводники и изоляторы. В его докладе мы находим только такое обобщение: «электричеству больше всего восприимчивы сами по себе те вещества, которые менее всего способны передавать его на большое расстояние».

Вслед за этим Дюфэ заинтересовался, можно ли передавать электричество на большие расстояния. В одном случае «веревка передачи» имела 1256 футов. Получив положительный эффект, Дюфэ решил, что нет более надобности увеличивать проводники, так как было ясно, что все дело в «силе трубки». Во время этих опытов он также убедился, что «большое открытое пространство и даже сильный ветер почти или вовсе не представляют препятствия прохождению электрической материи вдоль непрерывного тела».

Из последующих опытов Дюфэ замечателен тот, который он назвал «способом прерывания электричества». Вот что рассказывает Дюфэ: «Я привязал к концу веревки из шток в 15 футов длиной картонный шар диаметром в 1 фут. Устроив эту веревку обычным способом на двух шелковых шнурах, я приблизил к ней трубку; шар на другом конце стал сильно электрическим и притягивал листочки на расстоянии одного фута. Тогда я дотронулся до веревки концом пальца, и шар тотчас перестал быть электрическим. Я понял, что материя пошла по моему пальцу и, сообщившись моему телу и полу, рассеялась по всей комнате».

Это место из доклада Дюфэ весьма характерно. Как видно, был он к пониманию того, что электрический заряд был отведен человеческим телом в землю, и все же не сделал этого, казалось бы, простого заключения.

Вслед за Греем, наэлектризовавшим ребенка, Дюфэ изучал вопрос о влиянии электричества на человеческое тело. Но в отличие от Грея он наэлектризовал самого себя и описал те ощущения, которые испытал при этом. Я хотел занять, — говорит Дюфэ, — место ребенка, чтобы узнать, не почувствую ли я на лице действия электрической материи. Опыт удался очень хорошо, но я почувствовал только движение листочков фольги, которые быстро ударили меня по лицу».

Повторяя много раз эти опыты, Дюфэ получал все новые и новые данные, которые им охарактеризованы как ряд поразительных открытий, если вообще еще можно ожидать чему-нибудь в области, где чудесное встречается на каждом шагу».

Результаты, поразившие Дюфэ, были получены при следующих обстоятельствах: «Я положил на шелковые веревки деревянную доску шириной в один фут, длиной четыре и сел на нее, протянув ноги вдоль доски. К одной из моих рук приблизил трубку, тогда другая, под которой находились листочки, сделалась сильно электрической. Затем я взял в руку картон с листочками и проложил над ними рукой, к которой подносил трубку: листочки не пошевелились. Когда же другой человек, не подвизавший совсем ко мне, вытянул руку над картоном, листочки быстро взлетели к ней. Тогда я приблизил шток к лицу, желая узнать, не притянет ли оно листочки, но они не шевелились, зато, когда я протянул руку и удалил от своего тела картон, то листочки устремились сами собою в воздух и не падали обратно на картон. Я повторил этот опыт несколько раз, и он всегда удавался. Он сопровождался еще некоторыми замечательными явлениями. При одном из этих опытов один из присутствовавших хотел взять листок фольги, приставив к своей ноге. В этот момент, когда он приближал руку, он услышал треск, издаваемый обычно трубкой, когда ее приближают к пальцам, и почувствовал даже несильную боль, как от укола в палец; одновременно и я почувствовал такую же боль в ноге».

Было совершенно ясно, что вопрос о влиянии электричества на живые тела заслуживает внимательного изучения и Дюфэ «всегоцело занялся этим явлением». Эффекты, полученные им при следующих опытах, были еще ярче. Ощущаемую при этом, — пишет Дюфэ, — можно сравнить с резким укусом или ожогом от искры». Однако наблюдение Дюфэ стало достаточно изучаться только 40-х годах, когда была изобретена лейденская банка и исследователи стали экспериментировать с более сильными электрическими зарядами.

Теоретические заключения Дюфэ также нашли свое отражение в работах ученых много лет спустя.

В теоретическом отношении наиболее существенным является «четвертое сообщение об электричестве». В этом докладе, получившем название: «О притяжении и отталкивании электрических тел», Дюфэ формулировал то, что принято считать прототипом дуалистической теории электричества.

К теории двух электричеств Дюфэ пришел, исследуя явление отталкивания наэлектризованных тел. Во всех предыдущих опытах он имел дело с притяжением. Теперь же он занялся вопросом, который до него был мало, вернее, совершенно не разработан. Об явлении отталкивания до Дюфэ встречаются только упоминания — в работах Герике и Гауксби. Дюфэ же первый обратил на него серьезное внимание и подверг его систематическому изучению.

Он заметил, что «отталкивание не всегда постоянно», и это, пишет он, заставило его «заняться им специально». Он наблюдал неоднократно, что «легкие тела обычно отталкивались трубкой только в том случае, если тела, приближаемые к ней, имели несколько значительный объем». Из этого он сделал заключение, что трубка электризует эти тела, которые в свою очередь притягивают пух или листочки фольги, находящиеся между трубкой и наэлектризованными ею телами. Таким образом казалось, что отталкивания вообще не существует и что во всех случаях действует одно притяжение. От подобного ошибочного заключения Дюфэ был предостережен опытом, показанным ему его современником, известным ученым XVIII в. Реомюром.

Опыт Реомюра заключался в следующем. Наэлектризованная палочка, приближенная к песку, насыпанному на карту, «явно гнала за пределы карты частички песка». «Причем, — отмечает Дюфэ, — никакое другое тело их не притягивало. В том, что наряду с «электрическим притяжением» существует и «электрическое отталкивание», Дюфэ окончательно убедил результаты другого опыта. «Если положить фольгу, — пишет он, — на стекло и приблизить снизу трубку, листочки отгоняются вверх, не падая на стекло, и это движение нельзя объяснить притяжением соседних тел. То же самое происходит и через цветной газ и другие вещества, пропускающие электрические истечения, так что не приходится сомневаться, что электрические тела действительно обладают свойством отталкиваться».

Убедившись в том, что электрические тела действительно обладают свойством «отталкивания», Дюфэ старался связать это явление с выдвинутым им положением, что «наименее электрические сами по себе тела притягиваются более энергично, чем другие». Размышляя над этим вопросом, он решил, что «электрическое тело должно притягивать все неэлектрические и отталкивать все те, которые становятся электрическими при приближении к нему вследствие сообщения им его силы».

Эта мысль Дюфэ была весьма плодотворной. В сущности это был первый шаг к тому, чтобы формулировать положение о взаимодействии наэлектризованных тел. Разумеется, не сразу, но Дюфэ пришел к идее о двух различных электричествах.

Путь, который привел Дюфэ к его основному теоретическому выводу, начался с того, что он задался вопросом: «Не различаются ли электрические тела между собою разными степенями электричества». «Это рассмотрение, — пишет Дюфэ, — привело меня к другой истине, которую я никогда не подозревал, и думаю, никто еще не имеет о ней и малейшего представления».

Началось это с того, что одной и той же трубкой он поддерживал в воздухе два листка фольги на известном расстоянии друг от друга, которое не изменялось, сколько он ни старался их сблизить. Это было совершенно понятно с точки зрения его предположения, что наэлектризованное тело отталкивается наэлектризованным же телом. Тем более, что после того как одни листки (прикосновением руки) лишились заряда, они тотчас же соединились: наэлектризованный листок притянул ненаэлектризованный. Но когда он вместо второго листка фольги поднял в воздух наэлектризованный кусок копала, листок фольги «тотчас же прилип к нему и оставался на нем». Это совершенно не согласовывалось с его гипотезой, которая, казалось, была экспериментально доказана. Никак не хотелось верить, что все то, что представлялось таким ясным, построено на неверном заключении. Но новые результаты заставили пересмотреть все заново. Начал Дюфэ с того, что повторил последний опыт, думая, что именно в этом опыте допущен какой-то недосмотр.

На этот раз опыт производился со всей тщательностью. «Я принял меры, чтобы устранить всякие сомнения, — рассказывает он, — и убедился, что копал притягивал листок, хотя последний и отталкивался трубкой».

Те же результаты получились, когда вместо копала Дюфэ взял янтарь или сургуч. Однако последовал совершенно иной эффект, когда он употребил наэлектризованный шар из горного хрусталя: он отталкивал листок так же, как трубка. То же самое получилось, когда к листочку фольги была поднесена другая трубка: «Я убедился, — пишет Дюфэ, — что стекло и горный хрусталь производили обратное действие по сравнению с копалом, янтарем и сургучом, т. е. что листок, отталкиваемый первыми вследствие полученного им электричества, притягивается вторыми, и это навело меня на мысль, что существует два разных вида электричества».

Дюфэ вскоре понял, что перед ним — исключительно важное явление в области электричества. Он попытался узнать, насколько оно распространяется на другие наэлектризованные вещества, и каждый раз получал одно и то же, т. е. либо результаты, уже получавшиеся при опытах со смолистыми веществами, либо те, которые получались при опытах со стеклом.

Из всех этих опытов следовало, что «стекло отталкивает стекло и притягивает янтарь, и наоборот». Вывод был так ясен, что Дюфэ искренне удивлялся, как не заметили этого многочисленные исследователи, еще до него работавшие над явлениями электричества.

«Как ни странно, — говорит Дюфэ, — но это так, и до сих пор никому это обстоятельство не бросилось в глаза. Я сам с большим трудом поверил этому и не только после того, как соображение это пришло мне в голову, но даже тогда, когда его безусловность подтвердилась результатами, с необходимостью вытекавшими, как мне казалось, из него».

Укрепившись окончательно в своей идее «двух различных электричеств», Дюфэ, чтобы избежать, как он пишет, «смешения терминов и неудобства», придумал им названия. Одно он назвал стеклянным электричеством, а другое — смоляным. Дюфэ был убежден, что в природе есть всего два вида электричества: «иначе, — говорит он, — я себе не представляю, какое действие оказывало бы третье, если одно притягивает, а другое отталкивает». Таким образом Дюфэ разделил все вещества природы на два класса: одни он отнес к классу со стеклянным электричеством, а другие — со смоляным.

Таковы в основном достижения Дюфэ, завоеванные им при исследовании четвертой задачи. Главным из всего Дюфэ считал открытые им «две новые истины относительно электричества и два положения, о которых до сего времени не подозревали. Первая заключается в том, что электрические тела сначала притягивают все тела и только после этого отталкивают их, сообщив им часть своего вихря; вторая говорит о том, что существует два действительно совершенно отличных электричества».

При всей скромности, свойственной ему как всякому истинному ученому, Дюфэ отдавал себе ясный отчет в том, что им сказано новое слово в науке и что его исследования открывают новые просторы в деле изучения электрических явлений — «чего только нельзя ожидать от мировых перспектив, открывающихся перед физикой, и сколько новых свойств этой материи помогут нам открыть опыты», — писал он.

21 июля 1734 г. Дюфэ доложил Парижской академии наук свое «Пятое сообщение об электричестве»<sup>5</sup>. В этом сочинении он трактует о пятой проблеме, касающейся «условий, которые могут внести некоторые изменения в электричество, увеличивая или уменьшая его силу температурой воздуха, пустотой, сжатым воздухом и т. п.».

Постоянно связывая свои исследования с наблюдениями, сделанными до него, Дюфэ начинает сообщение с упоминания о том, что «большинство физиков заметило, что сырой воздух доставляет ряд помех для опытов с электричеством». Непосредственный предшественник Дюфэ — Грей — заметил, «что притяжение стекла больше отзывается на эти изменения, чем янтарь и другие подобные тела».

Повторив опыты своих предшественников, Дюфэ убедился, что действительно «сырость сильно вредит действию электрических тел». Он заметил, что в сырую погоду чрезвычайно трудно возбудить в янтаре значитель-

ный заряд. «Если в сырую погоду тереть трубку в течение 4—5 мин., то ей не сообщается никакая сила, а если она и приобретает ее после упорного и долгого трения, то эта сила очень незначительна сравнительно с образующейся в хорошую погоду».

Создав представление о влиянии таких условий, как внешняя температура воздуха и его влажность, на результаты электризации тел, Дюфэ переходит к рассмотрению «изменений в электричестве, которые «вызывает» пустота или хотя бы очень разреженный воздух». Дюфэ указывает при этом, что в предыдущих еще опытах было наблюдалось, что «колебания воздуха не увлекают электрическую материю».

Еще Гауксби интересовался вопросом о том, влияет ли пустота на возбуждение электрических зарядов. Им описан следующий опыт. Натертая, как обычно, стеклянную трубку, из которой был выкачан воздух, «не имела заметной силы и лишь слегка колебала листочки фольги». Но когда в трубку был впущен воздух, она «сразу стала электрической без нового натирания». Другие опыты Гауксби позволили ему думать, что «когда воздух находится внутри трубки, то он мешает свободному вхождению туда электрического вещества и, следовательно, он действует «снаружи»; напротив, если в трубке нет воздуха, то электричество легко входит в нее и поэтому не оказывает действия «снаружи»».

Грей, занимаясь подобными вопросами, — его опыт заключался в «возбуждении электричества трением в стеклянном шаре и в последующем подвешивании последнего в сосуде пневматической машины», — пришел к совершенно иным выводам. Он находил, что «электричество не претерпевало никакого уменьшения, был ли сосуд наполнен обыкновенным воздухом, был ли он пустым, впускали ли затем воздух».

Столь противоположные утверждения двух предшественников Дюфэ заставили его самым внимательным образом проверить описанные ими опыты «с большими предосторожностями и комбинировать их разными способами». Повторив опыты Гауксби и получив прежние результаты, Дюфэ, однако, не ограничился этим и продолжил свои изыскания, пока не получил новых данных, позволивших ему сделать свои выводы.

Изучение своей пятой проблемы Дюфэ завершил исследованием вопроса: «что произойдет, если сжать воздух в трубке».

Необходимо отметить, что, проделывая именно эту часть своих экспериментов, он оказался в самом затруднительном положении: низкая техника экспериментирования всячески осложняла опыты и приходилось всевозможными ухищрениями изобретать различные приспособления.

Однако сознание бессилия несколько не расхолаживало Дюфэ, и с исключительной страстностью он призывает к изучению темных «сторон явления электричества».

В следующем сообщении<sup>6</sup> Дюфэ коснулся последней проблемы. Оно носит название: «Шестое сообщение об электричестве, где рассматривается отношение между электричеством и способностью изливать свет, приложенное к большинству электрических тел, и что можно из этого вывести».

Из самого названия доклада видно, что Дюфэ, жалея, что сам того не зная, поднял одну из самых острых проблем естествознания, занимавшую на протяжении XIX в. умы крупнейших ученых. Реальные успехи в этой области были достигнуты лишь трудами Фарадея и его последователей, исходивших из твердого убеждения в единстве сил природы, т. е. имевших определенную физическую базу и от нее отталкивавшихся. Дюфэ же работал в эпоху, которая может быть названа зарею знания об электричестве, и, разумеется, его труды над подобной проблемой о связи между электричеством и светом могли быть лишь начальными и робкими шагами.

Закключение, к которому пришел Дюфэ, состояло в том, что свет, сопровождающий электрические явления, тесно с ними не связан. «Свет, возбуждаемый трением настолько связан с электричеством, чтобы не продолжал существовать, когда последнее свойство уничтожается влиянием сырости». В другом месте он еще более высказал свое мнение и подтвердил его следующим «Свечение, наблюдаемое в выкачанной колбе, где находится ртуть, является новым доказательством дей-

<sup>5</sup> Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1734, pp. 341—361.

<sup>6</sup> Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1734, 503—526.



тельного различия между веществом, обуславливающим электричество, и другим, вызывающим свет. Ибо, если переть этот сосуд в темноте, то он становится одновременно электрическим и светящимся. Если же только сильно встряхивать ртуть, то она, как известно, начинает светиться, но не становится электрической.

Из наблюдений, сделанных Дюфэ, наиболее интересно то, что «янтарь, стекло и всякое другое вещество, от природы электрическое, не образует искры; к этому способны вещества, наиболее противные электричеству, как живое тело, кусок металла, зеркала и любое смоченное вещество».

Шестым сообщением Дюфэ закончил те исследования, которые он наметил с самого начала своих самостоятельных изысканий. Естественно, что он попытался подвести итог всему пройденному пути и формулировать то, чего достиг. Такую попытку мы находим в конце шестого сообщения. Результаты двухлетних публикаций, богатых столь огромным количеством опытов, изложены в виде шестнадцати положений, к которым Дюфэ сводит все имеющиеся знания об электричестве, обогатившиеся его исследованиями. При этом он не забывает, что как бы значительны ни были новые завоевания, учение об электричестве не обрело еще «значения физических и первоначальных причин электричества» и оно все еще остается «плодородным полем», на котором не замедлят произрасти все новые и новые открытия. Вместе с тем Дюфэ не страдает и ложной скромностью. Он определенно утверждает, что результаты изучения им электрических явлений «послужат в дальнейшем базой для тех, кто захочет заняться новыми изысканиями в столь богатой области, где, повидимому, предстоит еще большое число открытий». Он даже говорит, что открыл «несколько законов». Правда, в другом месте он более осторожен и сам себя поправляет, говоря, что обнаружил вернее простые и основные факты.

«Простые и основные факты, к которым сводятся все известные опыты с электричеством», были следующие:

1. Все имеющиеся в природе тела воспринимают электричество за исключением металлов, а также веществ, не поддающихся трению, вследствие своей консистенции.
2. Все тела без исключения, даже жидкости, становятся электрическими через передачу, кроме пламени, которое не электризуется и не притягивается электрическими телами.
3. Лишь тела электрические по природе могут электризоваться путем передачи, если их поставить на подставку из металла, дерева или какого-либо другого вещества мало или совсем неэлектрического. Они воспринимают меньше электричества, если стоят на подставке, восприимчивой к нему.
4. Вещества по природе электрические, помещаемые между трубкой и листочками фольги или другими легкими телами, пропускают электрические истечения, а все остальные вещества их прерывают.
5. Электрические тела меньше всех способны передавать электричество на расстояние, лучше всего это делают смоченные тела.
6. Самый сильный ветер не отклоняет электрических истечений, сообщенных на расстояние 1250 фут. при помощи веревки или другого непрерывного тела.
7. Тела одной и той же природы прерываются или прерывают электричество примерно в соответствии с их объемом.
8. Из живого, наэлектризованного при помощи трубки

тела исходят жгучие искры, и они не вызывают никакого болезненного ощущения, исходя из неодоушевленного тела.

9. Существует два рода отличных друг от друга электричества, а именно стеклянное и смоляное, из которых одно притягивает тела, отталкиваемые другими.

10. Электрические тела всегда притягивают неэлектрические и, наоборот, отталкивают те, которые обладают однородным с ним электричеством.

11. Сырой насыщенный парами воздух вредит всякому электричеству и значительно понижает его эффекты.

12. Электрические тела, помещенные в пустоту, оказывают и в ней свое действие, но электрическая материя устремляется скорей в безвоздушное, чем заполненное пространство, а потому трубка или выкачанный шар оказывают заметные эффекты лишь внутри.

13. Сжатый воздух внутри трубки, повидимому, мешает так же, как и разреженный, внешним проявлениям электричества.

14. Все тела с более или менее значительным электричеством, смоляным или стеклянным, светятся, но несколько отлично, чем свет, возбужденный трением.

15. Материя этого света совсем иная, чем у электрического света, и эти оба свойства могут существовать независимо одно от другого.

16. Наконец, смолистые тела, хотя и непрозрачные, свободно пропускают свет, когда он исходит из электрической материи или если он сопутствует ей.

Формулировкой этих положений Дюфэ считал свои изыскания по электричеству законченными. Заключительные слова его доклада Парижской академии наук звучат как прощальное слово неутомимого исследователя, который с полным сознанием пройденного пути передает новому поколению свою область исследований, служившую ему поприщем, где были осуществлены многочисленные труды. Он выражает надежду, что наука «на этом не остановится, и уверен, что любители физики не забросят такое плодородное поле, так сказать, новый мир, в котором предстоит так много открытий».

К вопросам электричества Дюфэ еще вернулся через два года после опубликования последнего его сообщения. 30 мая 1736 г. он прочел Парижской академии наук седьмое сообщение, а еще через полтора года — 20 декабря 1737 г. — восьмое. В обоих этих сообщениях он докладывал академии об опытах Грея, осуществленных в последние дни жизни и доложенных Королевскому обществу уже после смерти.

Дюфэ считал себя вынужденным выступить с сообщением об опытах Грея, так как их описания были опубликованы после того, как вышла в свет первая статья Дюфэ — «История электричества». Таким образом Дюфэ по «обязанности историка» должен был как-то отметить новые опыты, которые показались ему настолько ценными, что он самым внимательным образом их повторил, стараясь и этим обогатить учение об электричестве новым вкладом.

Но новое слово, сильно двинувшее вперед учение об электричестве, было сказано спустя несколько лет, когда был изобретен конденсатор электрической энергии — так называемая лейденская банка. Это достижение вызвало целый ряд блестящих исследований, связанных с такими крупными именами, как Мушенброк, Ноле и Лемонье. Более того, знаменитые исследования Вениамина Франклина тесно связаны с изучением лейденской банки, ставшей в центре внимания ученого мира.

# БИБЛИОГРАФИЯ

КОСТЕНКО М. П. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО КУРСУ „БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЕ АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ“. Л., Ленинградский индустриальный институт, 1937, 225 стр., 152 рис. (стеклографир изд.), 250, без цены<sup>1</sup>

Книга представляет собой учебник или подготовительный материал к нему для студентов энергетических вузов. Такой учебник должен удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Правильная компоновка материала по изучаемой дисциплине, подобранный соответственно утвержденной программе, и координация круга вопросов, охватываемого данной дисциплиной, с дисциплинами смежными, изучаемыми до и после излагаемого курса.

2. Стройность и логичность изложения.

3. Ознакомление и ориентировка студентов в методах анализа, применяемых при разрешении основных теоретических задач дисциплины.

С точки зрения первого из указанных требований приведенный по ряду основных вопросов материал — типы обмоток статора, величины реактивных сопротивлений, количественные связи, определяющие электромагнитные процессы машины (момент, круговые диаграммы), к.-з. двигатели Бушера и с глубоким пазом — является современным, доброкачественным и достаточным по своему объему для институтского курса. Как положительный момент следует отметить наличие в конспекте лекций ряда практических сведений, например, относительно ремонта обмоток, по оценке эксплуатационной надежности центробежных переключателей и т. д.

Углублением следует считать полное отсутствие данных к расчету магнитной цепи при определении тока холостого хода, хотя расчет этот в применении к асинхронным двигателям имеет ряд специфических особенностей; в книге не указан даже порядок величин воздушных зазоров, принятых в асинхронных машинах. Не затронут также вопрос о приведении параметров к.-з. ротора к обмотке статора. Нет указаний в связи с этим о количественных связях, определяющих величины токов в стержнях и кольцах к.-з. ротора. Скупы сведения об обмотках роторов с контактными кольцами.

Совершенно не рассматриваются явления, связанные с несимметричными включениями асинхронных машин (несимметрия первичных и вторичных цепей).

Наряду с этим отводится место такому материалу, который, несомненно, должен быть знаком студентам из предшествующего курса теории переменных токов. Например, дано доказательство наличия круговой диаграммы для цепи с постоянной самоиндукцией и переменным омическим сопротивлением (рис. 68) и повторяется ряд по существу известных уже студентам соображений о точной эквивалентной схеме и диаграмме Лакура.

С точки зрения общего характера изложения материала нужно отметить ряд удачных в методическом отношении моментов в таких, например, разделах, как теория обмоток.

Удачна также интерпретация потоков асинхронной машины магнитными полями соответствующих моделей трансформаторов (рис. 57, 58 и 59).

Вместе с тем вряд ли можно считать методически рациональным рассмотрение всех режимов асинхронной машины, соответствующих диапазонам скольжения в начале книги (стр. 50) до основательного изучения основных электромагнитных процессов, тем более, что в дальнейшем эти вопросы почти не затрагиваются, если не считать указаний на соответствующие участки круговых диаграмм и энергетической диаграммы асинхронного генератора. Физические процессы генераторного режима и энергетический баланс тормозного режима оказались, таким образом, как бы опущенными, чего, несомненно, не было бы при рассмотрении указанной группы вопросов позже.

В начале раздела о круговых диаграммах изучаются окружности токов при переменном  $x$  и неизменных  $r$  и  $s$ . Цель, очевидно, та, чтобы в дальнейшем пояснить характер отклонения диаграммы токов от окружности влиянием насыщения на реактансы рассеяния. Но, при изложении этого весьма важного обстоятельства (гл. 8, стр. 153) никаких ссылок на упомянутые окружности не делается. Тогда не-

понятно, зачем о них нужно было упоминать вообще.

Глава об однофазных двигателях, сжатая, кстати, до пределов, совсем уже не соответствующих тому интересу, какой в последнее время снова начал проявляться к теории этих машин, содержит явно неверные формулировки. Приводя на рис. 144 трехфазную систему для интерпретации процессов в однофазной, автор заявляет, что последняя создает одинаковые по величине поля, вращающиеся в противоположные стороны. Эта точка зрения об одинаковости величины прямого и инверсного потока при разных скольжениях проводится и во всех остальных местах разбираемой главы, что резко диссонирует, конечно, с эквивалентной схемой рис. 146, а, указывающей на равенство прямого и инверсного м. д. с., но никак не потоков.

Сильно грешит изложение основных принципов работы асинхронной машины двойного питания (стр. 218—221). Излагая два принципиально разных режима работы этих машин — синхронный и асинхронный, — автор совсем не подчеркивает этого обстоятельства, что, несомненно, можно привести к путанице представлений у читателя. Вслед за главой о машине двойного питания расположена глава об асинхронном двигателе как катушке самоиндукции. При этом совершенно не упоминается, что речь, ведь, идет по существу также об одном из режимов машин двойного питания. Нет никаких указаний о моментах на валу машины, соединенной по схеме рис. 148. Нужно было сказать, что аналогичный прием предложен Брюдерлином неосредственно для измерения электрическим путем крутящих моментов. Таким образом делается весьма сомнительная трактовка автором схемы рис. 148 как реализации только катушки самоиндукции.

В книге не уделено должного внимания связям между временными и пространственными процессами асинхронной машины. Даже основная векторная диаграмма (рис. 60) дана на базе анализа абстрагированной эквивалентной схемы машины, но не процессов самой машины. Метод введения читателя в круг вопросов, связанных с использованием эквивалентными схемами, совершенно неудовлетворителен. Когда структуры эквивалентных схем не доказываются аналитически из основных электромагнитных связей (как это делает, например, в своем курсе Брагстад), то затмевается представление о схемах лишь как о математическом приеме расчета рабочего процесса машины.

Эквивалентные схемы двигателей Бушера и однофазных асинхронных машин даются совсем без каких бы то ни было доказательств их структуры.

Раздел, посвященный круговым диаграммам, является центральным и по существу приведенного в нем материала представляет собой несомненную ценность. Но, одно положение в этой главе должно быть отмечено как отрицательное. Речь здесь будет идти о тех приемах, с помощью которых автор знакомит читателя с результатами своих собственных работ по данному вопросу. Понятно, само по себе наличие в лекциях или в книге оригинального материала является большим ее достоинством. Как это неоднократно указывается в тексте, метод Костенко в отличие от метода Гейланда учитывает величину  $r_r$  в контуре вторичной цепи. Казалось бы, что изложение диаграммы Гейланда должно предшествовать главе о диаграмме Костенко. Однако в тексте имеет место обратное. Доказательством эквивалентной схемы М. П. Костенко занято около трех страниц (126—128), причем вывод строится, как не имеющий

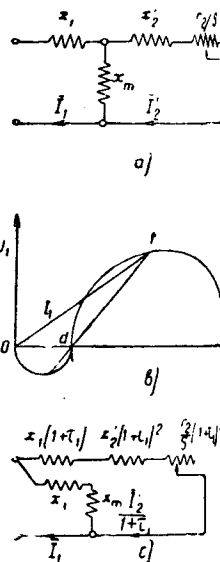


Рис. 1

<sup>1</sup> По материалам библиографического сектора Гос. научной библиотеки НКТП СССР.



визи с методом Гейланда. Между тем, если изложить раньше теорию Гейланда, можно было бы доказать предлагаемые М. П. Костенко уточнения буквально в двух строчках.

Действительно, Гейланд пренебрегает совсем омическим сопротивлением первичной цепи и, следовательно, исходит из эквивалентной схемы *a* рис. 1. В теории Гейланда (см. например, курс Лифшица) доказывается, что *d* (рис. 1, *b*) — неподвижная точка диаграммы. Вектор тока статора, таким образом, состоит из двух компонент — одной неизменной и равной  $Od$  (т. е.  $i_{01} \frac{\dot{U}}{x_1 + x_m}$ ) и другой переменной, соответствующей отрезку *df* и равной  $\frac{i_2''}{1 + \tau_1}$ . Но в соответствии со схемой *a* рис. 1 можно написать:

$$i_2' = i_1 \frac{x_m}{x_m + z_{2s}'} = \frac{\dot{U}}{x_1 + z_{2s}' \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right)} = \frac{\dot{U}}{x_1 + z_{2s}' (1 + \tau_1)}, \quad (A)$$

<sup>1</sup> Или рис. 83 в рецензируемой книге.

откуда

$$\frac{i_2'}{1 + \tau_1} = \frac{\dot{U}}{x_1 (1 + \tau_1) + z_{2s}' (1 + \tau_1)^2}, \quad (B)$$

что непосредственно и указывает на характер сопротивлений во второй параллельной ветви видоизмененной эквивалентной схемы *c* рис. 1 (здесь  $z_{2s}' = \frac{r_2'}{s} + jx_2'$ ).

Если теперь во вторичную цепь рис. 1, *a* включить последовательно с  $z_{2s}'$  сопротивление  $r_1$ , то оно также во второй ветви видоизмененной эквивалентной схемы согласно (B) окажется умноженным на  $(1 + \tau_1)^2$ , как и величина  $z_{2s}'$ . Диаграмму Гейланда нужно было бы, конечно, изложить полнее, не опуская весьма интересной группы окружностей, характеризующих в функции *s* изменения всех потоков машины. Резюмируя все вышеизложенное, можно сказать, что в книге подобран по ряду вопросов солидный материал, над которым, однако, нужно еще провести весьма серьезную работу, чтобы превратить книгу в полноценный учебник, отвечающий задачам подготовки советских специалистов.

Г. И. Штурман

**КУРС ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.** Под общей редакцией Каганова И. Л., Касаткина А. С. Перекалина М. А., ОНТИ, Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 564 стр., тираж 8000, 13 руб.<sup>1</sup>

Рецензируемая книга представляет собою результат переработки уже существующей учебной литературы. Сохранение ее не выходит за рамки установившегося в течение ряда лет стандарта изложения. Авторы не попытались использовать новый материал, появившийся за последние годы в литературе.

Таким образом книга является учебником, конспектирующим материал, излагаемый в аудитории, с добавлением значительного количества примеров, обычно используемых на практических занятиях.

Если только это и являлось целью авторов, то в основном она достигнута. Значительное число примеров, сопровождающих теоретическое изложение, поможет самостоятельной работе студентов.

Однако, принимая во внимание увеличение требований к лучшей подготовке студенчества, с одной стороны, и наличие значительного количества разнообразных курсов теоретической электротехники — с другой, трудно согласиться с тем, что появление такой книги вызывалось действительной необходимостью.

Несомненно, что появление новой книги могло бы быть оправдано наличием в ней оригинальной идеи или же наличием более современного материала.

Переходя непосредственно к содержанию книги, отметим следующее.

Теории переменных токов, включающей 11 глав (с IV по XIV), предшествуют главы: о постоянном токе (I глава), электрическом поле (II глава) и магнитном поле (III глава). Две главы по теории поля занимают довольно большой объем (133 стр. из общего объема в 560 стр.). Материал подобран и расположен хорошо, дан в векторном изложении, но в нем отсутствует изложение основных уравнений электромагнитного поля: уравнений Максвелла, векторного потенциала, вектора Пойнтинга. В теорию электрического поля не включены уравнения Лапласа и Пуассона. Таким образом эти главы не могут заменить теорию поля, так как в них отсутствуют те разделы, которые имеют широкое применение в практике электро-технических расчетов. Этот недостаток сказался в рецензируемом курсе при изложении явлений распространения волн вдоль проводов и поверхностного эффекта. Уравнения Максвелла позволило бы связать указанные явления с общим представлением об электромагнитных волнах. Таким образом приходится признать, что книга неполно соответствует своему названию — «Курс теоретической электротехники».

Кроме того, в книге имеются некоторые принципиальные и методические недостатки.

<sup>1</sup> Материалом библиографического сектора Гос. науч. библиотеки НКП СССР.

Определение разности потенциалов (стр. 18) вводится без достаточного разъяснения порядка интегрирования, что затрудняет правильное понимание.

Определение э. д. с. в отличие от напряжения (стр. 34) необходимо дать более строгое и ясное.

На схеме 1,17 удобнее стрелками указывать положительное направление тока на участке цепи, но не «предполагаемые направления токов».

Не лишним было бы наметить ход решения выведенных (на стр. 77) дифференциальных уравнений.

В § 2,13 и 2,14 (цилиндрический конденсатор и сферический конденсатор) методически неудачен подход при выводе выражений для емкостей (исследуется не емкость, а величина, обратная ей).

В § 8,11 (стр. 307—308) дважды выводится формула для  $U_0$ ; следовало бы дать вывод одной формулы (8,39), а затем положить в этой формуле  $Y_0 = 0$  и получить другую как частный случай.

§ 8,4 излишен, так как преобразование треугольника в эквивалентную звезду рассматривалось уже раньше в двух местах (стр. 59 и 281).

Термин «напряжение смещения нейтрали» (стр. 318) вводится без всяких пояснений.

Понятия пространственной и временной векторной диаграммы (стр. 337) требуют более точного разъяснения.

Теория рассеяния в трансформаторе (стр. 412) изложена неудовлетворительно: разделение рассеяния на рассеяния при холостом ходе и рассеяние при нагрузке, указание вскользь на неоднозначность операции разделения потоков рассеяния между обмотками и помещение в тексте ничего не разъясняющего рисунка (10,41) дают неверное представление о явлении рассеяния.

Введение операторного метода без вывода основных формул (§ 13,21; 13,22; 13,23) вызывает сомнение в своей целесообразности. Следовало бы изложить существующие весьма изящные и простые выводы основных формул. Материал, изложенный в настоящем виде, несколько не подготавливает студентов к самостоятельному пользованию методом.

Описание схем соединений обмоток трехфазного трансформатора (§ 10,15) дано слишком подробно. Из 16 стр., отведенных на теорию трансформатора, 4 стр. занимают схемы соединений.

Описание явлений поверхностного эффекта (§ 10,17) следовало бы выделить в особую главу.

Большое значение для учебной книги имеют язык и терминология, которыми пользуются авторы. Различные главы этой книги написаны различными авторами, что заметно отразилось на изложении. С этой точки зрения слабее других написана III глава, хотя шероховатости выпадают и в других главах.

Например, встречаются такие фразы:

«Если состояние среды в отношении сил, действующих на провод с током, не меняется вдоль всего прямолинейного участка  $l$ , иначе говоря, если магнитная индукция  $B$  остается неизменной (поле однородно) во всех точках участка  $l$  линейного провода, несущего ток  $I$ , закон, выражаемый уравнением (3,4), может быть записан и не в дифференциальной форме» (стр. 109).

Далее:

«Введение понятия напряженности магнитного поля позволяет характеризовать магнитное состояние в данной области пространства с точки зрения причины, возбуждающей это состояние, а также дает критерии для сравнения усиливающего или ослабляющего действия различных веществ на магнитное поле, т. е. для определения доли участия этих веществ в создании магнитного поля», и так далее вся страница (стр. 129).

«Когда э. д. с. индуцируется в прямолинейном отрезке проводника, движущегося в магнитном поле, направление э. д. с. удобно определять, пользуясь следующим mnemonicическим правилом, носящим название правила правой руки» (стр. 140).

«...две системы единиц, принятые в международном масштабе» (!) (стр. 190).

«...мы в дальнейшем при векторах будем обозначать только эффективные значения (стр. 208).

«В течение полупериода положительной или отрицательной полуволны э. д. с. магнитный поток сохраняет неизменным направление своего изменения...» (стр. 209) и т. д.

Тяжелые для понимания фразы и определения появляются также и в ряде других мест.

Не всегда выдержана терминология.

Так, говоря об электрическом поле между двумя заряженными проводниками, автор пишет: «Силовые линии будут заканчиваться на электродах» (стр. 97).

Одно и то же понятие выражают «эвакуированное пространство», «вакуум», «пустота» (стр. 125, 192). Нужно бы остановиться на одном термине и его применять.

Или: «Переходя от векторов к абсолютным величинам...» (стр. 109).

«С двумя параллельными проводниками, по которым движется электричество...» (стр. 107).

Заметим, что некоторые главы (например V, VI, VII, XII, XIII, XIV) в отношении ясности и точности изложения выгодно отличаются от других.

Разумеется, рецензенты не задавались целью перечислить все неудачные как по изложению, так и по терминологии места.

Станным является то обстоятельство, что авторы, работники кафедры МЭИ, в предисловии выражают благодарность проф. П. Л. Калантарову за подробные указания, в то время как по существу их коллективный труд является попыткой переложения 4-го издания книги проф. К. А. Круга «Основы электротехники».

А. И. Даревский, Э. А. Меерожа,

В. А. Судаков, В. М. Лагерь

## НОВЫЕ КНИГИ

**Баптиданов Л. Н. и Тарасов В. И.** Подстанции промышленных предприятий. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебника для энергетических техникумов. М.—Л. Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 432 стр. с иллюстр., 8 р. 50 к., перепл. 1 р. 50 к.

В учебнике рассматриваются вопросы электроснабжения и электрооборудования трансформаторных и преобразовательных подстанций промышленных предприятий.

**Курбатов С. И., проф. и Богоявленский В. Н., доц.** Электропередача в тепловозах. Теория, расчет и конструкция. Под ред. проф. А. Н. Шелеста. Утверждено ГУУЗ НКТП СССР в качестве учебного пособия для машиностроительных втузов. М.—Л. Главн. ред. машиностроительной и автотракторной лит-ры, 1937, 232 стр. с черт., 4 р. 50 к., перепл. 1 р. 50 к.

Книга выпущена кафедрой локомотивостроения Краснознаменного Московского механико-машиностроительного института им. Баумана и составляет вторую часть по тепловозостроению. В ней даны основные элементы электрооборудования тепловозов, определения к. п. д. тепловозной электропередачи, схемы управления, аккумуляторы. Приведены также схемы управления ряда существующих серийных тепловозов.

**Луценко Н. Н. и Максимов Д. Г.** Задачник по физическим основам электротехники. Л. Издание редакционно-издательской части ВЭТА, 1937, 128 стр. с черт., 7 руб.

Задачи охватывают три отдела физических основ электротехники: электростатика, постоянный ток и электромагнетизм, что соответствует программе 2-го курса ВЭТА. Перед каждым отделом помещены сводки основных формул. Задачи снабжены ответами и указаниями методов

решений. В конце помещены необходимые таблицы и кривые.

**Машкиллейсон Л. Е., доц.** Переходные процессы и перенапряжения в электрических цепях. Утверждено ГУУЗ НКТП СССР в качестве учебного пособия для энергетических втузов. Л.—М. Главн. ред. энергетической лит-ры, 1938, 287 стр. с черт., 4 р. 50 к., перепл. 75 коп.

Описаны переходные процессы в цепях с сосредоточенными постоянными и в цепях с распределенными постоянными. Рассмотрены также явления перенапряжений и способы защиты энергосистем.

**Оранский М. И., инж.** О добавочных потерях в синхронных машинах при несинусоидальной форме кривой тока. Диссертация. Л. Издание Ленинградского индустриального института, 1937, 88 стр., беспл.

Целью работы является рассмотрение добавочных потерь, возникающих в синхронной машине, имеющей искаженную кривую тока в статоре. При рассмотрении явлений, имеющих место при работе генератора, приводится разложение кривой тока в ряд Фурье и рассматривается каждая гармоника в отдельности.

**Эмдин С. Я., инж.** Ионные контроллеры для контактных электросварочных машин. Под ред. доц. А. А. Алексеева. Л.—М. Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 92 стр. с иллюстр., 2 р. 50 к.

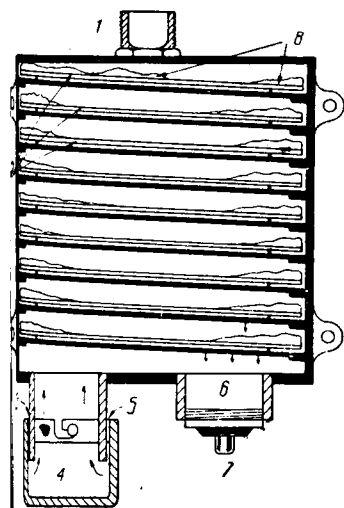
В книге собраны и систематизированы как советские так и иностранные материалы по тиристорным и ионным контроллерам и, кроме того, даны общие сведения, достаточные для понимания схем по тиристорам как с горячим, так и с жидким катодом. Пособие для цеховых работников и студентов втузов и техникумов.

# РЕФЕРАТЫ

R. BELVIN. ОРГАНЫ ДЫХАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ  
El. R. August 13, 1937

Для обезвреживания воздуха, проникающего в консерваторы масляных трансформаторов и реакторов, применяются особые приборы — поглотители, содержащие  $\text{CaCl}_2$  (рис. 1) или силикагель (рис. 2). Менее известные силикагелевые приборы отличаются рядом значительных достоинств.

Гранулярный силикагель,  $1 \text{ см}^3$  которого имеет внутреннюю поверхность более  $50 \text{ м}^2$ , способен из насыщенного воздуха поглотить влагу в количестве 40—50% собственного веса. Перед заливкой патрона поглотителя



к.1. Поглотитель типа Ferranti с масляным затвором.

— присоединение к баку консерватора; — перфорированные листы; 3 — выпуск масла; 4 — масляный затвор; 5 — уровень масла; 6 — сбор воды; 7 — пружинный механизм для выпуска воды; 8 — хлористый кальций

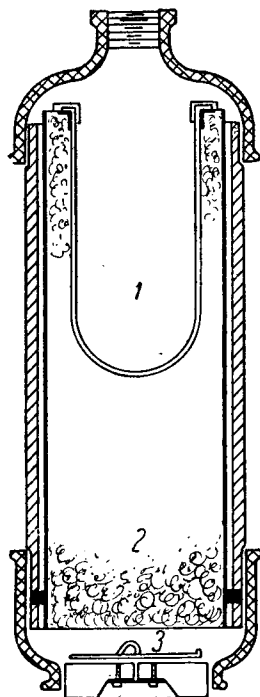


Рис. 2. Силикагелевый поглотитель.

1 — наблюдательная трубка; 2 — заряд геля; 3 — нагревательная спираль

силикагель пропитывается хлористым кобальтом, темной окраской которого указывает на активное состояние силикагеля. При насыщении же заряда влагой после длительного периода его работы цвет окрашивающего хлористого кобальта постепенно переходит в бледно-розовый. В этом случае сменный патрон поглотителя следует отделить от прибора и целиком поместить в нагревательную печь температурой  $150-200^\circ\text{C}$ , где он высушивается до полного восстановления первоначального цвета заряда. При этом силикагель в отличие от  $\text{CaCl}_2$  регенерируется полностью, без потерь.

Силикагелевые поглотители изготавливаются на различную производительность с ежедневным расходом воздуха от  $0,45 \text{ м}^3$  в течение одного года. Вследствие длительного срока беспрерывной службы заряда силикагелевые приборы особенно удобны для установок в удаленных местностях.

Таким образом силикагелевый поглотитель имеет преимущества в отношении габаритов и внешнего вида, удобства надзора, длительности активного состояния и быстроты смены заряда.

Н. А. Караулов

Н. BUMANN и J. PFAFFENBERGER. ИЗМЕРИТЕЛЬ

ЕМКОСТИ С ПРЯМЫМ ОТСЧЕТОМ. AEG-M № 11, 1937, стр. 386

Если производить периодически заряд и разряд конденсатора емкостью  $C$  с частотой  $f$  при напряжении  $E$ , среднее значение силы тока составит:

$$I = CEF.$$

Таким образом при постоянном значении частоты и на-

пряжения сила тока может служить мерой величины емкости конденсатора.

На этом принципе фирмой AEG разработан измеритель емкости с прямым отсчетом, схема соединений которого показана на рисунке.

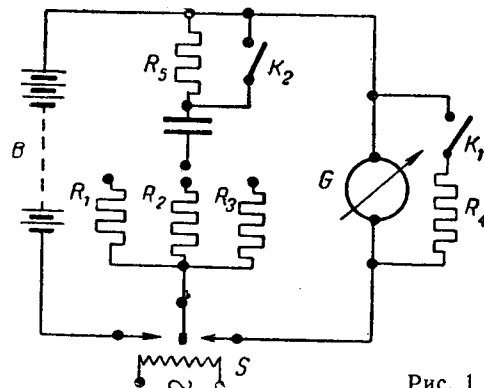


Рис. 1

Прибор изготавливается для следующих пределов измерения емкости: 0,02; 0,1; 0,2; 1; 2 и  $10 \mu\text{F}$ . Основными частями прибора являются магнитоэлектрический гальванометр  $G$  и синхронное реле  $S$ , обеспечивающее постоянство частоты прерывания тока. Сопротивления  $R_1, R_2, R_3$  служат для защиты контакта синхронного реле и соответствуют по величине трем значениям напряжения, при которых может вестись измерение (2; 20 и 200 V).

Сопротивление  $R_4$  служит для шунтирования гальванометра и используется для измерения предела измерения; сопротивление  $R_5$  служит для защиты прибора на случай к. з. испытуемого конденсатора. Точность измерения при помощи этого прибора составляет 1%. Прибор требует двойного питания: постоянным током (от сети или от батареи) и переменным током 220 V, 50 Hz (питание обмотки синхронного реле). Ввиду того что напряжение источника постоянного тока может не быть точно равным требуемой величине (2; 20 или 200 V), предусмотрена возможность изменения чувствительности прибора в соответствии с питающим напряжением при помощи магнитного шунта, который позволяет менять чувствительность прибора на  $\pm 12\%$ .

В. Т. Ренне

Принцип описанного выше устройства не нов, и в статье Н. Вуманн и J. Пфaffenбергер дается описание практического оформления его в виде готового прибора. Подобный прибор по нашему указанию был осуществлен еще в 1932 г. в конденсаторном цехе мастерских Киевского индустриального института, где работает и до сих пор на испытательной станции. Этот прибор имеет 2 предела измерения: до двух и до четырех  $\mu\text{F}$ , причем коррекция показаний производится при помощи эталонного конденсатора, который при помощи переключателя в любой момент может быть введен в схему вместо испытываемого конденсатора.

А. Д. Нестеренко

АВТОМАТИЧЕСКИЙ МОСТ ШЕРИНГА. Из книги R. Vieweg „Elektrotechnische Isolierstoffe“, Berlin, 1937, стр. 90—92

Хорошо известный мост Шеринга, широко применяемый для измерения угла потерь и емкости электроизоляционных материалов и конструкций, часто применяется для снятия зависимости угла потерь и емкости от времени, температуры, напряжения и других изменяющихся величин. В последнее время разработаны схемы, позволяющие получить автоматическое измерение угла потерь и емкости и их регистрацию в зависимости от времени или иной изменяющейся величины без участия экспериментатора. Возможность подобной автоматизации моста Шеринга представляет совершенно исключительный интерес, так как при этом, во-первых, экспериментатор освобождается от необходимости присутствия у мостовой схемы (экономия на рабочей силе особенно существенна в лабораториях и на испытательных постах заводов, ведущих дли-

тельные испытания изоляции) и, во-вторых, получается возможность фиксации быстропротекающих во времени изменений угла потерь и емкости (уравновешивание угла потерь вручную экспериментатором требует определенного промежутка времени).

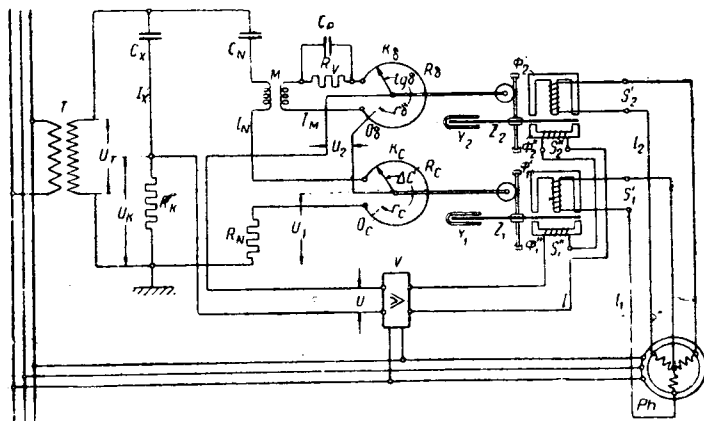


Рис 1

Рис. 1 изображает схему автоматического моста Шеринга. Схема питается повышающим трансформатором  $T$ . Через  $C_x$  обозначен испытуемый объект;  $C_N$  — эталонный конденсатор;  $R_b$  и  $R_c$  — реохорды, служащие для точной компенсации соответственно сдвига фаз и емкости испытуемого объекта. Для автоматической компенсации служат индукционные измерительные механизмы (наподобие механизмов индукционных счетчиков энергии)  $Y_1Z_1$  и  $Y_2Z_2$ , которые посредством механической передачи связаны с подвижными контактами реохордов. Для получения наибольшей чувствительности устройства измерительные механизмы связываются с диагональю нулевого индикатора мостовой схемы посредством лампового усилителя  $V$ ; обмотки возбуждения этих механизмов питаются от фазорегулятора  $Ph$ . Подвижные контакты реохордов соединяются с указателями для непосредственного отсчета или же с пишущими устройствами для регистрации на движущейся ленте. Предварительное уравновешивание моста (компенсация емкости испытуемого объекта) легко производится от руки посредством регулирования величины сопротивления  $R_b$  так, чтобы подвижной контакт на  $R_c$  стал в среднее положение. Подвижной контакт на  $R_b$  устанавливается автоматически, мост вполне уравновешивается. В дальнейшем все изменения величин угла потерь и емкости испытуемого объекта учитываются вполне автоматически, так как при возникновении неуровновешенности мостовой схемы индукционные измерительные механизмы поворачиваются до тех пор, пока подвижные контакты реохордов не перейдут в новые положения, соответствующие уравновешиванию моста при изменившихся значениях угла потерь и емкости испытуемого объекта. Время автоматического уравновешивания моста при изменении угла потерь и емкости составляет всего лишь 1—2 сек.

Б. М. Тареев

#### R. WEBER. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЛИТКА С ЭЛЕМЕНТАМИ ISTR. AEG-M № 12 (Dezember), 1937, стр. 427—432

В последнее время в Америке (фирмой General Electric) и в Германии (фирмой AEG) разработаны новые конструкции электрических плиток, обладающие значительно более высоким к. п. д., чем старые конструкции, в которых спираль из нагревательной проволоки укладывалась в канавки, сделанные в керамическом основании, причем передача тепла от спирали к нагреваемому сосуду осуществлялась главным образом лучеиспусканием. В отличие от конструкций с металлической плитой, покрывающей нагревательные элементы, здесь для получения высокого к. п. д. не требуется применения специальных сосудов, имеющих особо ровное и плотно прилегающее к плите дно.

Нагревательный элемент типа Istra, который применен в электрической плитке AEG (модель 1937 г.), а также в других электронагревательных приборах, представляет собой (рис. 1) вытянутую без шва трубку  $a$  из хромистой стали с внешним диаметром 8 мм и толщиной стенки

0,8 мм. В середине трубки проходит спираль  $b$  из сплава высокого сопротивления, вывод которой сходит через концевое уплотнение  $e$ . Трубка заполняется теплоизоляционным материалом с хорошими электроизоляционными свойствами и высокой теплопроводностью<sup>1</sup>. Для хорошего заполнения трубки применяется особый процесс с вибрационным уплотнением и с последующим обжимом<sup>2</sup>. Сопротивление допускает высокую нагрузку током и благодаря защите проволоки спирали от коррозии и механических повреждений весьма долговечно.

Каждая плитка имеет два элемента сопротивления, сделанной выше конструкции — внешний и внутренний, расположенные так, как показано на рис. 2: в левой части рисунка показаны оба элемента вместе, в средней части рисунка показан отдельно внешний элемент, а в правой части — один внутренний элемент. Включение обоих элементов параллельно или последовательно или же лишь одного элемента дает возможность регулирования мощности плитки.

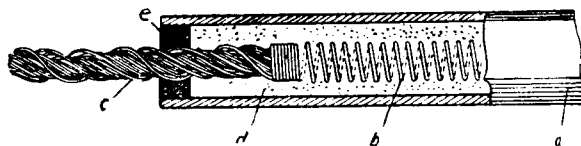


Рис. 1

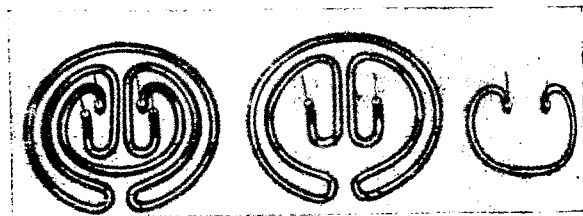


Рис. 2

С целью увеличения к. п. д. плитки верхняя поверхность трубчатых элементов делается плоской, что улучшает теплопередачу от элементов к сосуду, который ставится непосредственно на них; под элементами располагается отражатель, покрытый белой стекловидной эмалью. Схематически сечение элементов и путь потоков тепла, отража-

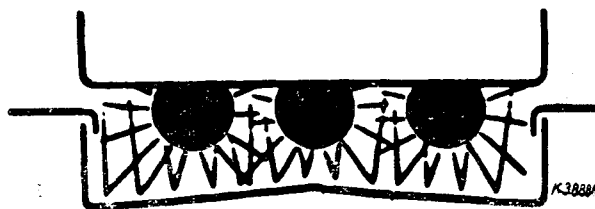


Рис. 3

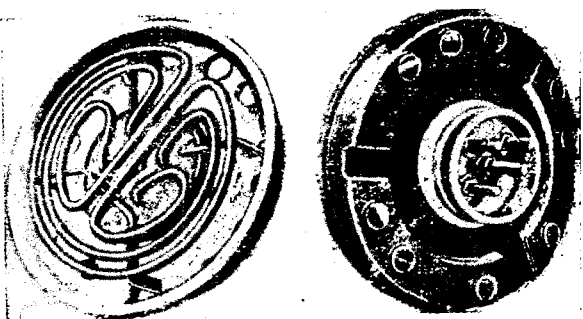


Рис. 4

<sup>1</sup> Чаще всего в трубчатых нагревательных элементах в качестве электроизоляционного материала с высокой теплопроводностью применяется жженая магнезия  $MgO$ . Большой интерес представляет также возможность применения кварцевого песка. Прим. реф.

<sup>2</sup> См. AEG-M № 8, 1935, S. 284.

ных от эмалированной поверхности и попадающих на дно судла, показаны на рис. 3.

Рис. 4 изображает общий вид собранной плитки: в левой части рисунка — вид сверху, в правой части рисунка — вид снизу (в середине хорошо заметно контактное приспособление для присоединения к сети).

Нормальные выполнения плитки: с диаметром 180 mm при максимальной мощности 1500 W и с диаметром 220 mm при мощности 2000 W.

Б. М. Тареев

#### G. W. NEDERBRAGT. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБИВНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЗАЛИВОЧНЫХ МАСС. Archiv für technisches Messen, т. 157, Dezember, 1937

Техника определения пробивной напряженности заливочных масс очень затруднительна.

Для пробы желательно использовать небольшое количество массы, но в этом случае трудно с элементарными методами избежать перекрытия. Помимо этого, плоскостные электроды во избежание опасности образования пугзырей должны быть вертикальными и должны разогреваться по этой же причине до заливки, что требует применения для конструкции теплоустойчивой изоляции.

На рис. 1 дана конструкция, предлагаемая автором, на основе критического рассмотрения методов, предложенных ранее, для определения пробивной напряженности заливочных масс.

Металлические электроды и все металлические детали выполнены из никелированной стали с низким температурным коэффициентом. Основу всей конструкции составляет фарфоровая труба 2, к которой прикреплен один электрод 8, соединенный металлическим стержнем 12 с клеммой 1. Диск электродов 10 и 11 имеют размеры: диаметр 40 mm и радиус закругления 2,5 mm.

Второй электрод специальной ножкой 9 соединен с хомутиком 6, 3.

Расстояние между электродами — 1 mm. Электроды ставятся на специальную крышку 7, опирающуюся на стенки фарфорового тигля. С помощью этих электродов возможно пробивать массы напряжением до 50 kV.

Реферлируемая заметка должна заинтересовать в первую очередь кабельные заводы.

В. А. Баев

#### G. P. de LANGE. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ. El. R. № 3115, август 1937

Описана установка фирмы «Филипс» для дуговой сварки постоянным током, которая приключается к трехфазной сети переменного тока 50 Hz и допускает сварку током от 25 до 200 A (в зависимости от вида работы и типа электродов).

Схема установки показана на рис. 1: а — трехфазный шестифазный трансформатор; б — регулирующий секционированный дроссель; с — трансформатор накала лампы; d — мотор вентилятора; е — магнитный выключатель (автомат); f — реле времени; h — лампы для двухполупери-

Характерно, что эти значения мощности значительно меньше явно недостаточной мощности наиболее часто выпускаемых нашими заводами электрических плиток. Прим. ред.

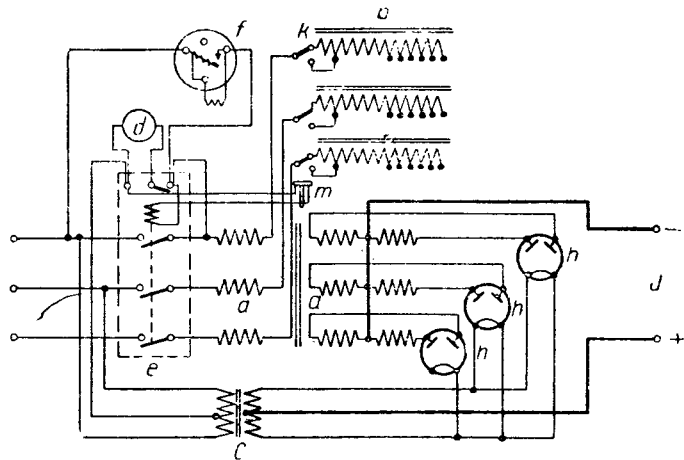


Рис. 1. Схема включения шестифазного выпрямителя

одного выпрямления; j — зажимы постоянного тока; k — переключатель для регулировки тока.

Другая установка той же фирмы позволяет производить сварку как постоянным, так и переменным током.

Переход от сварки постоянным током к сварке переменным током, т. е. от схемы выпрямителя к схеме сварочного трансформатора, производится при помощи одного переключателя, при нейтральном положении которого установка выключена.

Схема установки показана на рис. 2.

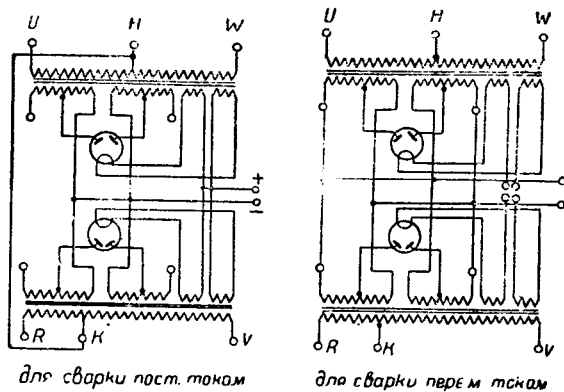


Рис. 2

При сварке постоянным током зажимы U, V и W приключаются к проводам трехфазной сети и точки K и H соединяются вместе. Вторичные обмотки образуют при этом симметричную четырехфазную звезду, нейтраль которой присоединена к отрицательному зажиму. Положительный зажим присоединен к средним точкам обмоток накала нитей, намотанных так, что напряжение накала не зависит от колебаний нагрузки. Когда переключатель находится в положении сварки переменным током, то соединения между точками K и H нет. Зажим U приключается к зажиму R, аналогично зажим V — к зажиму W. Обе пары зажимов приключаются к двум фазам трехфазной сети. Все четыре вторичных обмотки соединяются параллельно и приключаются к дуге. Цепь накала разорвана и лампы выключены.

А. И. Фройман

#### ТРОЛЛЕЙБУСНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ. El. R., февраль 4, 1938, стр. 161

Недавно в Leytonston была пущена в эксплуатацию подстанция, оборудованная стеклянными ртутными выпрямителями мощностью 2000 kW, для питания части лондонской троллейбусной системы при напряжении 630 V. Выпрямительная группа, наиболее крупная из установленных до сих пор подобных агрегатов, состоит из 4 отдельных 500-kW двоянных колб, причем каждая из них работает от своего собственного трансформатора. Помимо отдельной работы колб, все они могут работать парал-

тельно, если того требует нагрузка. Энергия для питания установки берется от 6600-V трехфазной 50 Hz магистрали. Высокое напряжение через выключатели, каждый разрывной мощностью 150 000 kVA, подводится к трансформаторам сердечникового типа, погруженным в масло; первичная обмотка трансформатора соединена треугольником с отпайками  $\pm 2,5$ ; 5 и 7,5%; переключение отпайек происходит при обесточенном трансформаторе.

Кабинки ртутных выпрямителей содержат 6 анодных колб, смонтированных на выдвижных тележках, вместе с вентилятором, зажиганием, возбуждением, предохранителями и анодным реактором, обеспечивающим равномерное деление нагрузки как между отдельными анодами, так и между 500-kW единицами.

Каждая 500-kW единица имеет следующий к. п. д.: при  $\frac{3}{4}$  нагрузки — 94%, при  $\frac{1}{4}$  — 94%, при  $\frac{3}{4}$  — 94,2%, при  $\frac{2}{4}$  — 93,5% и  $\frac{1}{4}$  — 92%. Выпрямители способны выдерживать следующие перегрузки: 25% — 2 h; 50% — 0,5 h и 100% — 30 sec.

Сторона выпрямленного напряжения имеет 4 панели для выпрямителей, 8 фидерных, измерительную и испытательную панели. Каждая фидерная панель обслуживает быстроедействующий выключатель с автоматическим повторным включением, снабженный перегрузочным и нулевым реле. Выпрямители снабжены также выключателями обратного действия.

М. Д. Трейвас

#### М. ARMSTRONG и J. OWEN. БУДУЩЕЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ Electr. Rev. Lond. 21, 1937

Целесообразность перевозки грузов внутри городов электромобилями за последнее время стала признаваться в Англии. В течение 1936 г. число электромобилей в Англии увеличилось на 819, что соответствует росту с 1935 г. на 30%. Общее число электромобилей в конце 1936 г. дошло до 2600, а в 1937 г. — прирост еще на 50%.

При годовом потреблении энергии электромобилей 5000 kWh общее потребление электроэнергии электромобилями в 1937 г. выразилось в 19 млн. kWh. Препятствием к распространению электромобиля является недостаточность пробега из-за ограниченной емкости аккумуляторной батареи (перезарядка батарей требует много времени), но в городах Англии устраиваются специальные пункты, где разрядившиеся батареи заменяются вновь заряженными.

И. И. Тихонов

#### ВКЛЮЧЕНИЕ И ВЫКЛЮЧЕНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ УЛИЦ ПОСРЕДСТВОМ ФОТОРЕЛЕ. ETZ № 50 от 16 декабря 1937 г.

При недавно произведенном в г. Буферам (США) обновлении освещения улиц прежде применявшийся способ включения осветительной сети при помощи реле, приводившейся в движение астрономическими часами, был заменен другим, при котором включение и выключение освещения осуществляются при помощи фотореле. Из общего количества 250 пунктов фотореле до 1 июля 1937 г. было оборудовано 179 пунктов. В остальных пунктах включение и выключение производится от руки по сигналам, даваемым фотореле.

Этот способ включения наружного освещения имеет прежде всего то преимущество, что при нем включение и выключение во всех частях города и при всякой погоде происходит всегда при одинаковой освещенности. Расходы на энергию при этой системе несколько выше, чем при включении и выключении по часам, так как в облачные и туманные дни включение производится ранее, а выключение несколько позже, чем при работе по часам, но более продолжительная работа осветительной сети в такие дни как раз желательна в интересах уменьшения несчастных случаев.

И. И. Тихонов

## ИСПРАВЛЕНИЯ

В статье А. А. Акопян «Защитное действие одиночного стержневого молниеотвода» в № 24 «Электричество» за 1937 г. по недосмотру автора

*Напечатано:*

Стр. 13, левая колонка, 10-я строка сверху: «Нам кажется, что в пределах высоты молниеотвода от малых значений

до 30—40 м отношение  $\frac{H}{h}$  не меняется и равно около 10. Для более высоких молниеотводов целесообразно эту цифру уменьшить, исходя из  $H = 300 = \text{const}$ ».

*Следует читать:*

«Нам кажется, что для одиночных стержневых молниеотводов высотой от малых значений до 30—40 м отношение

$\frac{H}{h}$  не меняется и равно около 20. Для более высоких молниеотводов целесообразно эту цифру уменьшить, исходя из  $H = 600 \text{ м} = \text{const}$ ».

В статье Р. И. Янус «О стандарте на листовую электротехническую сталь» в № 22 «Электричество» за 1937 г.

*Напечатано:*

Стр. 3, правая колонка, 13-я строка сверху: «...для нужд электропромышленности».

Стр. 5, левая колонка, 32-я строка сверху: «500×300 мм».

*Следует читать:*

«...для нужд слаботочной электропромышленности».

«500×30 мм».

В статье И. М. Сирота «Выбор основных параметров сетей низкого напряжения» в № 15 «Электричество» за 1937 г.

*Напечатано:*

Стр. 34, правая колонка, 3 строка сверху:

$j$  и  $n_1$  — соответственно то же, что  $p$  и  $N$  в нашей работе;».

*Следует читать:*

« $j$  — погонная плотность нагрузки в А/м;

$n_1$  — число сторон кварталов от ТП до точки наибольшего падения напряжения.»



## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Ко всем рабочим, инженерам, техникам, ко всем работникам электростанций, сетей и энергосистем . . . . .	1
Электропередача Куйбышев — Москва — дело чести советских электротехников . . . . .	4
<i>Горев А. А.</i> — Электропередача Куйбышев—Москва . . . . .	7
<i>Лебедев С. А.</i> — Замкнутая схема электропередачи Куйбышев—Москва . . . . .	14
<i>Баумгольц А. И.</i> — Намечаемая схема линий электропередач Куйбышевской межрайонной гидростанции . . . . .	18
Дискуссия по электропередаче Куйбышев—Москва . . . . .	19
<i>Лебедев С. А.</i> — Анализ искусственной устойчивости генераторов . . . . .	31
<i>Сазанов П. И.</i> — Экспериментальное исследование статической и искусственной устойчивости в электросистемах . . . . .	37
<i>Герценберг Г. Р.</i> — Электронно-ионный регулятор напряжения для машин переменного тока . . . . .	43
<i>Лигоцкий Л. П.</i> — Автоматизация управления уличным освещением . . . . .	48
<i>Талалай Б. А.</i> — Прибор для дистанционного наблюдения за коммутацией . . . . .	50
<i>Соколов С. В.</i> — Автоматическое защитное выключение в электрических ручных инструментах . . . . .	53
<i>Мирер Я. И.</i> — Защита электровозов от атмосферных перенапряжений . . . . .	56
<i>Кудрин С. М.</i> — Устойчивость опоры контактной линии электрических железных дорог . . . . .	58
<i>Байдак Н. Ф.</i> — Аналитическое выражение намагничивающего тока с учетом гистерезисной петли . . . . .	64
<i>Сыромятников И. А.</i> — Определение потерь синхронного генератора методом выбега . . . . .	67
<i>Эрлихман Б. Л.</i> — Электрификация и электростроительство фашистской Германии . . . . .	69
<i>Радовский М. И.</i> — Дюфэ — основатель дуалистической теории электричества . . . . .	74
<i>На обложке</i> — Испытание в ВЭИ защищенности плоскости молниеотводами на модели при напряжении импульсного генератора в 3 млн. вольт	

**ИЗДАТЕЛЬ ГОНТИ**

Технический редактор **А. П. Александрова**  
Зав. редакцией **М. Г. Башкова**

Отв. редактор **Я. А. Климович**

# AEG

## Ртутные выпрямители

для

электролиза  
электрической тяги  
освещения  
силовых подстанций



Выпрямительная установка 80 000 А  
состоящая из 16 выпрямителей по 5000 А 800 в для электролиза

## Allgemeine Elektrizitäts - Gesellschaft

Büro Rußland — Berlin NW 40

6740



# ШКОДА

Проволочные канаты для всех  
надобностей

Электрические кабели для всех  
напряжений

Динамо-провода  
производит высокого  
качества

и поставляет

# КАБЛО

АДРЕС: STAROMESTSKE NAMĚSTÍ 16.

АКЦИОНЕРНЫЙ  
КАБЕЛЬНЫЙ И  
ТРОСОВЫЙ  
ЗАВОД

# В ПРАГЕ 1.

ТЕЛЕФОН: 244-17, 260-69. ТЕЛЕГРА. АДРЕС: LANAKABEL

## Н О В О С Т Ь:

исключительное  
производство патент-  
проволочно-канатной  
системы

ТРУ-ЛАЙ-КАБЛО и упругие валы  
„ТЕЛЕФЛЕКС“ для Чехословакии

Завод в Кладно, телефон 62,  
телеграфн. адрес: Кабло, Кладно.

## Сплавы для сопротивлений

### Манганин

**для измерительных инструментов,**

удельное сопротивление 0,43 ома, температурный коэффициент  $\pm 0.00001$ , термическая сила (по сравнению с медью) + 1 микровольт на  $1^\circ \text{C}$ .

Оба сплава содержат от 12 до 13% марганца, вырабатываемого в Дилленбурге из лучшего советского железняка. Изабелленхютте в течении почти 50 лет является единственным производителем сплава манганин, широко употребляемого на всем свете, а также в СССР для прецизионной измерительной техники. Нововыпущенный сплав Изабеллин жароупорен до  $800^\circ$  и широко употребляется для сильно нагруженных технических сопротивлений и пусковых реостатов.

**ISABELLEN-HÜTTE / HEUSLER K. G. / DILLENBURG (ГЕРМАНИЯ)**

6741

### Изабеллин

**свободный от никеля сплав для технических сопротивлений,**

удельное сопротивление 0,50 ома, температурный коэффициент — 0.00002, удельный вес 7,9—8.

## JOHNSON & PHILLIPS, Ltd

**ELECTRICAL ENGINEERS & CABLE MAKERS  
CHARLTON LONDON**

**Джонсон и Филлипс, Лимитед  
ЛОНДОН, АНГЛИЯ**

○ ○ ○

Заводы ДЖОНСОН и ФИЛЛИПС предоставляют Вам воспользоваться их более чем 60-тилетней промышленной практикой, а также высококачественным выполнением, признанным инженерами всего мира

**КАБЕЛИ** вплоть до 33.000 вольт

**РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ДОСКИ**

Специальность: распределительные  
доски для индустрии

**ТРАНСФОРМАТОРЫ**

**СТАТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ**  
для увеличения активности электрич. силы

**ВОЗДУШНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
ПРОВОДКА** и материалы для нее

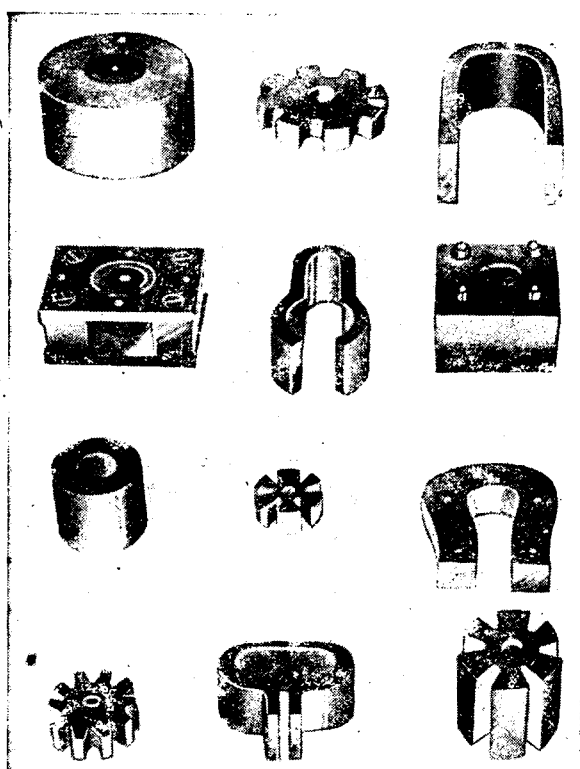
**ИНСТРУМЕНТЫ**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ**

ПОСЫЛАЙТЕ НАМ ВАШИ ЗАПРОСЫ.

233

## ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ из никель-алюминия и кобальтовой стали



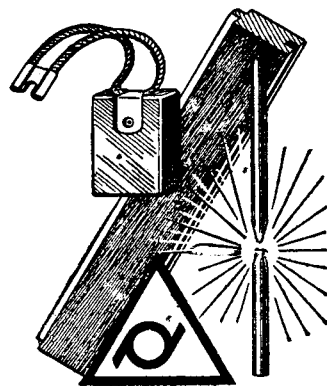
**DARWINS LIMITED SHEFFIELD (АНГЛИЯ)**

269

**Dr. Alb. Lessing**  
**Nürnberg O, Schloßstraße 24**  
Германия Основ. в 1872 г.

### Щетки

для всевозможных электрических машин из графита, а также из чистого и обгаороженного угля или из смеси угля с металлическим порошком.



**угольные пластины**  
с канавкой и пружиной или без таковых,

**угольные электроды**  
для электрической сварки,

**трубы, тигели и  
уплотняющие кольца из угля,**

все сорта  
**осветительных углей**

6745

# БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ПРЕССЫ

## для пластических масс модель НРК

с патентов. индивидуальным гидравлическим приводом



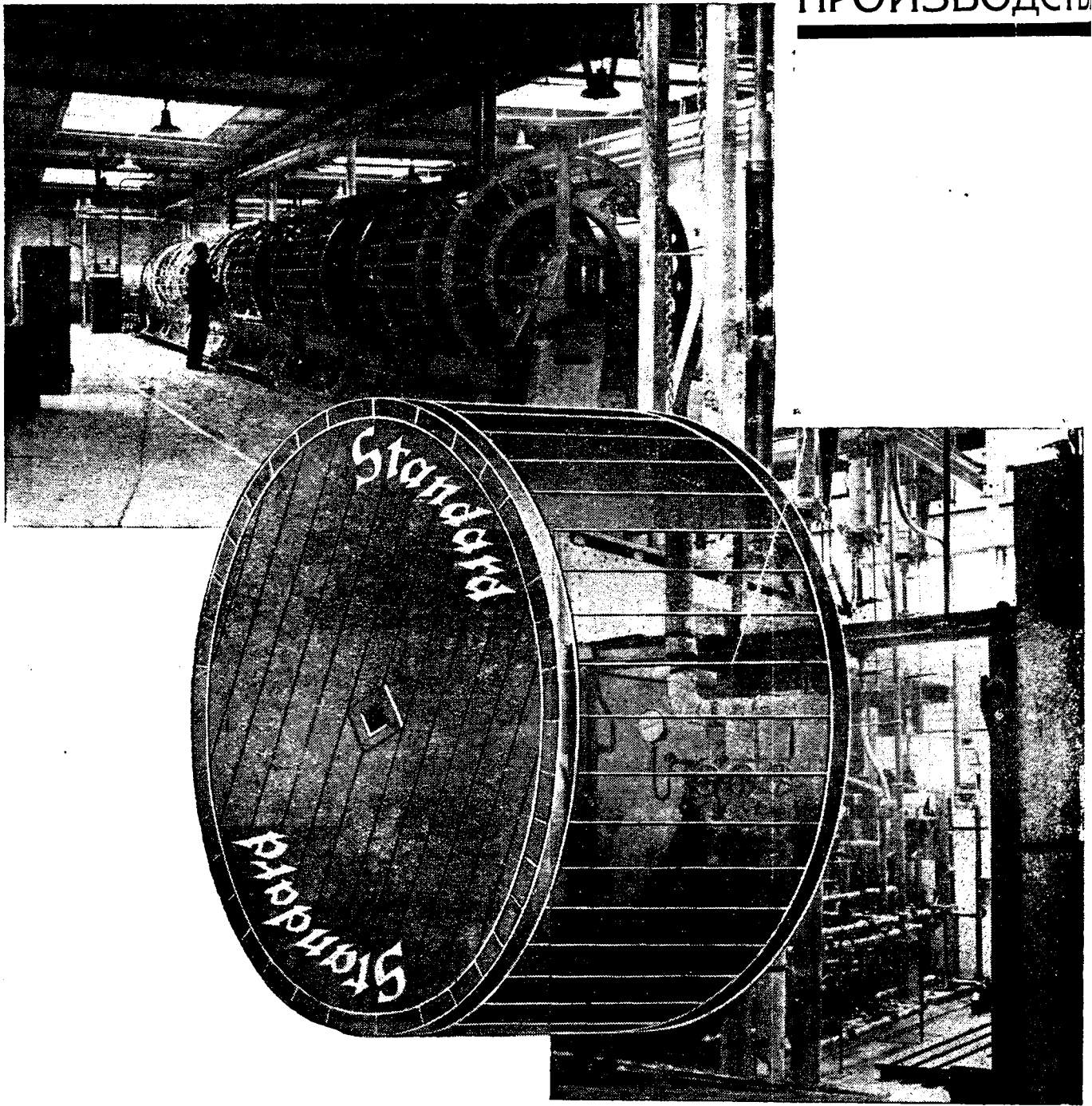
Быстродействующие прессы НРК применяются в настоящее время во всех промышленных странах, причем во многих предприятиях установлены целые серии таких прессов. Их успех обусловлен не только их исключительной производительностью и надежностью в эксплуатации, вызванные их конструктивными особенностями но и разносторонней возможностью их применения. Быстродействующие прессы НРК пригодны для прессования всевозможного сырья различными способами. Они допускают экономически - рациональное производство сложнейших деталей, даже из трудно поддающегося обработке сырья. Благодаря наличию специальных приспособлений, как-то автоматического, легко регулируемого замедлителя хода пресса, гидравлического выбрасывателя и т. д.: работа этого пресса отвечает самым суровым требованиям. Быстродействующие прессы НРК удовлетворят Вас при обработке всевозможного сырья различными способами, как производительностью так и качеством выработанных изделий.

*Требуйте посылку Вам нашего проспекта № 948*

# HAHN & KOLB · STUTTGART

# ГАН и КОЛЬБ · ШТУТГАРТ

РАЗВИТИЕ  
ПРОИЗВОДСТВА



## За каждым барабаном с силовым кабелем „STANDARD“

стоит производственная организация фирмы Standard Telephones and Cables Limited, обладающая глубоким знанием всех машин и процессов кабельного производства, с широко раскинутыми по всему миру разветвлениями этой фирмы. Ввиду этого все операции — начиная с исследования сырья и кончая последним испытанием кабеля высоким напряжением — производятся таким образом, что лабораторная техника превращается в технику массового производства, без каких бы то ни было видоизменений.

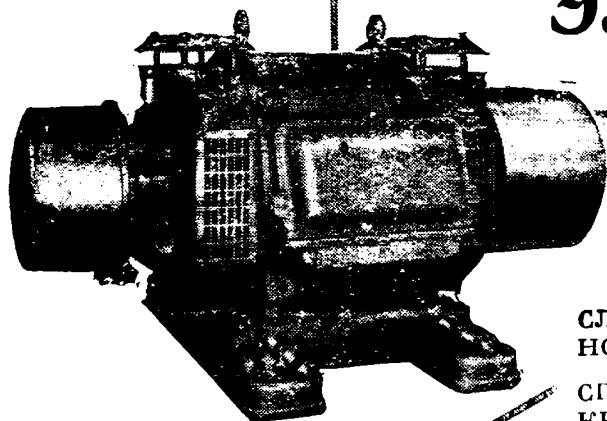
Хотя по своему внешнему виду кабели „Standard“ кажутся такими же как и другие, Вы все же можете быть особенно уверены в их качестве, передавая заказы на них фирме

# *Standard Telephones and Cables Limited*

NORTH WOOLWICH, LONDON, E. 16. АНГЛИЯ

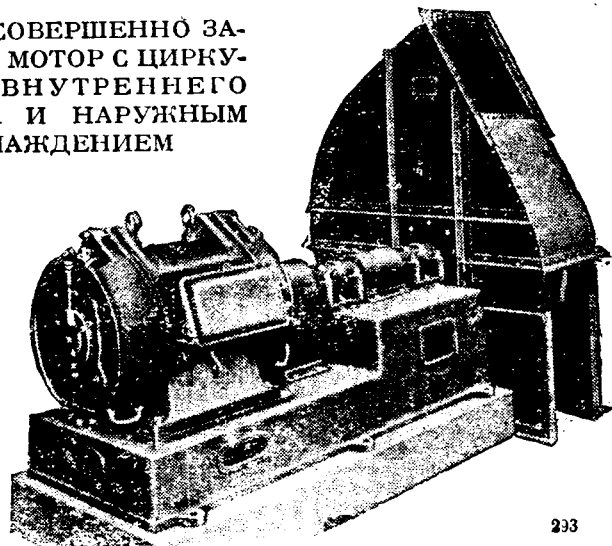
ОТДЕЛЕНИЯ И ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА ВО ВСЕМ МИРЕ

# ЭЛЕКТРОМОТОРЫ ВСЕХ ТИПОВ



СЛЕВА МОТОР ЗАЩИЩЕ-  
НОГО ТИПА НА САЛАЗКАХ

СПРАВА СОВЕРШЕННО ЗА-  
КРЫТЫЙ МОТОР С ЦИРКУ-  
ЛЯЮЩЕЙ ВНУТРЕННЕГО  
ВОЗДУХА И НАРУЖНЫМ  
ОХЛАЖДЕНИЕМ



**МЕТРОПОЛИТЭН**  
**Виккерс**  
ЭЛЕКТР. АКЦИОНЕРНО-ОБЩЕСТВО

233

**22** предела измерений  
постоянного и переменного тока  
охватывает новый мавометр WG:

милли- ампер	вольт
8	0.6
6	8
12	6
80	12
60	80
120	60
800	120
600	800
ампер	
1.2	600
8	1200
6	
12	

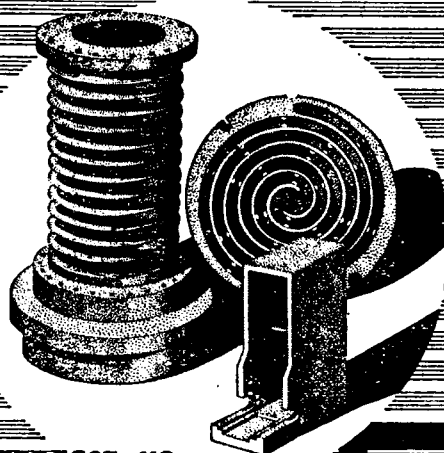
Обратите внима-  
ние на предыду-  
щие и последую-  
щие объявления



6735

**GOSSEN**  
FABRIK ELEKTRISCHER  
MESSGERÄTE  
ERLANGEN/BAYERN

## КЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ ДЛЯ ВСЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ



ПОСТУПАЕТ ИЗ

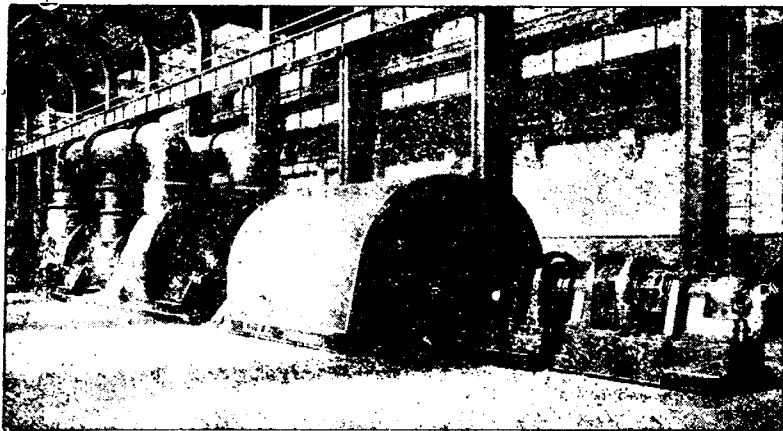
ЗАРЕКОМЕНДОВАВШИХ

СВОИ МАТЕРИАЛЫ



**STEATIT-MAGNESIA**  
**AKTIENGESELLSCHAFT**

BERLIN-PANKOW, FLORASTR. 8 Германия



## ТУРБОДИНАМО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**71,500 KWA**

10 750 V — 3 000 об./мин.

Одна из самых мощных в мире  
единиц, делающая 3000 оборотов  
в минуту

**A.C.E.C.**  
САМЫЙ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ  
БЕЛЬГИЙСКИЙ ЗАВОД,  
специализировавшийся  
в области конструкции  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Более чем 40-летний опыт  
Обширнейшие заводы  
Большое число  
сотрудников - специалистов  
Ультра-современное  
оборудование



МАРКА, ГАРАНТИРУЮЩАЯ КАЧЕСТВО

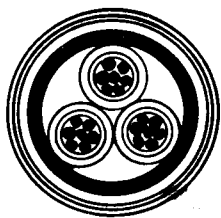
**A.C.E.C. ATELIERS DE CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES DE CHARLEROI A.C.E.C.**  
CHARLEROI (БЕЛЬГИЯ)

775

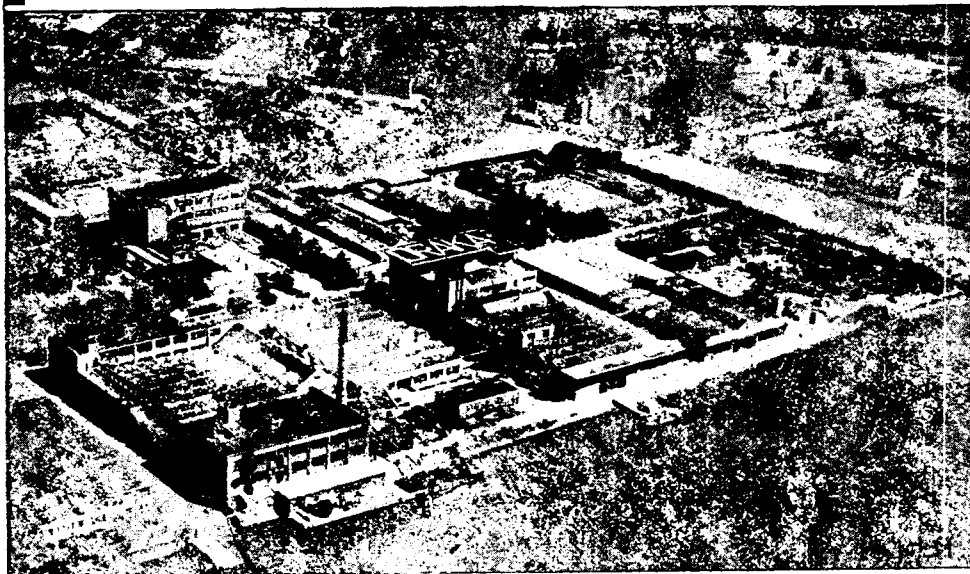
# DRAKA

N.V. HOLLANDSCHE  
DRAAD- EN KABEL FABRIEK  
AMSTERDAM — HOLLAND

адрес для телеграмм: DRAKA · AMSTERDAM · ГОЛЛАНДИЯ



специальность :  
все сорта проволоки и  
кабелей для электричества  
с резиновой изоляцией.



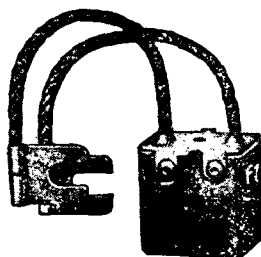
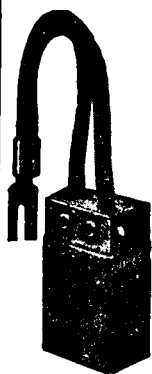
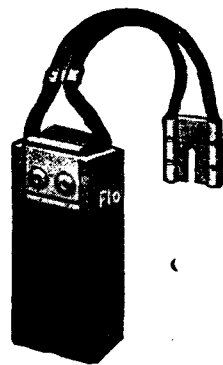
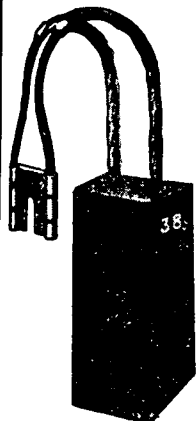


# SCHUNK & EBE

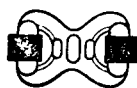
## GIESSEN (Германия)

Фабрика угольных щеток и щеткодержателей

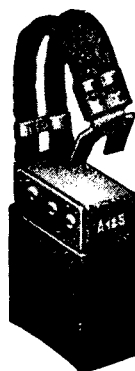
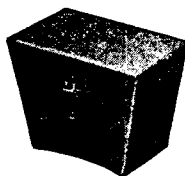
Мы являемся между прочим постоянным поставщиком всех сортов и качеств изображенных в настоящем объявлении угольных щеток для советских промышленных предприятий



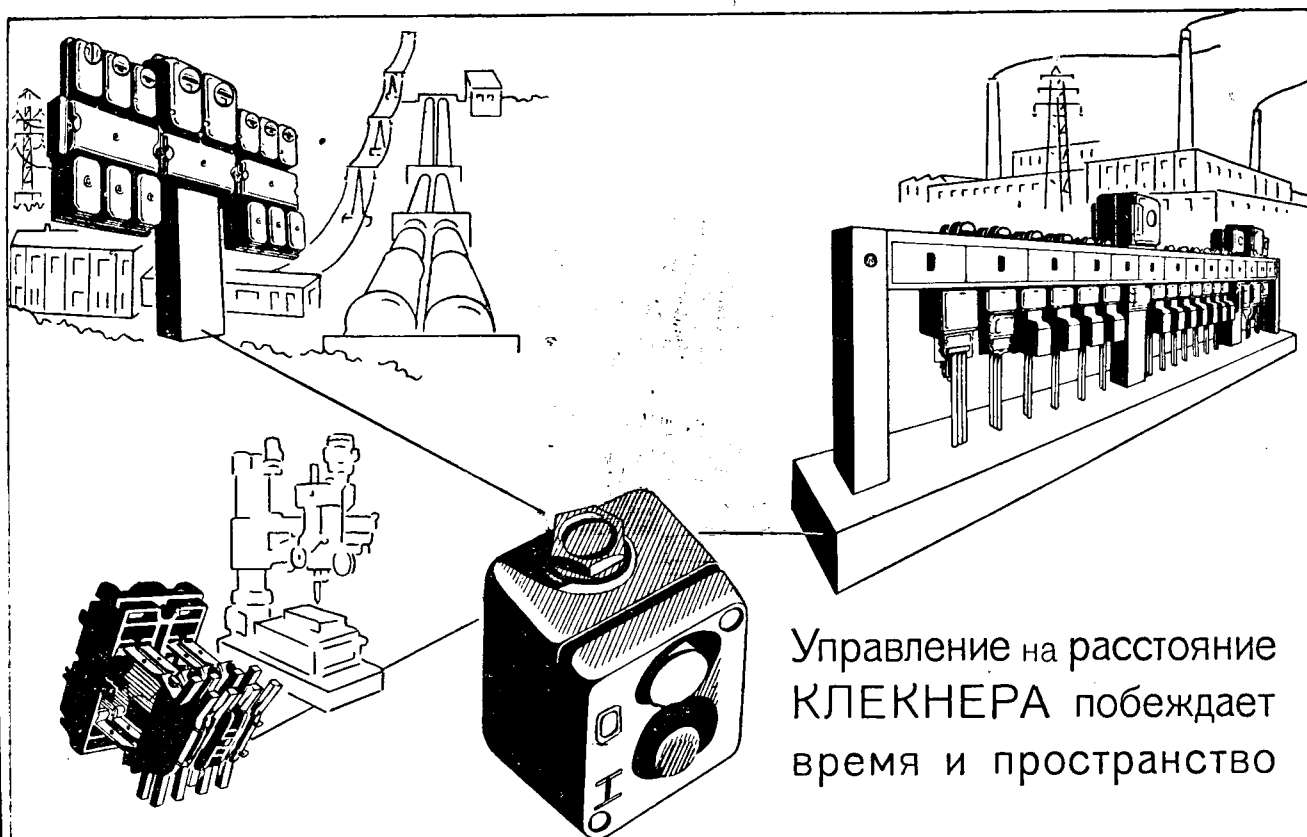
Наша фабричная марка



гарантия высокого качества



6737



Управление на расстояние  
КЛЕКНЕРА побеждает  
время и пространство

F. KLÖCKNER, KÖLN-BAYENTHAL (ГЕРМАНИЯ)

# ТОВАРНА НА КАБЛЕ, Акц. 0-во

## БРАТИСЛАВА (Чехословакия)

### Знаете-ли Вы уже наш шнур „флекс“?

Он является идеальным соединительным шнуром, снабжен неразбивающимся штепселем из мягкой резины и отличается безопасностью в отношении короткого замыкания, ненужностью специального монтажа, а также прочностью, водонепроницаемостью и гигиеничностью.

6748

### Имеется лишь один

изоляционный материал для токов высокой частоты, поддающийся механической обработке, — это

# MYCALEX

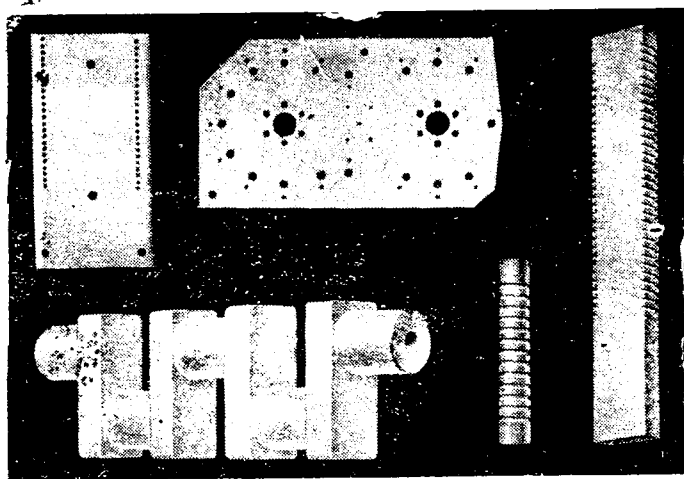
керамический материал, разрешивший проблему изоляции.

Mycalex обрабатывается механически так же легко, как мягкая сталь

Детали, указанные на рисунке, сработаны на наших заводах при помощи обыкновенных быстрорежущих резцов

В числе наших крупных покупателей значатся:

Admiralty	Radio Corporation of America
Air Ministry	Dutch Government Radio
Post Office	U.S.A. Admiralty Dept.
War Office	Westinghouse Electric & Manufacturing Co., U.S.A.
British Broadcasting Corporation	Aeronautical & General Instruments, Ltd.
British Thomson-Houston Co., Ltd.	Baird Television, Ltd.
Crompton Parkinson, Ltd.	Dubilier Condenser Co., Ltd.
General Electric Co., Ltd.	Ferranti, Ltd.
Marconi's Wireless Telegraph Co., Ltd. and Associated Companies	National Physical Laboratory, Teddington
Metropolitan-Vickers Electrical Co., Ltd	Plessey Co., Ltd.
A.E.G. Germany	Standard Telephones and Cables, Ltd., and Associated Companies
General Electric Company of America	H. W. Sullivan, Ltd.
Ministry of Marine, France	Telegraph Condenser Co., Ltd.
Philips Radio Holland	Western Electric Co., Ltd.



# MYCALEX

**MYCALEX (Parent) Co. Ltd.**  
100, VICTORIA STREET, LONDON, S.W.1, АНГЛИЯ