

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.
Адрес 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*

ОВАРИЩИ! Мы, хозяйственники, инженеры, стахановцы и ударники, собравшись на Все-
сное совещание по энергетике, созванное На-
шим Комиссаром Тяжелой Промышленности
Р, в течение нескольких дней обсуждали во-
работы электростанций, сетей и энергоси-
Совещание с большевистской самокритикой,
мовому разобрало недостатки в работе элек-
станий и сетей, вскрыло причины невыполне-
государственного плана по выработке элек-
трической энергии, экономии топлива и другим каче-
ственным показателям и наметило предложения по
внедрению порядка на электростанциях и в сетях.
Плакетные мероприятия по упорядочению ра-
бот электростанций и сетей будут даны в при-

казе Народного Комиссара Тяжелой Промыш-
ленности СССР.

В настоящем обращении мы, участники совеща-
ния, со всей большевистской прямотой заявляем,
что, несмотря на удвоение мощности районных
электростанций за годы второй сталинской пяти-
летки и ввода новых мощных электроцентралей,
оснащенных передовой техникой, до сих пор элек-
тростанции продолжают работать неудовлетвори-
тельно. За 1937 г. государственный план выра-
ботки 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 соб-
ственные 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 организациями 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 осинные гнезда разрушены, и фашистские выродки уничтожены. Будем бдительны! Выкорчуйте до конца остатки вредительства и вместе со всем народом нашей страны сотрем с лица нашей родной советской земли продажных троцкистско-бухаринских шпионов. Нагло 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 проверенные 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 повышенено 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 эксплоатационники! Полностью выдирайте аварии и простой оборудования, выполните в установленный срок противоаварийные мероприятия. Изучайте детально оборудование станций и сетей, все его особенности, и в соответствии с этим установите и строго соблюдайте строгий, 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. квт·ч электроэнергии, которые сейчас используются нерационально. Организуйте и строго соблюдайте графики планово-предупредительного и капитального ремонта, осмотр и профилактических испытаний оборудования.

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

Товарищи ремонтники! Бесперебойное энергоснабжение потребителей, особенно в период осенне-зимнего максимума, полностью зависит от современного 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 производите высококачественно и точно по графику.

Во время ремонта необходимо полностью выявлять аварийные очаги, устраниТЬ дефекты в роторах, сепараторах пара, присосы чугунной кладки, неплотности во фланцах, дефекты машин, турбин, насосов, масляных выключателей, линий защиты и т. д.

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

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

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

Товарищи кочегары! Пора покончить с авариями котельных агрегатов из-за неправильной эксплуатации, ненормального перегрева парогенераторов котлов, упуска воды и т. д. Не допускайте пережогов топлива! Овладевайте техникой эксплуатации котлов по графику с наименее опасным режимом работы, максимально используйте при этом измерительные приборы. Добейтесь оптимального значения СО₂ и нормальной

без пара. Наведите в котельных образцовую чистоту и порядок.

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

Не допускайте сброса, нагрузки из-за срыва или падения вакуума. Ликвидируйте аварийность узлов из-за расплавления подшипников, неисправности регулирующих устройств, превышение сверх нормальных температур масла.

Истановите на вахтах железную дисциплину. Тщко внедряйте опыт передовых стахановцев, давших высокой производительности труда, наилучшего качества работы.

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

Товарищи работники электросетей и подстанций! Вредители, орудовавшие в энергетике, создали разрыв между производством энергии и пропускной способностью высоковольтных и кабельных сетей. Некоторые электростанции из-за недостатка линий передач или малой их пропускной способности сейчас не могут полностью развовать своей мощности. Ваша задача — добиться максимального использования существующих сетей и подстанций, безаварийной их работы. Организуйте планово-предупредительные выезды точно по графику. Устраните полностью пожарные очаги в сетях: дефекты клемм, изоляции втулок, трансформаторов и т. д. Техники 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 т. д. Вам необходимо добиться четкой, безотказной правильной и селективной работы защитных устройств. Полностью устраните аварийность электрооборудования из-за неправильной работы аппаратуры защиты. На существующей аппаратуре добейтесь ускорение действия защиты, увеличение чувствительности путем периодических плавок и организации правильной эксплуатации. В период ремонтов проведите реконструкцию испытания и наладку защитных устройств. Своевременно подготовьтесь к грозовому сезону, выполнив все необходимые работы. В период грозы 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 использованием 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 эксплоатации, 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 промышленностью.

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-

приятий, уничтожить холостые хода агрегатов, снять излишнюю мощность моторов, повысить коэффициент 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 потребуется. 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 два раза.

Великие вожди В. И. Ленин и товарищ Сталин с гениальной прозорливостью еще в 1921 г. ~~записали~~ ^{разработали} 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 начат дальнейший огромный рост мощности электростанций и создание резервов.

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

Всесоюзное совещание работников электростанций и сетей НКПС

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 ю. 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 продолжат осуществление великой ленинско-сталинской идеи электрификации всей страны. Волхов — Днепр — Волга — таковые 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 по своему масштабу и содержанию не имеют предела в теории и практике подобных сооружений капиталистических стран.

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

С радостью и гордостью за свою родину и выпавшую на их долю часть 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 докладам¹ 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 работы.

Наряду с блочной схемой передачи на 300 кВ в данной дискуссии была представлена и замечательная

¹ См. ниже.

3-цепная схема на 400 kV, как обоснованное экономическое решение.

В расчетах Ленинградского индустриального института параллельно с напряжениями 300 и 400 kV изучали напряжения промежуточные — 330—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) до 1100 MW.

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

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

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

Проведенное в работах института экономическое обоснование одной и той же электропередачи, выполненной на различные напряжения, выявило снижение стоимости на 9,6% при переходе с 300 kV на 400 kV и на 12% при переходе с 300 на 400 kV. Однако эта экономия поглощается в результате удорожания конечных устройств, усиленного дроблением их мощности.

И показали расчеты института, что блочной схемой линии при напряжении 330 kV может быть доставлена с достаточной степенью надежности передача мощность в 640—700 MW. При повышении напряжения до 350 kV максимальная передаваемая мощность в Москву может быть доведена до 1100 MW.

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

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

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

Выходы, 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 нагрузки 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 переключательными постами вдоль линии. Рабочая мощность линии — 550 ± 600 MW.

Удовлетворительные результаты в смысле обеспечения статической и динамической устойчивости передачи были получены при 4 переключательных 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 sec. 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 sec.

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 эксплоатационную 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 дискуссия², 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 эксплоатационная 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 эксплоатационно 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 реакторов между грузкой и генераторами.

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

При этом отмечалось, что итти 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 снижается, так как число цепей возрастает до 12, 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 достичь передаваемую мощность по четырем цепям 800 MW, сохранив при этом приемлемое значение как для величины мощности генераторной единицы, так и для величины мощности, передаваемой по одной цепи-блоку (до 200 MW).

В случае передачи 1000—1100 MW приводят к себе внимание вариант 400-kV системы двух блоков, каждый из которых предполагает 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 из строя одного блока, выключая вместе с блоком часть нагрузки.

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

Тем не менее ценность работы, проделанной 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. Использованные материалы позволяют уже в сравнительно короткий срок сделать окончательный выбор параметров передачи, после того как будет определена величина передаваемой мощности.

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

² См. ниже.

Электропередача Куйбышев—Москва¹

А. А. Горев

Ленинградский индустриальный институт

ПЕРЕДАЧА Куйбышев—Москва характеризуется как необычной мощностью (свыше 100 MW), так и необычным расстоянием (900 km). Грубая характеристика — произведение этих цифр — составляет 540 000 MW·km. Эта цифра в 10 раз больше соответственной характеристики воздушной заграничной передачи — Болдер-Си-Лос Анжелос, построенной полтора года назад в США.

Экономически приемлемое решение проблемы такой передачи было дано осенью 1936 г. в эскизном проекте Ленгидэпа².

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

В связи с этим Главгидроэнергострой поручил Ленинградскому индустриальному институту выбрать основные параметры электрооборудования будущих сооружений и разработать предварительные технические условия, которым оно должно соответствовать. 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 основного задания:

Длина линии передачи в связи с переносом зала отправляющей станции с Переволок на окраину Глинку была увеличена с 850 до 900 km. Для удешевления станций принимались в первую очередь генераторы максимальной возможной квадратичной мощности.

Изыскание возможности осуществления генераторов и трансформаторов с оптимальными 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.

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

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

¹ Авторская обработка доклада, сделанного проф. А. А. Горевым на совещании 20 января 1938 г. в ВЭИ по материалам, выполняемой Ленинградским индустриальным институтом по заданию Главгидроэнергостроя и Гидроэнергостроя.

² Статья А. А. Горева, В. А. Толвинского, «Электричество» № 11 и 12, 1937.

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

6. В эскизном проекте мощность шунтирующих линию реакторов отправного 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 электропередач, 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-kV масляными выключателями прием-

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 $\cos \phi$ 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, питавшейся выпавшим блоком, на 25% имела постоянную проводимость и на 75% состояла из асинхронных двигателей двухкратной перегружаемости, загруженных в момент аварии на $\frac{3}{4}$ своей мощности.

Продолжительность аварии (трехполюсное к. з. на линии) принималась равной 0,1 sec, 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 удержать нагрузку. Нужно отметить, что этот положительный результат был получен для того типа схемы примыкания, 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 ее 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. Требование должно повести к снижению рабочей мощности одной цепи связанной передачи в сравнении с блочной, если не будет принято никаких дополнительных мер к повышению устойчивости. В этом последнем предположении расчет дал следующие цифры.

Число цепей	Число реактивных 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 трехполюсном к. з. продолжительностью в 0,08 sec. Принималось, что такое замыкание приблизительно эквивалентно по своему эффекту двухполюсному к. з. продолжительностью в 0,1 sec. Такое время отключения аварии следует считать по опыту передачи Болд Дам — Лос Анжелес достижимым. Таким образом приведенные в таблице цифры относятся только к двухполюсным к. з. предельно малой продолжительности; устойчивость связанных систем трехполюсных к. з. не гарантируется.

Считалось, что инерционная постоянная генератора равна 10 sec; после окончания расчетов генератором 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 время аварии; таким образом благоприятный эффект возможного применения быстродействующего 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 двухполюсных к. з.³

³ Так же не учтен был и весьма существенный, согласно сообщению проф. С. А. Лебедева, эффект включения в центральную высоковольтной обмотки линейных трансформаторов активного сопротивления.

Предполагалось, что емкостной эффект линий полностью компенсирован включением 100% реаторов по обоим концам каждой цепи⁴.

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 уравнять 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 может вызвать возражений с точки зрения их безопасности и неиспытанности, именно: искусственное повышение махового момента гидрогенераторов; 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. Полагаю, что той или иной их комбинацией, при точенных расчетах, можно будет довести рабочую нагрузку одной цепи связанной передачи в величины 0,71 ее натуральной мощности, пригодной для блочной передачи. В этом предположении был просчитан ряд вариантов, приводимых ниже.

Возможные варианты передачи Куйбышев — Москва. На заводе «Электросила» были просчитаны два варианта генератора: 1) 195 MW, 30 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-

⁴ Мощность 100%-ного реактора составляет при напряжении 300 kV — 115 MVA, при 330 kV — 140 MVA и при напряжении 400 kV — 204 MVA.

чтение 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 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 равнозначны вариантам блочных. С другой стороны, вариант 2 нельзя рассматривать как реальный, так как он накладывает слишком высокие требования на врачающийся 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, MW	Число постов	Число пелей	Общая мощность в Москве, MW	Общая мощность в Куйбышеве, MW	Число генераторов	Мощность одного генератора, MW	Общая мощность генератора, MW	Число и мощность (MVA) поникающих 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.
300-kV блочный	300	225	160	4	—	640	704	4	195	780	8 × 165	4 × 230	4 × 160	4 × 115	633
300-kV	400	400	285	2	—	570	627	4	173	692	6 × 195	4 × 204	2 × 285	2 × 204	615
300-kV связанный	300	225	160	4	2	640	704	4	195	780	8 × 165	4 × 230	4 × 115	4 × 115	713
300-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 пытаться 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 связанный передачей или эквивалентным ей по мощности комплексом блочных передач, различна, если, как это предполагается, авария на самой линии в первом случае не дает редукции 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 несущественно.

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 устойчивости 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 свыше 200 MW. Это накладывает ограничение на выбор напряжения — напряжение выше 300—330 kV уже не приемлемо.

Перечисленные положения непосредственно вытекают из работы Ленинградского индустриального 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), 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 км.

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 переключательными постами каждая, который, в зависимости от числа генераторов в комплексе (4,5 или 6), потребует⁵ 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 обще с про-

⁵ В этих расчетах, так же как и в случае блочного варианта с повышенным запасом, допустимая нагрузка на 1 цепь принятая 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 связанный 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	—
x_d	0,89	0,89	0,9
x_q	0,56	0,56	0,6
r_d	0,36	0,32	0,32
H^* , sec	13	15	10
T_{d0}^{**}	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 отдельно стоящего возбудительного 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 $\dot{\theta}$ 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 быстрореактивного возбуждения со взлетом⁶ 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 колосного хода гидрогенератора принималась в этих расчетах равной 4,5 sec.

По мнению завода «Электросила» для предель-

ного генератора по первому варианту осуществим 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 быстрореактивного 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 считается 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 прымкания. 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

⁶ Взлетом напряжения называется отношение скорости нарастания напряжения в вольтах в секунду к номинальному напряжению возбуждения в вольтах.

стремились 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 кем случае нельзя считать законченной; необходимы дальнейшие исследования⁷.

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 kV до 2500 MVA, при времени отключения, включаая время реле, в 0,2—0,25 сек как случае блочной, так и в случае связанной переччи. Этот результат следует считать весьма благоприятным, так как большие разрывные мощности этих выключателей значительно увеличили стоимость приспособления потребляющих систем к приему куйбышевской энергии.

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

Выключатели линейного напряжения (300, 346,5 400 kV) 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 sec, считая и время работы реле. Ускорение действия этих выключателей весьма существенно для подъема пропускной способности язанных систем. В блочных передачах разрывная мощность линейных силовых выключателей может быть в зависимости от схемы примыкания изжена до 3000 MVA при времени отключения 0,1 sec. Таким образом проблема силовых линейных выключателей как в отношении скорости действия, так и разрывной мощности при язанных системах значительно более серьезна. другой стороны, возможность применения при язанных системах более высоких напряжений позволяет надеяться на успешное ее разрешение.

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

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

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 стадарта.

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	kV
Среднее эксплоатационное . . .	286	380	315	330	:
Понижающая подстанция . . .	272	362	300	315	:
Класс изоляции аппаратуры . . .	315	420	346	364	:

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

Согласно установленвшейся 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 km в год — n и защитным уровнем линии I (наибольший ток отвода молнии в килоамперах), при котором отключение не имеет места⁸:

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

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

⁸ Ток в стволе молнии в килоамперах, умноженный на волновое сопротивление отвода, принятого в дальнейшем равным 300 Ω , дает так называемый динамический потенциал молнии в мегавольтах. Наблюдавший в изолированной опоре при сопротивлении заземления, равном нулю, ток вследствие отражения равен $2I$.

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

Защитный уровень линий при прямом ударе в опору⁹ оказался лежащим при сопротивлении заземления в 10Ω 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 μ 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 m, а длина пролета — 400 m. Для 300-kV линии получаются такие цифры: при волне $1/\sqrt{40} \mu$ sec — без учета короны 11 MW ($I = 36$ kA), при учете ее 19 MW ($I = 63$ kA); при волне $3/\sqrt{40} \mu$ 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 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 m для линии в 300 и 14 m для линии 400 kV. Для последней длина пролета считалась равной 450 m.

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 $3/\sqrt{40} \mu$ 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

⁹ 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.

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 То же, kA Число отключений в год на 1000 km	46,5 155 0,1	32,5 108 0,95
Прямой удар в середину пролета при высоте троса над проводом 12 m	Защитный уровень, MW То же, kA Число отключений в год на 1000 km	41 137 0,195	23,3 78 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 То же, kA Число отключений в год на 1000 km	65 217 0,00035	45 150 0,1
Прямой удар в середину пролета при высоте троса 14 m	Защитный уровень, MW То же, kA Число отключений . .	45 150 0,1	24,6 82 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 m.

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 представят вопрос о такой арматуре гирлянд, которая обеспечила бы достаточно равномерное распределение напряжения 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

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 кВ при напряжении линии в 300 кВ и порядка 5600 кВ при напряжении в 400 кВ. Применение тиристорных разрядников значительно снижает величину импульсов.

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

Тиристорные разрядники должны обладать такими характеристиками:

Напряжение линии, кВ . . .	300	400
Фазовое разрядное напряжение при 50 Гц, кВ . . .	520	690
Верхний предел вольтсекундной характеристики искрового промежутка (t — предразрядное время в μ sec) . . .	$850 \sqrt{1 + \frac{1}{t}}$	$1130 \sqrt{1 + \frac{1}{t}}$
Вольтамперные характеристики (E_a в кВ, 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 кВ. Анализ имеющихся данных показал, что кривые кратности разрядных и испытательных напряжений с повышением номинального напряжения поникаются, стремясь к асимптоте, которой они достигают уже при напряжении 230 кВ.

Характеристики изоляции 300- и 400-кВ подстанций

Номинальное напряжение, кВ	300	400
Класс изоляции аппарата, кВ	315	420
Сухое разрядное напряжение, кВ _{eff}	910	1200
Мокрое "	700	930
Сухое испытательное напряжение в течение 1 min, кВ _{eff}	790	1050
Мокрое испытательное напряжение в течение 10 sec, кВ _{eff}	630	830
Минимальное импульсное разрядное напряжение при волне $+1,5/40 \mu$ sec, кВ _{max}	1680	2150
Разрядное напряжение при запаздывании 2 μ sec при той же волне, кВ _{max}	2100	2680
Амплитуда падающей волны при съемке импульсных характеристик не менее, кВ _{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 — Москва¹

С. А. Лебедев
ВЭИ

В СТАТЬЕ изложены результаты работы лаборатории электрических систем и автоматики ВЭИ по вопросу куйбышевской передачи².

Основным исходным материалом, имевшимся к началу работы, являлся эскизный проект Ленгидэпа, в котором рассматривались варианты передачи энергии при напряжении 300 кВ и частично при напряжении 400 кВ. Все расчеты относились преимущественно к варианту блочной системы передачи. Согласно проекту стоимость передачи при напряжениях 300 и 400 кВ 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 кВ.

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 двухполюсные 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, блоч-

¹ Отредактированный текст доклада на совещании в ВЭИ 20 января с. г.

² Работа по анализу устойчивости передачи в основном была выполнена Д. А. Городским и М. М. Дерманер; по насыщенным дросселям — П. С. Жданов; по искусственной устойчивости — С. А. Лебедев, 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 усложняет 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. Основной технический вопрос, 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

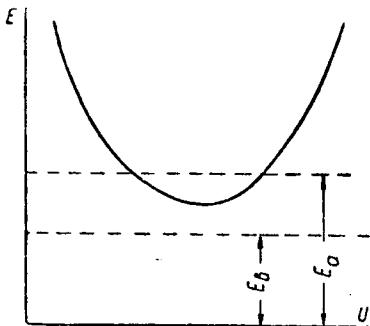


Рис. 1. Определение устойчивости нагрузки

ну кривую (E_a), то нагрузка будет устойчива, если 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 kV устойчивости нагрузки обеспечивается, и вся система распадается; при напряжении 300 kV вследствие потери меньшей мощности устойчивость нагрузки сохраняется, но ощущенные 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 kV 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 стоимости³ переданного киловатт-часа с 2,23 до 2,54 коп.

Для напряжения 300 kV 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.

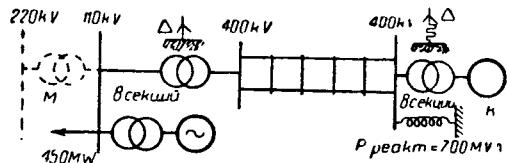


Рис. 2. Схема системы передачи и ее константы.

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

Динамическая устойчивость при двухполюсном замыкании на землю и передаче в Москву 600 MW при напряжении 400 kV 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 MVA 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-kV 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-

³ 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 позволяют 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 устойчивости⁴.

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 линии — 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 удержать 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 приведены 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 произведенны расчеты, лимитирующим фактором передач Куйбышев — Москва является статическая устойчивость. Поэтому нами были разработаны мероприятия, направленные на повышение устойчивости.

Первым мероприятием является применение насыщенных дросселей вместо обычных. Для схем передачи с дросселями в начале линии синхронизирующая мощность между станцией и приемной концом зависит от регулирующего эффекта дросселей⁵. Величину регулирующего эффекта можно характеризовать следующим: емкость линии имеет отрицательный регулирующий эффект; у синхронного компенсатора он обычно положителен, в 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 получается довольно значительным. Так, например, для системы передачи, аналогичной куйбышевской, увеличение предельной мощности за счет насыщенных дросселя получилось порядка 15%. Насыщенные дросселя сказываются благоприятно также и в 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:

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

⁵ Регулирующий эффект дросселя есть производная $\frac{dQ}{dU}$ 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 компенсаторах 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 э. д. с. холостого хода становится равной нулю ($\frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) = 0$). Протекание процесса нарушения статической устойчивости при работе в области искусственной устойчивости ($\frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) < 0$) 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 э. д. с. за продольным переходным реактанцем 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, проведенные для куйбышевской передачи, влияние реактанцев повышающих трансформаторов на предельную мощность сравнительно невелико и составляет примерно 0,07% на 1% реактанца. Для понижающих трансформаторов понижение реактанца оказывается несколько заметнее и составляет примерно 0,28% на 1% реактанца. Таким образом уменьшение реактанца понижающих трансформаторов более целесообразно, чем повышающих.

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 двухполюсном замыкании на землю дали предельное время выключения при четырех постах 0,27 sec, а при трех — 0,19 sec. Столь благоприятные результаты позволили поставить вопрос о сохранении динамической устойчивости по крайней мере при большинстве, если не при всех, трехполюсных к. з. с тем, чтобы получить систему, динамически более устойчивую, чем существующие системы передачи 220 и 110 kV. Предельное время выключения трехполюсного к. з. при четырех постах составило 0,11 sec, что может быть обеспечено при собственном времени защиты 0,02—0,04 sec и выключателей 0,06 sec, уже достигнутых на практике. При трех постах это время равнялось 0,07 sec, 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 передачи на киловатт-руб.	Стоимость энергии в Москве, коп./квт·ч
Без мероприятий для увеличения статической устойчивости		762	2,544
С применением электронных регуляторов напряжения и насыщенных дросселей . . .	4 переключательных поста	701	2,38
	3 переключательных 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 равносочены.

Заключение. На основании приведенных материалов можно заключить, что короткие замыкания на линии не влекут за собой больших трудностей в замкнутом варианте, вместе с тем отдаляет 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 стоимостях 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 эксплоатации.

Намечаемая схема линий электропередач Куйбышевской межрайонной гидростанции¹

А. И. Баумгольц

Управление строительства
куйбышевского гидроузма

ВЫРАБОТКА 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 предвари-

тельно. 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 — восток от Волги. Центром этих ирригационных нагрузок будет являться Савельевка.

¹ 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 передач говорить преждевременно. Во всяком случае линия передачи от Камышин 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.

¹ Отредактированный текст выступления на совещании в ВЭИ, 20 января с. г.

Как будут работать линии электропередач Куйбышев — Москва?

Куйбышевский гидроузел при наличии судоходной деривации может, не нарушая нормальную судоходства, вести суточное регулирование широких пределах, что для других гидростанций невозможно в таком размере. Кроме того, имея 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 (Кашин, Чебоксары, Сокольи 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 в различных по водности годах. При этом работа линий передач характеризуется годовым числом часов использования в среднем около 4500; в маловодные годы использование может до 3000 h, а в многоводные возрастает до 6500 h. Загрузка линий передач в Поволжье

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

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 передач от Куйбышева на Москву для передачи 600 MW — при напряжении 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 km.

Куйбышевской гэс при напряжении 400 kV эта мыслится в таком виде: Москва, Горький, ирригационный район, Уфа, Магнитогорск.

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

На Урале линия 400 kV будет доходить только до Екатеринбурга.

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

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

А. Горев совершенно правильно отметил, что все мы, производимые до сих пор, базировались на заездах величинках энергопотоков. Во вступительном докладе Баумгольц сказал, что величина 600 MW мы считаем как минимальная, возможно, потребуется передача до 1000 MW. При таком росте нагрузки линий пе-

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

редачи энергии Центрально-промышленного района, особенно учитывая параллельное этому росту строительство гидростанций на Северном Урале, можно считать, что основное направление электроэнергии 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 линий 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 эксплоатации 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.

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 достаточно резервы мощностей, чтобы поднять мощность вышедшего 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 вопросы 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 также, 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 больший 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 важны 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 идеи 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 допускать потому что это потребует отключения соответствующей машины. 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 вопросу о выборе напряжения, я прежде всего хочу упомянуть о экономической стороне его.

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

Но, кроме стоимости, выбор напряжения предопределяется рядом других факторов, в частности экономикой цветного металла.

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 производством цветного металла.

У нас ввиду вредительских действий сетевое строительство отставало от строительства станций. Мне кажется, что сегодня момент экономии цветных металлов является важнейшим фактором, определяющим предпочтение 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 определенного участка на ремонт можно будет в этом случае не жертвовать выключением параллельного участка и помимо разрыва передачи.

Если мощность передачи достигнет миллиона kW, придется в схеме т. Якуба иметь 4 цепи. Это требует соответствующих подсчетов. С точки зрения экономии приятнее было бы иметь вариант передачи с фигурирующими не 2 цепи, а 3.

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

При проектировании передачи вопрос об увеличении грозоупорности придется учесть. С этой точки зрения может быть выгоднее линии передачи вести по разным трассам, но с таким расчетом, чтобы в районах ключательных постов они сходились.

Я хочу напомнить об одном дополнительном моменте, о котором никто не говорил, — это о продольной компенсации. Хотел бы обратить внимание проектировщиков 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 3-го тока.

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

При передаче по двум проводам для трех цепей, но 6 фаз, т. е. то же самое, что при двух цепях в одной передаче.

Создание солидных заземлений в обоих концах представит 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, повидимому, необходима связанный передача (мои исследование вопроса о вероятных масштабах потребления и времени готовности куйбышевского гидроузла этот вывод полностью подтверждают).

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

Однако по моему мнению не эти цифры, а совсем другие соображения решают вопрос о выборе напряжения в тех линиях передач от куйбышевского гидроузла и других волжских гидростанций, которые нельзя выполнить 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 пропускная способность линий при передаче на большие расстояния соответствовала мощности агрегатов. То же соответствие пропускной способности одной цепи при 440 kV мощности агрегатов будет иметь место после форсирования куйбышевской гидроцентрали с гидротурбинами на 150—200 MW.

Я считаю необходимым иметь для каждой ответственной передачи электроэнергии не менее двух цепей. Если 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 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, обойти тольк напряжениями 220 kV и 440 kV для связи с различными системами будет невозможно, окажется необходимо применять и промежуточное напряжение 330 kV.

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

Вся единая система европейской части ССР может быть осуществлена межрайонными линиями 220 и 330 kV², более высокое напряжение при сохранении трехфазного тока понадобится только в Сибири.

По обстоятельству, что в конечном итоге разногласия при применении напряжения 440 kV будет заручено несколько меньше цветного металла, чем при напряжении 330 kV, я никак не могу считать решающим доводом для выбора напряжения. Остановившись на 440 kV, мы имели бы возможность более постепенно и более разветвленно развивать электрические связи между волжскими гидростанциями и соседними системами. 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 в Куйбышева будут 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 действие 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 ГЭС) 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 перегнать 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 расчетах, 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 (натуальная нагрузка 300-kV линии), равная $\frac{225}{300} = 0,75$, а при базисной мощности 400 MW (натуальная нагрузка 400-kV линии) — $\frac{400}{300} = 1,33$.

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 связанный 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 остальная часть сети системы Мосэнерго.

В случае, например, блоковой 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

¹ 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 ограниченной условиями токов к. з. мощности. Кроме того, должна быть какая-то объединяющая отдельные элементы городской системы артерия. Эта артерия предполагалась нами в форме 220-кВ 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 сек.

Если исходить из схемы приемной подстанции, которая имеет 2 трансформатора и разделена на шинах низкого напряжения на 2 секции, то трехполюсное 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 сек.

Если же эта авария произойдет где-либо в сети на питаемой от трансформатора 100-кВ подстанции, то при мощности этого трансформатора, не превышающей 30 МВА, блоковая система способна выдержать такой режим при его любой длительности. Для блоков характеристика градации: 1) 0,08 сек как минимальнейшее время отключения наиболее жизненных элементов системы; 2) 0,25 сек 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 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 км, 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-кВ варианта. Нами была рассмотрена передача нагрузки 0,71 натуральной мощности на цепь при четырех постах при мощности реактора, приблизительно равной той, которую назвал С. А. Лебедев (немножко меньше), и при применении быстродействующего 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 увеличении постоянной инерции куйбышевских генера-

торов до 15 sec вместо 10, как принималось нами ранее. При 10 sec 400-кВ вариант получился неустойчивым. Поэтому 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 связанный передачи в одинаковой мере остаются общепринятыми условиями к. з. в приемной сети. Приемная сеть представляется наиболее неопределенным моментом всей задачи. 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 мгновенное отключение при бесконечно-дробном секционировании линии.

Тогда, казалось бы, можно работать по связанный 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 превзойти эту величину для связанный 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 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 в Ленинградском отделении Гидроэнергопроекта оно учтено не было. Поэтому в настоящем проекте была произведена проверка, как будут вести себя приемники при трехполюсном к. з. на блоке, дляящемся 0,08 сек (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 издания, 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 устойчивое состояние приемников, то это легко исправить, изменив схему сети.

П. С. Жданов
ВЭИ

ВЫСТАПАВШИЕ здесь работники Мосэнерго и Куйбышевского управления привели довольно убедительные доводы в пользу повышенного напряжения. В частности приведенные т. Якуб цифры экономии металла, повидимому, близки к истине, хотя он и рассматривал совершенно новый, неразработанный вариант сети. Я подсчитал аналогичные цифры для старых вариантов сети Ленинградэпа и получил близкие результаты: примерно 18 500 км провода на 300 кВ, с одной стороны, и 8500 км на 400 кВ плюс 3 цепи на 220 кВ, 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-кВ цепь заменит 3 цепи на 220 кВ, которые фигурируют в 400-кВ старом варианте, где одна 400-кВ цепь на Горький не могла быть принята 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 неоппортунистическое 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-Краевского 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 с точки 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 реактивностью 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. Этими авариями сейчас пытаются бороться, стараясь поддерживать уровень напряжения в сети. Но что можно сделать с напряжением, если выйдет генератор? Здесь избежно 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, г. 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 трехполюсных к. з. на линиях, чего мы не требуем от существующих систем. Нами получено время отключения при трехполюсных к. з. при известных облегченных условиях 0,1 сек. Собственное время масляников 0,06 сек и защиты 0,02 сек обеспечивает нас по крайней мере при большинстве трехполюсных 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 трехполюсные к. з. Причина этого та, что институтами были приняты различные исходные данные мощности реактора и генераторов.

Работники Ленинградского индустриального института довольно решительно разделались 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 возможностью местных неравномерностей в характеристиках 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, $\cos \varphi = 0,8$ и 195 MW, $\cos \varphi = 0,85$.

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 реактанц 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 изменяется 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 связаны 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 подходит к номинальному напряжению.

Я. М. Червоненкис

Гидроэнергопроект

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 гидростанцией Шахтиков 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 Маркаса на затирающее напряжение 360 kV при максимальном токе 300 A. В 1934 г. напряжение вентиля 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 Гидроэнергопроект 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 общепринятых 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. t) по сравнению с 300-kV передачей. д) Эксплоатационные расходы уменьшаются по произведенным подсчетам примерно на 19 млн. руб.: во-первых, вследствие снижения амортизационных отчислений, во-вторых, за счет сокращения числа целей.

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 A эффективных.

У нас изучение проблемы передачи постоянным током находится в начальном 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 A эффективных. Согласно заявлению работников ВЭИ Академии наук для осуществления требуемой аппаратуры и проверки ее в реальных эксплоатационных условиях потребуется 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 представится 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 эксплоатационных 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 напряжение 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 связанный системы в такой постановке в значительной мере теряет свою остроту, так как линия постоянного тока имеет больше 600% запаса, и каждый провод линий 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 звездной схемы передачи к блочной. Я считаю, что такая возможность нет. В выступлении проскальзывала 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 разных 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 переключательных постов при минимуме цепей. Блок по идеи своей ограничивает величину передаваемой мощности по обособленной группе.

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

Выступавшие здесь тт. Соловьев и Маркович утверждают, что Мосэнерго не будет располагать резервами, из-за этой системы будут недостаточными для изыскания на случай выхода из работы одного из блоков полной мощности.

Можно ли согласиться с таким «развитием» системы Мосэнерго? Безусловно, нет. Сеть Мосэнерго запущена, тема не располагает достаточной и активной и реактивной мощностью, чтобы поддерживать нормальными группу и напряжение. Все это — результат вредительской деятельности троцкистско-бухаринских агентов фашии 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 переключательными постами на напряжение 400 kV. Эта передача уже сейчас имеет удовлетворительные показания в смысле запасов статической и динамической устойчивости. У этой передачи имеются и перспективы дальнейшего улучшения и статической и динамической устойчивости.

К числу мероприятий, которые будут способствовать улучшению статической устойчивости связанной 400-kV передачи, приведенных в докладе С. А. Лебедева, можно: автоматическое частичное снижение мощности различных двигателей в случае выключения одного из блоков, установка промежуточных синхронных компенсаторов с насыщенными дросселями, я хотел бы добавить предложенное нашей лабораторией разделное выключение фаз. В двухцепной замкнутой передаче при трех переключательных постах это мероприятие несет сколько-нибудь заметной асимметрии электрического режима.

Следующее мероприятие — повторное включение. Правда это мероприятие требует оговорки. Не может ли оно означать падкой о двух концах?

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

Другое дело, что повторное включение может снова вызвать на нелинейную аварию (место пробоя демонизировалось) и вызвать ухудшение устойчивости схемы. Этот вопрос требует дополнительного исследования, но, повидимому, удовлетворительное решение не 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 выплыть 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 $550 \div 600 \text{ MW}$.

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

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

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 дешевой 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 гидростанции. Это возражение в известной части существенно: авария на передаче — более возможное явление, чем авария с самими агрегатами; агрегаты гидростанции 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 $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{10}$ от общей установленной мощности системы.

Если возникнет 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 переключательными постами. В каждом блоке будет мощность порядка $\frac{1}{2}$ 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 расстройства.

Предвидя в перспективе рост передаваемых мощностей до 1000 MW как с Куйбышевской, так и других гидростанций (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 предпосылок и прежде всего из средней мощности передачи 600 MW.

В проектах принятая 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 итии на блоки 110 kV; придется итии 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 оаться только связанный вариант в какой-то модификации. Трудность заключается и в том, что требуется иметь в московской системе резерв не менее 175 MW. Все перечисленные предпосылки должны быть пересмотрены. Как я понял заявления товарищей из Управления куйбышевского узла, мощность, передаваемая в Москву, будет более 600 MW, — надо считаться хотя бы варианто с мощностью 1000 MW.

Кроме того, можно установить, что схема, принятая в сбес 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 держать 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 предпосылок, 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. Технико-электропроект считает, что он мог бы взять на себя представление эскизного проекта передачи мощности с Куйбышевской гидростанции 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 следует 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

ВЫСТУПЛЕНИИ т. Жданова отмечалось, что пос в трехцепной линии передачи будут иметь бомбометра два выключателя на одну цепь. Исходя из схем американской установки Болдер-Дам, можно, одна создать схемы с двумя выключателями на цепь и трех- и четырехцепной линии. Это имеет некоторое отношение и к выступлению т. Сазанова. Нет нужды связывать на каждом посту все 4 линии, достаточно связать 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 распределен поровну на все четыре цепи.

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

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

Я вполне согласен с тем, что необходимо снять связанный систему на трехполюсное к. з. Выход очевидной связанный системы из работы представляет собой большую неприятность, что допускать этого на наших масштабах передачи невозможно. В наших расчетах связанный 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 связанный 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 — реже.

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

Мне представляется, что требования, выдвинутые не 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 запроектирована таким образом, чтобы не получить слишком больших токов к. з. в точке примыкания линии.

Я не являюсь сторонником только блоковой или та-

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 — связанные, более гибка, более удобна и совершенна с точки зрения эксплуатации. С другой стороны, она, несомненно, более дорогая. При нынешнем положении вопроса на данной стадии разработки передачи невозможно вынести определенного решения, что лучше — блоковая или связанные системы. Но кажется во всяком случае, что и та и другая система заслуживают того, чтобы продолжать работать с ними при дальнейшей проектировке куйбышевской магистральной передачи.

А. А. Акопян

ВЭИ

ПРИ СОЗДАНИИ той или иной степени грозоупорности — при определении защитного уровня — мы всегда исходим из номинального напряжения системы, например, при расчетах 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 токов не должны вызывать выключения вообще.

Если принять такую установку, то, конечно, оперируя формулами, связывающими число выключений и 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 случай тока молний в 220 kA, фигурирующий из года в год в статистике.

Следует заметить, что величины, которые я привожу, не больше указываемых в расчетах; в статистических данных дается весь измеренный ток молний, а в расчетной схеме принимается ток падающей волны, т. е. вдвое меньше. 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.

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

Конечно, имеется в виду, что возможность прямого удара молнии непосредственно в провода линии исключена.

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

Стоит вопрос обратного перекрытия с провода на тросы.

Важность здесь в том, что пролеты очень большие требуются очень большое расстояние между проводами и тросами.

Проф. Горев указал на одну возможность снижения расстояния. Предлагалось в середине пролета соорудить промежуточную опору и с помощью такого средства 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 практическому уменьшению пролета вдвое. При этом же расстояние между тросом и проводом в 14—15 m можно считать абсолютно грозоупорным. Тогда токи 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 конструкций?

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 реакторами, как это требуется из условий устойчивости. Разница в реакторе сопоставляемых типов достигнет 1—1,5%.

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

Если ориентироваться на доставку трансформаторов водным путем или на возможность сборки их на месте, то тогда вопрос о реакторе в значительной мере отодвигается на задний план. Необходимый реактор 10—12% можно будет достичь при неизбежном, естественно, удешевлении и утяжелении трансформаторов. Если станционные трансформаторы могут быть доставлены водой при условии, что представляется 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, повидимому, 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 представляет 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 представляют 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 увеличиваем 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 эксплоатации 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 произведено снижение мощности, т. е. ограничение мощности потребителя. С этой точки зрения резерв для блочной системы передачи также должен быть выбран более вышенный, чем для замкнутой системы передачи.

Я не могу согласиться с мнением т. Сазанова, который говорил, что для 600 MW лучшее решение — 400 kV замкнутый вариант, а для большей мощности лучше переходить на блочный вариант. Наоборот, при трех цепях 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 заявлением, что дальнейший выбор замкнутой или блочной системы передачи должен решаться 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 учтено при анализе 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. Тесты, которые были произведены в Теплоэлектропротесте для различных систем, показали, что наличие такой связи между двумя секциями в значительной степени усиливает 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 решений, но, повидимому, тенденция идет в сторону повышения. Можно сказать, что следует идти на напряжение 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, повидимому, происходить в диапазоне 350—400 kV.

А. А. Горев

Ленинградский индустриальный институт

В НАШЕЙ разработке мы высказывались за генератор предельной мощности, хотя рассматривали также и вариант 160-MW машины. Вариант генератора предельной мощности электрически менее приемлем для передачи, однако трудность компоновки самой станции и лоссально 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, за которых написано одно и которые дают другое, настоящими генераторами на 195 MW с cos φ = 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. Вариант передачи 600—700 MW куйбышевской энергии в Москву по блочной системе при наличии врачающегося резерва я сейчас готов подписать свою фамилию. В осуществимости и надежности работы этого проекта я уверен; правда, будут случаи, когда блок может выпадать, но это предусмотрено расчетом, это не будет катастрофа, а просто неприятность, для эксплуатации потребители от такого выпадения не пострадают.

Напротив, под связанным вариантом я в настоящую минуту подписаться не могу уже по одному тому 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. В ВЭИ Ленинградским индустриальным институтом. У ВЭИ идет все благополучно, а мы мучаемся. В расчетах ВЭИ не только взят коэффициент мощности 0,8, но положен добавочный генератор в группу, совершенно изменив с точки зрения мощности. Поэтому переходная устойчивость в генераторной группе в расчете ВЭИ 0,18, тогда как при отсутствии лишнего генератора она равна 0,71. Конечно, можно поставить вопрос и о лишнем генераторе в группе, т. е. вместо четырех генераторов ставить пять, чтобы уменьшить их реактивность. Понятно, эта мера разрешает вопрос, но сомнительно, чтобы экономически такая мера была допустима.

Ленинградского индустриального института в связанной системе разрывная мощность получается 1,5 MVA при мощности трансформаторов связи между секциями порядка 1,2 MVA; у ВЭИ эта мощность составляет 4 млн. kVA. Вы понимаете, что это вызовет дальнейшее увеличение разрывной мощности. Производя расчет токов к. з., мы путем уменьшения мощности трансформаторов связи или искусственным увеличением реактивности старались ск卦ить 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 удовлетворением констатировал то, что оба варианта технически осуществимы. Это не то, что они равнозначны в смысле мощности на одну цепь при настоящем состоянии расчета, я сейчас держать не могу. Я поставил вопрос так: необходимо дотянуть мощность одной цепи связанного варианта до той же величины в блочном, и эту задачу мы выполним, но по-заслуженному она еще не разрешена.

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

Не только резерв, но и многое другое в электрохозяйстве Москвы необходимо привести в порядок и притом еще, 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 первов, релейной защиты, выключателей и т. д.; этого надо добиться и на это можно рассчитывать. Присоединение куйбышевской схемы к дефектам нынешнего московского электрохозяйства в плане на 7 лет вперед с этим я никак не могу согласиться. Эти дефекты должны быть изжиты во что бы то ни стало.

Доверенно 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 следствие 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 на половину срезать. Тем не менее известное экономическое преимущество при равной мощности на одну цель 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.

Переходу к вопросу об устойчивости потребителей при выпадении блока. Здесь указывалось, что опасность может возникнуть в послесварийном 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 ограничивается 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 врачающегося 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 избегать. 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 благоволите указать, какой коэффициент необходимо поставить на вздорожение 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 — Москва¹

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 кВ.

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 притти 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 Куйбышев.

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

а) стоимости передачи 1 kW из Куйбышев 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;

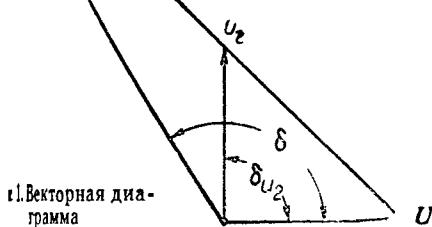
д) вариант 400 kV дает значительную экономию меди на линии передач по сравнению с вариантом 300 kV.

¹ Составлено на основе заключения, которое выработали 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. Шипов 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 реактанцем и с. холостого хода. При передаче энергии на шины бесконечной мощности через чистый реактанц предел мощности получается при угле $\delta = 90^\circ$. Если бы напряжение на зажимах генератора идеально поддерживалось постоянным величине, то предел мощности получился бы при угле напряжением на зажимах генератора и напряжением бесконечной мощности — $\delta_{U_2} = 90^\circ$ и определялся бы внешним реактанцем системы. Угол δ при этом получился бы больше 90° (рис. 1), а предельная мощность значительно бы увеличилась. Однако идеального поддержания постоянства напряжения на зажимах генератора нельзя обеспечить никакими известными регуляторами напряжения



1. Векторная диаграмма

лишь в той или иной степени приблизиться к этому. Следует отметить, что устойчивая работа при $\delta > 90^\circ$ может быть обеспечена лишь соответствующим действием регуляторов напряжения, и потому такая работа называется "искусственная устойчивость".

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

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

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

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

Делая из уравнений (1) и (2) ΔE_d и $\Delta E'_d$ и подставляя значение (3), получим после преобразования:

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \frac{1}{MT'_d} \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) &> 0 \\ \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const}) - \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) &> 0. \end{aligned} \quad (5)$$

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 реактанц. Данные схемы указаны на рис. 2. Дифференциальное уравнение для этой схемы получилось следующее:

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

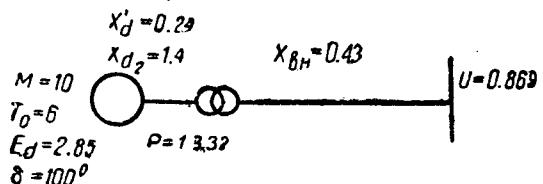


Рис. 2. Схема системы передачи

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:

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

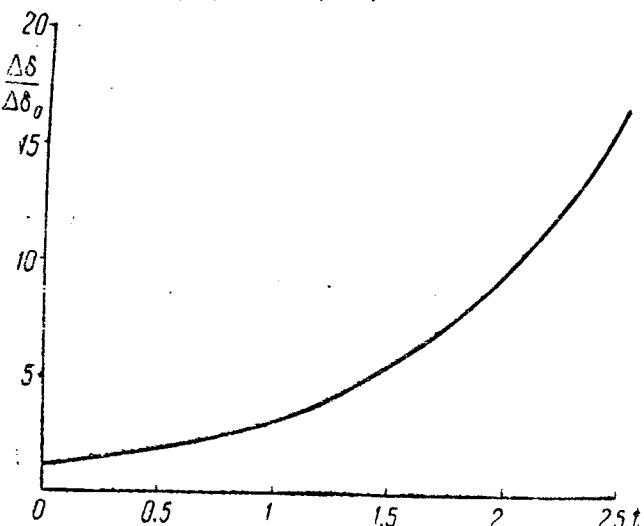


Рис. 3. Изменение среднего значения угла во времени

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° 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° , 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 реактанцием;
- 3) напряжения на зажимах генератора.

Избыток мощности для этих случаев:

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

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

$$\Delta P(U_e) = \frac{\partial P}{\partial U_e} \Delta U_e + \frac{\partial P}{\partial \delta}(U_e = \text{const}) \cdot \Delta \delta. \quad (10 \text{ c})$$

На рис. 4 даны эти семейства прямых.

При работе в области искусственной устойчивости

$\frac{\partial P}{\partial \delta}(E_d = \text{const}) < 0$, $\frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const})$ должно быть больше нуля и $\frac{\partial P}{\partial \delta}(U_e = \text{const}) > \frac{\partial P}{\partial \delta}(E'_d = \text{const})$. На рисунках для $\Delta P(U_e)$ 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 эту величину, соответствующую верхней зоне, то напряжение возбудителя уменьшается до предела $\Delta E_{de \min}$. Для суда о характере процесса можно пользоваться следующим выражением:

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

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

Предположим, ротор генератора находится в том состоянии, в котором имеет некоторую начальную положительную скорость. Напряжение возбудителя соответствует $\Delta E_{de \min}$. Из этого следует, что протекание процесса пойдет менее круто, чем $\Delta P(E'_d)$. Как только будет достигнута нижняя граница зоны нечувствительности, напряжение возбудителя возрастет до $\Delta E_{de \max}$, и протекание процесса пойдет по прямой $\Delta P(E'_d)$. При некотором угле ротор генератора израсходует свою избыточную кинетическую энергию, и угол будет уменьшаться, но $\Delta E'_d$ все время положительно, и кривая протекания процесса загнется вверх, переходя все время в большие значения $\Delta E'_d$. Когда будет достигнута верхняя граница зоны нечувствительности, напряжение возбудителя уменьшится до величины, соответствующей $\Delta E_{de \min}$. В это время протекания процесса будет переходить вниз, в зону меньших значений $\Delta E'_d$. 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. $\Delta \delta_d$ равнялась пл. $\Delta \delta_b$, $\Delta \delta_c$, $\Delta \delta_d$. Процесс будет идти аналогично рассмотренному в предыдущем разделе. Нетрудно убедиться, что максимальный угол отклик будет больше, чем в предыдущем цикле, так как $\Delta \delta_d$, $\Delta \delta_e$, равная пл. $\Delta \delta_f$, $\Delta \delta_g$, $\Delta \delta_h$, больше площади $\Delta \delta_d$, равной пл. $\Delta \delta_b$, $\Delta \delta_c$, $\Delta \delta_d$.

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

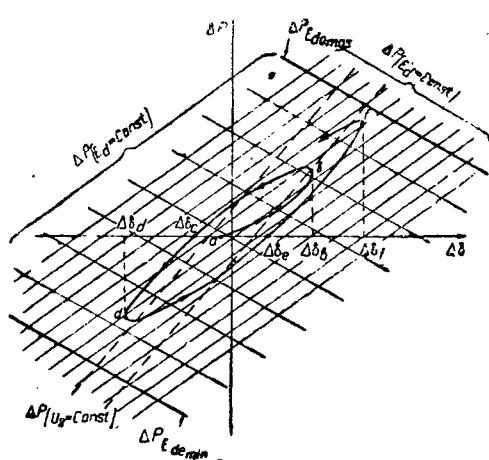


Рис. 4а. Работа в области искусственной устойчивости при ступенчатом регулировании с зоной нечувствительности. Неустойчивая работа

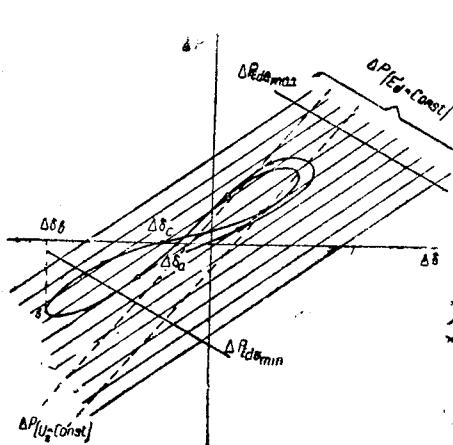


Рис. 4б. Работа в области искусственной устойчивости при ступенчатом регулировании с зоной нечувствительности. Устойчивая работа

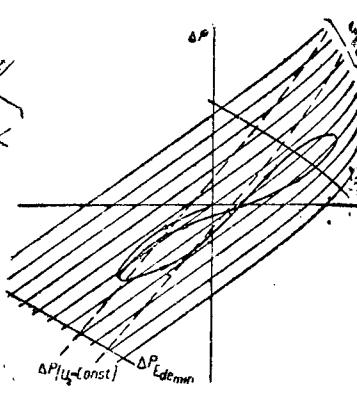


Рис. 4в. Работа в области искусственной устойчивости при ступенчатом регулировании с зоной нечувствительности. Устойчивая работа

когда угловой коэффициент угла увеличивает площади ускорения и торможения. Колебание угла будет возрастать до тех пор, пока кривая 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 как в области ниже $\Delta E_{de \min}$ $\Delta E'_d$ вновь становится положительной. Площадь ускорения следующего полуцикла будет меньше, чем площадь ускорения предыдущего полуцикла (пл. $\Delta\delta_c$, $\Delta\delta_b$, b меньше пл. $\Delta\delta_a$, $\Delta\delta_b$, b). При некоторой амплитуде колебания угла кривая процесса может описывать восьмерку, и увеличение амплитуды колебаний прекратится. Таким образом установившийся режим не имеет колебательный характер.

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

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

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

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

Изменение ΔE_{de} связано законом регулирования. Примем, что ΔE_{de} изменяется таким образом, что поддерживается первая статическая зависимость между изменением напряжения генератора ΔU_z и изменением напряжения возбуждения ΔE_{de} —

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

где b — коэффициент статизма.

Для более простого решения задачи напишем уравнение, отличное (12) и (13):

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

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

$$\begin{aligned} & \ddot{\Delta\delta} + \frac{1}{T'_d} \left(1 + \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \right) \ddot{\Delta\delta} + \frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d=\text{const})} \cdot \ddot{\Delta\delta} + \\ & + \frac{1}{MT'_d} \left(\frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta(U_z=\text{const})} + \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d=\text{const})} \right) \cdot \ddot{\Delta\delta}, \end{aligned} \quad (17)$$

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

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

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

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \right) \frac{\partial P}{\partial \delta(E'_d=\text{const})} - \\ & - \left(\frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \frac{\partial P}{\partial \delta(U_z=\text{const})} + \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d=\text{const})} \right) > 0. \end{aligned} \quad (19)$$

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

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

Разберем физическое значение этого неравенства, для чего определим избыток мощности ΔP_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

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

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. ΔE_{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 неустойчивой, и генератор будет раскачиваться. На рис. 5 показаны два случая изменения ΔE_{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 ΔE_{de} должно происходить так, чтобы избытки мощности установившегося режима ΔP_e находились в заштрихованной области рис. 5, б.

Необходимая величина коэффициента статизма. Нетрудно 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).

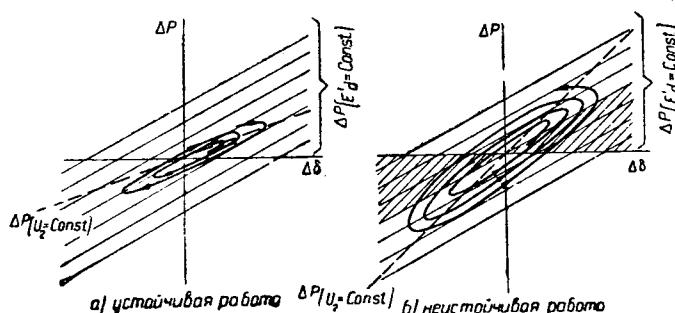


Рис. 5. Работа в области искусственной устойчивости при регулировании электронным регулятором



Рис. 6. Схема системы передачи на шины бесконечной мощности

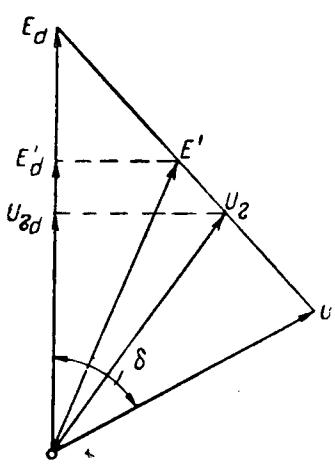


Рис. 7. Векторная диаграмма

При постоянстве продольной составляющей клемменого напряжения генератора

$$P(U_{zd} = \text{const}) = \frac{U_{zd}U}{X_{bh}} \sin \delta - \frac{U^2(X_d - X_{bh})}{2X_dX_{bh}} \sin 2\delta. \quad (26)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \delta} (E_d = \text{const}) &= \frac{E_{d0}U}{X_d} \cos \delta_0; \\ \frac{\partial P}{\partial E_d} &= \frac{U}{X_d} \sin \delta_0; \\ \frac{\partial P}{\partial \delta} (E'_d = \text{const}) &= \frac{E'_{d0}U}{X'_d} \cos \delta_0 - \\ &- \frac{U^2(X_d - X'_d)}{X_dX'_d} \cos 2\delta_0; \\ \frac{\partial P}{\partial \delta} (U_{zd} = \text{const}) &= \frac{U_{zd0}U}{X_{bh}} \cos \delta_0 - \\ &- \frac{U^2(X_d - X_{bh})}{X_dX_{bh}} \cos 2\delta_0; \\ \frac{\partial P}{\partial U_{zd}} &= \frac{U}{X_{bh}} \sin \delta_0. \end{aligned} \quad (27)$$

E'_{d0} и U_{zd0} можно выразить через E_{d0} :

$$\begin{aligned} E'_{d0} &= E_{d0} \frac{X'_d}{X_d} + \frac{U(X_d - X'_d)}{X_d} \cos \delta; \\ U_{zd0} &= E_{d0} \frac{X_{bh}}{X_d} + \frac{U(X_d - X_{bh})}{X_d} \cos \delta_0. \end{aligned}$$

Подставляя эти величины в (29), получим:

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

При этих значениях частных производных неравенство (20) дает:

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

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

$$\left(\frac{1}{b}\right)_{\min} = \frac{X'_d - X_{bh}}{X_d - X'_d} = \frac{X'_{d_{gen}}}{X_{d_{gen}} - X'_{d_{gen}}},$$

где $X_{d_{gen}}$ и $X'_{d_{gen}}$ — синхронный и переходный реактанс генератора (без внешнего реактанца).

При этом значении коэффициента статизма изменение мощности в зависимости от угла δ будет протекать по кривой, построенной для постоянства э. д. с. за переходным реактанцем ($P(E'_d = \text{const})$). Как было показано ранее [приложение (25)], левая часть неравенства (33) будет соблюдаться до момента максимума мощности $P(E'_d = \text{const})$.

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

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

стронного регулятора, необходимого для сохранения устойчивости. Максимальная мощность получится, исходя из условия постоянства э. д. с. за переходным реактанцем E_d ($P_{\max} = \text{const}$). Если бы можно было создать устойчивый режим при условии поддержания постоянства клеммового напряжения, то предельная мощность получилась бы значительно больше (рис. 8, $P_{\max} = U_{2d} = \text{const}$). Од

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 реактанцем, обеспечивающей 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 —

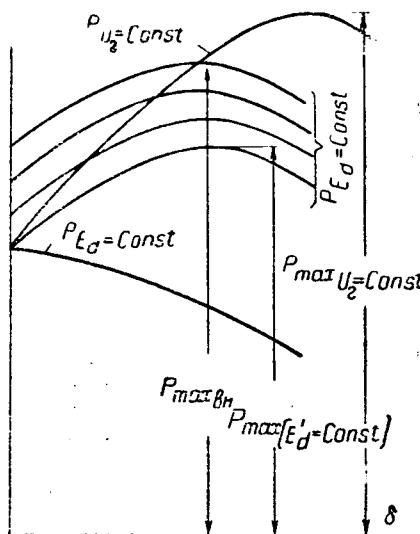


Рис. 8. Мощность в зависимости от угла δ

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

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

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

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

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

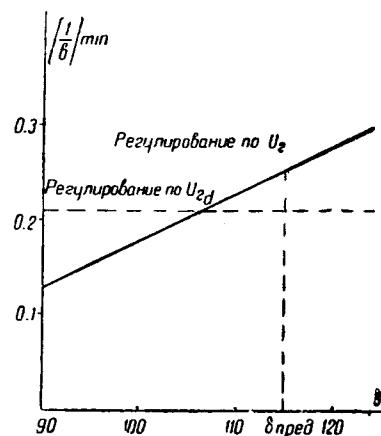


Рис. 9. Изменение минимально допустимого статизма при изменении угла δ

Из последнего уравнения следует, что в этом случае величина минимально допустимого коэффициента статизма определяется не только реактанцами генератора, как это имело место при регулировании по продольной составляющей напряжения, — но и внешними реактанцами, а также режимом работы ($\frac{U}{U_2}$ и δ). Изменение минимально допустимого коэффициента статизма в зависимости от угла δ 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° . 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 реактанцем требуется меньшее значение коэффициента статизма, то при постоянстве его при возрастании угла э. д. с. за переходным реактанцем 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 эксплоатационном отношении.

Учет конечной скорости изменения напряжения на зажимах возбудителя. Выше принималось, что напряжение на зажимах возбудителя ΔE_{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 зажимах генератора.

Уравнение возбудителя будет:

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

где ΔE_{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 регулировочного процесса:

$$\begin{aligned} & \text{IV} \\ & \Delta\delta + \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_d'} \right) \ddot{\Delta\delta} + \\ & + \left(\frac{1}{T_e T_d'} + \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})}}{M} + \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{T_e T_d' \frac{\partial P}{\partial U_z}} \right) \ddot{\Delta\delta} + \\ & + \left(\frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})}}{T_e M} + \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})}}{T_d' M} \right) \ddot{\Delta\delta} + \\ & + \frac{1}{MT_e T_d'} \left(\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})} + \frac{b \frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \delta(U_z = \text{const})} \right) \Delta\delta = 0. \quad (39) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{b} > \frac{\frac{\partial P}{\partial E_d} \left[\frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(U_z = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})}}{T_d'} + \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(U_z = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})}}{T_e} \right]}{\frac{\partial P}{\partial U_z} \left[\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})} \right] \left[\frac{1}{T_e} + \frac{T_e \left(T_d' \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})} + T_e \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})} \right)}{M(T_e + T_d')} \right]}$$

Для уравнения типа:

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

условия устойчивости будут:

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

$$\left| \begin{array}{cc} a_1; & 1 \\ a_3; & a_2 \end{array} \right| = a_1 a_2 - a_3 > 0; \quad (41)$$

$$\left| \begin{array}{ccc} a_1; & 1; & 0 \\ a_3; & a_2; & a_1 \\ 0; & a_4; & a_3 \end{array} \right| = a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_3^2 > 0. \quad (42)$$

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

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})}}{T_e} + \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})}}{T_d'} > 0; \\ & \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})}}{T_d'} + b \frac{\frac{\partial P}{\partial E_d}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} \cdot \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(U_z = \text{const})}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}} > 0. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Из этих двух неравенств получаем:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})} > - \frac{T_e}{T_d'} \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})}}{\frac{\partial P}{\partial U_z}}; \quad (44)$$

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

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,

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) определяя значение коэффициентов и решая неравенство относительно b , получим:

$$b > \frac{- \frac{\partial P}{\partial U_z}}{\frac{\partial P}{\partial E_d}} \left[1 + \frac{\left(\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})} \right) T_e^2}{M(T_e + T_d')} \right].$$

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

Третье условие устойчивости (42) дает:

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 упрощение повышает запас устойчивости. Тогда

$$\frac{1}{b} > \frac{\frac{\partial P}{\partial E_d} \left(\frac{\partial P}{\partial \delta(U_z = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})} \right)}{\frac{\partial P}{\partial U_z} \left(\frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})} \right)} \times \left[1 + \frac{T_e \left(\frac{\partial P}{\partial \delta(U_z = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})} \right)}{T_d' \left(\frac{\partial P}{\partial \delta(U_z = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})} \right)} \right].$$

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

$$\frac{1}{b} > \left(\frac{1}{b} \right)_{\text{пред}} \left[1 + \frac{T_e}{T_d'} \frac{\left(\frac{\partial P}{\partial \delta(U_z = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d = \text{const})} \right)}{\left(\frac{\partial P}{\partial \delta(U_z = \text{const})} - \frac{\partial P}{\partial \delta(E_d' = \text{const})} \right)} \right].$$

Чтобы оценить количественное влияние конечной скорости изменения напряжения возбудителя на величину минимально допустимого статизма, разберем случай регулирования по продольной составляющей напряжения генератора (U_{2d}) при работе его на шины бесконечной мощности чистый реактор. Подставляя в (49) значения частных

гих из уравнений (29), (31), (32), получим:

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

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

$X_{d_{\text{ген}}}$ и $X'_{d_{\text{ген}}}$ — синхронный и переходный реактанцы генератора (без внешнего реактанца).

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

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

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 анализ¹ показал, что при регулировании напряжения электронным регулятором возможно обеспечить работу генератора в области искусственной устойчивости без ограничений, если при этом регулятору будет дана определенная статическая зависимость между управляемым напряжением и током возбуждения генератора.

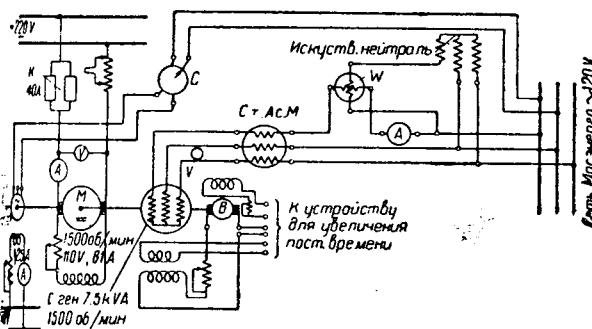
При анализе рассматривалась скорее качественная картина и не учитывался ряд факторов (периодные процессы в статорной обмотке, явления в цепях железа ротора и пр.). Поэтому потребовались известные корректировки на экспериментальной базе.

Лабораторная установка (рис. 1а) представляла собой мотор-генераторный агрегат 7,5 кВА, вставший параллельно сетью Мосэнерго, через внешний реактанц.

Испытанный генератор имеет синхронный (ненагруженный) реактанц $x = 9,66 \Omega$; $r_{\text{ак}} = 0,47 \Omega$; $\tau = 0,12 \text{ sec}$; $X'_d = 3,5 \Omega$. Внешний импеданс его $= 1,34 \Omega$ и $r_{\text{вн}} = 0,536 \Omega$.

Постоянная времени генератора примерно в 15 раз меньше, чем у больших машин. Для увеличения ее было применено устройство по теме рис. 1б.

В статью проф. С. А. Лебедева «Анализ искусственной устойчивости генераторов» в этом номере.



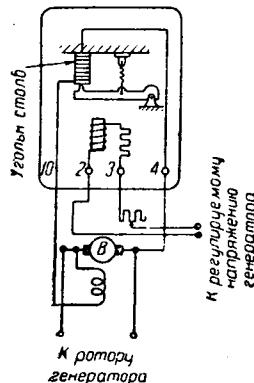


Рис. 1в. Схема соединения угольного регулятора на-
прижения

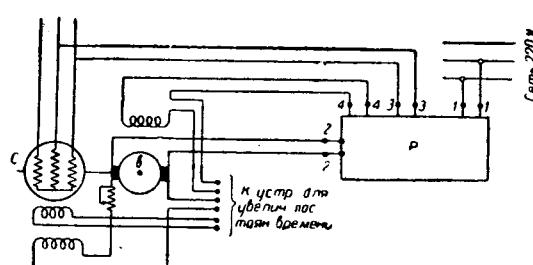


Рис. 1г. Схема включения электронного регулятора P в цепь синхронного генератора C при регулировании по U_e .
11 — питание тиатронов, 22 — к обратной связи, 33 — к измерительному элементу (мостику), 44 — к выходу тиатронов

картина — тиатрон будет уменьшать ток возбуждения, создавая таким образом эффект увеличения постоянной времени. С помощью описанного устройства постоянная времени была увеличена в 8 раз.

Как известно, момент, создаваемый стационарным агрегатом, в начале нарушения статической устойчивости остается постоянным. Между тем шунтовой мотор, особенно мотор с независимым возбуждением, очень чувствителен к изменению скорости машины. Так, изменение скорости агрегата в 3–5% вызывает изменение момента шунтового мотора на 30–50% и более.

Чтобы по возможности ограничить влияние скорости на момент мотора, был применен простейший, но весьма эффективный способ: последовательное включение в цепь якоря мотора омического сопротивления (рис. 1а). В лабораторной установке мотор подключался к сети 220 В через колонку 110 В, 40 А. При этом, как показали расчеты, зависимость между скоростью машины и моментом мотора была линейной.

При качаниях и в первый момент выпадения машины из синхронизма (до 150°) скорость машины изменяется в пределах 1–5%. В таких же пределах изменится момент мотора. Однако при этом мощность, развиваемая на валу генератора, останется неизменной, так как скорость мотор-генератора настолько же возрастает, насколько уменьшается момент мотора. Такие результаты стабилизации момента мотора следует считать вполне удовлетворительными.

Угол между ротором генератора и вектором напряжения сети Мосэнерго измерялся синхроноскопом, присоединяемым к двум напряжениям — вспомогательной машинки (рис. 1а) и сети.

Испытания проводились с угольным² (рис. 1в) и электронным³ (рис. 1г) регулятором. Зона нечувствительности угольного регулятора — 1–1,5%, а у электронного равна нулю.

За регулируемое напряжение было принято клеммовое напряжение генератора, определенное опытно (без регуляторов, $i_a = \text{const}$) при предельной мощности генератора.

² Описание угольного регулятора конструкции ВЭИ дано в журнале «Вестник электропромышленности» № 11, 1936.

³ См. статью инж. Г. Р. Герценберга, «Электронно-ионный регулятор напряжения для машин переменного тока» в этом номере «Электричества».

При настройке угольного регулятора обнаружилось, что стабильное регулирование с ним получается при зоне нечувствительности не ниже 1,0–1,5, эта зона и была принята для опыта.

Проверка работы электронного регулятора показала, что устойчивое регулирование достигается при статизме в рядке от 1,5–3% и выше. При меньших статизмах генератор испытывал незатухающие качания. Последующие опыты велись при статизме регулятора в 3–6%.

Наряду с записью по приборам на электрических величин производились для каждого опыта поверочные, графоаналитические расчеты мощности, между E и U_c и между E' и U_c , напряжения на клеммах машины и ее э. д. с.

По измеренным в опытах току генератора, напряжению сети, активной мощности генератора, отдаваемой в сеть, и постоянным генератора внешнего импеданца строилась векторная диаграмма э. д. с. и напряжений генераторов (рис. 2).

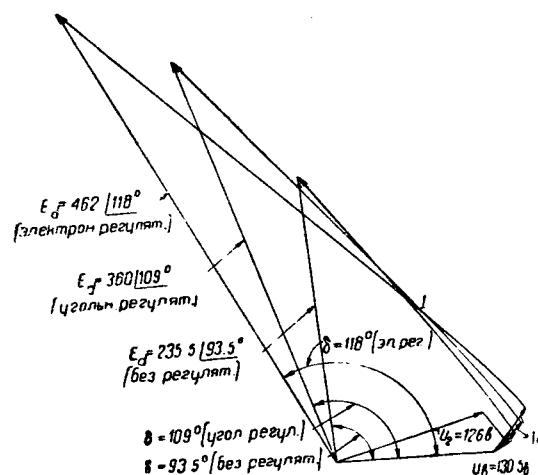


Рис. 2. Векторные диаграммы э. д. с. и напряжений, построенные для предельных по мощности режимов для трех случаев: без регулировки, угольный регулятор, электронный

Активная мощность генератора определялась по формуле:

$$P = \frac{E}{z_c} \sin \alpha_c + \frac{E U_c}{z_c} \sin (\delta - \alpha_c) [\text{kW}],$$

где U_c — напряжение сети;
 z_c — импеданс системы.

Вычисленная мощность сравнивалась с суммой мощности, измеренной по прибору (мощность отдаваемая в сеть), и мощности потерь в генераторе и внешнем импедансе, определенной известным из опыта току генератора и внешнем импеданцу.

В табл. 1 даны результаты трех основных опытов (верхние значения) и поверочных расчетов (цифры в знаменателе) по ним.

Указанная в таблице предельная мощность опыта с электронным регулятором заметно меньше действительной. В дальнейших опытах удалось довести ее до 7,8 kW при $U_e = 127,5$ V.

Таблица 1

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

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	
									Толчок мощности, kW	Мощность генератора после толчка, kW
1	3,475	75°	0,195	5,6	0,28	8,05	3,755	85°	Качания затухающие; синхронный ход	Качания затухающие; синхронный ход
2	3,475	75°	0,195	5,6	0,60	17,25	4,075	93°	То же	То же
3	3,475	75°	0,195	5,6	1,00	29,75	4,475	107°	"	"
4	3,475	75°	0,195	5,6	1,25	36,00	4,725	120°	"	"
5	3,475	75°	0,195	5,6	1,445	41,6	—	—	Машина выпала из синхронизма	Машина выпала из синхронизма
6	4,285	85—90°	0,06	1,4	0,34	7,94	4,625	95°	Качания затухающие; синхронный ход	Качания затухающие; синхронный ход
7	4,285	85—90°	0,06	1,4	0,625	14,6	4,910	105°	То же	То же
8	4,285	85—90°	0,06	1,4	0,925	21,6	5,21	115°	"	"
9	4,285	85—90°	0,06	1,4	1,215	28,4	—	—	Машина выпала из синхронизма	Машина выпала из синхронизма

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

Опыты в системе Мосэнерго. Для проведения опытов Мосэнерго выделило 50-MW машину на Стalingорской 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 (см. рис. 3) работала на 110-kV шину Москвы изолированной одноцепной 110-kV линии передачи.

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

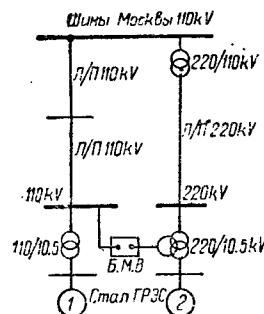
Для измерения угла и скорости испытуемой машины на ее вал насаживалась упомянутая выше синхронная машинка. Угол измерялся осциллографом по специальной потенциометрической схеме,

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

Потенциометры присоединились к двум источникам напряжения: к вспомогательной машинке и к шинам СтальгрЭС, 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.



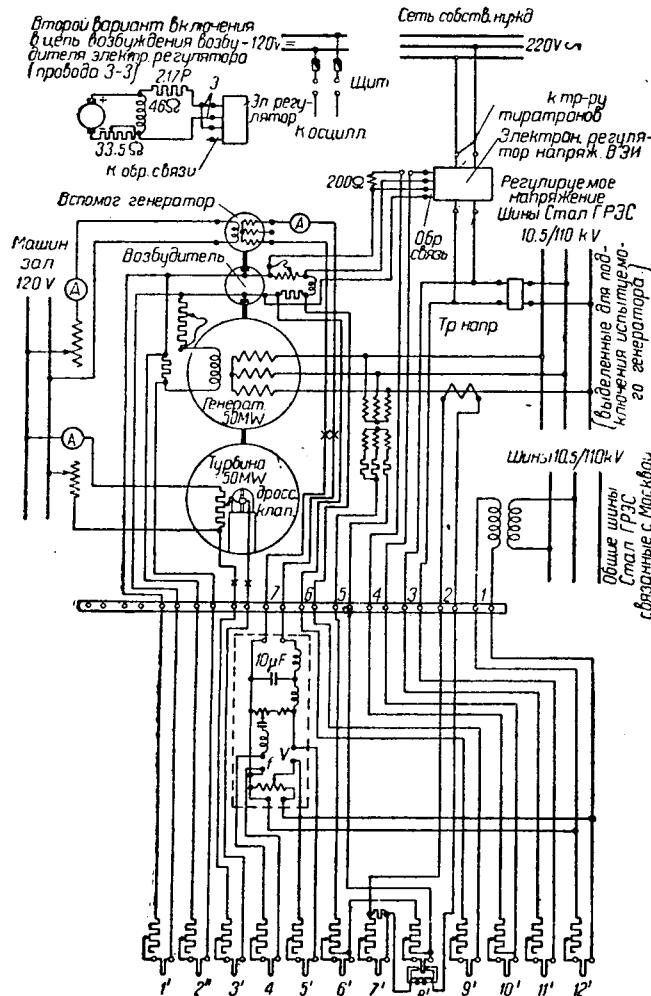


Рис. 4. Принципиальная схема соединений для измерений в опытах по искусственной устойчивости на Сталгрэс

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

При таком способе измерения угла между ротором испытуемой машины и вектором напряжения шин Москвы (шины бесконечной мощности) необходимо было считаться с наличием собственного угла самой измерительной схемы. Угол этот был условлен, во-первых, несовпадением при насадке сей полюсов вспомогательной машинки и испытуемого генератора, во-вторых, наличием на вспомогательной машинке определенной нагрузки от присоединенных к ней схем и приборов, сдвигавшей подаваемое от ее клемм напряжение по отношению к ее э. д. с., и, в-третьих, сдвигом между вектором напряжения шин Сталгрэс (подававшимся на устройства для измерения угла) вектором напряжения шин Москвы. Этот сдвиг был во время опытов постоянен ввиду поддержания неизменным нагрузочного режима на шинах передачи, связывающих эти шины Сталгрэс с 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 потенциометром, присоединенного к напряжению вспомогательной машинки. Контур был настроен в резонанс с частотой 53 Hz и имел крутоизменяющую 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 был также проведена проверка эффективности частичного 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).

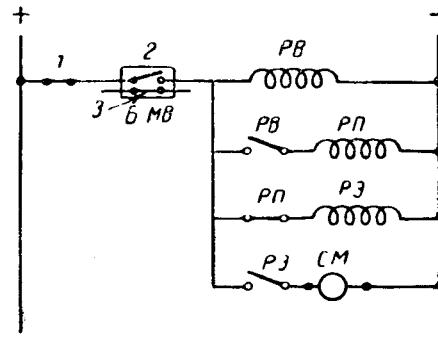


Рис. 5. Схема автоматического управления сервомотором синхронизатора, БМВ — биметаллический выключатель
1 — однополюсный рубильник для размыкания вручную цепей РВ и РП, 2 — блокирующий контакт, 3 — силовой контакт БМВ, РВ — реле времени, РП — промежуточное, РЭ — пусковое, СМ — сервомотор синхронизатор.

Схема приходит в действие в момент размыкания биметаллического выключателя 3, сопровождающееся замыканием блокирующего контакта 2. Через контакт 2 подается одновременно плюс на реле РВ и РП. Выдержка реле времени выбиралась в зависимости от характеристикой сервомотора синхронизатора (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 контакт РП, снимая плюс с пускового реле.

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

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

было достигнуто 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 δ , меньших 90° , регулятор должен действовать все время в сторону понижения тока возбуждения. При углах, больших 90° , регулятор должен был действовать все время в сторону повышения тока возбуждения. При углах δ , больших 90° , регулятор при постановке заданного ему напряжения от руки сначала действует в сторону понижения тока возбуждения генератора. В дальнейшем же по мере роста угла вследствие небаланса между постоянной токовой 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 стремится поддерживать его и вызовет увеличение тока возбуждения.

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

Время опыта через определенные интервалы

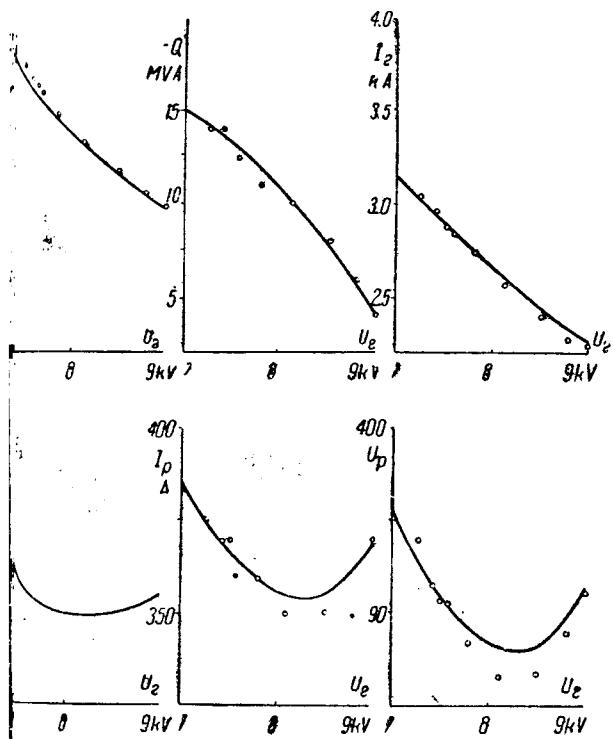


Рис. 6а. Результаты опытов с электронным регулятором

снижалось напряжение на клеммах испытуемого генератора и велась запись по приборам всех электрических величин, характеризующих режим опыта 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° начались небольшие колебания генератора, повидимому, вызванные недостаточной стабильностью регулирования в этой зоне углов. После увеличения статизма регулятора до 6% эти колебания стали исчезающими.

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

Предельный режим, достигнутый при опыте, характеризуется нижеследующей таблицей.

Величины	P_{pp} MW	δ	U_2 kV	E_d kV	I_2 A	Q MW	U V	I_p A
Опыт	35	117°	7,23	157,5	3040	-14	94	375
Расчет	35	114°	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 обычновенными 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

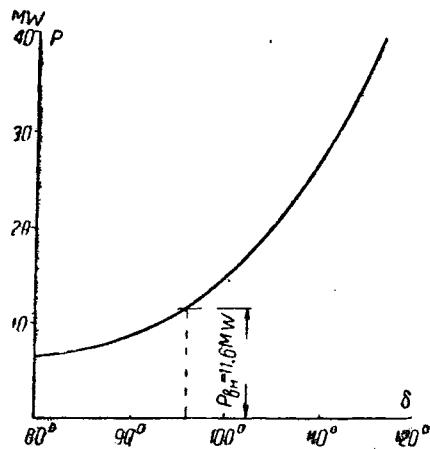


Рис. 6б. Активная мощность в зависимости от угла δ при напряжении генератора U_2 , 7,23 kV

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

В эксплоатационных 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 МВт. 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 МВт. 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 МВт). 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 МВт.

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 осциллографов.

Характеристика работы сервомотора испытуемого агрегата, снятая описанным выше образом, показана на рис. 7. Как видно из кривых рисунка, скорость работы сервомотора на убывание паровой мощности в сильной степени зависит от первоначальной нагрузки турбины: чем она больше, тем меньше скорость убывания 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 кВ протекала активная мощность 8 МВт от испытуемого генератора в 220-кВ линию передачи и к испытуемому гене-

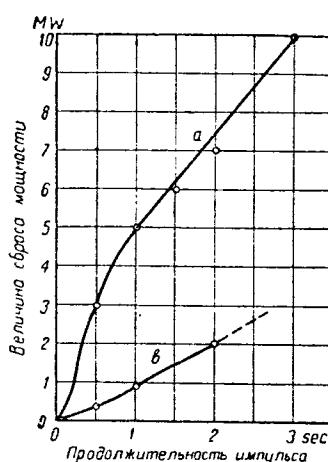


Рис. 7. Характеристика работы сервомотора синхронизатора на убывание паровой мощности при первоначальных нагрузках агрегата 30 МВт (a) и 40 МВт (b)

ратору от второго генератора реактивная мощность — 12 МВА. В схеме автоматического управления сервомотором рубильник 1 был замкнут. Контакт 2 разомкнут. На реле времени был 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 МВт. Выключение связи 110—220 кВ с помощью бустерного выключателя неминуемо должно было привести к нарушению статической устойчивости испытуемого генератора, если бы не было предусмотрено автоматически управляемого частичного сброса мощности.

После того как режим был установлен, произведена была подготовка к выключению связи с помощью БМВ; предварительно были пущены 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 МВт на 13,4 МВт (рис. 9).

Выключение связи, сопровождавшееся спустя 0,5 сек, работой сервомотора на убывание пар-

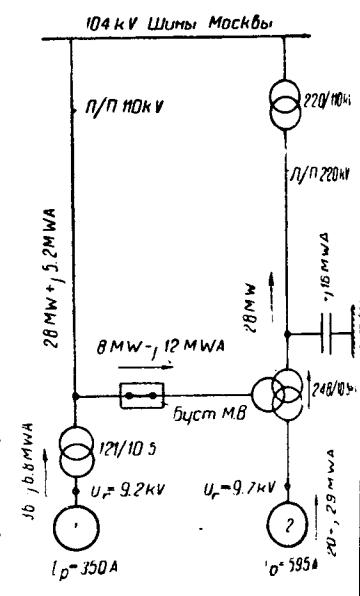


Рис. 8. Схема опыта с частичным сбросом паровой мощности и данные первоначального режима на выделенном участке
1 — испытуемый генератор 55 МВА, $\cos \varphi = 0,85$, 1500 об/мин; 10,5 кВ; генератор 55 МВА, 10,5 кВ; 1500 об/мин, $\cos \varphi = 0,85$

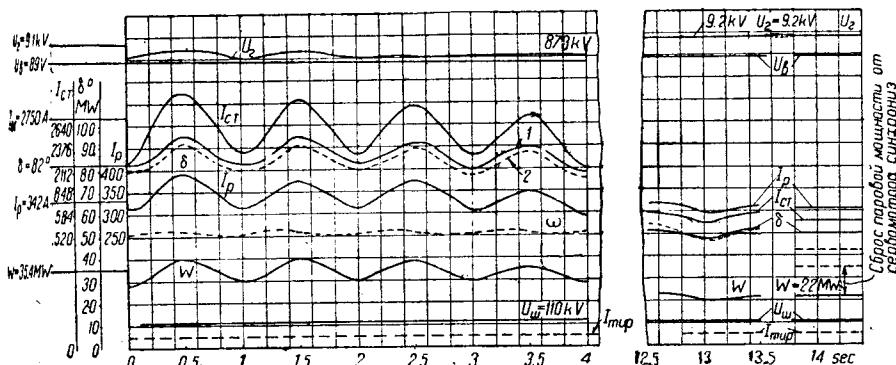


Рис. 9. Результаты расшифровки осциллографа. Выключение связи и частичный сброс паровой мощности от сервомотора синхронизатора

вызывало 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

углах: 75–85°. Этот факт создает уверенность, что при применении электронного регулятора в передачах с самым напряженным положением со статической устойчивостью (работа при двух цепях на углах 60–70°) сравнительно легко может быть обеспечена статическая и динамическая устойчивость системы при выходе одной из цепей линий передачи.

Совокупность опытов показала, что применение электронных регуляторов в наших системах, характеризующихся в настоящее

время 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. Городской, П. В. Чебышев. Работа велась под руководством и при непосредственном участии проф. С. А. Лебедева.

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

Электронно-ионный регулятор напряжения для машин переменного тока

Г. Р. Герценберг
ВЭИ

ПОМЕХО 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, затем на генераторе 50 MW, на Стalingорской грэс. Опытные данные полностью подтвердили теоретические исследования по искусственной устойчивости. Генератор при наличии элек-

тронного регулятора устойчиво работал при углах 115–120°.

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

Электронный регулятор состоит из четырех основных элементов: 1) измерительный; 2) усилиительный; 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 напряжению¹ будет всегда меньше единицы, даже при наиболее выгодных комбинациях подобных сопротивлений².

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.

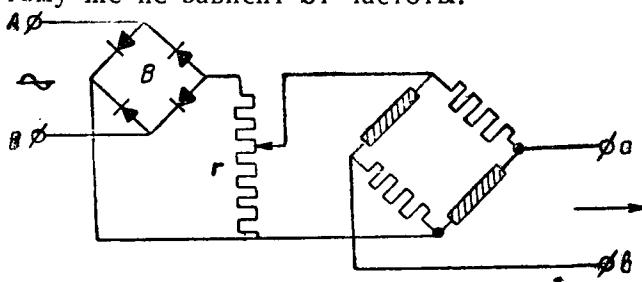


Рис. 1

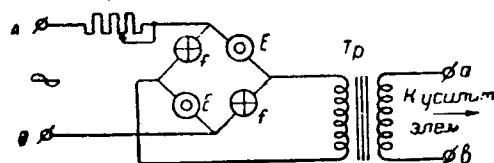


Рис. 2

Недостаток такого моста — его инерционность. При синусоидальном напряжении на мосте и отсутствии потребления в диагонали напряжение на ней будет (рис. 2):

$$U_d = \frac{U_m}{R_s + R'_s} (R_s - R'_s) \sin \omega t. \quad (1)$$

Сопротивление вольфрамовой лампы

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

сопротивление угольной лампы [3]

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

¹ 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.

² 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 ди-

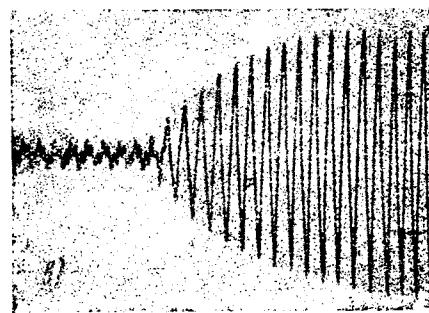


Рис. 3

гонали моста практически ни при каких значениях приложенного напряжения нельзя получить напряжение, равное нулю. Напряжение в диагонали, даже при равенстве средних значений сопротивления плеч, всегда имеет составляющую, состоящую из суммы напряжений первой и третьей гармоник, сдвинутых на 90° 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 Вт и две угольные по 32 свечи.

Эффективное значение напряжения U_d при $R_s = R'_s$ в этом случае было равно 0,1 В.

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

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

Напряжение диагонали повышалось при помощи трансформатора с коэффициентом трансформации 1:10. Следовательно, при изменении регулируемого напряжения на 1 В_{эфф} (напряжение баланса 100 В_{эфф}) на выходе измерительного элемента возникало напряжение около 3 В_{эфф}.

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

³ ΔR не превосходит практически $0,005 R_0$.

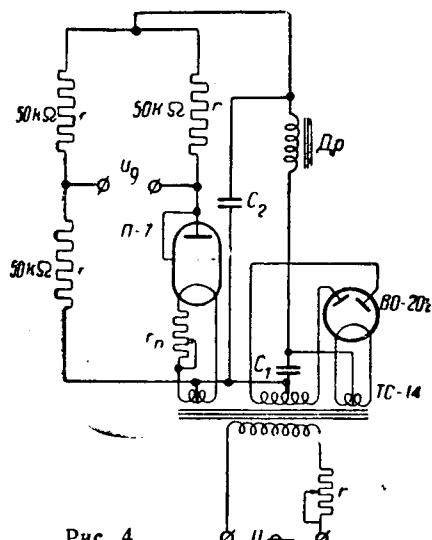


Рис. 4

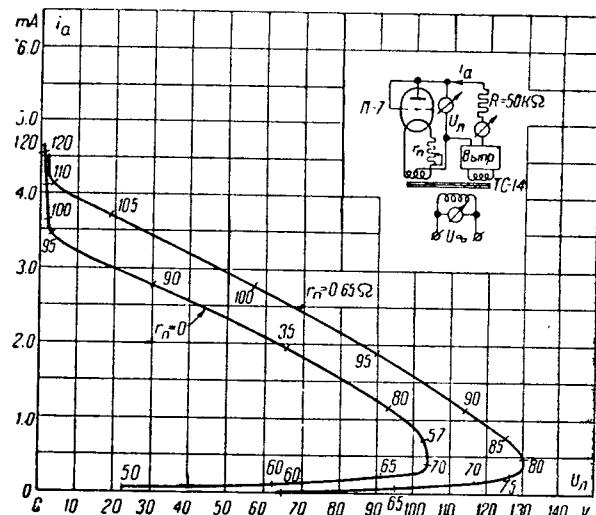


Рис. 5

Рассмотрим второй вариант измерительного элемента.

Как уже указывалось, чувствительность моста выше единицы можно получить при нелинейном элементе с характеристикой, аналогичной характеристике дуги. Таким свойством обладает диод, работающий в режиме насыщения и включенный масно 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 изменяется также и напряжение накала. Как видно из 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 элемента⁴. Напряжение сети выпрямляется мостовым 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 катодиоде 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 VA.

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

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

шой 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.

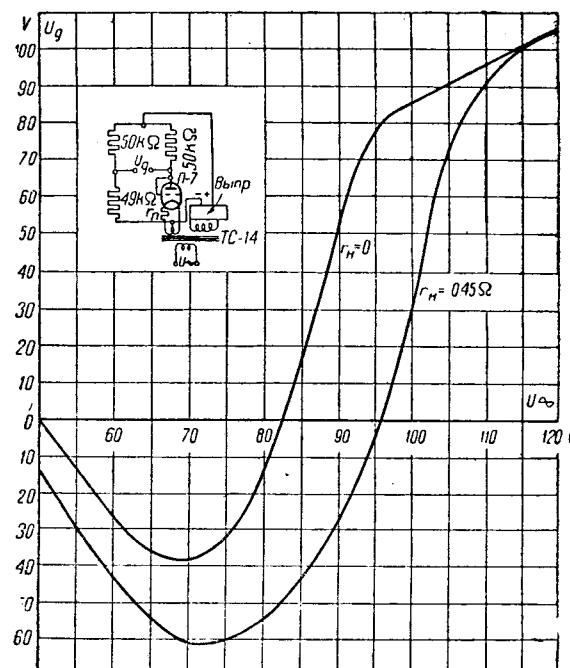


Рис. 6

⁴Предложена А. И. Васильевым.

Усилительный элемент. Назначение усилительного элемента в электронном регуляторе напряжения — усилить напряжение, получаемое от измерительного элемента, и управлять средним током тиатронов.

Для разработанного электронного регулятора был принят фазовый метод управления средним током тиатронов. При этом методе средний ток зависит от сдвига фазы сеточного напряжения по отношению к анодному.

Схема фазового мостика приведена на рис. 7. Отрицательное напряжение, подаваемое на сетку лампы (клеммы AB) от измерительного элемента, запирает лампу, в результате чего изменяется сдвиг фазы напряжения на клеммах ab. Трансформатор Тр-II служит для отделения постоянной составляющей.

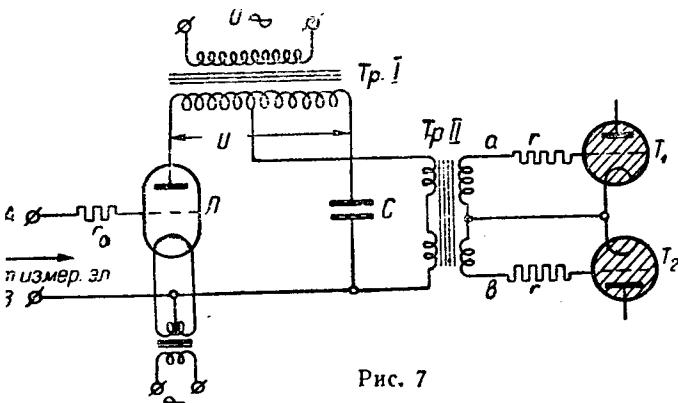


Рис. 7

Наилучшая чувствительность была достигнута с лампой УБ-178.

Накал лампы L установлен в 90% от нормального. При выбранных данных фазовый мостик обеспечивал сдвиг фазы сеточного напряжения тиатронов по отношению к анодному на 130° при подаче на сетку лампы напряжения 2,5 V.

Силовая часть. Эта часть схемы представляет обычный двухполупериодный управляемый выпрямитель.

Электронный регулятор включен таким образом

(рис. 8), что ток тиатронов увеличивает ток мотки возбуждения. В схеме применены ртутные тиатроны производства ВЭИ на среднюю силу тока 1,7 A и амплитудное значение 7 A.

Для 50-MW генератора регулятор может обеспечивать регулирование напряжения в пределах изменения тока ротора от тока холостого хода до тока, соответствующего десятипроцентной нагрузке по току ротора.

Эластичная обратная связь. Без применения эластичной обратной связи регулирование машины, имеющей относительно большую постоянную времени, при помощи электронного регулятора постоянной времени которого весьма незначительна, вызывает неизбежно качания (перегородки). Система эластичной обратной связи оказывает влияние на процесс регулирования только во время переходных процессов. Существует довольно много систем обратной связи — винтовая, индуктивная, с дросселем насыщением и т. д. Нами была принята наиболее простая емкостная система, так как она позволяет легко осуществлять подгонку к любой машине и, несмотря на свою простоту, практически дает вполне удовлетворительные результаты.

Система эластичной обратной связи состоит (рис. 8) из потенциометра r_9 , емкости C_3 и сопротивления r_2 . Потенциометр r_9 включен на напряжение возбудителя, а сопротивление r_2 — в цепь сетки. При падении напряжения генератора лампа открывается больше, вследствие этого ток тиатронов, а следовательно, и напряжение возбудителя увеличиваются. Увеличение напряжения возбудителя вызывает появление на сопротивлении r_2 напряжения, действующего в сторону запирания лампы и тем самым стабилизирующего регулятор.

Принципиальная схема регулятора приведена на рис. 8. Отдельные элементы ее были описаны уже ранее. Работа регулятора происходит следующим образом.

Предположим, что вследствие включения грузки напряжение генератора упало. Тогда напряжение диода L_2 уменьшится, в результате чего уменьшится также отрицательное напряжение на сетке лампы L_3 и анодный ток возрастет. Фаза сеточного напряжения, подаваемого на тиатроны, по отношению к анодному напряжению изменяется таким образом, что ток тиатронов увеличивается. Тем самым увеличивается напряжение возбудителя и напряжение генератора восстанавливается до первоначального значения (с учетом статизма регулятора).

Внешний вид регулятора (без кожуха) показан на рис. 9.

Испытание. В лаборатории проводились испытания на генераторе мощностью 7,5 kVA, 50/260/150 V, 16,7/29 A, приводимом во вращение током постоянного тока 11 л. с. Регулятор включался непосредственно на обмотку возбуждения возбудителя 110V, 1,25 kW. Опыты производи-

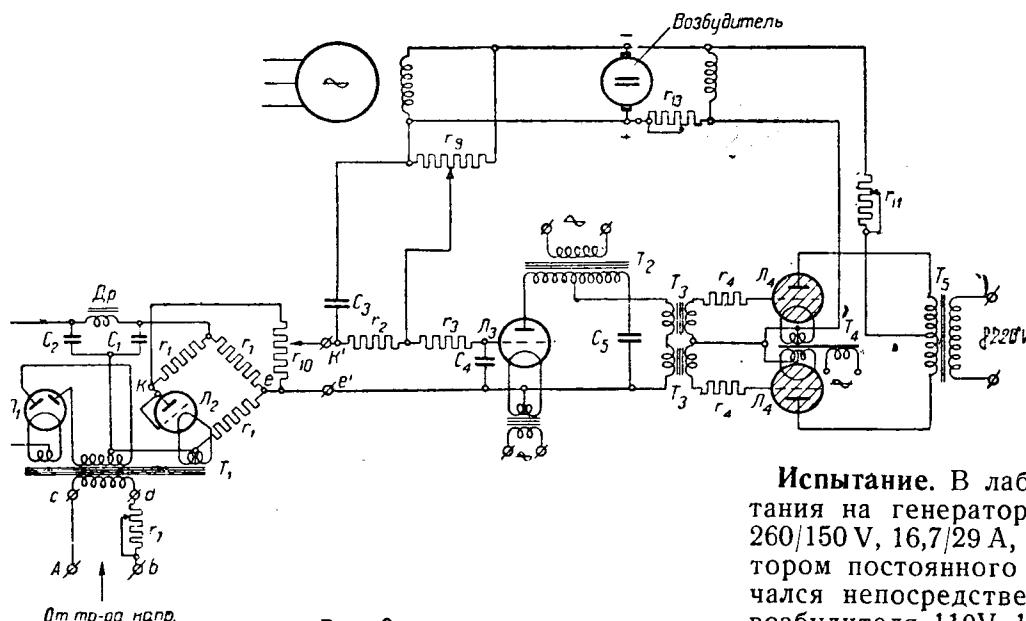


Рис. 8

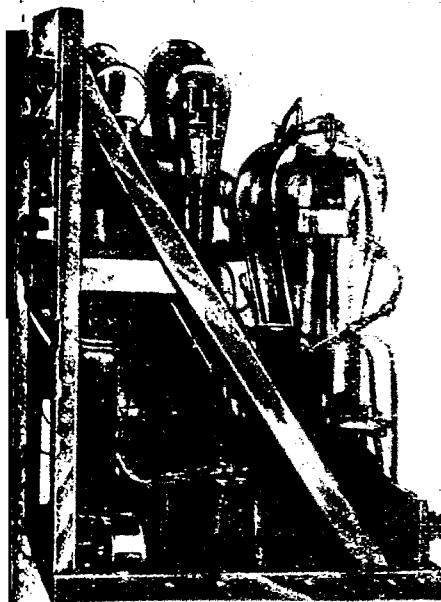


Рис. 9

обоими описанными выше измерительными элементами. При элементе в ламп накаливания питание силовой части должно происходить от однофазного 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 возбудителя, V	Ток возбудителя, A	Время регулирования sec
до	110,5	0	—	0,65	42	0,11	Включение 0,6
после	109,9	23,5	0,85	1,48	97	0,55	Выключение 0,8-0,9

* Технически генератор был нагружен на трансформатор, имеющий регулятор напряжения.

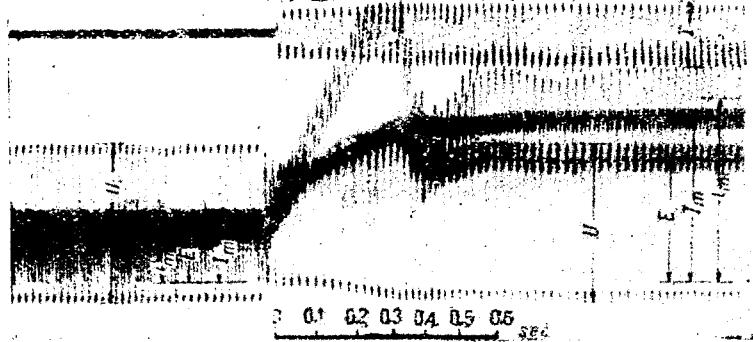


Рис. 10

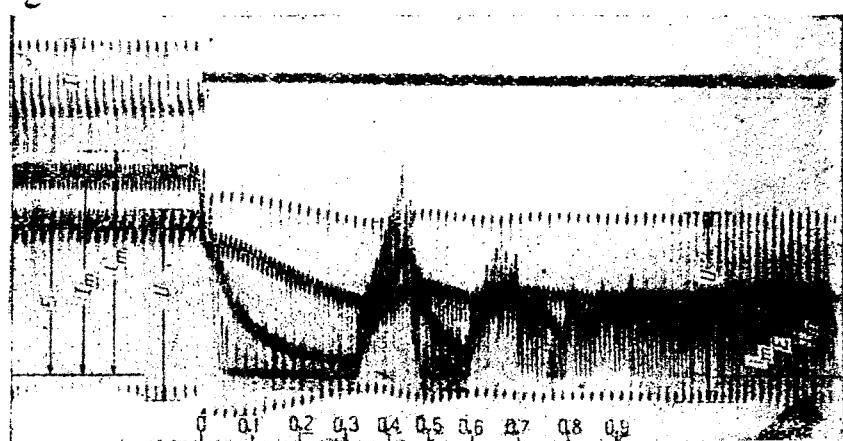


Рис. 11

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 генератора⁵.

Литература

- Лебедев С. А., Теоретическое исследование искусственной устойчивости. „Электричество“ № 4, 1938.
- Гольдфарб Л. С., Электронно-ионный регулятор для машин постоянного тока. „Электричество“ № 16, 1937.
- Голдовский Е. М., Шум ламп в звуковом кино. Гизэлгпром, изд. 1934 г., стр. 95.
- Сазанов П. И., Экспериментальное исследование статической и искусственной устойчивости. „Электричество“ № 4, 1938.

⁵ Публикуемая работа была проведена автором под руководством ст. научного сотрудника Л. С. Гольдфарба.

АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВЕ

Автоматизация управления уличным освещением

Л. П. Лигони
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 притяжением поля — типа КТ, изготовленные 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 (выходы из киосков для питания фонарной сети обычно являются трехфазными), то ток, приходящийся на один 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, монтируемый 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 перекидного двухполюсного рубильника ¹ часы-автомат шины управления находятся под напряже-

¹ В целях придания большей надежности работе пункта управления питание его осуществляется из двух киосков

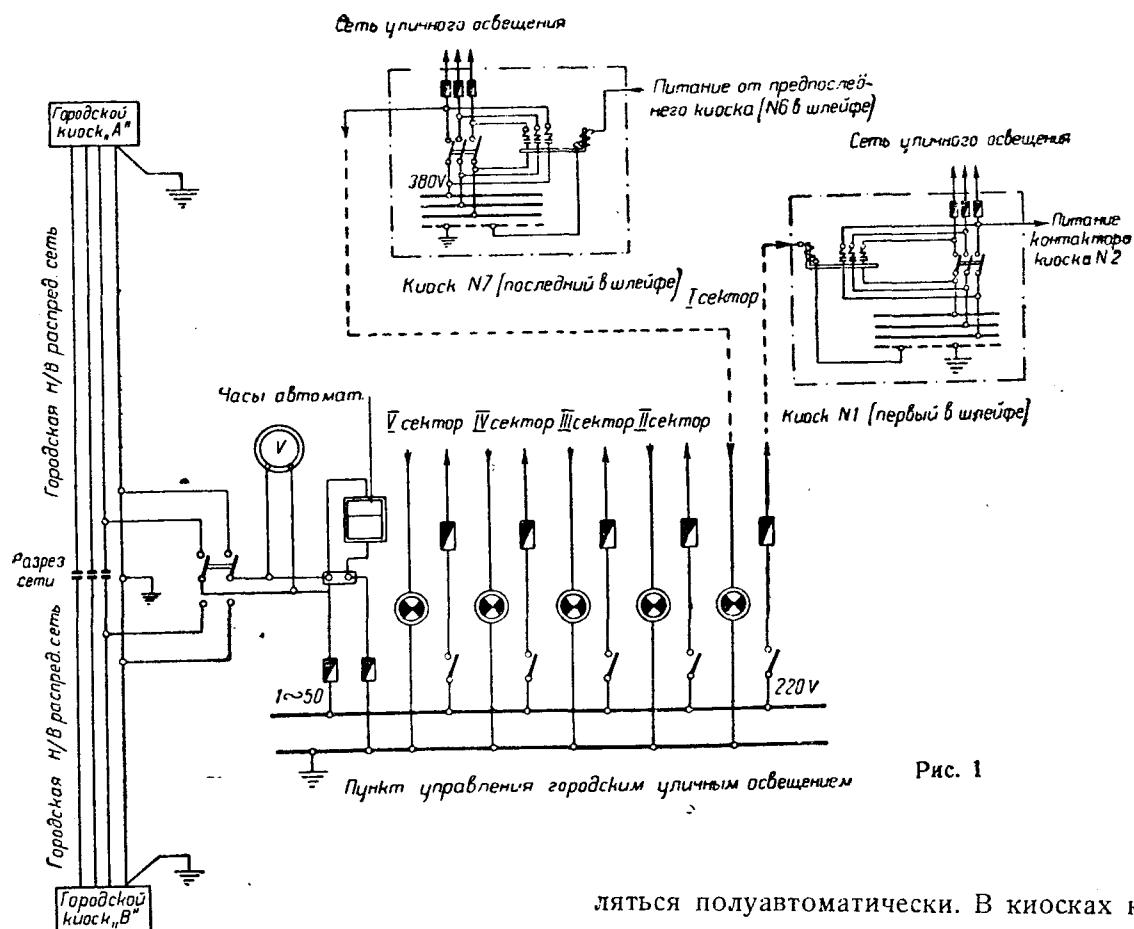


Рис. 1

вольтметр дает показания. Нормально главный рубильник всегда включен. Для зажигания уличного освещения достаточно включить лишь однополюсные рубильники, либо должны сработать часы-автомат. Тогда по проводам, соединяющим щит управления с ближайшими к нему киоски, потечет ток и оживит включающие катушки контакторов и, таким образом, включит уличное освещение, а также даст питание kontaktorам соседних киосков и т. д. Обратные провода при этой схеме отсутствуют — их заменят гнезды силовых трансформаторов, установленных в киосках. Обычно в городских распределительных низковольтных сетях все нулевые провода между собою электрически связаны в одну линию и надежно заземлены (380/220 В), поэтому нет смысла прокладывать специальные обратные провода. Последний контактор, установленный в шлейфе, зажигая уличное освещение, временно зажигает 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 езке шунтирующий рубильник уличного освещения и тем самым пошлет ток дальше по цепи контактора; следовательно, управление временно, пока до устранения дефектов, будет осуществляться 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 общефернной 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. Контакторы 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 типа² 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

² Рабочие контакты его рассчитаны на пропуск тока до 75 А, что при напряжении 380/220 В даст пропускную мощность на 3 фазы около 50 kW.

трансформатора вследствие несимметрии грузки.

Предельные расстояния между киосками, решающие не применять промежуточных при напряжении 220 В (при $P_{\%} = 10\%$), следующие (см. таблицу).

№ п/п	Марка и сечение проводов	Предель- ное рас- стояние km	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	Цифры предельных расстояний округлены
5	М10	1,70	
6	М16	2,20	
7	А16	1,35	
8	А25	2,10	
9	А35	2,50	

Опасаться ненадежной работы контакторов эксплуатации не приходится, так как вся электротехника металлургии, угольной промышленности и т. д. в основном зиждется на контакторах и разного рода реле, работающих без казно в более тяжелых условиях, нежели управление уличным освещением, где число включений и выключений весьма ограничено. Описанная схема может быть также применена для управления наружным освещением промышленных предприятий.

Прибор для дистанционного наблюдения за коммутацией

Б. А. Талалай

Центральный аэрогидродинамический институт

НАИБОЛЕЕ капризным звеном коллекторных машин является контакт коллектор-щетки. 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.

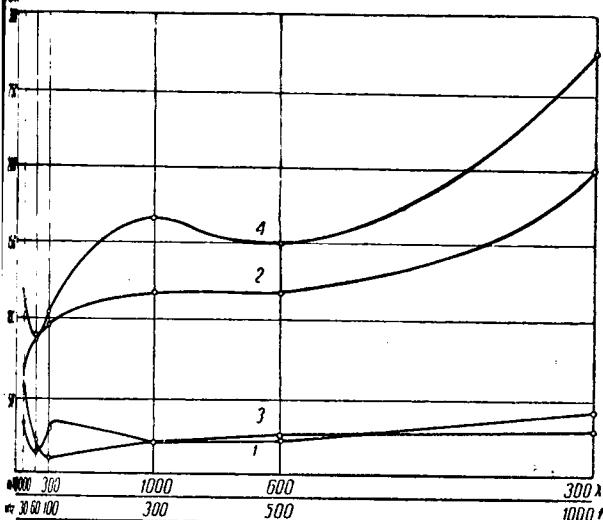
Электрическая искра на коллекторе вызывает излучение электромагнитных волн. Воспринимая эти волны на радиоприемник, мы на выходе радиоприемника будем получать сигналы, индикатором которых может служить электроизмерительный прибор, присоединенный к выходу.

Для разработки прибора предварительно необходимо было определить диапазон радиоволн излучаемых при коммутации электромоторов, установить максимум интенсивности излучения сигналов. Для этого было проведено специальное исследование¹.

Испытание велось с электромотором постоянного тока мощностью 650 л. с., 410 об/мин, производства завода «Динамо».

Периодическое возмущение излучаемых при коммутации электромотора радиоволн приносилось 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. Антenna длиной около 5 м подвешивалась над мотором на высоте приблизительно 20 см от верхней точки станции мотора. Приемники питались от анодных батарей и аккумуляторов (накал). Мощность на выходе

¹ Исследование проводилось ст. техником Булычевым руководством ст. инж. Какурина.



№ 1. График сигналов, принимавшихся приемником 4ПД-С, № 606

— отсутствие искрения (щетки не смещены), нагрузка 900 А, 270 об/мин, 1—щетки не смещены, нагрузка 1200 А, 315 об/мин, 2—щетки смещены (правые), нагрузка 900 А, 270 об/мин, 4—щетки смещены, нагрузка 1200 А, 315 об/мин

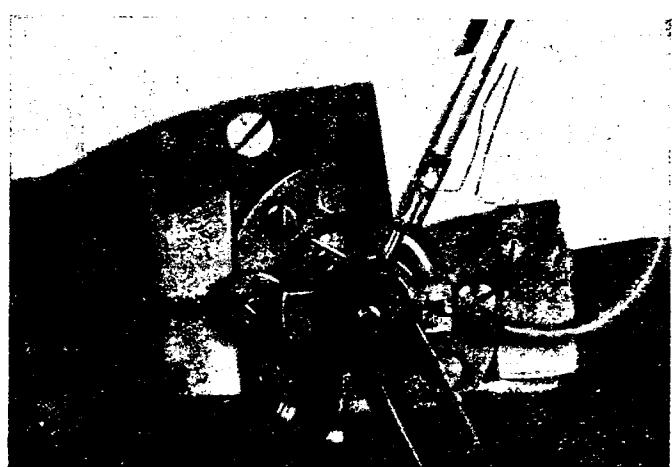
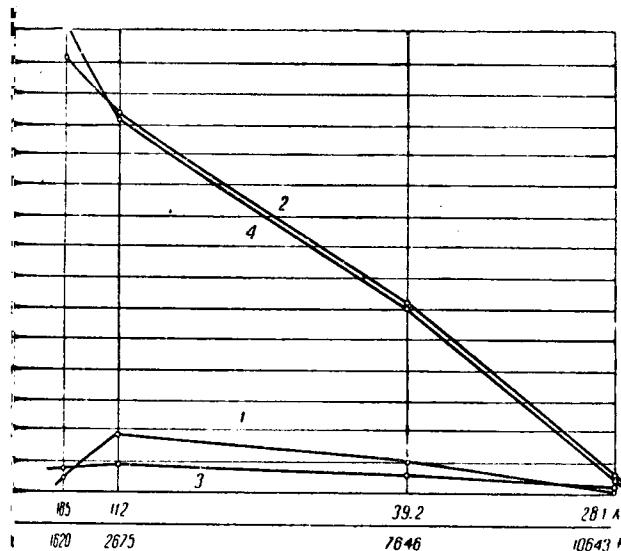


Рис. 3



№ 2. График сигналов, принимавшихся приемником КУБ-4, № 1222

— отсутствие искрения (щетки не смещены), нагрузка 900 А, 270 об/мин, 1—щетки не смещены, нагрузка 1200 А, 315 об/мин, 2—щетки смещены (правые), нагрузка 900 А, 270 об/мин, 3—щетки смещены, нагрузка 1200 А, 315 об/мин

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 индустриальных 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

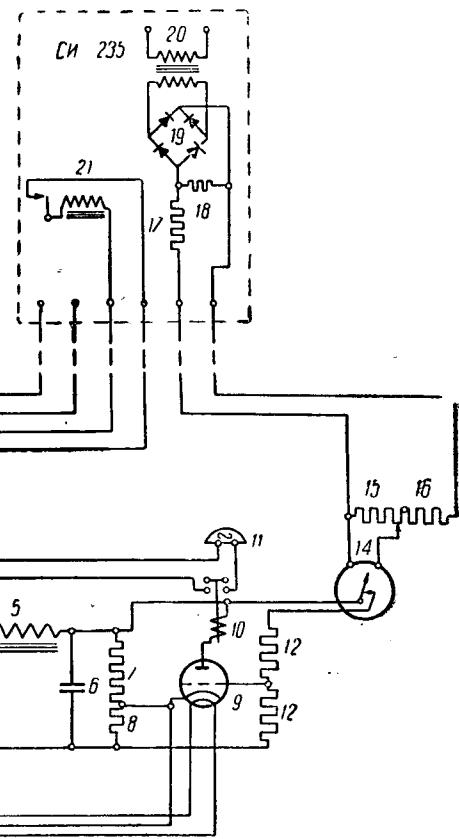


Рис. 4

— трансформатор, 2—кенотрон ВО-116, 3—кнопка, 4—конденсаторы 1,5 и 2,5 μF , 5—дробесель фильтра, 6 и 18—сопротивления Каминского 150 000 Ω , 7—2000 5000 Ω и 1,5 M Ω соответственно, 9—лампа 6Л2, 10—реле, 11—электрический звонок, 12—вольтметр с контактным устройством, 13—сопротивление переменного (проволочное) 2000 Ω , 17—сопротивление постоянное (проволочное) 2000 Ω , 19—мощный выпрямитель, 20—трансформатор выходной 1/2, 21—зуммер

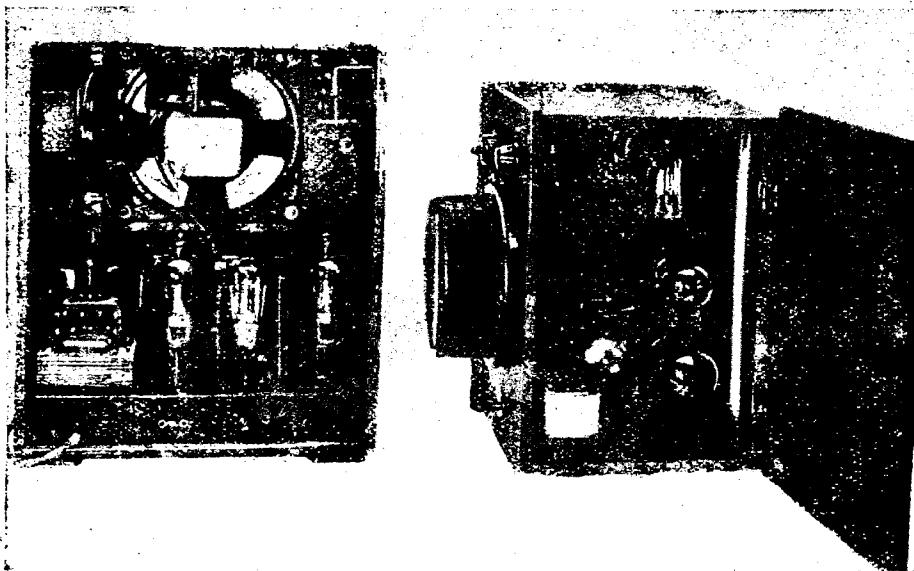


Рис. 5

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 пределах² 150—300 м.

Из приведенных выше исследований следует, что для приема излучений, имеющих место при искрении коллекторных машин, вполне пригоден стандартный радиоприемник, построенный на широковещательный 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-

² 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 (купрораковый 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 условия 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 постоянных индустриальных 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 корпус¹, 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 допускаемого 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), слагается 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.

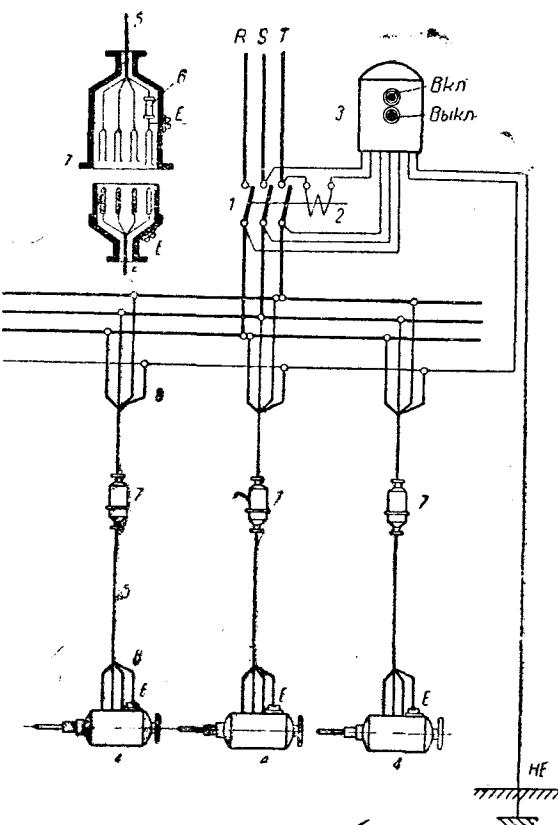
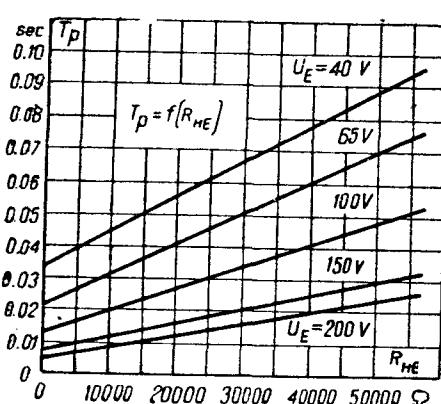


Рис. 2



¹ С. В. Соколов, Реле для автоматического защитного выключения при замыкании на корпус. „Электричество“ № 5, 1947. Авторское свидетельство по заявке № 170974.

Рис. 2

Принципиально нежелательное обстоятельство — одновременное выключение всей группы дрелей — при замыкании на корпус одной из них не может оказаться 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 штепсельных 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 электромолотками на судостроительных верфях, при обработке кож ручными электрическими инструментами, для сборочных стендов вагоностроительных и авиационных заводов и тому подобных случаев.

При защите заземлением в случае, если напряжение корпуса какой-либо дрели группы превзойдет 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 прибором².

При защите же автоматическим выключением сама защитная аппаратура, как было указано выше, служит и средством для отыскания дефектного приемника.

² Обычно применяется совершенно недопустимый способ — проба на ощущение тока.

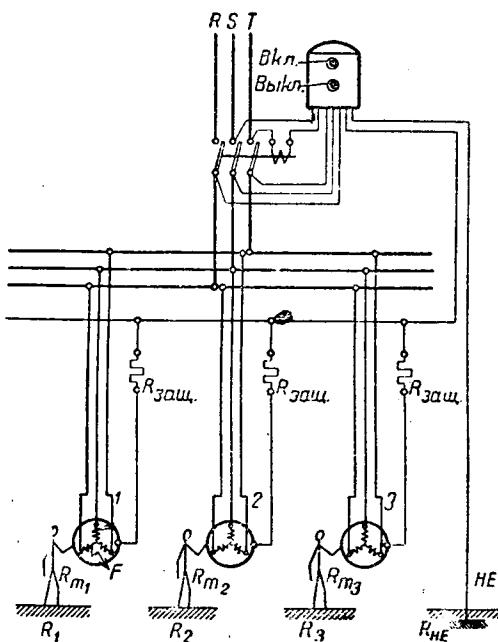


Рис. 3

Пусть при замыкании на корпус в какой-либо точке F обмотки дрели 1 (рис. 3) на корпусе появилось некоторое напряжение относительно земли U_{E_1} . При непосредственном соединении корпусов дрелей с реле, как нетрудно видеть, напряжения корпусов всех дрелей относительно земли будут одинаковы. Если же в проводах соединяющие корпусы с реле, ввести защитные сопротивления R_s , то напряжение прикосновения для дефектного приемника 1

$$U_{B_1} = \frac{U_{E_1}}{1 + \frac{R_s}{R_{m_1}}};$$

для приемника 2

$$U_{B_2} = \frac{U_{E_1} - \frac{U_{B_1} 2R_s}{R_{m_1}}}{1 + \frac{R_s}{R_{m_2}}};$$

для приемника 3

$$U_{B_3} = \frac{U_{E_1} - \frac{U_{B_1} 2R_s}{R_{m_1}} - \frac{U_{B_2} 2R_s}{R_{m_2}}}{1 + \frac{R_s}{R_{m_3}}}.$$

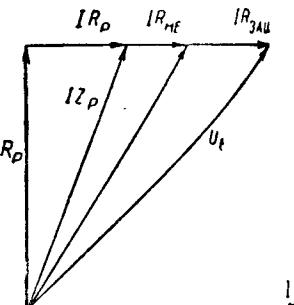


Рис. 4

Для упрощения можно положить равные сопротивления тела R_m и переходные сопротивления от тела человека к земле. Тогда

$$U_{B_1} = \frac{U_E}{1 + \frac{R}{R_m}};$$

$$U_{B_2} = U_{B_3} = \frac{U_E}{1 + \frac{R}{R_m} + \frac{2R_s}{R_m}}.$$

Как видно из (1), (2), применением соответствующих защитных сопротивлений можно уменьшить напряжение прикосновения всех недефектных приемников группы значительно понизить. Это положение подтвердилось и экспериментально (см. ниже на рис. 7 кривые U_{E_1} и U_{E_2}).

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 действует на реле через сопротивление R_s . Проще всего можно оценить степень влияния этого сопротивления, определив насколько изменится напряжение на зажимах реле (U_p) благодаря присутствию R_s .

Из диаграммы напряжений цепи корпус—земля (рис. 4) можно найти, что

$$U_p = \frac{U_E}{\sqrt{1 + \frac{R_{HE}^2 + 2R_p R_{HE}}{Z_p^2} + \frac{2(R_p + R_{HE}) R_s}{Z_p^2} + \frac{R_s^2}{Z_p^2}}}.$$

Здесь R_p , X_p и Z_p — сопротивления воспринимающей системы реле.

Для данного реле величина $Z_p = 50\ 000\ \Omega$; R_s практически достаточно взять равным 5000—1000. При этих значениях Z_p и R_s , повидимому, влия-

и напряжение реле U_P , а следовательно, и защитные характеристики его, будет весьма значительным. В соотношение же (2) R_s 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_s или даже меньше его. Рассмотрим числовой пример.

Положим, что сопротивление тела человека $R_m = 2000 \Omega$; $R_s = 5000$; 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 I по формуле (1) будет $U_B = 67$ V. Напряжение прикосновения недефектных приемников [формула (2)]

$U_B = U_{B_1} = 15,4$ 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_s , R_{HE} , согласно (2), будет 0,017 sec.

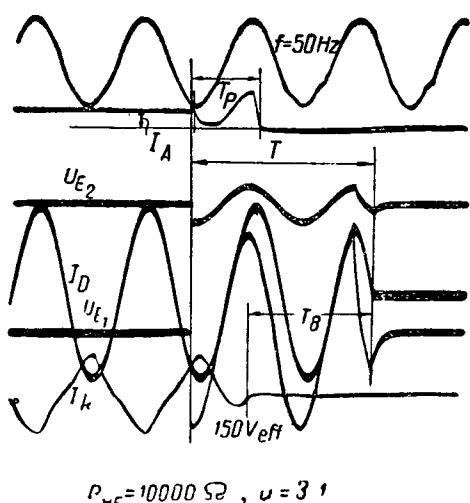
Следовательно, время существования напряжения на корпусах приемников — время срабатывающей защиты,

$$T = T_B + T_P = 0,03 + 0,017 = 0,047 \text{ sec.}$$

Подсчет по формуле (3) дает $U_P = 97,3$ V. Как видно при наличии в схеме $R_s = 5000 \Omega$ и $R_{HE} = 1000 \Omega$, напряжение на зажимах реле очень мало отличается от напряжения U_E . При отсутствии защитного сопротивления напряжение на нем 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 U_E величину защитного сопротивления и пользуясь соответствующей кривой напряжения U_E . По нашему примера увеличение времени T_P равно 0,002 sec (12%), что составляет всего лишь 5% времени срабатывания защиты.

Заданная схема и аппаратура были всесторонне



$$R_{HE} = 10000 \Omega, n = 3,$$

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 осциллографа. Масштаб времени дан кривой $f = 50$ Hz.

В таблице приведены некоторые данные исследования, имеющие практическое значение.

В схеме исследования было применено реле для автоматического 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 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 высокомоментные сопротивления, применяемые в радиотехнических установках. Как уже было выяснено раньше, через эти сопротивления

Номер приемника	U_{E_1} V	U_{E_2} V	R_{m_1} Ω	R_{m_2} Ω	R_1 Ω	R_2 Ω	R_{s_1} Ω	R_{s_2} Ω	R_{HE} Ω	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 дрелей 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, изготовленные Харьковским электромеханическим заводом, если их собственное время действия будет порядка 0,03 сек.

Выполнение вспомогательного заземления с противлением в несколько сот ом и на ток окон 1 мА, очевидно, не представит никаких затруднений.

Защита электровозов от атмосферных перенапряжений

Я. И. Мирер

Электродепо ст. Чусовская
им. Кагановича

ЗА 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 ¹ электровоза	Вольт- метры	Алюминиевые разрядники	Силовая аппарата
Cс11	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 последовательно с катушкой быстродействующего выключателя (БВ) и реле вспомогательных машин (РВМ), имеющими 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 следовании 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 индуктивные силовые катушки БВ, отразилась от индуктивности катушки реле вспомогательных машин. При этом амплитуда волн 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 — и следний 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-

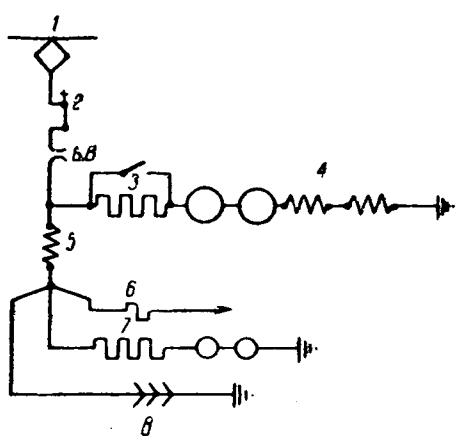


Рис. 1. Схема электровоза Сс11

1 — контактный провод, 2 — главный разъединитель, 3 — пусковые сопротивления, 4 — цепь тяговых двигателей, 5 — силовая катушка РВМ, 6 — цепь вспомогательных машин, 7 — цепь вольтметров, 8 — алюминиевый разрядник

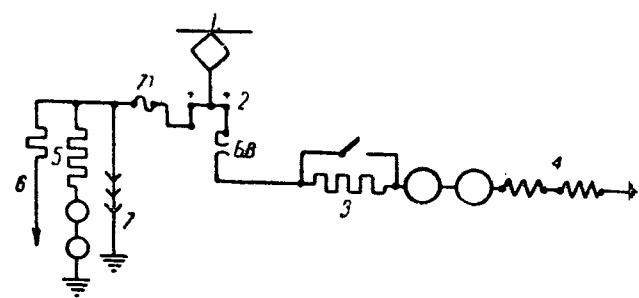


Рис. 2. Схема электровоза ВЛ19

1 — контактный провод, 2 — главный разъединитель, 3 — пусковые сопротивления, 4 — цепь тяговых двигателей, 5 — цепь вольтметров, 6 — цепь вспомогательных машин, 7 — алюминиевый разрядник

лось, что перегорели подводящие концы (и контакты) к панели сопротивлений вольтметров и счетчика. Эти концы кабельков были отобранны и изолированы. *БВ* включили. Через некоторое время в момент следующего грозового разряда снова сработал *БВ*; был обнаружен электрический пробой на корпусе электровоза изоляции силового кабеля *PBM*, идущего к демпферному сопротивлению вспомогательных машин.

После того как кабель был изолирован и *БВ* включен, при переводе главной рукоятки контроллера на первую позицию, было обнаружено короткое замыкание в силовой цепи: мikanитовая 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 *PBM*. 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 обгорание¹.

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 пробила кабель, идущий к демпферному сопротивлению.

Часть волны, отраженная от индуктивности тяговых двигателей, получила выход в электрическом пробое мikanитовой трубки ящика пусковых сопротивлений.

3. При маневрировании поезда (электровоз С11) на станции во время грозы в результате атмосферных перенапряжений пробило изоляционную стойку главного разъединителя. После этого разъединитель был отсоединен и закорочен. При следующем разряде сгорела 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 проводяжного бандажа, охватывающие место короткого замыкания, прожжены и размотались.

Повидимому, при первом разряде волна, отразившись от *БВ* и *PBM*, возросла (удвоилась) и пробила стойку главного разъединителя. В этом случае разрядник, вероятно, не сработал.

При втором разряде значительная часть волны, поглощенная индуктивностью *БВ* и *PBM*, отразилась от индуктивности катушек полюсов. Ам-

плитуда ее возросла. Часть волны пробила 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 *PBM* 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 спираль прибора проходят на корпус.

Нам представляется, что наилучший выход из положения, обеспечивающий надежную защиту вольтметров, это включение вольтметров после катушки *PBM* (после индуктивности — как и теперь), но при обязательном перемещении разрядника в схеме до *БВ*.

На электровозах серии ВЛ19 аварии также объясняются частичным выходом волны через вольтметры. Защитить² 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)

¹ Возможно и другое объяснение: замедленность перенапряжения вследствие прохождения через индуктивность не позволила разряднику сработать (даже при общем напряжении 11 кВ; см. Баев и Конышев, Алюминиевые разрядники для электровозов, изд. ОНТИ, 1937).

² На итальянских электровозах вольтметры защищены плавкими предохранителями (серебряная проволока $d = 0,1$ мм). Насколько эта защита совершенна, у нас данных нет.

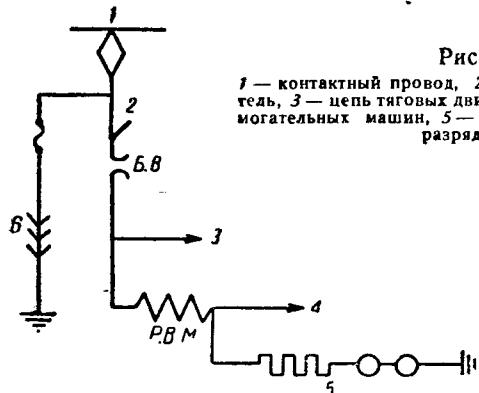


Рис. 3
1 — контактный провод, 2 — главный разъединитель, 3 — цепь тяговых двигателей, 4 — цепь вспомогательных машин, 5 — цепь вольтметров, 6 — разрядник

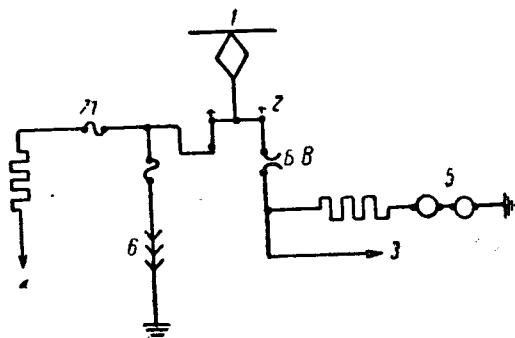


Рис. 4

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 грозового разряда, пробивающий электролит.

Для разрыва вольтовой дуги, возможно, надо пойти по пути применения менее мощного предохранителя³, чем вставка 71, номинальный ток которой $I_n = 60$ А. Этим будет достигнуто более быстрое его срабатывание. Конструкция этого предохранителя должна быть весьма совершен-

³ На итальянских электровозах применяется плавкий предохранитель из серебряной проволоки $d = 0,2$ mm.

ной, так как практика показала, что при срабатывании плавкого предохранителя 71 (цинковая вставка в фибровой трубке) сгорание «мостика» сопровождается рядом нежелательных явлений: сгоранием фибровой трубы, 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 послужившего 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.

НОВЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

Устойчивость опоры контактной линии электрических железных дорог

С. М. Кудри
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, потому в настоящей статье разбирается вопрос об устойчивости деревянных опор в том и другом случае совместно. Предлагаемый способ расчета основан на достаточно известном методе автора — расчета по предельной устойчивости и наперед заданным коэффициентом запаса ее; предварительное общее знакомство с этим методом необходимо для понимания дальнейшего¹.

¹ 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. был сделана попытка укорочения опоры до 11 м от части пути урезки опоры сверху с перестановкой фидерной консоли ниже, но, главным образом, урезкой снизу, причем для получения достаточной глубины заложения предполагалась досыпка балastного слоя с отнесением кювета в сторону (рис. Но при этом условия устойчивости опоры будут иные, 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 большом увеличении лежней и даны методы расчета, годные как для обычной установки у самого кювета, так и для случая досыпки.

В настоящей статьи, см. в работе автора «Устойчивость промежуточной контактной опоры на краю кювета, применение досыпки грунта и необходимые исследования вопроса», представленной в НИС Ленинградского института инженеров ж.-д. транспорта в 1937 г.

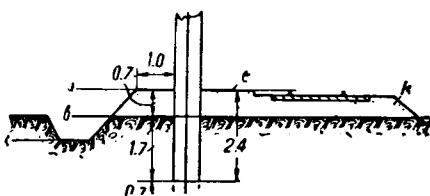


Рис. 1. Установка опоры при досыпке грунта

Разбор вопроса произведен на конкретном примере промежуточной опоры на прямой. Опора из двух столбов по 18 см в верхнем сечении несет два контактных провода и несколько фидеров. Условия нагрузки — ветер 30 м/сек без гололеда при +5°, или же ветер 20 м/сек при гололеде 1 см, 0,9 g/cm³, и -5°; нагрузки и размеры показаны на рис. 2.

Реакция в слое *ab* создается упомянутой досыпкой, а затем напряжения передаются на баластные кирпичи (справа на рис. 1). Досыпка в отношении сопротивления грунта ничем существенным не отличается от обычной засыпки разрыхленного котлована разрыхленным грунтом, то так же, как при засыпке котлована надлежит уплотнить ее (как минимум хотя бы утаптыванием), иначе она будет больше действовать на психологию строителя, чем мешать столбу склоняться.

Расстояние до противоположной кромки и баластного слоя остается около 4,5 м, т. е. оно почти равно двойной глубине заложения опоры, и можно принять, что верху грунт сопротивляется (со стороны пути) так же, как если бы он был ограничен горизонтальной поверхностью *ae*, простирающейся неопределенно далеко. Тем более это относится к сопротивлению его внизу, если даже на рис. 1 справа будет откос насыпи. При отсутствии досыпки это положение будет справедливо в еще большей степени.

Сопротивление грунта со стороны, противоположной пути, будет меньше вследствие близости общего откоса досыпки и кювета (или же одного кювета, если досыпки нет). Кроме того, в случае попадания опоры в кювет это приводит к усиленному насыщению водой верхних слоев грунта. Кроме случая достаточно чистого песка (не свыше 15—20% влажности), от этого насыщения сопротивление грунта понижается². Поэтому разумнее в общем случае предполагать понижение сопротивления еще и благодаря возрастанию влажности.

В опытах Н. Dörg³ над столбами в сильно утрамбованном песке при круглых столбах получились впереди них радиальные трещины. По чертежам Dörg (рис. 3), видно, что линия этих трещин составляла около одного диаметра столба при нагрузках, близких к предельным. Но, во-первых, это получалось при неограниченной горизонтальной поверхности пята, а во-вторых, речь идет о ясно видимых трещинах. Между тем трещины, несомненно, могли иметь значительное продольное продолжение, незаметное для глаз. В нашем же случае досыпка обрывается вблизи опоры, и выход трещин к ее кромке означал бы резкое уменьшение сопротивления грунта (в предельном состоянии), так как в этом случае отсутствует как бы сдерживающий обруч, образуемый окружающим грунтом. Поэтому нужно иметь кромку досыпки (если только не ближе двух диаметров столба от его поверхности). Но осторожнее будет принять три диаметра столба. При обычных диаметрах у поверхности земли в среднем около 30 и не свыше 35 см можно взять круглую цифру 31.

Однако это мероприятие достигает лишь той цели, что можно не опасаться выпирания в кювет секторов грунта (по радиусам от оси столба) раньше, чем могло бы быть достигнуто временное сопротивление грунта по поверхности столба. Но устранение этого нежелательного явления еще означает, что временное сопротивление будет такое же, как при неограниченном простирании грунта по поверхности *ae* (рис. 1). Это сопротивление будет меньше, особенно верху, так как откос досыпки и кювета опускается на глубину, приблизительно равную половине глубины заложения опоры; при этом откос находится вблизи опоры. Сверх того

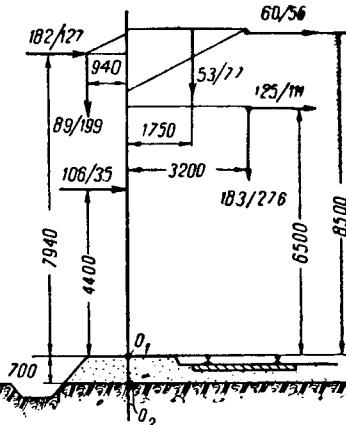


Рис. 2. Размеры и нагрузки опоры (в миллиметрах и килограммах). Первая цифра соответствует случаю без гололеда

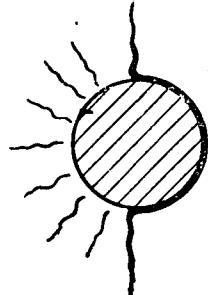


Рис. 3. Трещины кругом цилиндрического столба при опытах Dörg

за кюветом уровень грунта, обуславливающий его напряженное состояние, а следовательно, и временное сопротивление его, будет *b*, а не *a*.

Следует также учесть, что расчетные опрокидывающие моменты в обе стороны будут различны. Они сведены в табл. 1; момент относительно оси *O₂* определяется непосредственно по моменту относительно оси *O₁* путем прибавки момента горизонтальной силы при плече 0,7 м.

Таблица 1
Нагрузка промежуточной опоры на прямой

Нагрузка	Без гололеда	При гололеде
Горизонтальная сила при ветре: в обе стороны, kg	473	329
Момент при ветре: на путь, относительно <i>O₁</i> kgm	3829	3191
от пути , , , , , <i>O₁</i> , , , , ,	2639	1529
, , , , , <i>O₂</i> , , , , ,	2970	1759

Метод расчета. Временные сопротивления грунта с обеих сторон будут различны. Прежде всего примем по недостатку данных и по соображениям, изложенным подробно ранее⁴, зависимость

$$\sigma_{\text{врем}} = Ay,$$

тем более, что в данном случае основным грунтом вверху обычно является песок.

Тогда по направлению от столба на путь, т. е. вправо от оси столба на рис. 4, можно принять эту зависимость соответственно поверхности грунта по плоскости *a*.

Для направления же влево (рис. 4) временем грунта является вообще плоскость *b*. Однако в досыпке также имеется известное сопротивление, изменяющееся по закону *A'* у, где *A'* меньше *A* благодаря близости кромки. С другой стороны, ниже досыпки сопротивление грунта ослаблено кюветом.

⁴ „Устойчивость опор в грунтах“, стр. 63—65, рис. 28 и 29.

³ H. Dörg, Die Standsicherheit der Masten, 1922, стр. 40, рис. 30.

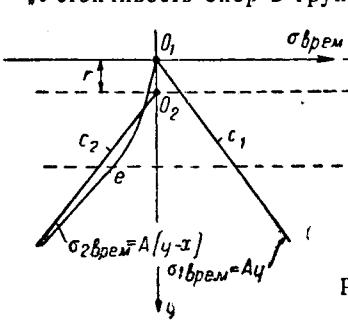


Рис. 4. К выяснению величины временных сопротивлений

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_2 . 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_2 ; повышение сопротивления благодаря досыпке скомпенсирует 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):

$$\epsilon_{1\text{врем}} = Ay; \quad (1)$$

$$\epsilon_{2\text{врем}} = A(y - r), \quad (2)$$

где r — разность обоих уровней расчетных поверхностей грунта⁵.

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, *b*). Если же сила и момент будут перемещать верхушку опоры в разные стороны, то верхняя реакция (верхняя площадка) будет меньше. Применим к опрокидыванию на путь такой случай показан на рис. 5, *c*; понятно, аналогичную картину мы получим при опрокидывании от пути. Такие комбинации мы условились называть случаем „отрицательной“ силы, так как момент мы всегда считаем существенно положительным⁶. 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, *a* легко заметить

⁵ Более подробные обоснования положений этого параграфа см. в работе, указанной в конце сноски 1.

⁶ 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.

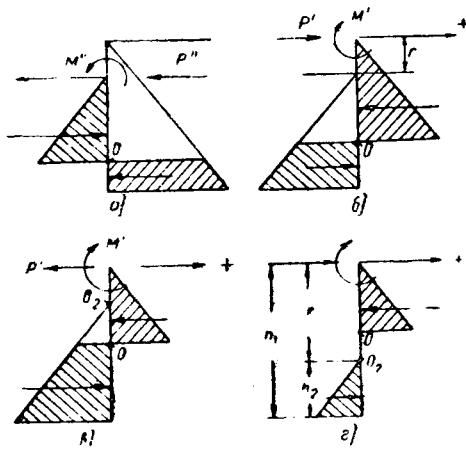


Рис. 5. Частные случаи эпюр напряжений
а — опрокидывание от пути, $P > 0$; б и в — опрокидывание на путь, $P > 0$ и $P < 0$ соответственно;
г — частный случай

следующее. При отрицательной силе P' , достаточноМой (т. е. при малом моменте M'), может оказаться, что левая точка эпюры O как раз совпадает 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 нумерация точек O правой площадки поднимется выше точки O_2 ; это 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, когда r велико, т. е. когда $\frac{r}{h_1}$ приближается к единице. Напротив, 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, *д*) отрыв точки O от точки O_2 не только возможен, но и возможен. Это же последнее условие также необходимо (но недостаточно) 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* вправо и вниз. Эпюру этого вида применительно к контактным опорам можно не рассматривать подробнее, но в других областях строительства она имеет некоторое значение.

При выводе расчетных формул мы будем считать исключенным случай опрокидывания на путь при положительной силе P (рис. 5); все величины, относящиеся к правой части эпюры, пока обозначим индексом 1, а для левой — индексом, 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.

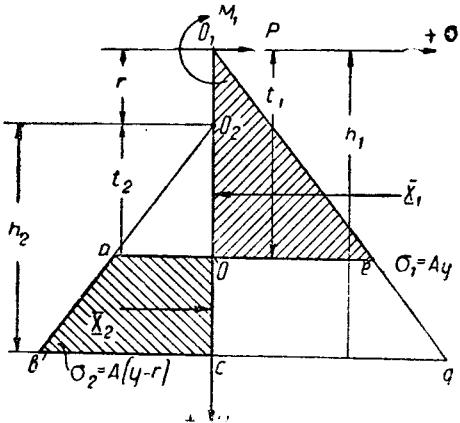


Рис. 6. К выводу расчетных уравнений

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

$$E_1 = \frac{Abh_1^2}{2},$$

вторая получилась бы, если бы столб перемещался посту-
пенно вправо.

Несила

$$X_2 b \cdot \text{пл. } Oabc = b \cdot \frac{\overline{Oa} + \overline{bc}}{2} \cdot \overline{Oc} =$$

$$\frac{1+b}{2} \cdot \frac{At_1 + Ah_2}{2} (h_2 - t_2) = Ab \cdot \frac{(t_1 - r) + (h_1 - r)}{2} (h_1 - t_1)$$

и после введения Θ , 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), полу-
чили:

$$P_{np} = E_1 \left[(2\Theta_1^2 - 1) + 2 \frac{r}{h_1} (1 - \Theta_1) \right]. \quad (9)$$

По второму условию равновесия имеем:

$$M_{np} = M_{1np} + M_{2np}. \quad (10)$$

Непосредственно из рисунка и формулы (6) имеем

$$M_1 = \frac{2}{3} t_1 X_1 = \frac{2}{3} E_1 h_1 \Theta_1^3. \quad (11)$$

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:

$$M_2 = \frac{2}{3} E_1 h_1 \left[(1 - \Theta_1^2) - \frac{3}{2} \frac{r}{h_1} (1 - \Theta_1) \right]. \quad (12)$$

Подставляя M_1 и M_2 из (10) и (11) в (4), получим:

$$M_{np} = \frac{2}{3} E_1 h_1 \left[(1 - 2\Theta_1^2) - \frac{3}{2} \frac{r}{h_1} (1 - \Theta_1) \right]. \quad (13)$$

Полученные формулы перепишем без индекса 1:

$$\begin{aligned} P_{np} &= E \left[(2\Theta^2 - 1) + 2 \frac{r}{h} (1 - \Theta) \right]; \\ M_{np} &= \frac{2}{3} Eh \left[(1 - 2\Theta^2) - \frac{3}{2} \frac{r}{h} (1 - \Theta) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

Удобнее, так как при определении устойчивости в направлении от пути формул останутся справедливыми, если вставить в них величину r с минусом, а величины E и h — 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 же расчет. В первое уравнение подставляют заданную силу P , желаемую глубину h и т. д. и находят Θ . Тогда второму уравнению находят предельный момент устойчивости. Для этого удобно придать формулам (14) несколько вид, так что в совокупности получается такой комплекс расчетных формул:

$$\begin{aligned} \frac{Abh^2}{2}; \quad \Theta^2 - \frac{r}{h} \Theta - \left(0,5 + \frac{P_{np}}{2E} - \frac{r}{h} \right) = 0; \\ M_{np} = \frac{Eh}{0,75} \Delta_3 - Er\delta_2, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\Delta_3 = 0,5 - \Theta^2$$

цены для уменьшения вычислительных ошибок и ускорения расчета. Для них составлена табл. 2, в которой даны новые значения обеих функций Θ .

Более удобные таблицы этих и других функций Θ че-
з 0,001 аргумента см. в статье автора „Вспомогательные
формулы для расчета предельной устойчивости опор“ 1937,
издающейся в Сборниках Ленинградского института инже-
неров ж.-д. транспорта.

Таблица 2

Функции Θ

Θ	$\Delta_3 = 0,5 - \Theta^2$	$\delta_2 = 1 - \Theta^2$	Θ	$\Delta_3 = 0,5 - \Theta^2$	$\delta_2 = 1 - \Theta^2$
0,500	0,375 ₋₈	0,750 ₋₁₀	0,750	0,078 ₋₁₇	0,437 ₋₁₅
510	357 ₋₈	740 ₋₁₀	760	061 ₋₁₈	422 ₋₁₅
520	359 ₋₈	730 ₋₁₁	770	043 ₋₁₈	407 ₋₁₅
530	351 ₋₈	719 ₋₁₁	780	025 ₋₁₈	392 ₋₁₆
540	343 ₋₉	708 ₋₁₁	790	+0,007 ₋₁₉	376 ₋₁₆
0,550	0,334 ₋₁₀	0,697 ₋₁₁	0,800	-0,012 ₁₉	0,360 ₋₁₆
560	324 ₋₉	686 ₋₁₁	810	031 ₂₀	344 ₋₁₆
570	315 ₋₁₀	675 ₋₁₁	820	051 ₂₁	328 ₋₁₇
580	305 ₋₁₀	664 ₋₁₂	830	072 ₂₁	311 ₋₁₇
590	295 ₋₁₁	652 ₋₁₂	840	093 ₂₁	294 ₋₁₇
0,600	0,284 ₋₁₁	0,6+0 ₋₁₂	0,850	-0,114 ₂₂	0,277 ₋₁₇
610	273 ₋₁₁	628 ₋₁₂	860	136 ₂₃	260 ₋₁₇
620	262 ₋₁₂	616 ₋₁₃	870	159 ₂₂	243 ₋₁₇
630	250 ₋₁₂	603 ₋₁₃	880	181 ₂₄	226 ₋₁₈
640	238 ₋₁₃	590 ₋₁₃	890	205 ₂₄	208 ₋₁₈
0,650	0,225 ₋₁₂	0,577 ₋₁₃	0,900	-0,229 ₂₅	0,190 ₋₁₈
660	213 ₋₁₄	564 ₋₁₃	910	254 ₂₅	172 ₋₁₈
670	199 ₋₁₃	551 ₋₁₃	920	279 ₂₅	154 ₋₁₉
680	186 ₋₁₅	538 ₋₁₄	930	304 ₂₇	135 ₋₁₉
690	171 ₋₁₄	524 ₋₁₄	940	331 ₂₇	116 ₋₁₉
0,700	0,157 ₋₁₅	0,510 ₋₁₄	0,950	-0,357 ₂₆	0,097 ₋₁₉
710	142 ₋₁₅	496 ₋₁₄	960	385 ₂₈	078 ₋₁₉
720	127 ₋₁₆	482 ₋₁₅	970	413 ₂₈	059 ₋₁₉
730	111 ₋₁₆	467 ₋₁₅	980	441 ₂₉	040 ₋₂₀
740	095 ₋₁₇	452 ₋₁₅	990	470 ₃₀	020 ₋₂₀
0,750	0,078	437	1,000	-0,500	0,000

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} изменяется 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.

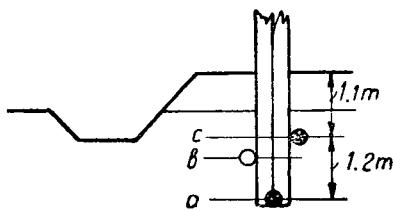


Рис. 7. К установке лежней

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 Борфора) — 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

$$\begin{array}{ll} \text{при ветре } 35 \text{ м/сек} & S = 2,5 \\ \text{при ветре } 20 \text{ м/сек и гололеде} & S = 3,0 \end{array}$$

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 получилось бы падения надлежащие установленных опор или очень большого оставшегося наклона их.

Соответственно этому мы получаем предельные расчетные нагрузки (на основе цифр табл. 1) согласно табл. 3.

Таблица 3
Пределенные 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 ⁸.

Ветер 35 м/сек предполагается при $+5^\circ$, а гололед — при -5° . Вероятность того, что при -5° грунт окажется замерзшим, 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

$$\begin{array}{l} \text{Горизонтальная сила} \dots 1,2 \text{ т} \\ \text{Момент от пути} \dots 7,4 \text{ тм (относительно } O_2) \\ \text{на путь} \dots 9,6, (\text{ относительно } O_1) \end{array}$$

⁸ 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 ⁹

$$A = 12 \text{ т/м}^2.$$

На основании некоторых косвенных результатов испытаний Dörr автором настоящей статьи была принята для круглых столбов в сильно утрамбованном песке расчлененная ширина $b = 2d$ (с преумножением против получавшейся $2,7 \div 2,8d$). Позднейшие прямые опыты автора дали $3 \frac{1}{2}$ в песке (слегка уплотненном утаптыванием и легким утрамбованием вверху), 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 был введен величина $b = 2d$.

Расчетная ширина столба при среднем диаметре подошвой 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	-0,7	+0,7
h	1,7	2,4
$r:h$	-0,412	+0,29
P_{np}	1,2	1,2
$E = \frac{Abh^2}{2} = \frac{12 \cdot 0,52}{2} h^2 \text{ т}$	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} переда- но	Предельные моменты, тм				Нижний лежень		Верхний лежень		
	на опоре	на стол- бе	оста- ток	на лежне	R_{2np}	b_2	I_2	R_{1np}	b_1
На столб	7,4	1,8	5,6	5,6	4,7	0,17	4,7	0,3	0,3
	7,4	3,4	4,0	4,5	3,8	0,14	5,0	0,5	0,5

По первому варианту свободная площадь обеих лежней $0,17 + 0,36 = 0,53 \text{ м}^2$,

⁹ Там же, табл. 31.

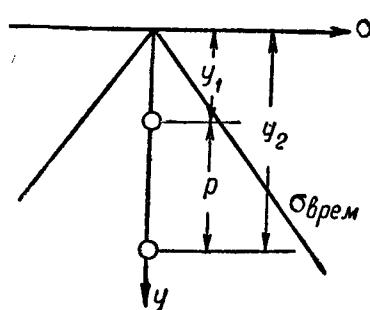


Рис. 8. К расчету лежней

Вычисление моментов столба

Таблица 6

Опрокидывание	P_{np} ложится на:	Θ	Δ_3	Eh	Столбцы (2) \times (3)	σ_2	Er	Столбцы (5) \times (6)	Столбцы (4) — (7)
		1	2	0,75	3	4	5	6	7
От пути	Столб Лежни	0,804 0,771	-0,020 0,041	20,4 20,4	-0,41 0,84	0,354 0,406	-6,30 -6,30	-2,23 -2,56	1,82 3,40
На путь	Столб Лежни	0,654 0,620	0,220 0,262	57,7 57,7	12,70 15,14	0,572 0,616	12,6 12,6	7,20 7,75	5,50 7,39

по второму

$$0,14 + 0,38 = 0,52 \text{ м}^2;$$

в этих цифрах видно, что второй вариант в данном случае ишь немнога выгоднее.

Цифры последнего столбца дают предельный момент, воспринимаемый столбом. В сторону пути предельная нагрузка, приложенная к опоре, составляет 9,6 тн 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 в б, 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 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, не баласт пути. По соображениям, изложенным ранее, придется расчетный уровень грунта считать по почве, не по досыпке и лежень ставить в б. Если же поставить лежень справа, то его рабочая поверхность окажется (счи-я пока диаметр лежня около 20 см) на

$$0,20 + 2 \cdot 0,26 = 0,72 \text{ м}$$

и выше от откосов, причем до них остается приблизительно полуторная глубина, считая от уровня баласта (с на рис. 7). Кроме того, лежень приходится близко к баластному слою. Поэтому здесь без большой натяжки можно принять расположение на уровне с, 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:

$$\begin{aligned} \Theta^2 + 0,412\Theta - (0,500 + 0,067 + 0,412) &= 0; \\ + 0,412 - (0,500 + 0 &+ 0,412); \\ - 0,232 - (0,500 + 0,033 - 0,292) &; \\ - 0,292 - (0,500 + 0 &- 0,292) \end{aligned}$$

тогда 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 выше. Поэтому есть смысл определить размеры верхнего лежня по первому варианту.

Применив 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 градациях через 20 см:

$$\begin{aligned} 0,47 + 0,26 &= 0,73 \text{ м, примем 0,8 м;} \\ 1,00 + 0,26 &= 1,26 \text{ м, примем 1,2 м.} \end{aligned}$$

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 недоразумений, 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	П е р е р а с х о д руб.	Э кономия руб.
Лежни (с пропиткой и доставкой)	0,7	—
Столбы (.)	—	24,8
Котлован	—	7,9
Досыпка баластом (с работой и материалом)	21,3	—
И т о г о . . .	22,0	32,7
В с е г о . . .	—	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 тока¹ 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/cm . 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 намагничения² $B = f(aw)$ для союзной трансформаторной стали толщиной 0,5 и 0,35 мм. Исследование этих кривых позволило автору найти

¹ Например, F. Bergtold. Über die Einzelwellen des Magnetisierungstromes, ETZ, 1928, S. 1847; Г. Н. Петров, Трансформаторы, 1934, стр. 183, § 60.

² По материалам Московского трансформаторного завода (МТЗ).

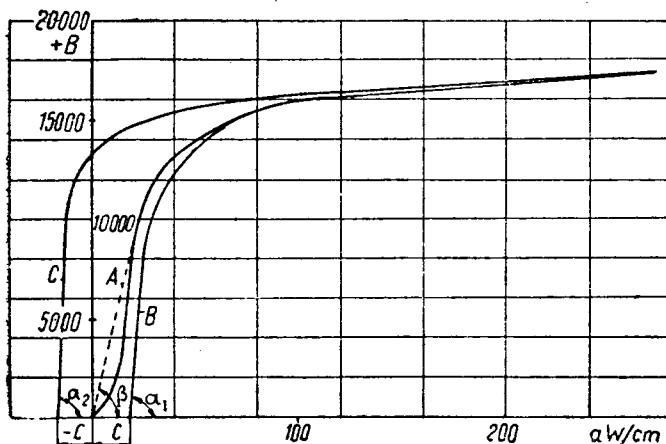


Рис. 1. Петля гистерезиса эталонного образца

коэффициенты и показатели степени уравнения³:

$$aw = ab + bx^x.$$

Для железа толщиной 0,5 mm — $a = 0,4$, $b = 0,35 \cdot 10^6$ при толщине 0,35 mm — $a = 0,4$, $b = 0,43 \cdot 10^6$ и $x = 9$.

Кривые шлейфа выражаются подобного вида уравнениями, только они содержат еще постоянную составляющую, представляющую $\frac{aw}{cm}$ 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 B больше угла наклона касательной к A ($\alpha > \beta$). Эти кривые пересекаются между собой.

Для произвольного значения: y_1

$$x_A = a_A y_1 + b_A y_1^X;$$

$$x_B = a_B y_1 + b_B y_1^X.$$

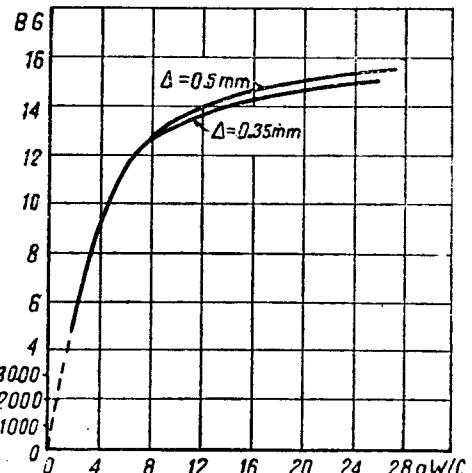


Рис. 2. Кривые намагничения для стали ЕСЧАА

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 яснилось, 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

³ К выражению такого вида впервые пришел Bergtold (см. сноску 1).

ится к отысканию коэффициентов a_1 , b_2 и c . Эти коэффициенты мы определим из следующих условий.

Когда индукция достигает заданного максимума, все три кривые сходятся в одной точке. Площадь искомой петли должна быть равна площади истинной.

Первое условие дает:

$$aw_m = aB_m + bB_m^x; \quad (3)$$

$$aw_m = a_1 B_m + bB_m^x + c; \quad (4)$$

$$aw_m = a_1 B_m + b_2 B_m^x - c. \quad (5)$$

Как известно, элементарная работа на гистерезис

$$dW = Wid\Phi 10^{-8}. \quad (6)$$

Для однородного магнитопровода длиною l и сечением Q

$$dW = Ql 10^{-8} aw d B. \quad (7)$$

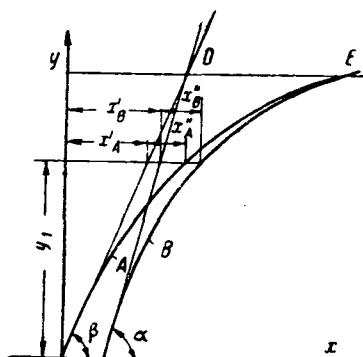


Рис. 3

Средняя мощность потерь на гистерезис за период T

$$P_h = \frac{W}{T} = \frac{Ql 10^{-8}}{T} \int_T aw d B, \quad (8)$$

и площадь петли

$$\int_T aw d B = \left(\frac{P_h}{Ql 10^{-3}} \right) T \cdot 10^5. \quad (9)$$

Первый сомножитель правой части есть потери на гистерезис в 1 dm^8 металла — p_h . Выражая индукцию в килогауссах при $T = \frac{1}{50}$ сек получаем:

$$\int_T aw d B = 2p_h \quad (10)$$

$$2p_h = 2 \left[\int_0^{B_m} (a_1 B + bB_m^x + c) d B + \int_{-B_m}^0 (a_1 B + b_2 B_m^x - c) d B \right] \quad (11)$$

$$2cB_m - \frac{b_2 - b}{x+1} B_m^{x+1} = p_h. \quad (12)$$

Местное решение (3), (4), (5) и (12) дает:

$$c = \frac{p_h}{2xB_m} (x+1); \quad (13)$$

$$a_1 = a - \frac{c}{B_m}; \quad (14)$$

$$b_2 = \frac{2c}{B_m} + b. \quad (15)$$

Таким образом, зная максимальную индукцию B_m магнитопровода, потери p_h , параметры начальной кривой намагничивания a , b , x , легко найти параметры эквивалентной гистерезисной петли.

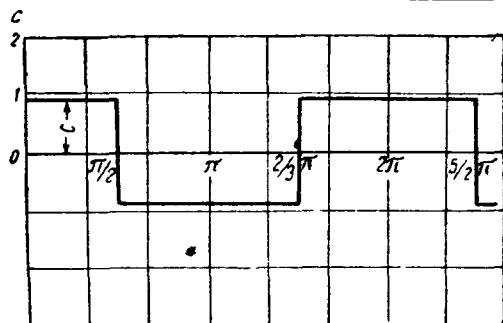


Рис. 4

Намагничивающий ток однородной магнитной цепи. Для однородной магнитной цепи средней длиной l отдельные намагничивающие ампервитки aw представляют полный ток намагничения в определенном масштабе (i'). Если индукция изменяется по синусоиде $B = B_{\max} \sin \omega t$, то при

$$\omega t = 0 \div \frac{\pi}{2} \quad i' = a_1 B + bB^x - c; \quad (16)$$

$$\omega t = \frac{\pi}{2} \div \pi \quad i' = a_1 B + b_2 B^x - c; \quad (17)$$

$$\omega t = \pi \div \frac{3}{2}\pi \quad i' = a_1 B + bB^x - c; \quad (18)$$

$$\omega t = \frac{3}{2}\pi \div 2\pi \quad i' = a_1 B + b_2 B^x + c. \quad (19)$$

Из этих уравнений видно, что намагничивающий ток i' можно разложить на три компоненты: одна — $C = f(\omega t)$ (представлена на рис. 4), вторая действует в первом и третьем квадрантах ($a_1 B + bB^x$), а третья — во втором и четвертом ($a_1 B + b_2 B^x$).

Компонента, действующая в первом и третьем квадрантах:

$$a_1 B + bB^x = (a_1 B_m + k_1 bB_m^x) \sin \omega t - k_3 bB_m^x \sin 3\omega t + k_5 bB_m^x \sin 5\omega t - k_7 bB_m^x \sin 7\omega t + \dots + k_x bB_m^x \sin x\omega t. \quad (20)$$

Для упрощения расчетов на рис. 5 приводятся кривые $k_n = f(x)$, где

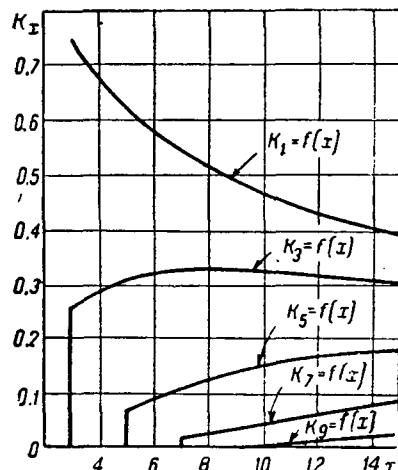
$$k_n = \frac{1}{2^{x-1}} \cdot \frac{x(x-1)(x-2)\dots[x-(n-1)]}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots n}.$$

Аналогично третья компонента:

$$a_1 B + b_2 B^x = (a_1 B_m + k_1 b_2 B_m^x) \sin \omega t - k_3 b_2 B_m^x \sin 3\omega t + k_5 b_2 B_m^x \sin 5\omega t - \dots + k_x b_2 B_m^x \sin x\omega t. \quad (21)$$

Амплитуды одноименных гармоник в (20) и (21) неравны. Так как $b_2 > b_1$, то амплитуды третьей компоненты больше одноименных с ними амплитуд второй компоненты:

$$I''_{mn} > I'_{mn}.$$

Рис. 5. Выбор k_n от характеристического коэффициента

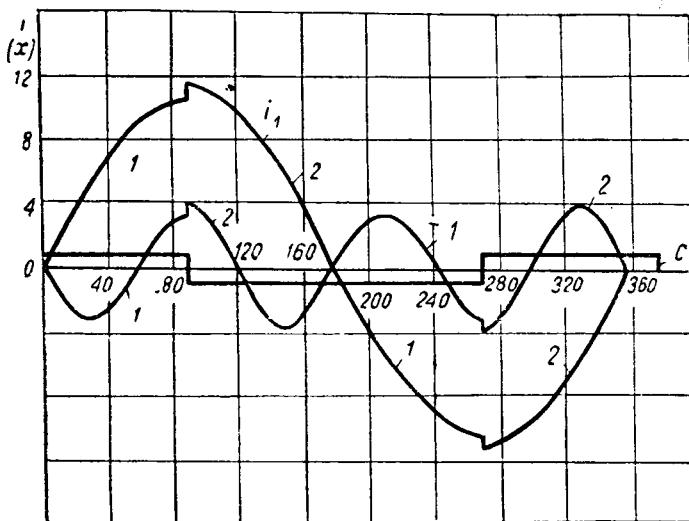


Рис. 6. Высшие гармонические намагничения тока и постоянная составляющая

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 намагничения.

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

$$I_\mu = \sqrt{\frac{\sum I_{mn}^2}{2}}. \quad (25)$$

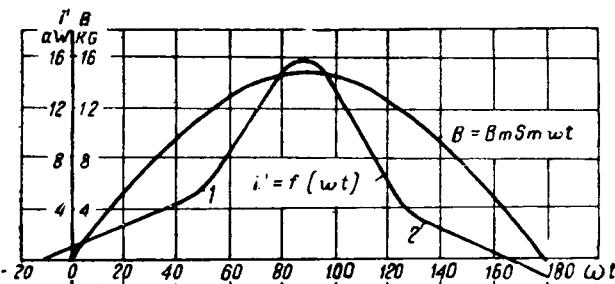


Рис. 7. Намагничивающая ток — $i = f(\omega t)$; $B = f(\omega t)$

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

$$P_c = -ec \frac{l}{w},$$

$$-e = E_m \cos \omega t.$$

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 (22) после преобразований получим:

$$P_c = \frac{x+1}{x} P_h. \quad (26)$$

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 отдельльна, как в этом легко убедиться из рис. 6, — четвертые неодинаковы.

Пример. Для простоты положим $\frac{w}{l} = 1$, тогда $i' = i$. Трансформаторной стали толщиной 0,5 (рис. 2) $a = 1$, $b = 0,35 \cdot 10^{-9}$, $x = 9$. 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 $f = 50$ $\frac{W}{c_h} = 0,1125$. Тогда $P_h = c_h B_m^2 = 0,1125 \cdot 14,5^2 = 23,6 \frac{W}{dm^3}$. Уравнению (3):

$$c = \frac{P_h (x+1)}{2xB_m} = \frac{23,6 (9+1)}{2 \cdot 9 \cdot 14,5} = 0,905.$$

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)]:

$$I'_{m_1} = 10,3, \quad I'_{m_3} = 3,26, \quad I''_{m_5} = 1,37, \quad I''_{m_7} = 0,348,$$

$$I'_{m_9} = 0,0487 \text{ A.}$$

$$I''_{m_1} = 11,2, \quad I''_{m_3} = 3,87, \quad I''_{m_5} = 1,65,$$

$$I''_{m_7} = 0,413 \text{ и } I''_{m_9} = 0,0578 \text{ A.}$$

По уравнению (24) амплитуды отдельных гармоник:

$$I_{m_1} = 10,75, \quad I_{m_3} = 3,58, \quad I_{m_5} = 1,515,$$

$$I_{m_7} = 0,382 \text{ и } I_{m_9} = 0,0535 \text{ A.}$$

Намагничивающий ток, уравнение (25):

$$I_\mu = \sqrt{\frac{\sum I_{mn}^2}{2}} = 8,1 \text{ A.}$$

Приведенные на рис. 6 кривые первой и третьей гармоники тока и намагничивающий ток рис. 7 построены на данных этого примера.

Наименование гармоники 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 целевых гармонических, в таблице сопоставлены расчеты размагничивающего тока с учетом петли гистерезиса и без нее, исходя только из начальной кривой намагничения. Исходные данные взяты из вышеупомянутого примера.

При рассмотрении таблицы видно, что результирующий ток с учетом петли гистерезиса получается несколько выше ($\approx 1,88\%$). 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 больше⁴. 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 неоднозначности

⁴ С ухудшением качества стали, очевидно, разница будет еще более заметной.

одного магнитопровода его необходимо разбить на участки и для каждого участка магнитной цепи определять намагничивающий ток как для однородной магнитной цепи.

Литература

1. Проф. Г. Н. Петров. Трансформаторы, 1934, стр. 183, § 60.
2. F. Bergtold. Über die Einzelwellen des Magnetisierungstromes, ETZ, 1928, 1847.
3. G. Grobe. Ein analytische Ausdruck für die Histeresis-schleife, ETZ, H. 203, 1934.
4. Launepse. A Theoretical Expression for the Magnetising-curve of the Machine, Met. Gaz. № 273, 1936.
5. M. Dergi. Eine neue Formel für die Magnetisierungskurve ETZ, H. 218, 1928.
6. H. Sequeira. Beiträge zur Gleichung der Hysteresisschleife, Arch. El. H. 29, 1935, S. 387.

Определение потерь синхронного генератора методом выбега

И. А. Сыромятников
Баку, Азнеэро

ВТОР ПРЕДЛОЖИЛ использовать для определения постоянной опыта разбега генератора при сбросе нагрузки. Этот метод был применен электротехником Сргреаса 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; ω — ускорение силы тяжести; ω — угловая скорость; J — момент инерции; t — время.

Заменим

$$J = \frac{GD^2}{4g}; \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}; \quad \frac{\omega}{\omega_n} = v;$$

$$\frac{P_m}{P_n} = p_m; \quad \frac{P_n}{P_n} = p_n,$$

получим:

$$dt = T_a \frac{vdv}{P_T - p_n}, \quad (2)$$

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 Δt время изменения числа оборо-

тов 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 $a=3$

$$\frac{tp_0}{T_a} = \frac{v_1^{2-a} - v_2^{2-a}}{2-a} = \frac{1,025^{-1} - 0,975^{-1}}{2-3} = 0,050035.$$

Погрешность

$$\frac{0,050035 - 0,050000}{0,050000} 100 = 0,07\%.$$

При меньших значениях a погрешность будет еще меньше. Из опыта разбега имеем:

$$p_0 = p_{cbr} = \frac{P_{cbr}}{P_n} = \frac{T_a}{\left(\frac{dt}{dv}\right)_{cbr}}.$$

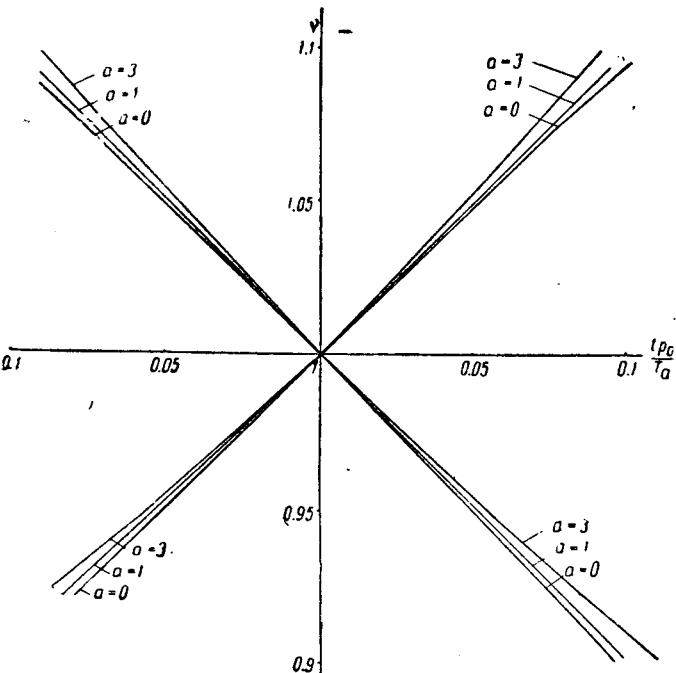


Рис. 1

Подставляя из этого соотношения значения T_a в формулу (5), находим:

$$P_0 = P_n = \frac{P_n}{P_n} = \frac{\left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right)_{cbr} P_{cbr}}{P_n \left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right)_n},$$

откуда

$$P_n = P_{cbr} = \frac{P_{cbr} \left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right)_{cbr}}{\left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right)_n}.$$

При $\Delta n_{cbr} = \Delta n_n$

$$P_n = P_{cbr} \frac{(\Delta t)_{cbr}}{(\Delta t)_n}.$$

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 уменьшаются.

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-2970, 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 A. Электродвижущая сила статора 7000 V и для нагрузки 10% (2400 kW) при $\cos \varphi = 0,8$, ток ротора 145 A, 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 уменьшаются

$$10,2 \left(\frac{126}{145} \right)^2 = 7,73 \text{ kW.}$$

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 в клеммах генератора внезапно возрастет на величину вынужденной потери напряжения в активном и реактивном сопротивлении. При нагрузке 10% эта потеря напряжения соответствует всего лишь 1%. В вызванном 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 10 sec.

В случае турбогенераторов при сбросе нагрузки 10% номинальной время разбега до числа оборотов, превышающее номинальное на $2,5 \div 5\%$, будет 3,5—7 sec.

Как уже указывалось выше, при нагрузке 10% ток возбуждения равен около 1,1—1,15 тока холостого хода. 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 номинальных.

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ В КАПИТАЛИСТИЧЕСКИХ СТРАНАХ

Электрификация и электростроительство фашистской Германии

Б. Л. Эрлихман
Москва

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 энергозаимстве (декабрь 1935 г.) установлена военно-фашистская 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)¹.

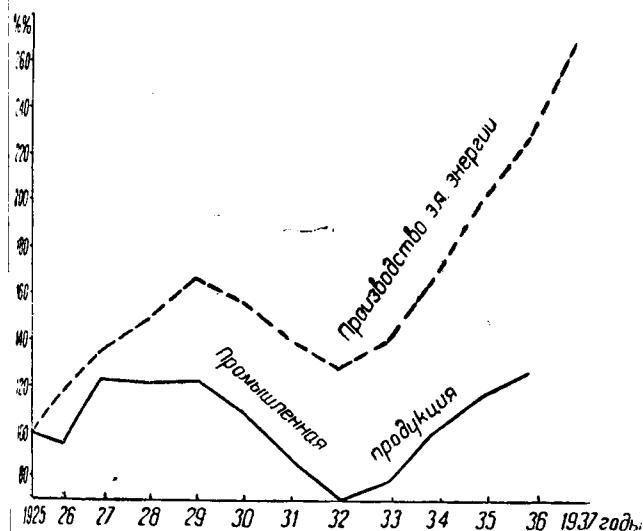


Рис. 1. Динамика индексов промышленной продукции и производства электроэнергии

Фашистские энергетики восхваляют прогрессивное значение электрификации в период гитлеровского господства для германского народа, ссылаясь на рост коммунально-бытового и сельскохозяйственного потребления электроэнергии.

Таблица 1

Годы	Выработка электроэнергии в млн. MWh
1935	18,3
1936	30,7
1937	23,5
1938 (включ. Саар)	30,7
1939	37
1940	42,5
около 1941	около 50

Между тем, фактическая динамика расходной части электробаланса (табл. 2) легко опровергает это демагогическое утверждение.

Еще более показательно сопоставление абсолютных цифр при-

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 промышленности² (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 израсходовано³ 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-

¹ по данным Elektrizitätswirtschaft № 1, 1937, № 1 и 2, 1938, № 1 и St. № 7 и 22, 1936 и Annuaire St. de la Soc. des E. 1935/36.

² По данным St. Jahrb. d. D. R. и El. W. № 32, 1936.

³ El. W. 1936, S. 446, RTA 1936, 15/IV.

нейшей централизации фашистского электрохозяйства и усилении позиции наиболее мощных капиталистических электротранспортных компаний.

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 отнесен 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 району⁴. По станциям высокого давления данные приводятся в зашифрованном виде⁵ (без указания названия станций). Разноречивы и путанные 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 энергоснабжения⁶. 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 электроснабжающие 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 возрасала по установкам общего пользования. По

Таблица 4
Динамика установленной мощности электростанций Германии за 1925—1937 г. *

Годы	Мощность станции 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 отстают 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, «预备 запас».

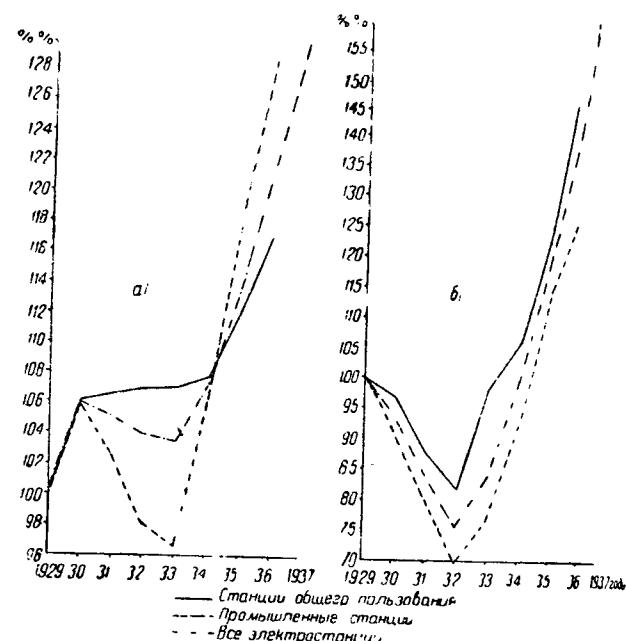


Рис. 2. б — динамика производства электроэнергии, а — динамика установленной мощности электростанций

Заметна тенденция к рассредоточению и концентрации электростроительства, пропагандируемая идеологами фашистского электрохозяйства. В качестве максимальной мощности станции выдвинута мощность в 150 MW, тогда как до кризиса были построены станции в 400—500 MW.

Все значительные промстанции (*«leistungsfähige Zechenkraftwerke»*) включаются в сеть общего пользования. Представитель фашистского руководства энергохозяйством Креке специально призывал к созданию двухсторонней электрическо-

⁴ El. W. № 4, 1936.

⁵ Ср. El. W., 1937, 25/I и VGI № 340, 1936.

⁶ Ср. статьи Warrelmann, El. W., 1935, S. 681, майора W. Hedler, RTA 1936, 12/XII, Die Wärme № 14, 1937 и др.

связи промстаний с сетью общего пользования и к построению сети трех напряжений: а) межрайонных передач в 100 и 220 kV («zwischen bezirklichen»), б) распределительной сети среднего — 30—80 kV («Orts-Mittelspannung») 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 электроцентраций. 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 характер⁸.

Бавария — важнейший район избыточной гидроэнергии, развитой электрохимии и электрифицированных ж. д. Строительство гэс на Инне в последние годы вызвано потребностью в энергии атомниевых, 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 (Гофф и Герлаштрун). Протяженность 100-kW сети достигла в 1935 г. 1400 km, 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. 1/3 общегерманской). Расширена 100-kV сеть, питающая новые участки электрифицированных линий.

Рейнско-Вестфальский район. В последние два года шло интенсивное строительство станций и линий как по RWE (рост установленной мощно-

сти за 1934—1935 гг. на 28%), так и по промстаниям. По данным Кепхена⁹, RWE увеличила отдачу только по одному алюминиевому заводу Эрфтвек 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-Ибенбюрен), 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 широкой 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 Мангайме, 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 MW¹⁰.

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 Мульдштайн и др.) и 3) для высоковольтной связи с другими районами и создания опорных пунктов

ETZ 1937, 12/VIII, El. W. № 25, 1937. Ср. также статьи Schaly, Schleicher и др. о включении крупных промстаний в сеть общего пользования, El. W. № 19 и 21, 1937.

⁸ Для линий в 220 kV применен алюминиевый провод диаметром в 450 mm². Неэкономичность линий, которые якобы, для выпуска с аркой энергии, отмечена немецкой энергетикой: „Die Übernahme... der Saarenergie ist... nur von diesem aus betrachtet ein Opfer bedeutet“. El. W. 1935, S. t07.

⁹ A Koepchen, Die Aufgaben der deutschen, El. W., 1936.

¹⁰ 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 (Гесснц). 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 промстаницам. 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, вклиниченного между Польшей и Чехословакией.

В районе усиlena 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 плотин¹¹.

В Нижне-Саксонском и северо-западном районах в последние годы реконструирован ряд старых электростанций (рост мощности по Брауншвейгу на 13,5 MW, Киль — 12,5 MW и др.). Для питания этих районов прежде неплотного электроснабжения имеют существенное значение 220-kV линия Лерте — Гарбке, 60-kV линия Унтервезер — Вульсдорф на юг и т. д.

В Поммерании имело место строительство 30—100-kV линий, связывающих район с Берлином и Средней Германией (Берлин — Гюстров — Штальзунд, Финкенгерд — Незевальк). 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 (Альтштейн — Растенберг).

Электростроительство истекшего 1937 г. в рассматриваемых районах еще более скучно 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 Вторцбургом (на Майне).

Намечена дальнейшая реконструкция тепловых станции Герлита, расширенной в 1935 г. (Силезия). На ст. Мюленбург (Восточная Пруссия) устанавливается новый агрегат.

Сооружается станция у Bleckenstedt для электроснабжения нового металлургического завода Salzgittergebiet¹². 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 в высоковольтную сеть Германии¹³.

В строительстве тепловых станций последних лет растет удельный вес установок высокого давления. Около 745 MW приходится на турбины с давлением выше 60 at. К началу прошлого года в эксплуатации и строительстве находилось 9 котлов на давление в 100 и выше атмосфер.

**

Непосредственно до кризиса, т. е. в период наибольшего использования мощности электростанций, почти все системы и промустановки имели значительные резервы мощностей. Так, отношение установленной мощности к пиковой составляло: по Берлинской системе — 1,94, Электроверке — 1,9, MEW — около 1,6 и т. д. Тот же показатель по станциям общего пользования в среднем равнялся около 1,5. Для промстаниций 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 h в 1936 г. против 2470 в 1929 г.).

По данным W. u. St.¹⁴ 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-

¹² El. W. № 34, 1937.

¹³ Материал о новом строительстве — по данным El. W. № 25/XI, 15/VIII; VDI 1937, RTA № 45, 1936, а также El. W. № 38, 15.

¹⁴ № 22, 1936. Ср. также El. W. № 32, 1936. W. Rohrbeck Betriebsstatistik der Wirtschaftsgruppe, El. V. f. d. I. 1935, же величина для 1934 г. составляла 61%, для 1932 г. —

¹¹ 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 угле	
Саксен-Анхальт	Микрамаг	68	тепловая на каменном угле	Станция общего пользования для покрытия пиков и резерва, 1929—1932 гг. Для обслуживания химпредприятий военного значения, 1932—1934 гг. 1930—1934 гг.
	Гарбке	30	тепловая на каменном угле	
Саксония	Блейлох	40	гидростанция с гидроаккумулятором	Окончена в 1934/1935 г.
	Болен	210	тепловая на буром угле	
Бавария	Нидервартта	70	гидроаккумуляторная	Для обслуживания химпромышленности, 1929—1935 гг. В последние годы произведена реконструкция котельной 1930—1931 гг.
	Швандорф	60	тепловая	
Рейнско-Вестфальский район	Иннверк (Тоттинг)	70	гидростанция	Станция общего пользования, 1930—1933 гг. Расширение в 1936—1937 г. для питания алюминиевых предприятий Принадлежит RWE, 1929 г.
	Гердеке	140	гидроаккумуляторная	
Силезия	Альбрюк Доггерн	100	гидростанция	Для питания южной части высоковольтной сети RWE, 1929—1933 гг. Для питания химпредприятий. Расширение старой установки и переход на высокое давление в 1935—1937 гг. 2 турбины—25 MW в строительстве
	Шольвен	46	тепловая на каменном угле	
Баден	Гельзенкирхен	20	тепловая	Для электроснабжения трубопрокатного завода. Турбина MAN на 160 t/h, 1936 г. Радиальная турбина ССВ для электроснабжения промпредприятий
	—	50	тепловая	
Саксен	Глейвитц	27	тепловая на каменном угле	Станция общего пользования. Расширена в 1935—1936 гг.
Восточная Пруссия Нидерсаксен и Северо-запад	Майнгейм	32	тепловая	Расширение за счет установки турбины и котла высокого давления 112 at в дополнение к установленной турбине в 12 MW в 1934—1935 гг. 1929—1930 гг.
	Шлухзее Гаузерн	126	гидростанции	1933—1934 гг. Станция общего пользования, 1929—1933 гг.
	Эйхгольц	26	гидроаккумуляторная	
	Вальдек	115	гидроаккумуляторная	Станция общего пользования, 1934—1935 г. Турбина Юнгстрема, 1935 г.
	Гумбинен	13	тепловая	
	Ганновер	16	тепловая	Турбина 110 at и 2 котла в 135 at на станции общего пользования, 1935 г.
	Гамбург	22	тепловая	

е электростроительство последних лет не было названо 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 жюлье 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 из энергии с запада юга к центру, из Средней Германии в Северо-запад т. д.¹⁵.

¹⁵ 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 амортизованных 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 (Нидервартта, 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.

Заимствованная из El. W.¹⁶ 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 буроугольных 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

¹⁶ 1937, S. 483.

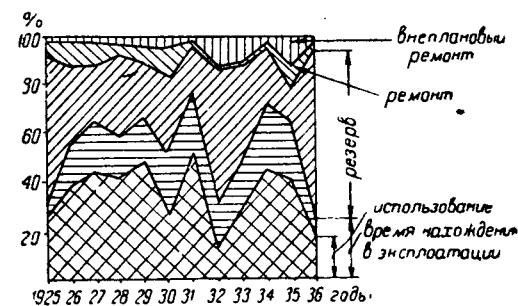


Рис. 3. Характеристика использования мощных турбин (от 10 MW) в зависимости от года установки

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 энергетики 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 сигналлизации 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, Вильке и Симмера, противопоставивших свои взгляды взглядам Франклина, основателя унитарной теории электричества.

Шарль-Франсуа де-Систерне Дюфэ (Charles-François de Cisternay 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 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 имеющие 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., тех пор научный орган Парижской академии наук редкий год не публиковал произведений Дюфэ. Это были сочинения преимущественно по химии. С 1733 г. начали даваться его исследования по электричеству.

Приступая к экспериментальным изысканиям, Дюфэ уже имел совершенно ясное представление о современном ему состоянии избранной им отрасли физики. Бы-

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 первому принадлежит первое историческое сочинение в этой области. Первая его статья, появившаяся в органе французской Академии наук¹, 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 пряток 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 становился 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 осознавалось 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 называл под термином электричества.

Электричество, — писал он, — является свойством, общим некоторым веществам, и состоит в способности притягивать различные тела, находящиеся на некотором расстоянии от электрического тела после того, как оно было некоторым образом подготовлено». «Приготовление», — добавляет он, — заключается в простом натирании 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 соответственному 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 плаванию этой силы, совершаясь ли она по веревке, по воде или при приближении трубки, и какие тела лучше всего притягиваются электричеством?

4. Что общего между силой притяжения и силой оттал-

кивания, связанными 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 преувеличением утверждение, что до Фарадея никто из исследователей в области электричества не чувствовал столь глубоко и в целом всю проблематику, которую выдвигало учение об электричестве.

23 мая 1733 г. Дюфэ прочитал доклад в Парижской академии наук. Он опубликован под названием «Второе сообщение об электричестве»² 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, считавших-

ся до того «неэлектрическими», удается наэлектризовать при известных условиях. Это и tolknulo на предположение: «если в некоторых из них нельзя возбудить эту силу, то не потому ли, что они невосприимчивы к соответственному 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 удалил сомнительное «как будто».

¹ Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1733, pp. 83—84.



Шарль-Франсуа де-Систерне Дюфе

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 наэлектризуются 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, скрипидар; Дюфэ решил прибавлять к ним «достаточное количество толченого кирпича» для превращения их в твердое тело. Опыт показал, что и эти тела «становятся электрическими при трении».

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 имелась 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 считаю 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 Дюфэ³. 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 Гре 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 испытал то же самое, — пишет он, — и все тела, которые 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 разнородных 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 убедительные результаты; это окончательно убедило Дюфэ, что «все тела могут стать электрическими при приближении стеклянной трубы, достаточно натертой, чтобы возбудить в них эту силу».

Третья проблема, поставленная Дюфэ: «какие тела могут остановить или способствовать передаче этой (электрической) силы, совершается ли она по веревке, по палке или при приближении трубы, 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 журнале⁴ 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 сочинении 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, отдав должное своим предшественникам, никому из них не верил 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 «имеются безусловные доказательства значительной роли цвета в явлениях электричества». Таким образом Дюфэ, добно 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 убедил опыты на тему: «равное ли действие оказывают натуральные цвета и искусственные». «С этой целью, — пишет Дюфэ, — взял мелкие кусочки цветов всех окрасок и приближал к ним натертую трубку. Я заметил, что все эти листочки 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».

³ См. нашу статью «Начальный этап в учении об электричестве». «Электричество» № 3, 1938.

⁴ Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1733, 233—254.

ния». Он установил, что стеклянные трубы 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: «к 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 совсем не представляют препятствия прохождению электрической материи вдоль прерывистого тела».

Из последующих опытов Дюфэ замечателен тот, который он назвал «способом прерывания электричества». Вот то рассказывает Дюфэ: «Я привязал к концу веревки из шток в 15 футов длиною картонный шар диаметром в 1 фут. Устроив эту веревку обычным способом на двух шелковых шнурках, я приблизил к ней трубку; шар на другом конце стал сильно электрическим и притягивал листочки на расстоянии одного фута. Тогда я дотронул 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 во всей комнате».

Это место из доклада Дюфэ весьма характерно. Как якобы был он к пониманию того, что электрический заряд был отведен человеческим телом в землю, и все же сделал этого, казалось бы, простого заключения.

Вслед за Греем, наэлектризовавшим ребенка, Дюфэ вчад 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 листочек фольги, которые просто ударяли меня по лицу».

Повторяя много раз эти опыты, Дюфэ получал все новые и новые данные, которые им охарактеризованы как вид поразительных открытий, если вообще еще можно выражаться чемунибудь 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, длиною 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 пронес над ними рукой, к которой подносил трубку: листочки не пошевелились. Когда же другой человек, не поднявший совсем ко мне, вытянул руку над картоном, листочки быстро взлетели к ней. Тогда я приблизил руку к лицу, желая узнать, не притянет ли оно листочки, но они не шевелились, зато, когда я протянул руку над своим телом картон, то листочки устремились сами собою в воздух и не падали обратно на картон. Я повторил этот опыт несколько раз, и он всегда имелся. Он сопровождался еще некоторыми замечательными явлениями. При одном из этих опытов один из присутствовавших хотел взять листок фольги, приставив к моей ноге. В этот момент, когда он приближал руку, я услышал треск, издаваемый обычно трубкой, когда приближают к пальцам, и почувствовал даже немногую 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 «всесильно занялся этим явлением». Эффекты, ученные им при следующих опытах, были еще ярче. Я могу сказать, — пишет Дюфэ, — можно снять с резким уколом или ожогом от искры». Однажды внимание Дюфэ стало достаточно изучаться только в 40-х годах, когда была изобретена лейденская банка и исследователи стали экспериментировать с более новыми электрическими зарядами. Электрические заключения Дюфэ также нашли свое выражение 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 убедили результаты другого опыта. «Если положить фольгу, — пишет он, — на стекло и приблизить снизу трубку, листки 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 отталкивать».

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 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 идеи о двух разнородных 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 (при косновении 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 также, 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 обратно». 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 подтверждалась результатами, с необходимостью вытекавшими, как мне казалось, из него».

Укрепившись окончательно в своей идеи «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»⁵. 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 «сирость 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 «вызывают пустоту или хотя бы очень разреженный воздух». Дюфэ указывает при этом, что в предыдущих еще опытах было наблюдано, что «колебания воздуха не увлекают электрическую материю».

Еще Гаукбси интересовался вопросом о том, влияет ли пустота на возбуждение электрических зарядов. Им описан следующий опыт. Нагретая, как обычно, стеклянная трубка, из которой был выкачен 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 Гаукбси позволили ему думать, что «когда воздух находится внутри трубки, то он мешает свободному входению туда электрического вещества и, следовательно, онодаетствует снаружи; напротив, если в трубке нет воздуха, 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 претерпевало никакого уменьшения, был ли сосуд наполнен обыкновенным воздухом, был ли он пустым, впоследствии 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 Гаукбси и получив прежние результаты, Дюфэ, однако, не ограничился этим и продолжил свои изыскания, пока не получил новых данных, позволявших 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 «всегда осложняла опыты и приходилось всем возможными ухищрениями изобретать различные приспособления».

Однако сознание бессилия нисколько не расхолаживало Дюфэ, и с исключительной страстью он призывал к изучению темных сторон явлений электричества.

В следующем «сообщении»⁶ Дюфэ коснулся последней проблемы. Оно носит название: «Шестое сообщение об электричестве, где рассматривается отношение между электричеством и способностью изливать свет, приложимому к большинству электрических тел, и что можно извлечь».

Из самого названия доклада видно, что Дюфэ, жаждя быть 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. имеющих определенную электрическую базу и от нее отправлявшихся. Дюфэ же работал в эпоху, которая может быть названа зарядом знания об электричестве, и, разумеется, его труды над этой проблемой о связи между электричеством и светом могли быть лишь начальными и робкими шагами.

Заключение, 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 продолжать существовать, когда последнее свойство уничтожается влиянием сырости». В другом месте он еще более язвительно высказал свое мнение и подтвердил его следующим: «Свечение, наблюдавшееся в выкаченной колбе, где находится ртуть, является новым доказательством действ

⁵ Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1734, pp. 341—361.

⁶ Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1734, 503—526.

тального различия между веществом, обуславливающим электричество, и другим, вызывающим свет. Ибо, если перелить 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 способам 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 к нему всему пройденному пути и формулировать то, чего добился. Такую попытку мы находим в конце шестого сообщения. Результаты двухлетних публикаций, бо́льших столь огромным количеством опытов, изложены в виде шестнадцати положений, к которым Дюфэ сводит 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 процветать 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 большой 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, воспринимавшей 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 пропитываются или прерывают электричество примерно в соответствии с их объемом.

8. Из живого, наэлектризованного при помощи трубы

тела исходят жгучие искры, и они не вызывают никакого болезненного ощущения, исходя из неодушевленного 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 выкаченный шар оказываются заметные эффекты лишь внутри.

13. Сжатый воздух внутри трубы, 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 два 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 завершенными. Заключительные слова его доклада Парижской академии наук звучат как прощающее слово неутомимого исследователя, который с полным сознанием пройденного пути передает новому поколению свою область исследований, служившую ему плютищем, 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 цennыми, 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, Нолле и Лемонье. Более того, знаменитые исследования Вениамина Франклина тесно связаны с изучением лейденской бани, 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 цены¹

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, подобранные соответственно утвержденной программе, и координация круга вопросов, охватываемого данной дисциплиной, с дисциплинами смежными, изучающимися до и после излагаемого курса.

2. Стойкость 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 Бушеро 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 эксплоатационной надежности центробежных переключателей и т. д.

Упущением 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 радиальным 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 I 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 одинаковой величине 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 прямой и инверсной 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 этой машины — синхронный и асинхронный, — автор совсем не подчеркивает этого обстоятельства, что, несомненно, может привести к путанице представлений у читателя. Вслед за главой о машине двойного питания расположена глава о 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 нео-средственно для измерения электрическим путем крутильных моментов. Таким образом делается весьма сомнительной 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. 68) 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 затушевывается представление о схемах лишь как о математическом приеме расчета рабочего процесса машины.

Эквивалентные схемы двигателей Бушеро 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_2 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

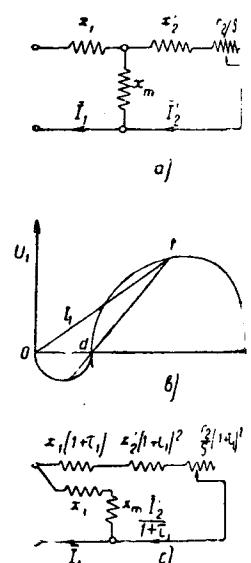


Рис. 1

¹ По материалам библиографического сектора Гос. научной библиотеки НКТП СССР.

кии с методом Гейланда. Между тем, если изложить раньше теорию Гейланда, можно было бы доказать предложенные М. П. Костенко уточнения буквально в двух строках.

Действительно, Гейланд пренебрегает совсем омическим сопротивлением первичной цепи и, следовательно, исходит в эквивалентной схеме *a* рис. 1. В теории Гейланда (см. пример, курс Лифшица) доказывается, что d (рис. 1, *b*) — это неподвижная точка диаграммы. Вектор тока статора, или образом, состоит из двух компонент — одной неизмен-

ной и равной Od (т. е. $i_{01} \frac{U}{x_1 + x_m}$) и другой переменной,

ответствующей отрезку df и равной $\frac{i''_2}{1 + \tau_1}$. Но в соответствии со схемой *a* рис. 1 можно написать:

$$\begin{aligned} i'_2 &= i_1 \frac{x_m}{x_m + z'_{2s}} = \\ &= \frac{U}{x_1 + z'_{2s} \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right)} = \frac{U}{x_1 + z'_{2s} (1 + \tau_1)}, \end{aligned} \quad (\text{A})$$

Или рис. 83 в рецензируемой книге.

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.¹

Рецензируемая книга представляет собою результат переработки уже существующей учебной литературы. Содержание ее не выходит за рамки установленного 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 лучшую подготовку студенчества, с одной стороны, и наличие значительного количества разнообразных курсов теоретической электротехники — с другой, трудно согласиться с тем, что появление такой книги вызывалось настоятельной необходимостью.

Несомненно, что появление новой книги могло бы быть связано наличием в ней «оригинальной» идеи или же включением более современного материала.

Переходя непосредственно к содержанию книги, отмечу следующее.

Теория 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 иложен хорошо, дан в векторной форме, но в нем отсутствует изложение основных явлений электромагнитного поля: уравнений Максвелла, векторного потенциала, вектора Пойнтинга. В теории электрического поля не включены уравнения Лапласа и Конона. Таким образом эти главы не могут заменить теории поля, так как в них отсутствуют те отделы, которые имеют широкое применение в практике электротехнических расчетов. Этот недостаток сказался в рецензии на курс при изложении явлений распространения вдоль проводов и поверхностного эффекта. Уравнение Максвелла позволило бы связать указанные явления с представлением об электромагнитных волнах.

Таким образом приходится признать, что книга неполностью соответствует своему названию — «Курс теоретической электротехники».

Однако, в книге имеются некоторые принципиальные и методические недостатки.

Материалам библиографического сектора Гос. научно-исследовательской библиотеки НКТП СССР.

откуда

$$\frac{i'_2}{1 + \tau_1} = \frac{U}{x_1 (1 + \tau_1) + z'_{2s} (1 + \tau_1)^2}, \quad (\text{B})$$

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 φ 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

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, нисколько не готовляет 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 попадают 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 I , иначе говоря, если магнитная индукция B остается неизменной (поле однородно) во всех точках участка I 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 mnemonicским 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 выдержано терминология.

Так, говоря об электрическом поле между двумя заряженными проводами, 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 проводами, 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.

Странным 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. Мегрок,
В. А. Судаков, В. М. Лайф

НОВЫЕ КНИГИ

Баптиданов Л. Н. и Тарасов В. И. Подстанции промышленных предприятий. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебника для энергетических техников. 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 вузов. 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 разделом 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 вузов. 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 несинусоидальном виде кривой тока. Диссертация. Л. Издание Ленинградского индустриального института, 1937, 88 стр., беспл.

Целью работы является рассмотрение добавочных потерь, возникающих в синхронной машине, имеющей испаженную 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. Л. Издание 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 тиатронным и ионным контроллерам и, кроме того, даны общие сведения, достаточные для понимания схем по тиатронам, как с горячим, так и с жидким катодом. Пособие для цеховых работников и студентов вузов и техникумов.

РЕФЕРАТЫ

R. BELBIN. ОРГАНЫ ДЫХАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

EI. R. August 13, 1937

Для обезвоживания воздуха, проникающего в консерваторы масляных трансформаторов и реакторов, применяются особые приборы — поглотители, содержащие CaCl_2 (ж. 1) или силикагель (рис. 2). Менее известные силикагельевые приборы отличаются рядом значительных достоинств.

Гранулярный силикагель, 1 cm^3 которого имеет внутреннюю поверхность более 1 m^2 , способен из насыщенного воздуха поглотить влагу в количестве 40—50% собственного веса. Перед заменой патрона поглотителя

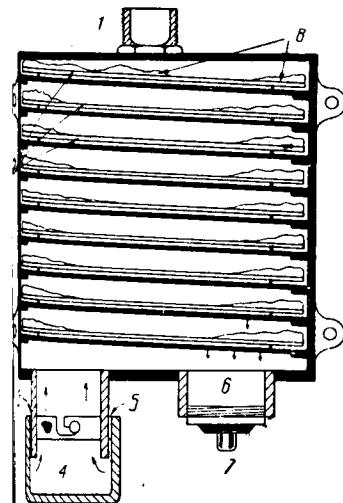


Рис. 1. Поглотитель типа Ferranti с масляным затвором.

—присоединение к баку консерватора; 1—перфорированные листы; 2—заряд геля; 3—дыхательная спираль; 4—масляный затвор; 5—урон масла; 6—сбор воды; 7—пружинная винта для выпуска воды; 8—хлористый кальций

силикагель пропитывается хлористым кобальтом, темно-бурый цвет которого указывает на активное состояние силикагеля. При насыщении же заряда влагой же длительного периода его работы цвет окрашивающего хлористого кобальта постепенно переходит в бледно-красный. В этом случае сменный патрон поглотителя следует отдельить от прибора и целиком поместить в нагревательную печь температурой 150—200°, где он высыпается до полного восстановления первоначального заряда. При этом силикагель в отличие от CaCl_2 генерируется полностью, без потерь.

Силикагелевые поглотители изготавливаются на различную производительность с ежесуточным расходом воздуха от 3 до $0,45 \text{ m}^3$ в течение одного года. Вследствие длительного срока бессменной службы заряда силикагелевые приборы особенно удобны для установок в удаленных местностях.

Таким образом силикагелевый поглотитель имеет преимущества в отношении габаритов и внешнего вида, облегчает надзор за длительности активного состояния быстроты смены заряда.

Н. А. Карапулов

H. 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-

пряженения 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.

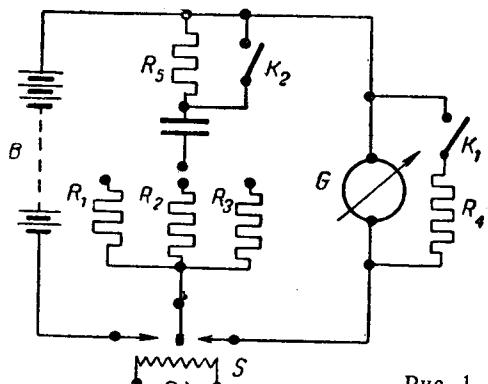


Рис. 1

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 короткого замыкания 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 H. Bumann и J. Pfaffenberger 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 μF , причем коррекция показаний производится при помощи эталонного конденсатора, который при помощи переключателя в любой момент может быть введен в схему вместо испытуемого конденсатора.

А. Д. Нестеренко

АВТОМАТИЧЕСКИЙ МОСТ ШЕРИНГА. Из книги R. Vieweg „Elektrotechnische Isoliersstoffe“, 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).

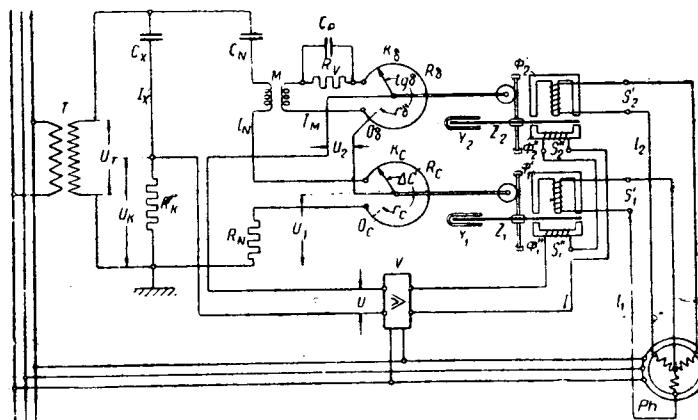


Рис. 1

Рис. 1 изображает схему автоматического моста Щеринга. Схема питается повышающим трансформатором T . Через C_x обозначен испытуемый объект; C_N — эталонный конденсатор; R_s 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_k так, чтобы подвижной контакт на R_c стал в среднее положение. Подвижной контакт на R_s устанавливается автоматически, мост вполне уравновешивается. В дальнейшем все изменения величин углов потерь и емкости испытуемого объекта учитываются вполне автоматически, так как при возникновении неуравновешенности мостовой схемы индукционные измерительные механизмы поворачиваются до тех пор, пока подвижные контакты реохордов не перейдут в новые положения, соответствующие уравновешиванию моста при изменившихся значениях углов потерь и емкости испытуемого объекта. Время автоматического уравновешивания моста при изменениях углов потерь и емкости составляет всего лишь 1—2 sec.

Б. М. Тареев

R. WEBER. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЛИТКА С ЭЛЕМЕНТАМИ
ISTRÄ. 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 лучиспусканием. 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 mm и толщиной стенки

0,8 mm. В середине трубы проходит спираль *b* из сплава высокого сопротивления, вывод которой с проходит через концевое уплотнение *e*. Трубка заполняется теплостойким материалом с хорошими электроизоляционными свойствами и высокой теплопроводностью¹. Для хорошего заполнения трубы применяется особый процесс с вибрационным уплотнением и с последующим обжимом². Сопротивление допускает высокую нагрузку током и благодаря защите проволочной спирали от коррозии и механических повреждений весьма долговечно.

Каждая плитка имеет два элемента сопротивления отсеканной 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.

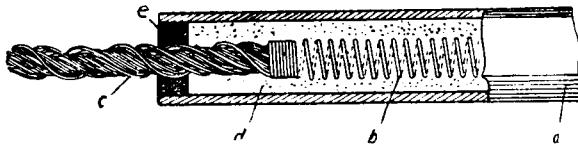


Рис. 1

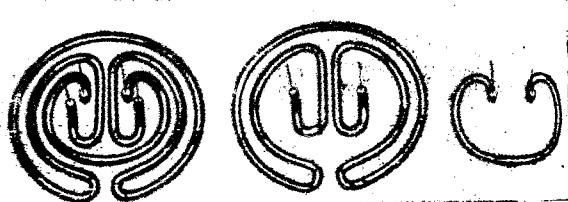


Рис. 2

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 сражатель, покрытый белой стекловидной эмалью. Схематически сечение элементов и путь потоков тепла, отраж

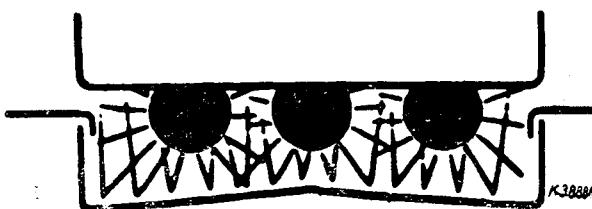


Рис. 3

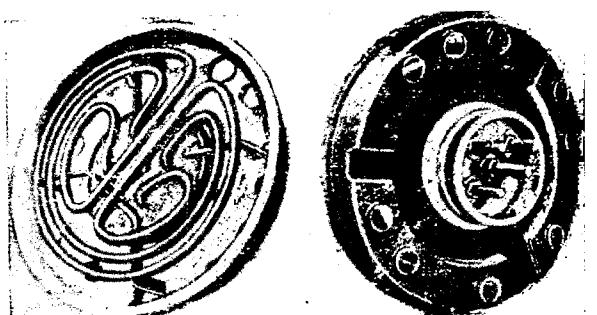


Рис. 4

¹ Чаще всего в трубчатых нагревательных элементах в качестве электроизоляционного материала с высокой теплопроводностью применяется жженая магнезия MgO . Большой интерес представляет также возможность применения керамического песка. Прим. ред.

еия кварцевого песка. Прир. *См. АЕС-М* № 8 1935. С. 284.

ых от эмалированной поверхности и попадающих на дно буда, показаны на рис. 3.

Рис. 4 изображает общий вид собранной плитки: в левой части рисунка — вид сверху, в правой части рисунка — снизу (в середине хорошо заметно контактное присоединение для присоединения к сети).

Нормальные выполнения плитки: с диаметром 180 mm при максимальной мощности 1500 W и с диаметром 220 mm при мощности³ 2000 W.

Б. М. Тареев

G. W. NEDERBRAGT. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБИВНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЗАЛИВОЧНЫХ МАСС. Archiv für technisches Messen, т. 157, Dezember, 1987

Техника определения пробивной напряженности заливочных масс очень затруднительна.

Для пробоя желательно использовать небольшое количество массы, но в этом случае трудно с элементарными электродами избежать перекрытия. Помимо этого, плоскости электродов во избежание опасности образования пузырей должны быть вертикальны и должны разогреваться по этой же причине до заливки, что требует применения для конструкции теплостойкой 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. Диски 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 крышки 7, опирающуюся на стенки фарфорового тигля. С помощью этих электродов возможно пробивать массы напряжением до 50 kV.

Реферируемая заметка должна заинтересовать в первую очередь кабельные заводы.

В. А. Баев

G. P. de LANGE. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ. El. R. № 3115, август 1987

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; в — трансформатор накала ламп; г — мотор вентилятора; е — магнитный выключатель (автомат); ф — реле времени; ж — лампы для двухполупериодного

Характерно, что эти значения мощности значительно выше явно недостаточной мощности наиболее часто выпускаемых нашими заводами электрических плиток. При этом

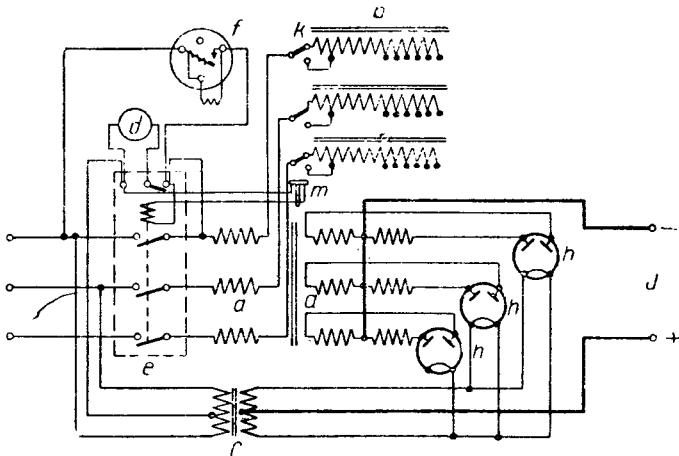


Рис. 1. Схема включения шестифазного выпрямителя

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.

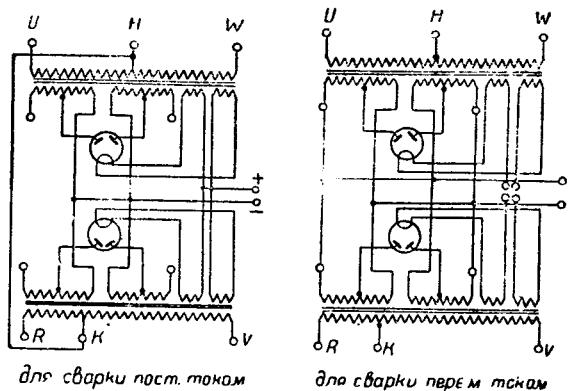


Рис. 2

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, нейтралью 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, 1988, 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 сдвоенных колб, причем каждая из них работает от своего собственного трансформатора. Помимо отдельной работы колб, все они могут работать параллельно.

лько, 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 отпаек 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 $\frac{5}{4}$ нагрузки — 94%, при $\frac{4}{4}$ — 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 быстродействующий выключатель с автоматическим повторным включением, снабженный перегрузочным и нулевым реле. Выпрямители снабжены также выключателями обратного действия.

М. Д. Трейвас

M. 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 электромобилем 5000 kWh общее потребление электроэнергии электромобилями в 1937 г. выражалось в 19 млн. kWh. Противостоянием к распространению электромобиля является недостаточность пробега из-за ограниченной емкости акумуляторной батареи (перезарядка батареи требует много времени), но в городах Англии устраиваются специальные пункты, где разряженные батареи заменяются вновь заряженными.

И. И. Тихонов

ВКЛЮЧЕНИЕ И ВЫКЛЮЧЕНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ УЛИЦ ПО СРЕДСТВОМ ФОТОРЕЛЕ. ETZ № 50 от 16 декабря 1937 г.

При недавно произведенном в г. Буферам (США) общем обновлении освещения улиц прежде применяющийся способ включения осветительной сети при помощи ремней приводившихся в движение астрономическими часами был заменен другим, при котором включение и выключение освещения осуществляются при помощи фотопар. Из общего количества 250 пунктов фотопар до 1 июля 1937 г. было оборудовано 179 пунктов. В остальных пунктах включение и выключение производится от ручки по сигналам, даваемым фотопаром.

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 облачные и туманные дни включение производится раньше, 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 молниеприемника» в № 24 «Электричество» за 1937 г. по недосмотру автора

Напечатано:

Стр. 13, левая колонка, 10-я строка сверху: «Нам кажется, что в пределах высоты молниеприемника от малых значений до 30—40 м отношение $\frac{H}{h}$ не меняется и равно около 10. Для более высоких молниеприемников целесообразно эту цифру уменьшить, исходя из $H = 300 = \text{const}$.»

Следует читать:

«Нам кажется, что для одиночных стержневых молниеприемников высотою от малых значений до 30—40 м отношение $\frac{H}{h}$ не меняется и равно около 20. Для более высоких молниеприемников 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».

Следует читать:

«...для нужд слаботочной электропромышленности».

Стр. 5, левая колонка, 32-я строка сверху: «500×300 мм». «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
Горев А. А.— Электропередача Куйбышев—Москва	7
Лебедев С. А.— Замкнутая схема электропередачи Куйбышев—Москва	14
Баумгольц А. И.— Намечаемая схема линий электропередач Куйбышевской межрайонной гидростанции	18
Дискуссия по электропередаче Куйбышев—Москва	19
Лебедев С. А.— Анализ искусственной устойчивости генераторов	31
Сазанов П. И.— Экспериментальное исследование статической и искусственной устойчивости в электросистемах	37
Герценберг Г. Р.— Электронно-ионный регулятор напряжения для машин переменного тока	43
Лигоцкий Л. П.— Автоматизация управления уличным освещением	48
Талалай Б. А.— Прибор для дистанционного наблюдения за коммутацией	50
Соколов С. В.— Автоматическое защитное выключение в электрических ручных инструментах	53
Мирер Я. И.— Защита электровозов от атмосферных перенапряжений	56
Кудрин С. М.— Устойчивость опоры контактной линии электрических железных дорог .	58
Байдак Н. Ф.— Аналитическое выражение намагничивающего тока с учетом гистерезисной петли	64
Сыромятников И. А.— Определение потерь синхронного генератора методом выбега .	67
Эрлихман Б. Л.— Электрификация и электростроительство фашистской Германии	69
Радовский М. И.— 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

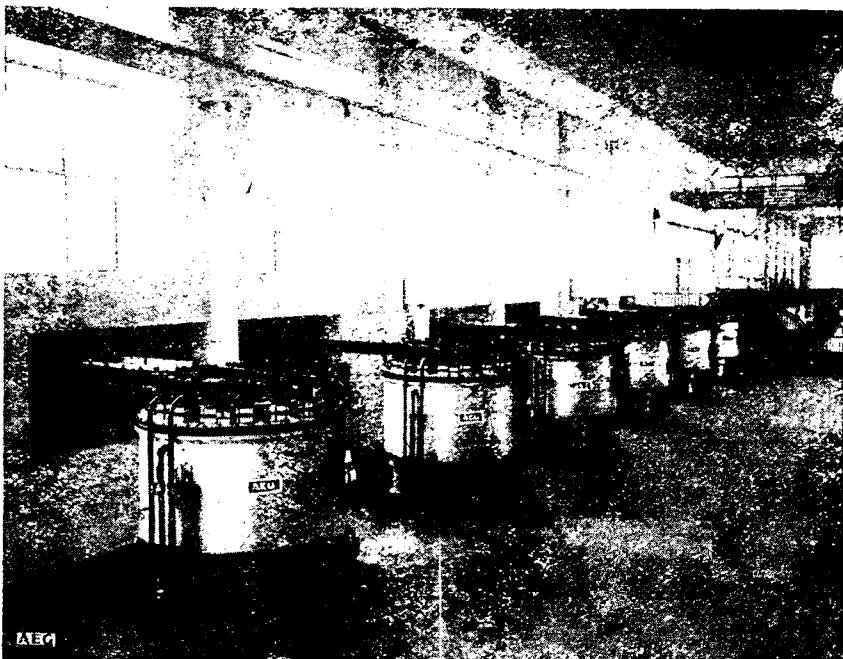
Технический редактор А. П. Александрова
Зав. редакцией М. Г. Башкова

Отв. редактор Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ

АЕГ

Ртутные выпрямители

для
электролиза
электрической тяги
освещения
силовых подстанций



Выпрямительная установка 80 000 А
состоящая из 16 выпрямителей по 5 000 А 800 в для электролиза

Allgemeine Elektricitäts - Gesellschaft

Büro Rußland — Berlin NW 40

6740



ШКОДА

Проволочные канаты для всех
надобностей
Электрические кабели для всех
напряжений
Динамо-проводки
производит высокого
качества
и поставляет

КАБЛО

АДРЕС: STAROMESTSKÉ NAMESTÍ 16. ТЕЛЕФОН: 244-17, 260-69. ТЕЛЕГР. АДРЕС: LANAKABEL

В ПРАГЕ 1.

НОВОСТЬ:
исключительное
производство патент-
проводочно-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 ± 0.00001 , термическая сила (по сравнению с медью) + 1 микровольт на 1° Ц.

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.

Новоизобретенный сплав Изабеллин жароупорен до 600° и широко употребляется для сильно нагруженных технических сопротивлений и пусковых реостатов.

Изабеллин

свободный от никеля сплав для технических сопротивлений, удельное сопротивление 0,50 ома, температурный коэффициент — 0.00002, удельный вес 7,9—8.

ISABELLEN-HÜTTE / HEUSLER K. G. / DILLENBURG (ГЕРМАНИЯ)

6741

JOHNSON & PHILLIPS, LTD.

ELECTRICAL ENGINEERS & CABLE MAKERS
CHARLTON LONDON

Джонсон и Филлипс, Лимитед
Лондон, Англия
ООО

Заводы Джонсон и Филлипс предоставляют Вам
использоваться 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

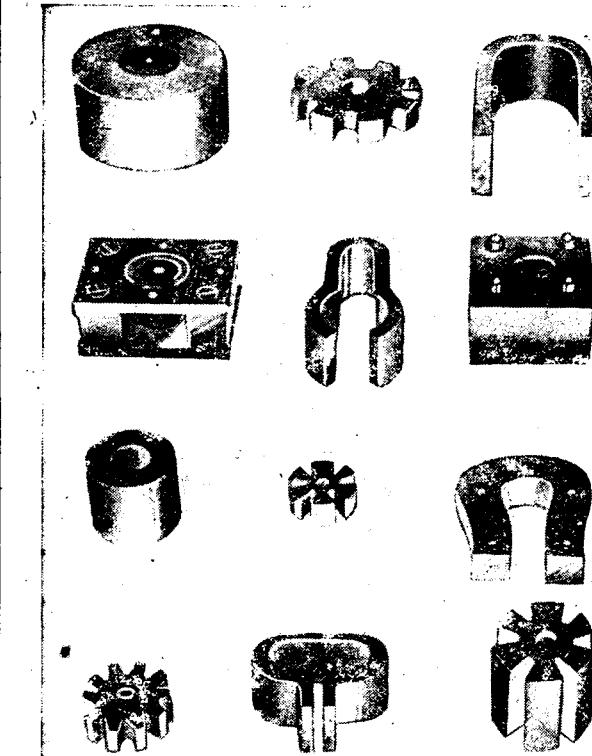
ИНСТРУМЕНТЫ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ

ПОСЫЛАЙТЕ НАМ ВАШИ ЗАПРОСЫ.

233

ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ из никель-алюминия и кобальтовой стали



DARWINS LIMITED SHEFFIELD

(АНГЛИЯ)

269

Dr. Alb. Lessing

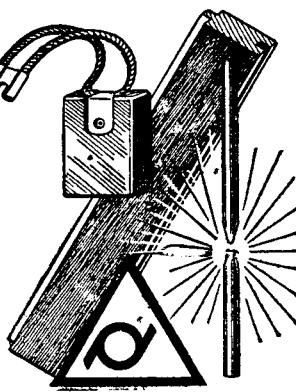
Nürnberg O, Schloßstraße 24

Германия

Основ. в 1872 г.

Щетки

для всевозможных электрических машин из графита, а также из чистого и облагороженного 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 колыца из угля,

все сорта

осветительных углей

6745

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ПРЕССЫ

для пластических масс модель НРК

с патентов. индивидуальным гидравлическим приводом

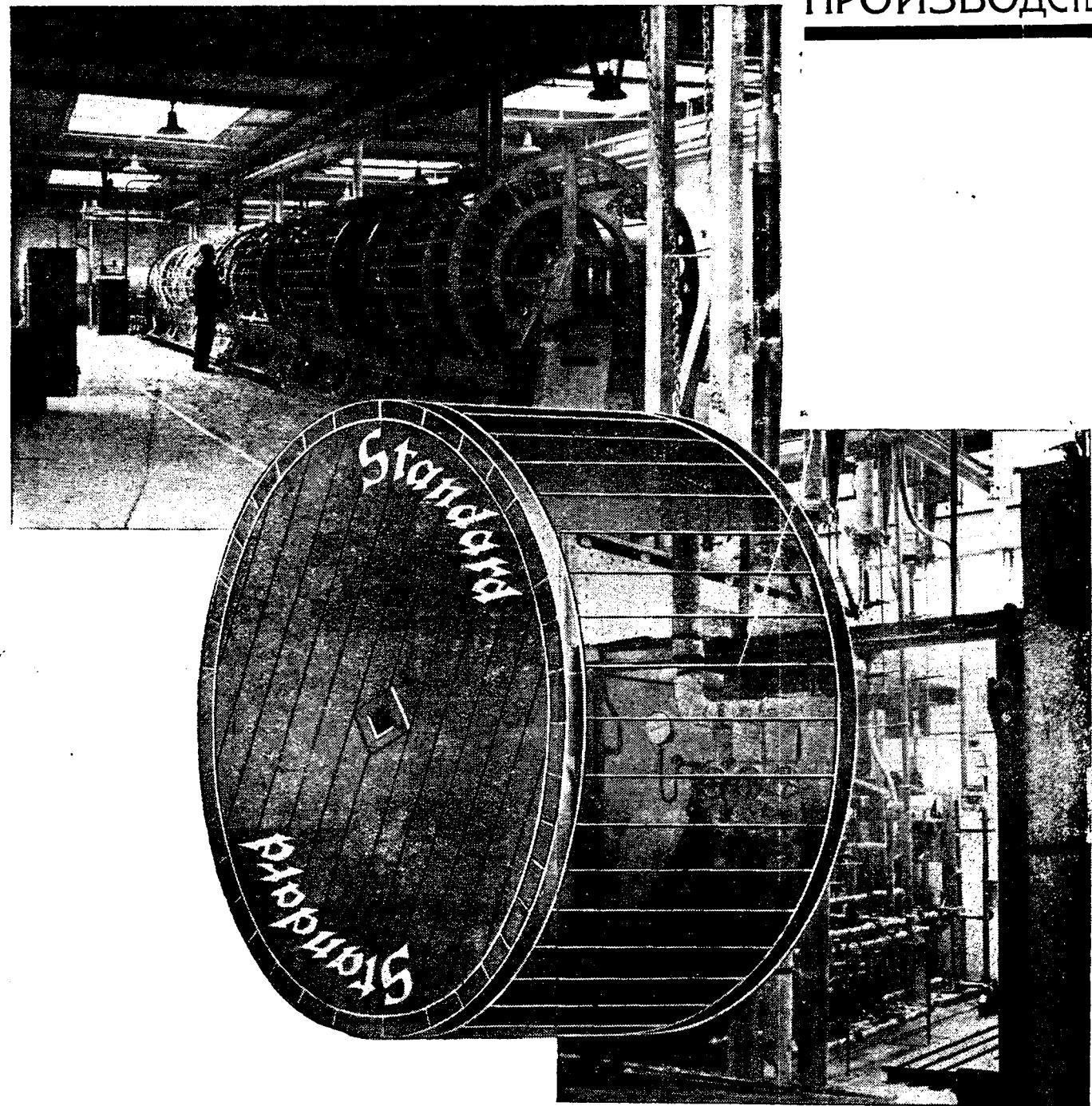


Быстродействующие прессы НРК применяются в настоящее время во всех промышленных странах, причем во многих предприятиях установлены целые серии таких прессов. Их успех обусловлен не только их исключительной производительностью и надежностью в эксплуатации, вызванные их конструктивными особенностями но 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
ГАННКОЛЬБ · ШТУТГАРТ

РАЗВИТИЕ
ПРОИЗВОДСТВ



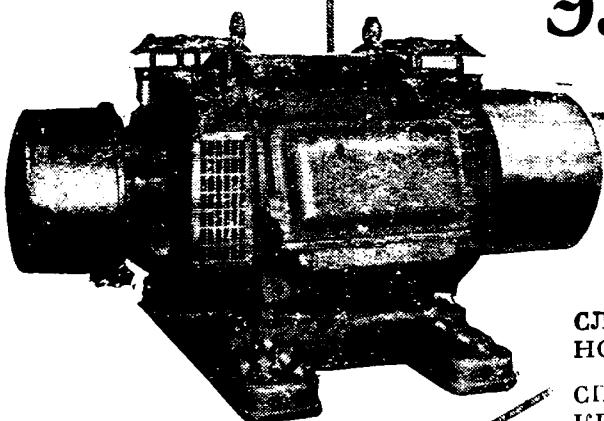
За каждым барабаном с силовым кабелем „STANDARD“

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 исследованием 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 можете быть особенно уверены в их качестве, передавая заказы на них фирмам

Standard Telephones and Cables Limited

NORTH WOOLWICH, LONDON, E. 16. АНГЛИЯ
ОТДЕЛЕНИЯ И ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА ВО ВСЕМ МИРЕ

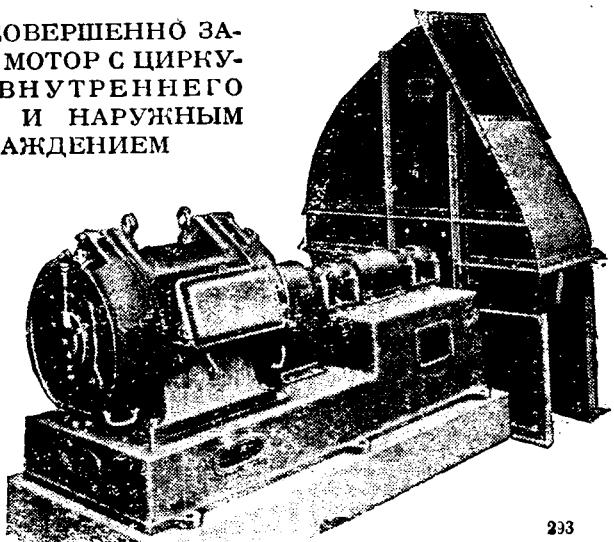


ЭЛЕКТРОМОТОРЫ ВСЕХ ТИПОВ



СЛЕВА МОТОР ЗАЩИЩЕННОГО ТИПА НА САЛАЗКАХ

СПРАВА СОВЕРШЕННО ЗАКРЫТЫЙ МОТОР С ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВНУТРЕННЕГО ВОЗДУХА И НАРУЖНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ



МЕТРОПОЛИТЭН
Виккерс

АКЦИОНОРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

293

22 предела измерений

постоянного и переменного тока охватывает новый мавометр WG:

миллиампер	вольт
8	0.6
6	3
12	6
80	12
60	80
120	60
800	120
600	800
ампер	
1.2	600
8	1200
6	
12	

Обратите внимание на предыдущее и последующие обьявления

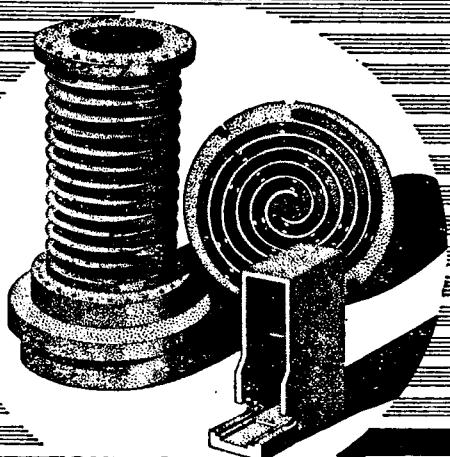


6735

GOSSEN
FABRIK ELEKTRISCHER
MESSGERÄTE
ERLANGEN/BAYERN

КЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ

ДЛЯ ВСЕЙ ЭЛЕКРОТЕХНИКИ



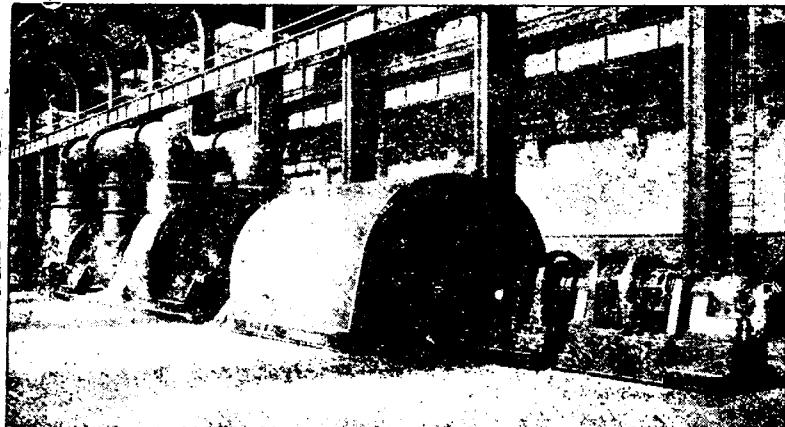
поставляет из

и рекомендует в

себя материалы



STEATTITE-MAGNESIA
AKTIENGESELLSCHAFT
BERLIN-PANKOW, FLORA STR. 8 Германия



**ТУРБОДИНАМС
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

CHARLEROI (БЕЛЬГИЯ)

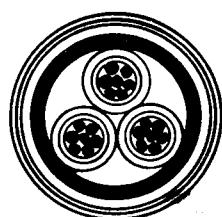
A.C.E.C.

775

DRAKA

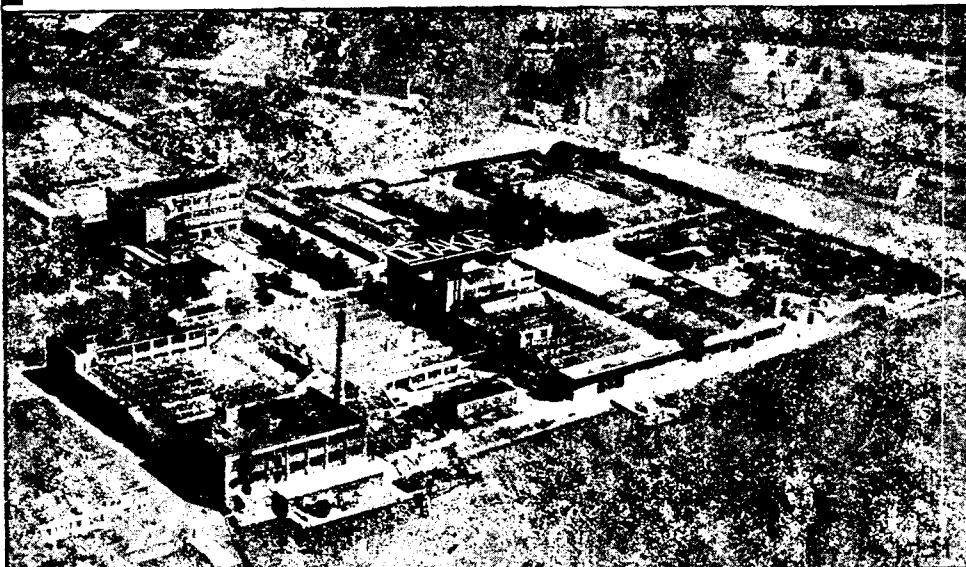
**N.V. HOLLANDSCHE
DRAAD- EN KABEL FABRIEK
AMSTERDAM — HOLLAND.**

адрес для телеграмм: DRAKA · AMSTERDAM · ГОЛЛАНДИЯ

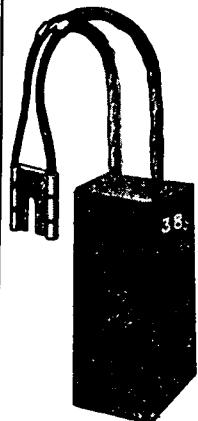


специальность:

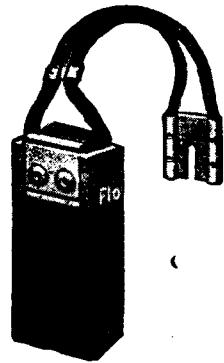
**Все сорта проволоки и
кабелей для электричества
с резиновой изоляцией.**



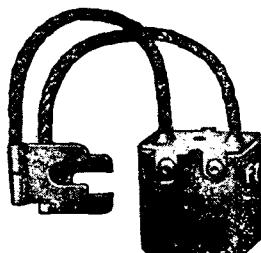
SCHUNK & EBE GIESSEN (Германия)



Фабрика угольных щеток и щеткодержателей



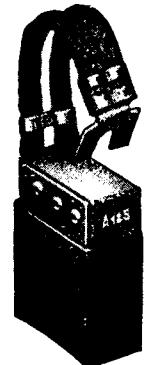
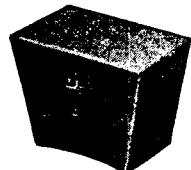
Мы являемся между прочим постоянным поставщиком всех сортов и качеств изображенных в настоящем об'явлении угольных щеток для советских промышленных предприятий



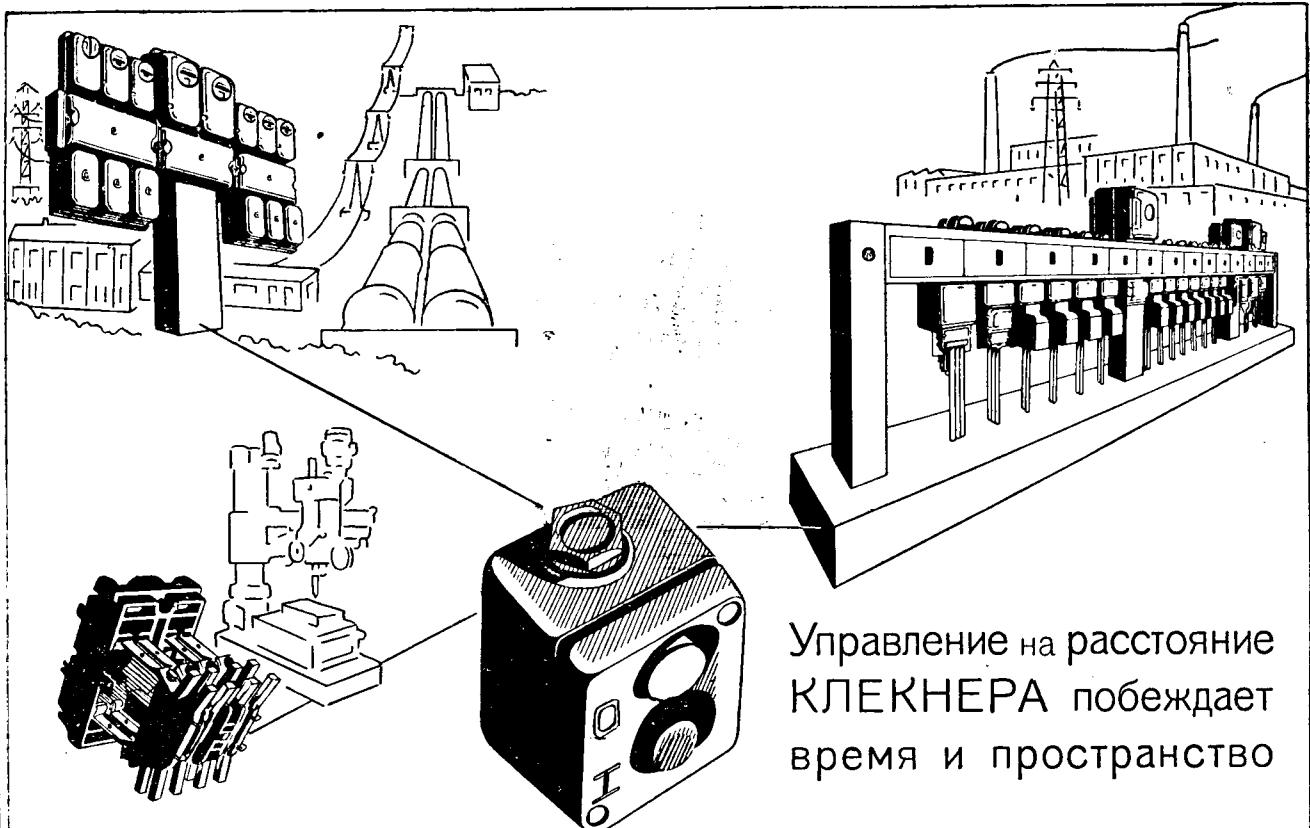
Наша фабричная марка



гарантия высокого качества



6737



Управление на расстояние
КЛЕКНЕРА побеждает
время и пространство

F. KLÖCKNER, KÖLN-BAYENTHAL (ГЕРМАНИЯ)

ТОВАРНА НА ЖАБЛЕ, Акц. О-ВО БРАТИСЛАВА (Чехословакия)

Знаете-ли Вы уже жащ шнур „Флексо“?

Он является идеальным соединительным шнуром, снабжен неразбивающимся штепслем из мягкой резины и отличается безопасностью в отношении короткого замыкания, надежностью специального монтажа, а также прочностью, водонепроницаемостью и гигиеничностью.

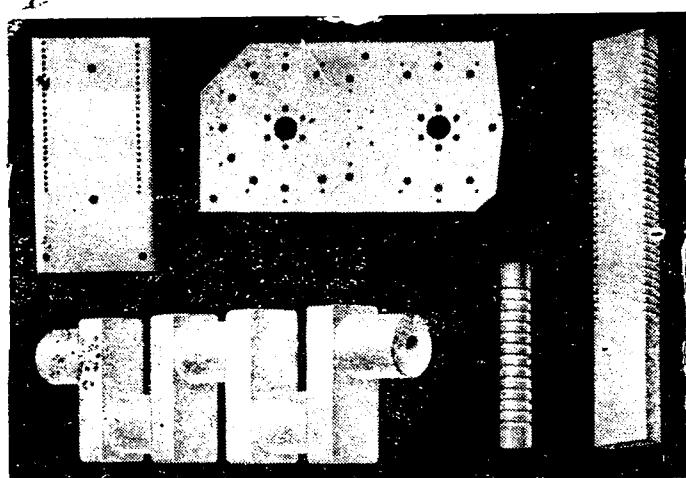
6748

Имеется лишь один

изоляционный материал для токов высокой частоты, поддающийся механической обработке, — это



MYCALEX



MYCALEX

MYCALEX (Parent) Co. Ltd.
100, VICTORIA STREET, LONDON, S.W.1, АНГЛИЯ

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.
Phillips Radio Holland	Western Electric Co., Ltd.