

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

4

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Честь и слава советским энергетикам!	1
К 50-ЛЕТИЮ ИЗОБРЕТЕНИЯ РАДИО А. С. ПОПОВЫМ	
<i>В. Ф. Миткевич и М. И. Радовский</i> — А. С. Попов и русские общественные круги	2
<i>В Юбилейном комитете</i>	5
<i>О некоторых ранних научных работах А. С. Попова</i>	6
<hr/>	
<i>О развитии сельской электрификации</i>	8
<i>А. Г. Захарин</i> — Электроснабжение сельскохозяйственных районов в условиях широкой электрификации сельского хозяйства	9
<i>П. Н. Листов</i> — Электрификация полеводства	15
<i>А. Д. Степанов</i> — О значении дизель-электрической тяги в промышленном транспорте	20
<i>В. И. Полонский</i> — Закон электромеханического подобия и универсальные диаграммы переходных процессов электродвигателей постоянного тока	23
<i>В. А. Веников</i> — Критерии подобия электромеханических явлений и их применение к моделированию электросистем	30
<i>Л. И. Гутенмахер, Н. В. Корольков, В. А. Тафт</i> — Электрические схемы для решения системы уравнений	33
<i>Г. Н. Петров</i> — Влияние насыщения на угловые характеристики синхронной машины	36
<hr/>	
<i>Л. В. Цукерник</i> — Автоматическое регулирование напряжения компаундированных синхронных генераторов	41
<i>Р. П. Жежерин</i> — Схема замещения явнополюсной синхронной машины	42
<i>Л. М. Шницер</i> — Номограмма нагрузочной способности силового трансформатора	44
<i>А. М. Бамдас</i> — Трансформаторно-выпрямительные агрегаты для электрической очистки газов	45
<i>И. Е. Балыгин</i> — К вопросу о грозопоражаемости нефтяных озер	46
<i>И. С. Стекольников, В. С. Комельков</i> — О заметке И. Е. Балыгина	48
<i>В. Ю. Ломоносов</i> — Магнитное поле кольцевых токов	48
Хроника	49
Письмо в редакцию:	
<i>Б. Л. Айзенберг</i> — Об актуальных вопросах проектирования и эксплуатации городских электрических сетей	52
Библиография	53
Рефераты	54



Ответственный редактор академик Б. Е. ВЕДЕНЕВ

Зам. ответственного редактора инж. Я. А. КЛИМОВИЦКИ

Адрес редакции: Москва, проезд Владимирова, 4, тел. К 1-10
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 2

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

ЖУРНАЛ
ОСНОВАН
в 1880 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

4
1945
АПРЕЛЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР
И НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

Честь и слава советским энергетикам!

Указом Президиума Верховного Совета СССР награждены орденами и медалями около 3 000 работников электрических станций, электросетей, строителей и заводов Наркомата электростанций СССР за успешное выполнение заданий правительства по электроснабжению оборонной промышленности в трудных условиях военного времени. Среди награжденных — передовые деятели советского электроэнергетического хозяйства, рабочие, инженеры и научные работники. Высоких наград удостоены лучшие электростанции СССР. В передовой статье «Трудовая доблесть советских энергетиков», помещенной в газете «Правда» 2 апреля с. г., говорится:

«Страна отмечает наградами передовой отряд энергетиков в момент, когда Красная Армия ведет упорные бои за полный и окончательный разгром гитлеровской Германии. В маршах грядущей победы ярко сверкают и замечательные успехи советских энергетиков. Война явилась серьезным испытанием для нашего энергетического хозяйства — и оно выдержало его с честью».

«Великий Ленин положил электрификацию в основу развития единого, планового, социалистического хозяйства. Ленинский план электрификации страны — знаменитый план ГОЭЛРО — был успешно выполнен советским народом под руководством великого Сталина. Энергетики своим доблестным трудом сыграли выдающуюся роль в создании могучей социалистической державы. Индустриализация страны в годы сталинских пятилеток, создание мощной энергетической базы в восточных районах позволили уже в первые месяцы войны широко развернуть на востоке военную промышленность, разбросать эвакуированные предприятия и быстро пустить их в ход».

«Поздравляя строителей Челябинской электростанции, товарищ Сталин в прошлом году писал: «Выражаю твердую уверенность, что Вы и впредь своим героическим трудом и напряжением всех сил обеспечите дальнейшее наращивание энергетических мощностей, которые дадут возможность непрерывно увеличивать производственные силы страны для скорейшего и окончательного разгрома немецко-фашистских захватчиков». Бесперебойно питать электроэнергией шахты, металлургические, авиационные, танковые, пушечные и другие военные заводы, неуклонно наращивать энергетические мощности — эта задача вдохновляла советских энергетиков в их славных трудовых подвигах на всем протяжении войны».

«В годы войны техническая мысль советских энергетиков шагнула далеко вперед, родила и претворила в жизнь новые смелые идеи».

«За годы войны мощность электростанций Урала и других восточных областей почти удвоилась. Одна только Красногорская тэц увеличила за это время мощность турбин в 5 $\frac{1}{2}$ раз и котлов в 6 раз. Создана новая Челябинская

тэц, на которой установлена крупнейшая турбина в 100 тысяч киловатт. В Узбекистане, на реке Чирчик, закончены две и вновь построены четыре гидроэлектростанции. Там же строится мощная Фархадская гидроэлектростанция. Так наращивает мощь своей энергетики советский народ, еще раз показавший, что для него нет непреодолимых препятствий».

«В результате героических усилий советского народа тяжелые раны, нанесенные нашему энергетическому хозяйству в первый период войны, начинают быстро заживаться. Опыт, накопленный энергетиками, успешно используется при восстановлении электростанций в освобожденных районах. К концу 1944 года в этих районах было введено в эксплуатацию 35 районных электростанций: 80 турбин и 156 котлов. Мощность электростанций в освобожденных районах увеличилась в прошлом году по сравнению с 1943 годом почти в 2 с половиной раза. Давно работает на полную мощность Волховская гидроэлектростанция имени Ленина, которая передавала энергию героическому Ленинграду по проводам, проложенным по дну Ладожского озера. Советский народ восстанавливает одно из своих прекраснейших творений, свою гордость — Днепровскую гидроэлектростанцию имени Ленина».

За годы войны улучшилось качество работы наших электростанций. Расход топлива на выработанный киловаттчас энергии сократился с 580 граммов в 1941 году до 571 грамма в 1944 году. В результате лучшего ухода за оборудованием, введения системы обязательных капитальных ремонтов мощность действующих электростанций значительно возросла».

«Многое сделано за эти годы, но довоенная мощность наших электростанций еще не достигнута. Подлый враг с особым остервенением обручился на электростанции, разрушая их особенно жестоко. Он надеялся таким путем подорвать нашу военную мощь. Советские энергетики не дали осуществиться замыслам врага. Сегодня в своей предсмертной агонии враг испытывает на своей шкуре сокрушительную мощь нашей боевой техники, созданной усилиями всего народа и его славного отряда — энергетиков. Получая высокую награду, они еще с большим энтузиазмом возьмутся за дело и в короткий срок восстановят энергетические мощности до довоенного уровня, еще более быстрыми темпами пойдут дальше вперед».

«Идут решающие битвы Красной Армии и армий наших союзников на территории врага. Близок день, когда разбойничья гитлеровская Германия будет окончательно повергнута в прах. В эти великие дни весь советский народ охвачен единым могучим стремлением — еще крепче подпереть свою доблестную Красную Армию для нанесения последних всесокрушающих ударов по врагу. Советские энергетики до конца исполнят свой священный долг в этой титанической победоносной борьбе».

А. С. Попов и русские общественные круги

Академик В. Ф. МИТКЕВИЧ и М. И. РАДОВСКИЙ

Более глубокое изучение жизни и деятельности А. С. Попова, развернувшееся в связи с 50-летием изобретения радио, значительно расширяет наши знания о различных сторонах творческой биографии знаменитого русского ученого, которые до сих пор почти или вовсе не освещались. Точнее и подробнее встают перед нами и черты того окружения, в котором пришлось действовать Попову. Отношение к нему общественной среды может быть более полно и правильно оценено только теперь.

Из 47 лет жизни Попова около 25 лет протекли в непосредственной связи его с научной и технической общественностью. Еще студентом он примкнул к передовой группе ученых и инженеров, входивших в состав Русского технического общества, электротехнический (VI) отдел которого был создан в 1880 г., за два года до окончания Поповым Петербургского университета. Общеизвестна большая роль Русского технического общества в формировании кадров технической интеллигенции и развитии научно-технической мысли в России.

Будучи еще юношей, в 1880 г. Попов принимал активное участие в организации Электротехнической выставки (первой в России и в мире) и с тех пор не прерывал связи с электротехническими кругами.

По сформированию математик (он окончил физико-математический факультет по математическому разряду), Попов посвящал свои силы физике и вел как педагогическую работу, так и исследовательские занятия именно в этой области. Понятно поэтому, что главный труд его жизни был доложен (7 мая 1895 г.) прежде всего Русскому физико-химическому обществу. Именно перед этой корпорацией впервые в мире была продемонстрирована возможность использования волн Герца для практических целей. Члены этого общества отдавали себе отчет в том, какие горизонты открывают перед научно-технической практикой достижения их соотечественника, и в знак признания его заслуг избрали его в дальнейшем председателем Русского физико-химического общества.

Документы, хранящиеся в Военно-морском архиве, достаточно ясно свидетельствуют об отношении военно-морских кругов к А. С. Попову. Картина получается иная, по сравнению с той, которая обычно изображалась до сих пор. Современники Попова в своих воспоминаниях давно уже отмечали, каким вниманием и весом пользовался он в общественных кругах.

Теперь же можно судить об отношении к Попову по подлинным документам, исходящим от виднейших деятелей русского флота. Докладные записки, рапорты и резолюции высших начальников, вплоть до управляющего министерством, повествуют о том, что, как ни ново было дело Попова и как ни трудно воспринималось оно даже специалистами, к его опытам с самого начала был проявлен живой интерес.

До изобретения радио Попов редко выступал публично и в печати, причисляя себя к рядовым членам Русского физико-химического общества и Русского технического общества. Доклад, опубликованный затем под названием «Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний», тотчас же нашел отклик в прессе. Он был напечатан в ряде журналов; в прессе появились отзывы о важном и принципиально новом шаге, сделанном русским физиком в актуальной тогда области электромагнитных колебаний. Внимание к Попову значительно повысилось после его второго доклада в Русском физико-химическом обществе 12(24) марта 1896 г., когда впервые публично демонстрировались радиопередача и радиоприем.

В широком масштабе Попов ощутил внимание к себе научной и технической общественности в 1897 г., когда выступил Маркони. Напомним, что патент последнего был датирован 2 июня 1896 г., достоянием же научного мира схема его стала лишь в 1897 г., когда Маркони решил опубликовать ее в общей и специальной печати. Сообщение это вызвало должный отклик в России.

Сам Попов выступил в печати — русской и иностранной и, сравнивая свою схему с схемой Маркони, отметил, что со-

следняя является воспроизведением его собственной. В октябре 1897 г., на собрании неперенных членов электротехнического отдела Русского технического общества А. А. Троцкий внес предложение, «чтобы VI отдел возбудил петицию министерством финансов ходатайство о невыезде г. Маркони привилегии, в случае, если бы таковая испрашивалась г. Маркони».

Еще раньше на защиту интересов Попова выступила редакция журнала «Электричество». В № 13—14 (июль) 1897 г. был перепечатан из журнала «Industrie Electrique» доклад В. Приса в Королевском институте в Лондоне 4 июня 1897 г. «Передача сигналов на расстоянии без проводников». В этом докладе Маркони выступался изобретателем телеграфа без проводников и редакция «Электричества» сочла себя вынужденной снабдить это сообщение специальным примечением:

«Позволим себе напомнить нашим читателям, что № 13—14 «Электричества» за прошлый 1896 г. был описан прибор А. Попова для обнаружения и регистрирования электрических колебаний в атмосфере, как он был назван изобретателем. Реле Маркони представляет почти точную копию этого прибора г. Попова, а поэтому мы не можем согласиться, что «г. Маркони изобрел новое реле» и т. д. (Л. 1, 2).

В февральской книжке (1898 г.) «Почтово-телеграфный журнал» (Л. 3), в статье М. Шедлинга «Прогресс электричества в 1897 г.» автор не проходит мимо возникшего вопроса о приоритете:

«Следует упомянуть, что еще до появления в печати сведений о телеграфе Маркони, опыты телеграфирования без проволоки производились уже в России преподавателем Минного офицерского класса А. С. Поповым и были предметом сообщений в Петербургских ученых обществах в апреле 1895 и также 1896 г. в заседании физического отделения Русского физико-химического общества и в соединенном собрании метеорологической комиссии Географического общества и членов Главной физической обсерватории. Опыты приборов г. Попова были описаны в журнале Русского физико-химического общества за январь 1896 г., в «Метеорологическом вестнике» за февраль 1896 г., в «Почтово-телеграфном журнале» и в журнале «Электричество».

В марте 1897 г. А. С. Поповым была прочитана публичная лекция в Кронштадтском морском собрании «О возможности телеграфирования без проводников», причем были продемонстрированы специально собранные для этого приборы и произведены опыты, подтвердившие справедливость предположений изобретателя. Наконец, результаты всех своих исследований и испытаний А. С. Попов подробно изложил в сообщении, сделанном им 19 октября 1897 г. в Электротехническом институте. Это сообщение помещено в № 48 «Электротехнического вестника» за 1897 г. и ясно показывает, что все то, что было сделано Маркони, основано в главных чертах на тех же принципах, на которых были выполнены проекты и приборы А. С. Попова, а потому не представляется никаких оснований считать Маркони первым изобретателем беспроволочного телеграфа.

В заграничной прессе, одно за другим, появились сообщения, рекламировавшие опыты Маркони и грандиозные возможности, которые они предвещают. Открытие нового средства связи приписывалось исключительно ему. Неудивительно поэтому, что в русской печати появились упреки Попову по поводу его излишней и даже неуместной скромности, вследствие чего оказалось забытым, что важнейшее достижение было сделано именно русским ученым, на русской почве. Попов считал тогда своей обязанностью выступить перед широкой публикой и специально разъяснить на столбцах столичной газеты, как было дело в действительности (Л. 4). Это было второе выступление Попова в газете; как и в первый раз (Л. 5), оно было вызвано необходимостью лично восстановить истину касательно его научной деятельности.

В 1898 г. присуждалась премия Русского технического общества (точное ее название было «Премия имени государя наследника-цесаревича при Императорском Русском техническом обществе»). Согласно уставу («Правилам») она выла-

раз в три года «за лучшую работу или изобретение, ныне русским техником и о которых сделан доклад в Императорском Русском техническом обществе, или же, наконец, за наиболее замечательную оригинальную статью, помещенную в Записках Императорского Русского технического общества, журналах «Электричество» и «Железнодорожное дело» или других, издающихся Обществом и его Отделами в органах, в обоих случаях, считая за трехлетний период, предшествующий выдаче премии».

VI отдел Русского технического общества выдвинул на получение премии кандидатуру А. С. Попова. В заседании января 1898 г. (Л. 6) было вынесено следующее постановление:

«Высоко ценя идею, энергию и труд, затраченные А. С. Поповым в устройстве особого приемника электро-магнитных колебаний и на практическое применение его к метеорологической технике (телеграфирование без проводов), VI отдел Императорского Русского технического общества ходатайствует перед Советом (Технического общества) о присуждении А. С. Попову премии имени государя наследника-цесаревича».

Отзыв о работе Попова, представленной к соисканию премии, дал видный русский физик Н. Г. Егоров. В его краткой записке изложена история изобретения радио Поповым, подчеркнута научное и техническое значение его работ и перечислены успехи, достигнутые Поповым за три года изысканий в области беспроволочной телеграфии. Н. Г. Егоров остановился на имеющихся сведениях об опытах Маркони и corroborированными данными показал преимущество Попова. Являясь указанием на благоприятное отношение военно-морских кругов к опытам Попова. «При содействии морского министерства,— пишет Н. Г. Егоров,— А. С. Попов начал кампании уже имел коллекцию приборов, вполне приспособленную для опытов сигнализации, и таким образом течение лета 1897 г. совершенно независимо от Маркони описание приборов Маркони появилось только в июне) А. С. Попов организовал в Транзунде телеграфирование без проводов. Сигнализация с приборами Попова была совершенно правильной для расстояния до 5 верст» (к моменту присуждения премии Попову удалось больше чем удвоить это расстояние).

Премия 1898 г. согласно § 4 «Правил» была разделена пополам и присуждена: инженеру В. Л. Васютинскому за аппарат, фотографический метод и доклад: «Наблюдение над временными деформациями верхнего строения пути» и А. С. Попову за «Приемник для электромагнитных колебаний и приборы для телеграфирования на расстояние, которое в лето 1898 г. было доведено до 8 морских миль (12 верст)».

Публично признание своих заслуг Попов получил от всей технической общественности из уст того же Н. Г. Егорова, в конце 1899 г., когда в Петербурге собрался Первый Всероссийский электротехнический съезд (Л. 7). В программе съезда был представлен доклад Попова «Телеграфирование без проводов». Н. Г. Егоров, как председатель VI отдела, председательствовал и на съезде. Вот что записано в протоколе заседания от 29 декабря:

«А. С. Попов прочел доклад «Телеграфирование без проводов», иллюстрированный прекрасными опытами. Н. Г. Егоров указал, как на редкое явление, на то, что А. С. Попов, который свое открытие сделал ранее открытия Маркони, между тем, как большая доля известности доставалась этому исследователю, не терял спокойствия духа и, сохраняя полную самостоятельность, продолжает самостоятельно, непрерывно расширять область своих исследований и опытов, которые, как видно из прочитанного доклада, уже привели его к практическому пользованию телефонами. А. С. Попов, сделавший важный шаг в науке об атмосферном электричестве устройством регистрирующего грозоотметчика, не остановился перед трудностями для практического применения идей грозоотметчика к телеграфированию без проводов».

Основная деятельность А. С. Попова протекала в военно-морском ведомстве. Здесь он провел большую часть своей самостоятельной жизни и осуществил важнейшие свои работы. Не лишено интереса установить, понимали ли в Кронштадте и в Главном адмиралтействе в Петербурге, что скромный преподаватель физики военного учебного заведения возмущает мировое дело, что опыты, поставленные в Кронштадтской Минной школе, послужат началом целого переворота в области связи, благотворными действиями которого воспользуется прежде всего военно-морской флот? Встречал ли Попов сочувствие и содействие в своих изысканиях со стороны начальствующего состава? Наконец, дорожили ли им во флоте, в частности в министерстве? Как известно, до сих пор Попов изображался одиночкой, лишенным поддержки и по-

мощи и действовавшим в недружелюбной и даже явно враждебной обстановке. Так ли все это? Документы рисуют перед нами не совсем такую картину.

Разумеется, никто из военно-морского ведомства, как, впрочем, никто и из научно-технического мира (да и сам А. С. Попов!), не представлял в полном объеме, что таит в себе новое изобретение. Но что речь идет об очень важных изменениях в области связи, некоторые лица во флоте, как, например, адмирал С. В. Макаров, понимали не хуже, чем в ученых кругах.

И до изобретения радио А. С. Попов отнюдь не был незамеченной фигурой в военно-морских кругах, о чем свидетельствует большое количество документов. Остановимся на некоторых из них.

В 1893 г. в Чикаго была организована Всемирная (Колумбийская) выставка (тогда же собрался III Международный электротехнический конгресс). У руководящих деятелей флота возникла мысль—послать на Выставку своего представителя. Выбор пал, как известно, на А. С. Попова, который и был направлен делегатом в Америку. В представлении Попова в качестве делегата говорилось: «Означенную командировку с наибольшей пользой для класса и Морского министерства мог бы выполнить преподаватель Минного офицерского класса и Технического училища морского ведомства Попов, специально изучающий практические применения электричества... Многолетняя и полезная деятельность этого преподавателя ругается за то, что возложенное на него поручение будет им выполнено вполне добросовестно» (Л. 8).

Еще за несколько лет до изобретения своего «Прибора для обнаружения и регистрирования электрических колебаний» А. С. Попов начал изыскания в этой области, делая сообщения о них в Кронштадтской Минной школе. Лекциями Попова интересовались, однако, не только в Кронштадте, но и в Петербурге; они были предметом внимания Технического комитета Морского министерства и даже управляющего министерством (Л. 9).

Но интерес к изысканиям А. С. Попова неизмеримо вырос после того, как он наглядно показал возможность практического использования воли Герца. Известно, что опыты телеграфирования без проводов в более широких масштабах Попов начал в 1897 г., когда из Англии дошли сведения о грандиозных для того времени опытах Маркони. Сохранившиеся документы свидетельствуют, что запросы Попова удовлетворялись безотлагательно. Правда, они были чрезвычайно скромны. Например, Попов просил на «расходы по опытам электрической сигнализации без проводников между судами эскадры» ... триста рублей. Однако для получения и такой сравнительно небольшой суммы требовалось разрешение управляющего Морским министерством, так как эти расходы не были предусмотрены сметой. Разрешение было получено незамедлительно. Первые опыты показали ничтожность этой суммы: из отчета Попова о кампании 1897 г. мы узнаем, что расходы измерялись тысячами рублей.

Здесь нет возможности подробно останавливаться на всех материалах, характеризующих отношение к усилиям Попова по радиофикации флота. Ограничимся только некоторыми отзывами адмирала С. О. Макарова и сведениями об отношении морского начальства к переводу Попова из морского ведомства.

Отзывы С. О. Макарова, содержащие высокую оценку работ Попова, опубликованы им самим (Л. 10) и проф. А. И. Бергом (Л. 11). Известно, что построенный Макаровым ледокол наряду с другими выдающимися операциями снял с камней броненосец «Генерал-адмирал Апраксин». В этой последней операции исключительно важную роль сыграло радио, и Макаров дает самую высокую оценку Попову, который принимал непосредственное участие в устройстве радиосвязи между берегом и островом Гогланд, поблизости от которого наскочил на камни «Апраксин». Во время этих работ С. О. Макаров состоял главным командиром Кронштадтского порта.

«Изобретение нашего кронштадтского ученого профессора Попова,— пишет С. О. Макаров,— получило во время работ у Апраксина практическое применение. Профессор Попов первый открыл способ телеграфирования без проводов. Маркони выступил после Попова, но в Англии образовалось общество с большим капиталом, которое не щадило средств на исследования и рекламу». И далее, при описании сооружений на Гогланде и Котке у Макарова встречаются такие выражения, как, например: «шаги великого открытия нашего соотечественника».

Об отношении адмирала Макарова к А. С. Попову мы узнаем и из скупой заметки в «Электротехническом вестни-

ке», относящейся к 1902 г., когда в Россию приезжал Маркони (Л. 12), надеясь получить большие заказы для своей фирмы. В беседе с последним С. О. Макаров подчеркивал, что изобретателем радио является русский ученый А. С. Попов.

Из документов, опубликованных проф. А. И. Бергом, видно, как далеко шли планы адмирала Макарова. Документы эти относятся к 1902 и 1903 гг., когда Попов покинул Кронштадт и состоял уже профессором Электротехнического института. Макаров поставил перед министерством вопрос о том, чтобы профессор Попов всецело занялся усовершенствованиями беспроволочного телеграфа с предоставлением ему в широких размерах свободы в производстве опытов. Для этих целей Макаров предлагает создать Попову специальную лабораторию или, как мы бы теперь сказали, научно-исследовательский институт. Адмирал Макаров мечтал в условиях царского строя о том, что сделается возможным лишь в наши дни, когда в советской стране научно-технические изыскания стали делом государственной важности и финансируются правительством.

В 1901 г. Электротехнический институт предложил А. С. Попову кафедру физики. Это был редкий случай: место ordinатного профессора требовало ученой докторской степени, которой Попов не имел. В таких случаях необходимо было «высочайшее соизволение» или хотя бы разрешение министра, в ведении которого находилось высшее учебное заведение.

В своем письме министру внутренних дел, в ведении которого находился Электротехнический институт, управляющий Морским министерством вице-адмирал Т. Тыртов, давая согласие на занятие А. С. Поповым кафедры физики в Электротехническом институте, подчеркивал требование «...чтобы г-н Попов оставался вместе с тем и на службе в Морском ведомстве в звании заведующего установкой телеграфирования без проводов и членом-сотрудником Морского технического комитета и чтобы он продолжал руководить этими присюбленными в Морском ведомстве и лично участвовал в летние месяцы при установке этих приспособлений на судах и обучении чинов флота» (Л. 13).

Мы рассмотрели только немногие бумаги, сохранившиеся в архиве Военно-морского ведомства, но и из них видно, что трудам Попова оказывалось внимание.

Продолжая характеристику отношения русских общественных кругов к А. С. Попову, остановимся на том отклике, который вызвала безвременная смерть изобретателя радио, и на принятых Русским физико-химическим обществом мерах для закрепления за А. С. Поповым приоритета в деле изобретения радио.

Известно, при каких обстоятельствах умер А. С. Попов. Он не выдержал того напряжения, которое ему пришлось испытать на тяжелом посту директора высшего учебного заведения во время революции 1905 г., когда восторжествовала реакция. Как ни тяжелы были цензурные условия, в некрологах и в воспоминаниях его памяти речах на траурных заседаниях причина скоропостижной смерти Попова связывалась непосредственно с происками реакции.

«Еще одна свежая могила! Еще одну жертву безвременной унес безжалостный Молох наших дней», — писал близкий друг Попова, профессор Г. Л. Любославский (Л. 14).

«Александр Степанович Попов... — новая жертва современных невыносимо тяжелых условий в России», — так начал свою вступительную речь товарищ председателя Физического отделения Русского физико-химического общества, проф. Н. А. Гезехус, открывая экстренное заседание (24 января), посвященное памяти А. С. Попова.

В некрологе, помещенном в журнале «Электричество» (Л. 15), причины гибели Попова изложены еще более открыто: «А. С. пришлось пережить тяжелые минуты. По своей натуре, по своему далеко не блестящему здоровью, он не был приспособлен к тому бурному темпу, которым развивались события... В последнее время, когда реакция надвинулась со всех сторон, между прочим, и на высшую школу, настроение А. С. было особенно подавленное. В последних числах декабря, после неприятных разговоров с администрацией, он почувствовал себя плохо, а через два дня скончался от кровоизлияния в мозг».

Некрологи Попова были помещены в большом количестве столбчатых и провинциальных газет и журналов — в «Новом Времени», «С.-Петербургских ведомостях», «Петербургской газете», «Котлине», в упомянутом уже «Слове», «Молве», «Одесских новостях», «Историческом вестнике», «Физическом обозрении» и многих других. Пресса единодушно отмечала, что Россия понесла тяжелую утрату, лишившись ученого,

приумножившего ее славу, и призывала принять меры к стойкому увековечению памяти выдающегося исследователя.

Это пожелание было осуществлено путем учреждения «Премии имени изобретателя беспроволочного телеграфа Александра Степановича Попова» (Л. 15). Идея о премии имени А. С. Попова возникла сразу же после его смерти. VI отделе Технического общества, почетным членом которого он являлся. Замысел для того времени был грандиозным. Предполагалось привлечь широкие круги научной и технической общественности, имеющие отношение к электротехнике, заинтересованные в том, чтобы поощрять усилия отечественных исследователей. Инициатива была поддержана целым рядом организаций и учреждений, создавших специальную «Комиссию для разработки вопроса о премии имени А. С. Попова». В нее вошли представители от Минного офицерского класса, Физического отделения Русского физико-химического общества, VI отдела Русского технического общества, Общества инженеров-электриков и Электротехнического института. Первое заседание комиссии состоялось 2 февраля 1906 г. Краткая протокольная запись не сохранила нам имени автора проекта «Положения о премии», но на этом заседании проект уже обсуждался и был утвержден. § 1 «Положения» гласил: «В память выдающегося ученого и изобретателя беспроволочного телеграфа Александра Степановича Попова основывается премия следующими учреждениями и обществами: Электротехническим институтом императора Александра II, Минным офицерским классом, Физическим отделением Русского физико-химического общества, VI (электротехническим) отделом Императорского Русского технического общества, Обществом инженеров-электриков».

Размер первой премии был установлен в 500 руб. Главная задача, однако, состояла в том, чтобы изыскать средства для чего приходилось апеллировать к той же общественности, т. е. собрать необходимую сумму по подписке среди «почетателей заслуг Александра Степановича Попова». Для того чтобы дело было поставлено на твердую почву, нужно было иметь определенный (неприкосновенный) капитал, проценты которого давали бы возможность выплачивать премию. Ограниченные средства большинства представителей научно-технического мира предопределили размеры «неприкосновенного капитала». За два года, к 1 января 1908 г. собранная сумма составляла около 3 000 руб.; из них-то 31 декабря 1906 г. была выплачена первая премия.

Одна из форм добывания премияльных денег состояла в организации публичных лекций по беспроволочной телеграфии, весь доход от которых поступал бы в фонд премии. Устройство этих лекций преследовало еще и другую цель. Имелось в виду силами выдающихся петербургских ученых (первым предложил свои услуги известный профессор петербургского университета И. И. Боргман) создать курс лекций, чтобы «ознакомить публику с научными основаниями беспроволочного телеграфирования, с его историей, современным положением и практическим значением этого дела, а также выяснить роль, которую в изобретении и совершенствовании его сыграл А. С. Попов».

Назначение премии состояло в том, чтобы поощрять исследования в области электричества и его практического применения вообще. При этом в пункте шестом «Положения» подчеркивалось: «Премия выдается за лучшие оригинальные исследования и изобретения по электричеству и его применениям, произведенные в России и изложенные на русском языке».

Присуждению премии был придан явко выраженный общественный характер. Электротехнический институт, являясь юридическим лицом, при котором была учреждена премия, обязан был ежегодно сообщать отчет о движении сумм, поступивших в фонд премии. При институте была создана комиссия делегатов от заинтересованных учреждений и обществ, основавших премию.

И все же в дореволюционное время русской общественности не удалось достичь своей цели. Имя Попова начало постепенно забываться. Нашлись даже люди, которые отказывались признавать заслуги своего соотечественника. Более того, некоторые заняли явно враждебные позиции и открыто выступали против признания А. С. Попова изобретателем радио. Дело дошло до того, что эти мнения начали высказываться и в печати. Передовая русская научная общественность не могла мириться с столь явным допиранием истины и наглым оскорблением патристических чувств.

Вопрос был поставлен на обсуждение Русского физико-химического общества. Была создана специальная комиссия под председательством О. Д. Хвольсона. Комиссия занялась тщательным изучением всех материалов, опубликован-

печатать, а также опросом живых свидетелей происхо-
ждения сравнительно недавно событий. Решено было обра-
титься к зарубежным ученым Лоджу и Бранли, с именами
их непосредственно связан этап, предшествовавший изо-
бретению радио. Эти ученые охотно согласились высказать
свое мнение о роли и значении работ Попова в великом деле
радиотелеграфирования без проводов.

Высказывания Лоджа и Бранли вместе с отчетом Ко-
миссии были опубликованы в «Журнале Русского физико-
математического общества» (Л. 17). Английский и французский
тексты сыграли огромную роль в предистории радио, влия-
ние их исследований и высказываний на всех, искавших но-
вое средство связи, общеизвестно. После Герца именно Бран-
ли и Лодж были теми, кто побудил Попова взяться за его
дело. Отчет Комиссии с этого и начинается:

«Ознакомившись из печатавшихся в журнале «Electri-
city» за 1894 г. лекций проф. Лоджа «The Work of Hertz
in some of his successors» с работами Бранли, А. С. По-
пов зимой и весной 1895 г. проверяет опыты Герца с коге-
рентами Бранли. Убедившись в недостаточном постоянстве дей-
ствия когерентов Бранли и Лоджа, А. С. Попов рядом опытов
работывает свой тип когерера, а также создает ту схему
контрастной станции—цепи когерера с реле и цепи звонка-со-
звонителя, которая впоследствии легла в основание первых
шагов по беспроволочному телеграфу, как А. С. Попова, так
и Маркони».

Комиссии нетрудно было рядом неопровержимых дан-
ных, уже известных в литературе, доказать истинное поло-
жение вещей. Заключительная часть доклада Комиссии гла-
вит:

«Таким образом, по имеющимся в нашем распоряжении
данным, независимо от всяких прочих обстоятельств истории
этого изобретения, А. С. Попов по справедливости должен
быть признан изобретателем телеграфа без проводов при по-
мощи электрических волн. Мы надеемся, что и сомневаю-
щиеся в справедливости такого признания присоединятся к
нам. Мы, современники незабвенного А. С., его товарищи,
ученики и почитатели, еще не забыли его опытов, его чест-
ности и скромной души, его правдивого слова, его оригиналь-
ности ума и экспериментаторской талантливости».

Материалы, характеризующие отношение русских об-
щественных кругов к А. С. Попову, заслуживают более под-
робного освещения. Но и приведенные данные в достаточной
мере рисуют перед нами отношение к Попову той обще-
ственной среды, в которой жил и творил изобретатель радио.

Литература

1. А. С. Попов. Прибор для обнаружения и регистри-
рования электрических колебаний в атмосфере. Электриче-
ство № 13—14, 1896.
2. У. Прист. Передача сигналов на расстояние без про-
водов. Электричество № 13—14, 1897.
3. М. Шедлинг. Прогресс электричества в 1897 г. Поч-
тово-телеграфный журнал, февраль, 1898.
4. Новое время (газ.) 22 июня, 1897.
5. Котлин (газ.) 8 января, 1897.
6. Протоколы Русского Технического общества, 1898.
7. Протоколы I Всероссийского электротехнического
съезда.
8. Центр архив Военно-морского флота. Фонд Минного
класса, дело 65.
9. Центр архив Военно-морского флота. Фонд Морского
технического комитета, дело 5, 1890.
10. С. О. Макаров. Ермак во льдах. СПб, 1901.
11. А. И. Берг. А. С. Попов и изобретение радио. Соц-
экгиз, 1935.
12. А. М. Лукомская и К. И. Шафрановский.
Встреча Попова с Маркони. Электричество № 3, 1945.
13. Центр. гос. архив Военно-морского флота. Фонд Мор-
ского Технического комитета, дело 53, 1898.
14. Слово (газ.) 7 января, 1906.
15. Журн. Русского физ.-хим. общества. Физический от-
дел, 1900.
16. Жизнь и деятельность Александра Степановича По-
пова. Электричество № 7, 1906.
17. Журн. Русского физ.-хим. общества. Физический от-
дел, XI том 1903.

В юбилейном комитете

— Один из старейших и заслуженных деятелей русской
советской радиотехники, лауреат Сталинской премии, член
корреспондент АН СССР, проф. В. П. Вологдин по просьбе
Комитета написал большую работу (по личным воспомина-
ниям и материалам) о развитии русской и советской радио-
техники с периода после смерти А. С. Попова и до
наших дней.

— Издательство наглядных пособий Наркомпроса за-
казывает работу над подготовкой большого альбома, посвя-
щенного 50-летию со дня изобретения радио А. С. Поповым.
Содержание альбома: портреты и краткая биография изобре-
тателя, аппаратура и приборы, изготовленные им самим;
первые передающие и приемные радиостанции, изготовленные
им в России, так и в Париже фирмой Дюкрет; фотодоку-
менты, иллюстрирующие развитие радиоаппаратуры за период
от Великой Октябрьской социалистической революции. Спе-
циальные разделы альбома посвящены первым годам совет-
ской радиоиндустриальности и радиотехники, ее последующе-
му развитию, радиовещанию, радиолюбительству и телевиде-
нию.

— Проф. Г. А. Кьяндский, муж дочери А. С. Попова,
выполнил по просьбе Комитета доклад «Заграничные коман-
довки А. С. Попова» и прочтет его на научно-технической
конференции.

— Комитет утвердил темы и докладчиков на торжествен-
ном заседании, посвященном 50-летию со дня изобре-
тения радио А. С. Поповым. С докладами на заседании вы-
ступят: инженер вице-адмирал А. И. Берг «А. С. Попов —
изобретатель радио», академик А. Ф. Иоффе «А. С. Попов
как ученый физик», академик Б. А. Введенский «50 лет
идею».

— Широко развернута подготовка к выставкам, открывающимся в дни 50-летия в Политехническом музее и Военном музее связи Красной Армии. На выставке в Политехническом музее будет представлена аппаратура, с которой работал А. С. Попов, радиостанции первых лет и будет демонстрироваться на образцах развитие радиотехники во всех ее областях за 50 лет. Военный музей связи Красной Армии будет демонстрировать армейские и морские радиостанции, применявшиеся в первые годы после изобретения радио, радиостанции, участвовавшие в Русско-японской войне, а также покажет радиостанции, находившиеся на вооружении в первую мировую войну и в период гражданской войны, и развитие военной радиоаппаратуры в последующие годы. Большим разделом Военного музея является «Радио в Отечественной войне». Экспонаты музея иллюстрируют героические подвиги радистов в Отечественной войне, их подлинную аппаратуру. Вся эта аппаратура будет демонстрироваться в действующем состоянии.

— Издательство Академии наук СССР сдало в набор «Сборник исторических документов, посвященных изобретению радио А. С. Поповым». Исторические документы, представленные Комитету Главным архивным управлением НКВД и его архивами, расположены по годам и иллюстрируют, как работал А. С. Попов над своим изобретением, описывают опыты по радиосвязи, их условия и результаты, показывают, как постепенно внедрялось радио на кораблях русского флота. Сборник подготовлен под редакцией заместителя председателя Комитета по проведению 50-летия со дня изобретения радио А. С. Поповым, инженера — вице-адмирала А. И. Берга, предпославшего сборнику большую вступительную статью.



А. С. Попов среди участников Красноярской экспедиции по наблюдению солнечного затмения

Слева направо: стоят — М. А. Шателен, А. В. Вульф, А. С. Попов; сидят — Н. Н. Хамонтов, Ф. Я. Капустин, А. И. Садовский и Г. Л. Любославский

О некоторых ранних научных работах А. С. Попова

В 1883 г. после окончания физико-математического факультета Петербургского университета А. С. Попов поступил на службу в Минный офицерский класс в Кронштадте. Вначале он являлся ассистентом у преподавателя электротехники А. С. Степанова, вел практические занятия по гальванизму и заведывал физическим кабинетом, а затем самостоятельно стал читать курс практической физики. С поступлением в Минный класс совпадает и начало обширной научно-педагогической деятельности А. С. Попова.

Правда, свою научную деятельность Александр Степанович начал, по существу, еще в университете, когда написал диссертацию «О принципах магнито- и динамоэлектрических машин постоянного тока» (Л. 1). Профессор Фан-дер-Флитт в отзыве о ней писал: «Диссертацию г. Попова нахожу вполне удовлетворительной; это весьма обстоятельная и добросовестно выполненная работа». Но это были лишь первые шаги молодого ученого. Еще больший интерес представляет вторая работа Попова «Условия наилучшего действия динамоэлектрической машины», опубликованная в 1883 г. на страницах журнала «Электричество» (Л. 2). Современник А. С. Попова, проф. А. А. Петровский, так характеризовал это исследование: «Ясная и определенная постановка вопроса, короткий и простой прием решения, наглядно и изящно представленные результаты... все говорило о недюжинном уме, талантах автора...».

С первых же дней пребывания в Минном офицерском классе Попов, наряду с усвоением теории, старался дать слушателям как можно больше и практических навыков. Серьезное внимание уделял он организации на лекциях наглядной опытной части. Работы оказалось настолько много, что свободного времени у Попова почти не оставалось. Несмотря на это, Александр Степанович среди многочисленных служебных обязанностей иногда находил время и для «чистой науки». Так, в 1887 г. он принял участие в Красноярской экспедиции по наблюдению солнечного затмения.

Как известно, в августе 1887 г. происходило полное солнечное затмение. Полоса затмения тянулась через всю Россию от Западной границы до Тихого океана. Поэтому и явился интерес к наблюдению затмения, проявленный научными учреждениями. Для наблюдения солнечного затмения было организовано несколько экспедиций. Одна из них под руководством проф. Н. Г. Егорова была организована Русским физико-химическим обществом. Участник этой экспедиции тогда еще студент 3-го курса Петербургского университета проф. М. А. Шателен рассказывает (Л. 3):

«В университете факультативный курс спектрального анализа тогда читал Н. Г. Егоров. На своих лекциях он много говорил об астрофизических исследованиях и, в частности, об исследованиях в периоды полных солнечных затмений. Немногочисленные слушатели его специального курса,

но, с громадным интересом воспринимали сообщаемые сведения и затем, когда узнали о предполагавшейся для наблюдения затмения экспедиции, стремились получить возможность принять в ней или в работах по подготовке ее какое-либо участие. В конце-концов в состав экспедиции было учтено несколько студентов. Они сразу же включились втельную подготовку экспедиции, которую вел ее организатор. Это были молодые физики, группировавшиеся вокруг физической лаборатории университета. В числе их были и А. С. Попов. Остальными членами были его товарищи по университету: А. И. Садовский, Г. Л. Любославский, Н. Хамонтов и Ф. Я. Капустин. Некоторые из них являлись лаборантами в университете, другие — лаборантами в других высших учебных заведениях. Но все они поддерживали тесную связь с физической лабораторией университета. В лаборатории этой в то время работали такие лица, как виднейший профессор Ф. Ф. Петрушевский и П. П. Фан-дер-Липт и более молодые И. И. Боргман, Н. А. Гезехус, Д. Хвольсон, Н. Г. Егоров и общий учитель, душа лаборатории, В. В. Лермонтов, занимавший скромную должность лаборанта, но фактически благодаря своей исключительной интуиции, своему конструкторскому таланту бывший воспитателем и консультантом многих поколений физиков, вышедших из стен Петербургского университета. Под влиянием этих профессоров выросли все участники экспедиции и в том числе А. С. Попов».

При распределении обязанностей между членами экспедиции Александр Степанович взял на себя фотометрическое измерение солнечной короны. Техника фотометрии тогда еще была недостаточно разработана. Применялась только визуальная фотометрия. Экран Бунзена с масляным пятном был наиболее распространенным фотометрическим приспособлением. Попову пришлось самому разработать и метод фотометрического исследования короны и самому сконструировать специальный фотометр. В основу им был положен также экран Бунзена, но не с одним пятном, а с рядом пятен, расположенных по радиусам, расходящимся из одного центра. При помощи этого прибора можно было судить о распределении света и вдоль радиусов короны и вокруг центра короны.

В этой работе Александр Степанович показал свои замечательные способности экспериментатора, так ярко обнаружившиеся в дальнейшем при работе с волнами Герца. При испытаниях с искусственной короной аппарат дал хорошие результаты.

Экспедиция выехала из Петербурга в конце июня. Поезд до Красноярска занял 28 дней. «В Красноярске, — вспоминает проф. М. А. Шателен, — члены экспедиции прожили около месяца. За весь этот период при тесной совместной жизни они могли хорошо узнать друг друга и сойтись или разойтись. К счастью, для успеха дела все близко сошлись, жили и работали дружно. Конечно, и характер и темперамент у нас был различный. Александр Степанович отличался спокойствием характера, внешнею невозмутимостью и холоднотой. В то время, когда мы все негодовали, например, из-за задержек на почтовых станциях или брали состояние дороги, опасаясь за целостность перевозимых инструментов, Александр Степанович с невозмутимым видом успокаивал нас и оказывал, что все идет нормально и все в конце концов образуется». Он принимал участие в наших беседах и в них ясно выразились основные черты его характера: отсутствие яркости, спокойное отношение, по крайней мере по внешности, к обсуждаемым фактам и стремление примирить спора. Эти черты выявились у него и гораздо позже, когда ему приходилось при работах по телеграфии без проводов защищать свои идеи и предложения. Во время длительного переезда Александр Степанович очень увлекался фотографией, делал массу снимков и обучал студентов приемам фотографирования. В Красноярске он принимал самое деятельное участие в постройке временной обсерватории. Она была расположена за городом, на холме, около развалин старой часовни. Там, в деревянном балагане, Александр Степанович установил свою фотометрическую трубу и экспериментировал, готовясь к наблюдению затмения. По возвращении в Петербург все занялось разработкой материалов экспедиции: подготовкой отчетов и докладов в Физико-химическом обществе. Во всех этих работах участвовал и А. С. Попов».

В 1888 г. были опубликованы результаты работ Герца, впервые обнаружившего электромагнитные волны и исследовавшего их основные свойства. Опыты Герца воспроизводились почти во всех физических лабораториях мира. Попов очень заинтересовался этими работами и сразу же приступил к повторению опытов Герца.

Вибратор и резонатор Герца помещались в фокусах больших рефлекторов, сделанных из цинковых листов размером 2×2 м каждый. А. С. Попов уменьшил величину рефлекторов до 44 см. Так, вибратор его состоял из очень маленьких цилиндров, опущенных в особый сосуд с парафиновым маслом.

Кроме изменения размера приборов Герца Александр Степанович внес и другие в них усовершенствования. Вместо одной искры, получаемой в вибраторе Герца, Попов в своем приборе давал сразу три. Искра между шариками резонатора получалась яркой и была хорошо видна.

В 1889 г. Попов прочел в Кронштадте на собрании военных офицеров первую публичную лекцию о лучах Герца. Называлась она «Новейшие исследования о соотношении между световыми и электрическими явлениями». Программа лекции была следующей:

1. Условия прохождения колебательного движения электричества и распространения электрических колебаний в проводниках.
2. Распространение электрических колебаний в воздухе. Лучи электрической силы. Отражение, преломление и поляризация электрических лучей.
3. Актино-электрические явления и действие света вольтовой дуги на электрические заряды.

На лекции Александр Степанович наглядно показал морякам работу вибратора, излучение им электромагнитных волн, отражение их с помощью металлических зеркал. Для демонстрации преломления волн он использовал трехгранную призму из картона, которая была заполнена древесными опилками.

Успех лекции А. С. Попова во флоте был очень большой, и 22 марта 1890 г. в Главном адмиралтействе, в зале Морского музея состоялась лекция А. С. Попова «Об электрических колебаниях с повторением опытов Герца». В Центральном архиве Военно-морского флота сохранилась программа этой лекции (Л. 4). Она включала следующие вопросы: условия происхождения колебательного разряда; индукция при колебательном разряде — явление электрического резонанса; передача электрических колебаний по проводнику; распространение электрических колебаний в однородной непрозрачной среде — электрические лучи; поляризация отражения и преломления электрических лучей.

По свидетельству проф. Н. Н. Георгиевского, работавшего с 1889 по 1894 г. в качестве ассистента Попова, Александр Степанович уже в то время «неоднократно высказывал мысль о возможности использовать лучи Герца для передачи сигналов на расстоянии». От своих первых научных работ в области физики А. С. Попов шел к изобретению радиотелеграфа.

*Составлено Центральным музеем связи
(директор музея — Г. И. Головин)*

Литература

1. А. С. Попов. О принципах магнито- и динамоэлектрических машин постоянного тока (диссертация). Ленинградский областной исторический архив, Фонд Петербургского университета.
2. А. С. Попов. Условия наиболее действенного действия динамоэлектрической машины. Электричество № 15 и 16, 1893.
3. М. А. Шателен. Проф. А. С. Попов в экспедиции по наблюдению полного солнечного затмения в 1887 г. (рукопись воспоминаний).
4. Центральный государственный архив Военно-морского флота. Фонд Морского технического комитета, дело № 5, 1890. Дела Морского музея, дело № 109, 1890.
5. А. А. Петровский. Ученая и педагогическая деятельность А. С. Попова (отгиск из журнала Русского Физико-химического общества, февраль 1907 г.)

О развитии сельской электрификации

Развитие сельской электрификации является одной из важных задач в общем плане развития электрификации СССР.

Еще в своих ранних трудах, на рубеже двадцатого века, В. И. Ленин указывал на большое значение и перспективы применения электричества в условиях сельского хозяйства. В наброске плана научно-технических работ Академии наук (апрель 1918 г.) Ленин писал: «Обращение особого внимания на электрификацию промышленности и транспорта и применение электричества к земледелию». В плане и конспекте брошюры «О продовольственном налоге» (март—апрель 1921 г.) содержится запись Ленина:

«Пути перехода к социалистическому земледелию.

мелкий крестьянин

колхозы

электрификация».

Под электрификацией страны, как указал товарищ Сталин в своей речи на пленуме ЦК ВКП(б) в ноябре 1928 г., «Ленин понимает не изолированное построение отдельных электростанций, а постепенный «перевод хозяйства страны, в том числе и земледелия, на новую техническую базу, на техническую базу современного крупного производства», связанного так или иначе, прямо или косвенно с делом электрификации».

Успешное осуществление плана ГОЭЛРО и сталинских пятилеток обеспечило создание в СССР основанной на электрификации технической базы современной крупной промышленности и крупного механизированного сельского хозяйства.

Таким образом были созданы предпосылки для постепенного внедрения электричества в сельское хозяйство. Уже к 1938 г. мощность электроустановок в сельских местностях выросла с 2 000 квт, которыми располагали помещичьи хозяйства царской России, до 250 000 квт. Общее потребление электроэнергии в сельском хозяйстве только за две пятилетки выросло в 11 раз и достигло 360 млн. квтч. К 1941 г. было электрифицировано 9 500 колхозов с общим числом дворов свыше 700 тыс. и около 2 500 МТС и МТМ, причем потребление энергии составило 450 млн. квтч.

Известное решение XVIII съезда ВКП(б) о широком развертывании строительства мелких колхозных гидроэлектростанций, ветросиловых и газогенераторных электроустановок на местном топливе дало мощный толчок развитию сельской электрификации. Можно было уже говорить не только об отдельных колхозах и совхозах, но и о целых сельскохозяйственных районах СССР, где электрическая энергия прочно вошла в быт и в производство. Наиболее ярким примером этого являлся Запорожский район Украинской ССР, непосредственно прилегающий к Днепровской гидроэлектростанции им. Ленина, — район широкой электрификации сельского хозяйства. Колхозы этого района были электрифицированы почти на 100% и обслуживались 6 подстанциями 35/6 кв и 154 трансформаторными пунктами общей мощностью свыше 12 000 ква. В колхозах района имелось: 26 000 световых и 2 500 радиоточек, 80 электрифицированных молотильных агрегатов, 17 300 м² электротеплиц и электропарников, около 500 электро-

двигателей на общую мощность 5 500 квт, приводивших в движение кормоприготовительные машины, мельницы, насосы для водоснабжения и орошения, станки ремонтных мастерских и т. д.

В Саратовской области успешно развивались опыты по электрификации полеводства с применением электротракторов оригинальной советской конструкции.

Все более широкое распространение получало применение электричества в животноводстве. Сумский завод наладил массовый выпуск электроаппаратов для механической дойки, спрос на которые со стороны колхозов и совхозов возрастал. Ростовский завод освоил производство агрегатов для электрострижки овец. В овцеводческих районах работало более 200 таких агрегатов для обработки 500 000 овец.

Успешный рост электрификации сельского хозяйства, так же как и других отраслей народного хозяйства, был нарушен войной. Немецко-фашистские разбойники подвергли варварскому разорению сельскохозяйственные районы с наиболее широко развитой электрификацией на Украине.

В настоящее время, в связи с приближающейся окончательной победой над фашистской Германией, вопросы развития сельской электрификации, которые являются частью общей задачи дальнейшего подъема сельского хозяйства СССР, становятся вновь все более и более актуальными.

Недавнее постановление Совета Народных Комиссаров СССР о развитии сельской электрификации предусматривает строительство малых гидроэлектростанций и тепловых электростанций, проектно-изыскательские работы для дальнейшего строительства, производство турбин и оборудования для сельских силовых установок, присоединение сельских местностей к сети существующих электростанций.

В первом полугодии 1945 г. будет развернуто строительство 430 малых гидроэлектростанций на 8 600 квт; 52 гидростанции и 71 тепловая электростанция должны быть введены в эксплуатацию во втором квартале текущего года. Кроме того в этом же году будут проведены проектно-изыскательские работы для строительства 2 565 малых гидроэлектростанций общей мощностью в 51 300 квт.

Ряду наркоматов правительство поручило изготовление турбин, генераторов, гидромеханического и электрического оборудования для электрификации сельских местностей.

Энергией от вновь сооружаемых электроустановок в первую очередь должны обеспечиваться ремонтные предприятия, молотба, зерноочистка, насосные установки для орошения, животноводческие фермы и бытовые нужды населения.

Правительство одобрило инициативу и принял предложения колхозников, советских и партийных организаций ряда областей, обязавшихся собственными силами электрифицировать коллективные и советские хозяйства в 1945 г. Колхозники Горьковской области обязались провести проектно-изыскательские работы и построить в этом году 80

их гидроэлектростанций; колхозники Молотовской области — построить 32 гидроэлектростанции, Свердловской области — 20 станций, Узбекской ССР — 300 станций. Советские и партийные организации этих областей и республик решили организовать на местных предприятиях производство мелких турбин, аппаратуры станочных материалов.

Совет Народных Комиссаров СССР установил, что электроустановки, построенные силами колхозов и обслуживающие отдельные колхозы, являются собственностью этих колхозов. Строительство колхозных и колхозных электроустановок, отходящих часть электроэнергии государственным

предприятиям, производится за счет трудовых вложений и средств колхозов и государственных предприятий пропорционально их участию в использовании электроэнергии.

Решение о дальнейшем развитии сельской электрификации, принятое правительством в трудных условиях военного времени, еще раз свидетельствует о том большом значении, которое партия, правительство и лично товарищ Сталин придают этому делу. Технические и технико-экономические вопросы сельской электрификации должны занять важное место в работе наркоматов и научных учреждений, связанных с развитием электрификации СССР.

Электроснабжение сельскохозяйственных районов в условиях широкой электрификации сельского хозяйства

Кандидат сельскохозяйств. наук А. Г. ЗАХАРИН

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

В статье, представляющей извлечение из работы автора, проводимой под научным руководством члена-корреспондента Академии наук СССР В. И. Вей а, на основании анализа советского и мирового опыта освещаются вопросы электроснабжения сельскохозяйственных районов в условиях сельского хозяйства СССР. Масштабы работ, связанных с широкой электрификацией сельскохозяйственных районов, требуют введения специальных стандартов и типов оборудования. Электрификация сельского хозяйства в СССР должна развиваться в значительной мере на собственной энергетической базе с широким развитием строительства электростанций средних и малых мощностей и при комплексном использовании местных энергоресурсов. Статья печатается в порядке обсуждения.

Изучение мирового опыта в области электрификации сельскохозяйственного производства приводит к выводу, что даже в условиях мелкого индивидуального хозяйства электроэнергия является одним из наиболее мощных факторов подъема производительности и производительности труда в сельском хозяйстве. Так, например, по американским данным, относящимся к 41 обследованной ферме, объем продукции после электрификации увеличился на 55% при одновременном сокращении на 5% количества людей, занятых в сельскохозяйственном производстве; при этом по отдельным производственным процессам были получены следующие показатели: доильная машина позволила увеличить поголовье с 4 до 19 коров без увеличения персонала; электрические брудеры и автоматическое водопоее позволили увеличить количество выращиваемых цыплят с 400 до 2150; водопровод на пастбище позволил увеличить сдаваемое на рынок поголовье свиней с 175 до 250 в год и т. д.

В нашей стране, являющейся самой передовой в мире по уровню механизации полевых работ, электрификация сельского хозяйства до войны отставала от зарубежного уровня; тем не менее опыт отдельных электрифицированных колхозов показывал весьма убедительно, что в условиях крупного социалистического хозяйства эффективность электрификации значительно повышается. Так, например, комплексная электрификация животноводческих ферм, которая в мелких хозяйствах Германии считалась дорогой и неэффективной, в условиях колхозов Московской области дала прекрасные результаты и позволила при улучшении качества продукции и облегчении условий труда сократить от 25 до 35% обслуживающий персонал.

Не вдаваясь в подробное рассмотрение вопроса об эффективности электрификации, в настоящей

статье попытаемся осветить вопрос о том, с какими масштабами работ связано снабжение электроэнергией сельскохозяйственных районов Союза, какие проблемы оно выдвигает и какие методы их решения могут быть предложены.

Условия централизованного электроснабжения сельскохозяйственных районов. Условия распределения электроэнергии в сельскохозяйственных районах в силу низкой плотности нагрузки значи-

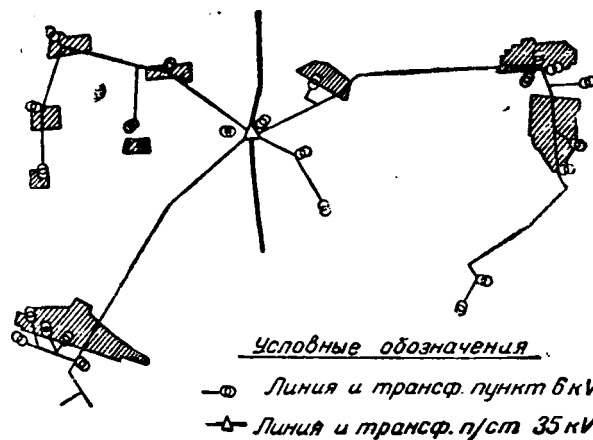


Рис. 1. Распределительная сеть 6 кВ в сельскохозяйственном районе

тельно менее благоприятны, чем в городах и промышленных районах.

Длина высоковольтной распределительной сети по данным ряда выполненных установок (рис. 1) равна в среднем 25—50 м на каждый электрифицированный дом, загрузка сети колеблется в пределах 5—10 тыс. кВт/км, а расход металла (железа) достигает значений 75—100 кг/кВт передаваемой мощности (без сетей низкого напряжения).

Для определения основных показателей централизованного электроснабжения крупных сельскохозяйственных районов можно воспользоваться следующим простым методом, проверенным на ряде конкретных примеров и дающим вполне приемлемые результаты в тех случаях, когда можно без большой погрешности считать нагрузку равномерной распределенной по району.

Длина распределительной сети высокого напряжения в этом случае может быть определена из простого соотношения

$$L = \alpha \sqrt{NF} \text{ (km)},$$

где N — количество селений, присоединяемых к сети, F — охватываемая территория в km^2 , α — коэффициент, определяемый в зависимости от характера местности. Для равнинных районов в центральной части Союза с весьма равномерным распределением населенных пунктов по территории района значение α близко к единице и обычно находится в пределах 0,90—1,05; в южных степных районах, где селения вытягиваются сплошными цепочками вдоль рек, и в северных районах с большими пятнами незаселенных лесных и болотных массивов значение α ниже единицы и может снижаться до 0,75—0,8.

Радиус действия сети в наиболее удобной форме может быть выражен следующей формулой:

$$R = \frac{U}{C} \sqrt{\frac{\varepsilon G}{k}} \text{ (km)},$$

где U — напряжение сети в kV , ε — допускаемые потери напряжения в процентах, G — вес металла проводов на 1 kW передаваемой мощности, C — коэффициент непрямолинейности трассы, равный отношению длины линии к ее проекции на радиус, и k — постоянная материала проводов, которая для меди равна $k = 17,5 \cdot 8,95 = 157$ и для витых железных проводов $k = 132 \cdot 7,85 = 1040$.

$$L = \alpha \sqrt{NF}.$$

Исходя из этих двух параметров, определим в качестве примера основные показатели распределительной сети высокого напряжения для централизованного электроснабжения одной из областей в центральной части Союза: территория области — 55 000 km^2 ; количество населенных пунктов — 8 800; протяженность распределительной сети 10 kV при $\alpha = 1$: $L_{10} = 1 \times \sqrt{8800 \cdot 55000} = 22000 \text{ km}$.

Радиус действия сетей 10 kV с железными проводами при $\varepsilon = 5\%$, $G = 75 \text{ kg kW}$ и $C = 1,1$:

$$R_{10} = \frac{10}{1,1} \sqrt{\frac{5 \cdot 75}{1040}} = 12,2 \text{ km}.$$

Территория, охватываемая одним питательным пунктом, $f \approx \pi R_{10}^2 = 470 \text{ km}^2$. Количество питательных пунктов 35 kV $n = \frac{F}{f} = 120$. Протяженность линий передачи 35 kV $L_{35} = 1 \times \sqrt{120 \cdot 55000} = 2500 \text{ km}$.

Если принять значение плотности нагрузки $\gamma = 2 \text{ kW/km}^2$, то получим мощность питательного пункта 35/10 kV $P_{35} = \gamma f = 940 \text{ kW}$; вес проводов магистральных линий 10 kV :

$$G_{10} = \frac{\gamma FG}{1000} = 8250 \text{ t}.$$

Приведенные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Задача централизованного электроснабжения сельскохозяйственных районов Союза связана такими объемами работ (только по строительству сетей), что даже при рекордных американских темпах строительства (до 500 km в день) потребует для своего осуществления значительных средств.

2. С развитием широкой электрификации сельскохозяйственных районов вопросы облегчения удешевления сетей приобретают столь важное значение, что существующие стандарты и типы электрооборудования должны быть пересмотрены с учетом интересов сельской электрификации и вопросы о введении специального сельскохозяйственного распределительного напряжения 15—20 kV , о специальной серии сельскохозяйственных трансформаторов, об однофазном оборудовании для смешанной системы распределения электроэнергии, о сетевых регуляторах напряжения должны получить практическое осуществление.

Следует отметить, что условия распределения электроэнергии в центральных районах Союза плотностью населения 25—50 человек на 1 km^2 значительно благоприятнее условий многих стран, в частности, США. Так, если сравнить указанную выше область со штатами, имеющими наиболее высокую плотность сельскохозяйственного населения, то получим следующую картину (табл. 1).

Таблица 1

	F , тыс. km^2	N , шт.	$L = \sqrt{NF}$, тыс. km	Сельскохозяйственное население, тыс. чел.	Длина сети высокого напряжения, тыс. km	Количество хозяйств на 1 km^2 сети питания
Область в СССР	55	8 800 (селений)	22	2 900	7,5	26
Штат в США	135,8	280 000 (ферм)	194	1 600	121	1,43

Кроме того в части низковольтных сетей значительные преимущества перед всеми зарубежными странами дает концентрация производственной нагрузки в колхозах и совхозах.

Роль местных энергетических ресурсов в электроснабжении сельскохозяйственных районов. Выше отмечены были две особенности, выгодно отличающие советское сельское хозяйство от сельского хозяйства зарубежных стран; первая из них заключается в высокой эффективности электрификации крупных обобществленных хозяйств по сравнению с мелкими единоличными хозяйствами; вторая — в наиболее благоприятных условиях распределения электроэнергии в связи с концентрацией населения в деревнях, а внутри деревень — в связи с концентрацией производственной нагрузки.

Третья особенность, характеризующая специфические условия Советского Союза, относится к области источников электроснабжения. В передовых капиталистических странах Западной Европы и Америки развитие промышленности и промышленной энергетики исторически на много лет опередило развитие сельскохозяйственной электрификации. Поэтому электроснабжение сельскохозяйственных районов оказалось возможным осуществить

крупных промышленных и районных станций в странах Европы почти полностью и в США (до 43 г.) — наполовину. В Союзе при наличии огромных сельскохозяйственных территорий, не сравнимых с масштабами Западной Европы, и при исключительно быстром росте промышленности и городов, поглощающих все возрастающие количества электроэнергии, проблема генерирующей мощности является проблемой, определяющей масштабы и темпы развития сельской электрификации.

Во многих районах Союза сельская электрификация должна развиваться в основном на собственной энергетической базе; поэтому электрификацию от мощных энергосистем необходимо сочетать с широким размахом строительства сельскохозяйственных электростанций различных типов и мощностей, использующих в основном местные энергетические ресурсы.

В этой области прежде всего следует обратиться к вопросам использования малых рек и строительства мелких гидроэлектростанций (примерно от 40—50 до 400—500 л. с.), которые за последние годы получили доминирующее значение в развитии сельской электрификации. Запасы гидроэнергии малых рек в нашей стране огромны и, как известно, исчисляются цифрами порядка миллионов л. с. Однако в основных, густо заселенных районах в равнинной части Союза они все же далеко не могут покрыть всех местных потребностей в целом. Так, например, данные рекогносцировочных обследований в одной из центральных областей Европейской части Союза определяют ресурсы малых гидроустановок в пределах 8—10 W на человека, а в одной из южных степных областей — в пределах 6—8 W, т. е. в несколько раз ниже минимальных потребностей. При этом обеспеченность гидроэнергией отдельных административных районов изменяется в широких пределах, о чем можно судить по следующим цифрам, которые относятся к 43 районам, взятым в пределах одной области (табл. 2):

Таблица 2

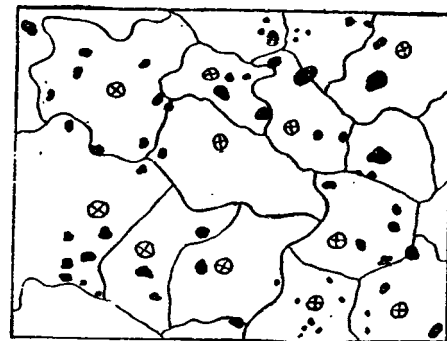
Характеристика районов	Число административных районов	Удельная мощность малых рек, кВт	Средняя мощность	
			кВт на район	W на жит.
Районы на водоразделах, в поймах крупных рек и заболоченные	25	4,4	175	7
Районы среднего течения малых рек	18	18,0	100	30

Запасы топлива местного значения по количеству и по качественной характеристике также представляют довольно пеструю картину, в которой, однако, можно выделить отдельные моменты, являющиеся типичными в достаточно широких пределах. Так, например, обеспеченность отдельных административных районов торфом болот местного значения, т. е. размерами от 10 до 500 га, определяется для Европейской части РСФСР данными, приведенными в табл. 3 (цифры даны в процентах к общему количеству районов области).

Таким образом можно выделить целую группу областей, в пределах которых можно говорить о полной обеспеченности всех районов торфом местного значения. Пример распределения торфяных болот по районам одной из таких областей показан на рис. 2.

Области	Районы, обеспеченные и сверхобеспеченные (возможная добыча свыше 100 тыс. т в год)	Районы среднеобеспеченные (возможная добыча 10—100 тыс. т в год)	Районы необеспеченные
Северо-западные	80—100	0—15	0—5
Центральные	40—50	20—30	10—30
Южные	0—5	0—25	70—100

С другой стороны, можно выделить большую группу районов в южных степных областях, где участие дров и торфа в топливно-энергетическом балансе не превышает 5—10% и где почти единственным, но часто недостаточным источником топливоснабжения являются различные отходы сельскохозяйственного сырья (солома, стебли подсолнуха и кукурузы, копра конопли и т. п.).



Грестом в кружках обозначены районные центры

Рис. 2. Расположение торфяных болот

В целом, если принять центральную зону Европейской части РСФСР (Московскую область) за 100%, то распределение местных энергетических ресурсов всех основных видов в направлении с северо-запада на юго-восток представит следующую картину (табл. 4):

Таблица 4

Области	Лесистость, %	Площадь торфяных болот, %	Гидроподъем среднегодового стока, %	Среднегодовая производительность ветроустановок, %
Северо-западные	120—130	200—35	120—130	90—100
Центральные	100	100	100	100
Юго-восточные	2—20	0—3	2—60	120—130

Приведенные данные показывают исключительную неравномерность распределения энергоресурсов и полную невозможность оперировать средними цифрами, которые могут служить источником грубых ошибок; с другой стороны, следует отметить известную закономерность в распределении энергоресурсов, уже отмеченную нами выше на примере торфа и позволяющую поставить вопрос о районировании сельскохозяйственной территории Союза по признаку электроснабжения, с выделением отдельных обширных зон с достаточно устойчивыми общими признаками, определяющими направление и условия развития местной энергетической базы.

Возможность и целесообразность подобного районирования подтверждаются также при изучении вопросов о размещении потребителей и условий распределения электроэнергии по району, для которых также можно подметить определенную закономерность, причем, что особенно важно, территориальное распределение признаков в значитель-

ной мере совпадает с картиной распределения местных энергоресурсов.

Не задаваясь целью установить уже сейчас сколько-нибудь законченную классификацию, приведем несколько примеров, достаточно типичных в пределах определенной зоны. За основную единицу в этих примерах принят административный

средней плотности нагрузки 2 kW/km^2 , гидроэлектростанции не выходят за пределы внутрирайонного значения, но в этих пределах могут покрыть 60—70% потребности и, следовательно, строительство теплосиловых установок может быть отложено на вторую очередь развития энергетической зоны, причем возможно решение с междурайонными



Рис. 3. Район центрального типа

по 30 дворов—65 сел
31—100 : —68 :
101—151 : —5 :

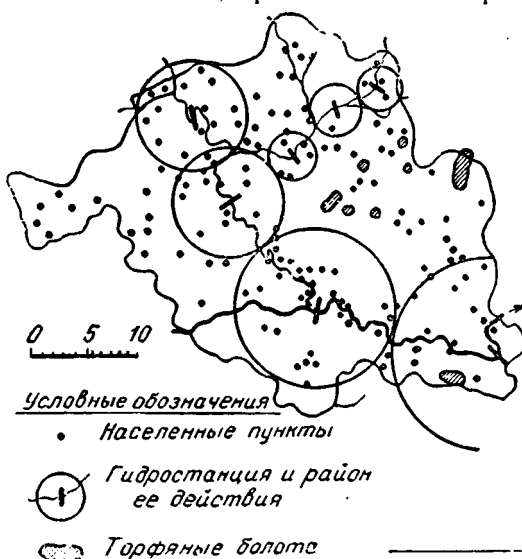


Рис. 4. Район центрального типа, на 60—70% обеспечен гидроэнергетическими ресурсами



Рис. 5. Район степного типа

30—200 дворов—19 сел
200—1 000 : —12 :
свыше 1 000 : —1 :

район, границы которого, конечно, весьма условны с точки зрения электроснабжения, но который характеризуется определенным единством в организации и направлении хозяйства, а также представляет довольно определенную по ряду признаков величину и поэтому может служить ориентировочной масштабной единицей.

В условиях Европейской части центра и юга РСФСР территория района обычно не выходит за пределы 800—1 500 km^2 (в среднем 1 000 km^2), население составляет 30—50 тыс. человек, а возможные масштабы электроснабжения потребителей местного значения определяются цифрами 1,5—3 MW и 4—7 млн. kWh.

На рис. 3 представлен район центрального типа с достаточно равномерным распределением 150 населенных пунктов, в среднем по 30—40 домов (и не свыше 200 домов) в каждом; район полностью обеспечен торфом местного значения, ежегодная добыча которого может быть доведена до 50 тыс. т; гидроэнергетические ресурсы характеризуются густой сетью мельчайших рек, на которых возможно строительство гидроэлектростанций мощностью от 20 до 100 kW (при напоре 3—5 м) и общей мощностью 200—300 kW; таким образом гидроэнергия может обеспечить не свыше 10—15% потребителей в отдельных колхозах на первом этапе развития электрификации, а для удовлетворения всей потребности необходимо строительство теплосиловых установок. Как расположение торфяных болот, так и равномерное распределение нагрузки определяют благоприятные условия для централизации производства энергии в пределах всего района или его значительной части, а возможно, и в более широких масштабах.

На рис. 4 показан район подобного же типа, но располагающий значительными запасами гидроэнергии порядка 1 500 kW и 2—2,5 млн. kWh, причем мощность отдельных станций достигает 500—700 kW. Как видно из схемы, на которой радиус действия гидроэлектростанций определен, исходя из

связями, т. е. с использованием теплосиловой установки соседнего района.

На рис. 5 представлен типичный степной район, население которого концентрируется в 40 селениях, расположенных цепочками вдоль немногих сленных и немногочисленных рек; размеры селений в среднем 150—250 домов, но отдельные крупные

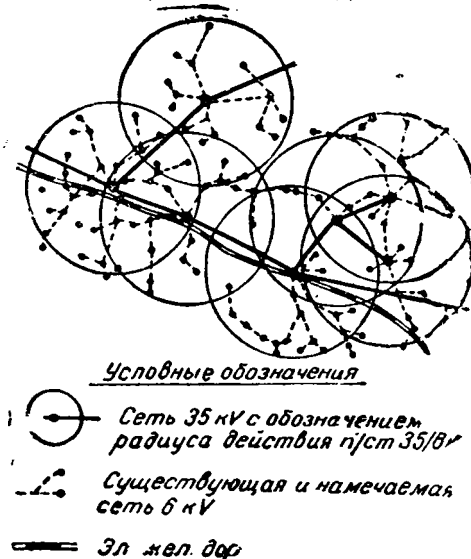


Рис. 6. Схема централизованного электроснабжения пригородного района

селения, в которых проживает 60—75% населения, достигают размеров 2 000—2 500 домов. Гидроэнергия в лучшем случае, при обязательном регулировании стока, может покрыть 20—30% потребности, а запасы местного топлива с трудом обеспечивают основные нужды населения и местной промышленности. Район, следовательно, не может удовлетворительно решить проблему электроснабжения на основании существующих ресурсов и без

базы топлива. Условия распределения электроэнергии благоприятны в силу большей концентрации нагрузок, причем возможны варианты силовых танков, обслуживающих отдельные крупные селения.

Наконец, на рис. 6 для сравнительной характеристики показан пригородный район, в котором наиболее благоприятные условия централизованного электроснабжения от городских и промышленных сетей сочетаются с высокой плотностью населения и интенсивным характером сельского хозяйства молочно-овощного направления.

Основные вопросы развития энергетической схемы района. Переходя к вопросу о типах силовых установок, необходимо остановиться на тех особенностях, которые определяют их роль в развитии энергетики района.

Гидроэнергия малых рек в большей или меньшей степени может быть использована почти во всех районах, особенно на первых этапах развития электрификации, когда относительная несложность оборудования и простота эксплуатации имеют особо важное значение. Однако помимо ограниченной мощности, связанной с недостатком гидроресурсов в тех районах равнинной части Союза, которые располагаются на водоразделах малых рек, в поймах крупных рек и в заболоченной местности, роль малых гидроэлектростанций ограничивается также их качественными особенностями.

Одиночная гидроэлектростанция небольшой мощности в обычных условиях, т. е. без годового регулирования стока, не в состоянии справиться с качественными требованиями при развитии электрификации местной промышленности и интенсивного сельскохозяйственного производства. Так, например, продуктивная молочная ферма требует бесперебойного электроснабжения в течение 20—22 час. в сутки в продолжение всей зимы; электрификация птицеводства также требует бесперебойного снабжения и имеет максимум в весенние месяцы; с этими и подобными требованиями не может справиться одиночная малая гидроэлектростанция в равнинной части Союза, мощность которой значительно снижается в зимние месяцы и резко падает с наступлением паводка.

Поэтому малые гидроэлектростанции, взятые отдельно, играют и будут играть в условиях Советского Союза выдающуюся роль пионеров сельской электрификации, но по мере роста нагрузок и электрификации интенсивного сельскохозяйственного производства они не смогут справиться ни с количественными, ни с качественными требованиями потребителя; задача развития высококачественной системы электроснабжения должна решаться в значительной мере с участием теплосиловых установок на местном топливе.

В области тепловых электростанций задача осложняется тем, что имеющийся опыт многочисленных установок почти не может быть использован: в зарубежной, в частности в американской, практике вопрос о мелких тепловых станциях решается пока исключительно на базе жидкого топлива и природного газа; в Советском Союзе наибольшее распространение до войны имели мельчайшие (10—20 кВт) станции с нефтяными двигателями.

Обследование, проведенное в довоенные годы, показало, что эксплуатационные расходы таких

станций (мощностью до 50 кВт) составляют от 1 000 до 2 200 руб. в год на установленный киловатт при использовании мощности в пределах 1 000—1 500 час., т. е. примерно от 1 до 1,5 руб. за 1 кВт·ч, а расход жидкого топлива достигает 0,6—0,8 кг, 0,9—1,1 кг условного топлива (на 1 л. с. в час).

С переходом на местные энергоресурсы (перевод на генераторный газ) удельный расход топлива установок увеличивается на 50—100% и стоимость энергии с учетом расходов по добыче, разделке и перевозке топлива также значительно возрастает. Поэтому перевод мелких установок на генераторный газ имеет, безусловно, важное значение лишь как первый этап, но не решает проблемы тепловой станции в условиях широкой электрификации.

Таким образом применяемые в настоящее время трафаретные типы силовых установок обладают такими органическими дефектами (как технического, так и экономического порядка), которые вызывают справедливые сомнения в их пригодности в качестве основной базы для сельской электрификации. Для того чтобы сделать местные станции полноценной энергетической базой сельскохозяйственных районов, очевидно, необходимо внести некоторые новые элементы в построение энергетической схемы района.

Одним из таких элементов является принцип концентрации производства электроэнергии на станциях «районного» масштаба, т. е. обслуживающих разнообразных потребителей района: сельское хозяйство, местную промышленность и коммунальное хозяйство районных центров. Размещение потребителей в виде достаточно густой и равномерной сетки населенных пунктов создает необходимые предпосылки для такой концентрации и позволяет охватить из одного центра потребителей с суммарной мощностью порядка 1—1,5 MW при напряжении распределительной сети 10 кВ и соответственно 2—3 MW при повышении напряжения до 17—20 кВ.

Как показывает имеющийся опыт, в подсобных условиях использование генераторной мощности сельскохозяйственных станций достигает значений 2 500—3 500 час.; разработка запасов местного топлива, чрезвычайно обременительная и дорогая для мелкого полукустарного хозяйства, может быть организована на более высоком техническом уровне. Поэтому с ростом мощности сельскохозяйственных установок, использующих местное топливо, стоимость энергии падает значительно более резко, чем, например, для городских дизельных станций.

Необходимым условием развития сельскохозяйственных станций районного значения являются разработка стандартов и организация серийного производства теплосилового оборудования, т. е. паровых турбин, локомотивов и газовых двигателей для диапазона мощностей 0,5—2 MW, для которого в настоящее время необходимое оборудование отсутствует, если не считать двигателей на жидком топливе.

Вторым элементом рационально построенной энергетической схемы сельскохозяйственного района является принцип комплексного использования энергии и местного топлива, позволяющий при прочих

равных условиях в значительной мере снизить стоимость эксплуатации тепловых электростанций. Одним из наиболее известных примеров такого комплексного использования является паросиловая установка с паровыми турбинами или для небольшой мощности — с паровыми машинами (локомобиль); при развитии таких отраслей местной промышленности, коммунального и сельского хозяйства, которые могут явиться значительными и эффективными потребителями электрической и тепловой энергии, особый интерес приобретает вариант комплексного энергоснабжения небольшого промышленного города с окружающим сельскохозяйственным районом.

В тех случаях, когда запасы топлива ограничены, либо ограничены масштабы его добычи в связи с напряженным трудовым балансом района, приходится искать другие решения. Одним из таких решений, технически новым, но крайне заманчивым по своим возможностям, является схема комплексного использования некоторых видов топлива и, в частности, торфа в простейшей энергохимической установке, вырабатывающей газ, полукокс, жидкое топливо, смазочные масла и некоторые побочные продукты для всех потребителей района.

Следующим исходным принципом, открывающим широкие возможности количественного (по выработке энергии) и качественного роста генерирующего аппарата района, является широкое развитие кооперации электростанций различных типов и мощностей с объединением их в конечном счете в местную энергосистему.

Условия работы в системе малой гидростанции (с ведущей тепловой станцией или более крупной гэс) хорошо известны. Они позволяют настолько упростить схему автоматизации станции, что автоматическое управление становится экономически выгодным для самых малых мощностей. Использование энергии водотока по материалам некоторых зарубежных станций поднимается до 80% и выше. Как показывает анализ структуры стоимости энергии, в этих условиях стоимость киловатт-часа может быть снижена по меньшей мере на 50, а иногда и на 70% по сравнению с условиями одиночной работы, причем снимаются также те качественные недостатки, о которых говорилось выше.

Организация малой энергосистемы позволяет также реально поставить вопрос об использовании энергии ветра, особенно в тех степных районах, где среднегодовые скорости достигают высоких значений 5—6 м/сек и где энергия ветра является в некоторых случаях почти единственным местным энергетическим ресурсом.

Наконец, при условии объединения топливной базы появляется возможность объединения в единой системе стационарной и полевой энергетики и, в частности, возможность покрытия зимних пиков нагрузки за счет частичного использования тракторного парка, мощность которого для одного административного района выражается внушительными цифрами порядка 1,5—4 тыс. л. с. В районах, снабжаемых от гидростанций, такое сезонное использование тракторных двигателей в значительной мере разрешит проблему провалов генераторной мощности, которые делают неполноценной работу мелких гидроэлектри-

ческих станций. При этом в качестве электрических генераторов для тракторных агрегатов, работающих параллельно с основной станцией, могут быть использованы асинхронные двигатели, например, работающие летом на оросительных установках; при децентрализованном использовании тракторных агрегатов в различных точках сети сокращаются потери и улучшается качество энергии; при централизованном использовании на электрической станции (при условии ее территориального и организационного объединения с машинно-тракторной станцией) значительно упрощается проблема ремонта, так как не только ходовая часть трактора, но также все пусковые устройства и система зажигания могут во время стационарной работы двигателя проходить нормальный ремонт.

Как известно, трактор в Советском Союзе загружен в 2—3 раза выше, чем в США, поэтому попытка его дальнейшей загрузки могла бы показаться чрезмерной. Тем не менее уже из приведенных соображений очевидно, что комплексное использование тракторного парка, возможное только в советских условиях, в некоторых случаях может оказаться чрезвычайно эффективным. Однако следует подчеркнуть, что возможные масштабы такого использования должны явиться предметом серьезного исследования с детальным рассмотрением вопроса о типах и об экономических пределах загрузки тракторных двигателей при комплексном использовании.

В заключение отметим, что для большой группы степных районов пока остается открытым вопрос не только об электростанции, но и о топливе для нее, которого на месте часто не имеется. Помимо усиленных поисков ископаемых видов местного топлива (уголь, газ) здесь следует рассмотреть также вопрос о возможности создания агроэнергетического комплекса, т. е. об эффективности специального выращивания быстрорастущих и объемных культур (подсолнуха, кукурузы, конопли и т. п.) с целью их дальнейшего энергетического использования.

Выводы. 1. Сельское хозяйство Советского Союза, организованное в крупные коллективные хозяйства, по условиям и эффективности электрификации имеет крупные преимущества по сравнению с мелкими крестьянскими и фермерскими хозяйствами капиталистических стран.

2. Сельское хозяйство Советского Союза располагает также наиболее благоприятными условиями в области передачи и распределения электроэнергии: длина линий передачи высокого напряжения на душу населения для центральных районов Союза в 10—20 раз меньше, чем в США.

В то же время масштаб абсолютных величин (20—30 тыс. км сетей высокого напряжения на область Центральной части Союза) и экономика электроснабжения диктуют необходимость всемерного облегчения и удешевления сельскохозяйственных электросетей путем введения специальных напряжений и оборудования (сельскохозяйственные трансформаторы, сетевые регуляторы напряжения, однофазное оборудование для смешанной системы распределения).

3. В условиях Советского Союза электрификация сельского хозяйства должна развиваться в значительной мере на собственной энергетической базе; поэтому развитие централизованного элек-

набжения от мощных энергосистем необходимо сочетать с широким размахом строительства сельскохозяйственных электростанций средних и малых мощностей.

4. Сельскохозяйственные районы Союза располагают огромными богатствами местных энергетических ресурсов всех видов. Тем не менее распределение этих ресурсов по стране крайне неравномерно и, в частности, энергия малых рек не может покрыть растущих потребностей сельскохозяйственного производства в значительной части районов. Поэтому вопрос о направлении развития энергетической базы района должен явиться предметом деталь-

ного исследования на примере районов различных типов.

5. Существующие типы мелких станций не могут обеспечить сельскохозяйственные районы высококачественной и дешевой энергией. Поэтому необходимо осуществить реконструкцию генерирующего аппарата в направлении комплексного использования топлива и энергии и объединения станций различных типов в малой энергосистеме. Особое значение в этих условиях приобретает задача объединения полевой и стационарной энергетик при возможности комплексного использования мощного тракторного парка.

Электрификация полеводства

Обобщение опыта шестилетней эксплуатации советских электротракторов

Доцент П. Н. ЛИСТОВ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

В статье, представляющей изложение из работы автора, проводимой под научным руководством члена-корреспондента Академии наук СССР В. И. Вейца, впервые в литературе освещаются результаты длительной эксплуатации советских электротракторов в условиях МТС. Полученные итоги позволяют считать, что при комплексной электрификации сельского хозяйства в районах с активным электробалансом электротрактор может явиться машиной, пригодной для выполнения многих сельскохозяйственных работ.

Многолетние опытные работы по электрификации полеводства с помощью электролебедок канатной тяги не дали положительных результатов. По сравнению с универсальным, относительно легким трактором с двигателем внутреннего сгорания электролебедки канатной тяги: а) требовали двойного веса металла на 1 л. с.; б) практически могли производить только вспашку; в) требовали, из-за реверсивного хода троса, балансирных или оборотных орудий, которые (на единицу ширины захвата) в 4—5 раз тяжелее в сравнении с тракторными орудиями; г) требовали почти двойной установленной мощности двигателей, так как лебедки работают попеременно; д) давали примерно половину производительности на 1 л. с. по сравнению с трактором; е) нарушали ряд требований агротехники (неравномерность глубины вспашки и др.).

Отрицательные результаты этих опытов, продолжавшихся в СССР свыше пятнадцати лет, создали у многих представление о невозможности вообще на данном уровне техники рационально решить проблему электрификации полеводства.

Между тем за последние годы в СССР созданы образцы работоспособных электротракторов, которые прошли шестилетнюю опытно-хозяйственную эксплуатацию в Ангельской МТС Саратовской области. Изучение этого опыта показывает, что электротрактор советской конструкции¹ открывает перспективы нового более высокого уровня электромеханизации земледелия для целого ряда районов с активным электробалансом и благоприятными в технико-экономическом отношении условиями электроснабжения.

Классификация выполненных советских и зарубежных электротракторов. В целях установления общего направления технической мысли при создании электротрактора в табл. 1 приводится классификация выполненных советских и зарубежных электротракторов по следующим основным признакам: типу конструкции, способу питания, роду применяемого тока, величине рабочего напряжения и длине кабеля.

Анализ этих данных позволяет сделать следующие выводы:

а) Примерно до 1930 г. как советские, так и иностранные конструкторы стремились создать электротрактор в виде специальной конструкции типа электромоторизованного орудия. Это направление не дало положительных результа-

тов. В последние годы наметился правильный путь создания электротрактора с использованием проверенных конструкций шасси тепловых тракторов и с учетом накопленного опыта тракторной промышленности. В результате у нас создан ра-

Таблица 1

Классификация выполненных электротракторов

Показатели	Советские %	Заграничные %
Наимен. тракторов		
По типу конструкции		
Обычные тракторные	80	54,6
Специальные конструкции	20	45,4
По способу питания		
Аккумуляторные	—	10
Троллейные	—	20
Кабельные	100	70
По роду тока		
Постоянный	10	20
Переменный трехфазный	90	80
По напряжению		
1.000 V	10	—
500 V	40	20
220/380 V	50	60
Прочие	—	20
По длине кабеля		
500 м и больше	50	20
До 400 м	20	40
До 200 м	30	40

ботоспособный электротрактор, предназначенный к использованию в крупных хозяйствах (колхозы, совхозы), а за границей — маломощный фермерский электротрактор (конструкция инженера Кемп, фирмы Сачердотти и др.). Эксплуатация электротракторов в течение ряда лет позволяет говорить о том, что мы имеем, хотя и в экспериментальных образцах, работоспособные конструкции.

б) Способ питания движущегося по полю двигателя от неподвижных электролиний, являющийся основным вопросом в электротракторе, в настоящее время решается преимуще-

¹ Описание конструкции советского электротрактора приведено в статье автора. Электричество № 8, 1939.

ственным применением кабельного способа питания, как наиболее надежного и относительно безопасного в эксплуатации.

в) По роду применяемого тока электротрактора в 85% случаев используют трехфазный ток. Вместе с тем следует отметить ряд известных преимуществ применения постоянного тока, что дает возможность упрощения конструкции шасси трактора и обеспечивает соответствие характеристик тяговой и рабочей машин.

г) По величине рабочего напряжения тенденции у советских и иностранных конструкторов различны. Для мелкого фермерского хозяйства напряжения до 500 В вполне достаточны. В наших условиях для обработки крупных массивов экономически и технически целесообразным следует считать напряжение в 1000 В, снижая его только для электротракторов, предназначенных к использованию на мелких участках (огородные, плодово-ягодные и пригородные хозяйства).

д) По тем же мотивам заметно различие у советских и зарубежных авторов и в вопросе выбора длины питающего кабеля.

Следует учитывать, что в определенной зависимости от длины кабеля (L в м) находится удельный расход полевой высоковольтной сети (l в м/га). Эта зависимость $l=f(L)$ представлена на рис. 1, причем

$$l = \frac{b}{2(L-b) \cdot 10^{-4}} \text{ м/га,}$$

где l — длина полевой линии в м/га; L — длина кабеля в м; b — ширина участка в м.

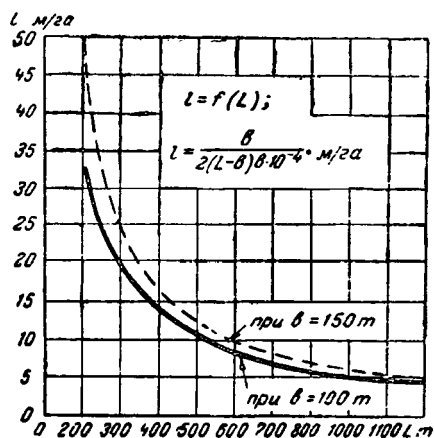


Рис. 1

Обобщение опыта эксплуатации советских электротракторов. Объем выполненных работ и удельные расходы электроэнергии. Два советских электротрактора находятся в эксплуатации в Ангельской МТС Саратовской области с 1937 г., т. е. свыше 6 лет. Общий объем выполненных двумя электротракторами работ и расход электроэнергии приведены в табл. 2.

Впервые электротрактора выполнили такой большой объем работ, исчисляемый тысячами га. Колебания в

Таблица 2

Годы	Общий объем выполненных работ га мягкой пахоты	Общий расход электроэнергии тыс. kWh	Среднегодовой расход электроэнергии на 1 га условной пахоты kWh
1937	262	9,7	37,0
1938	1103	40,1	36,2
1939	1502	53,9	35,9
1940	953	38,5	40,4
1941	830	25,0	30,4
1942	957	36,4	38,0
1943*	613	24,6	40,3
Всего . . .	6 223	228,3	35,7

* В 1945 г. на весновспашке электротрактора обработали около 400 га.

годовых объемах работ объясняются тем, что работа электротракторов не планировалась по МТС. Кроме того протекли длительные перерывы (месяц и больше) в работе электротракторов из-за перебоев в подаче электроэнергии в Сарграс и из-за предельной амортизации полевых 6-kV электролиний, которые при небольшом ветре ложились целыми километрами.

В условиях нормальной эксплуатации электротракторы дали бы во много раз большую выработку. Исходя из валового расхода на низкой стороне подстанции, в среднем удельный расход электроэнергии на 1 га мягкой пахоты составил 36,7 kWh. С учетом потерь в трансформаторе и высоковольтной (6 kV) линии до стационарной подстанции 35,6 kV можно принять удельный расход электроэнергии в среднем в 45 kWh на 1 га мягкой пахоты. Номенклатуру выполненных электротракторами работ и удельный расход электроэнергии по отдельным операциям приводятся в табл. 3.

Таблица

Наименование сельскохозяйственных полевых работ	Выполненный объем работ, натуральных га	Израсходовано электроэнергии, тыс. kWh	Удельный расход электроэнергии на 1 га работы, kWh
Боронование зяби в 1 след.	893	7,7	8,7
Весновспашка с боронованием в два следа	854	45,1	52,8
Подъем пара с боронованием в два следа	708	31,9	45,1
Лущение пара	203	7,3	36,3
Боронование пара в два следа	203	3,0	15,2
Подъем черного пара с боронованием в два следа	1 269	59,6	47,0
Перепахка пара с боронованием в два следа	320	14,8	46,2
Уборка комбайном	7	0,14	20,0
Посев озимых	140	2,5	18,1
Подъем зяби	1 257	55,9	44,5

Приведенные данные показывают, что электротрактора выполнялся весь комплекс основных сельскохозяйственных полевых работ, а именно: весновспашка, подъем и перепахка пара; взмет зяби, боронование, культивация; посев и, в вид опыта, уборка комбайном. Это говорит о том, что электротрактор является такой же универсальной тяговой машиной как и тепловой трактор.

Производительность электротракторов и их использование. Работа электродвигателей. Средние данные по проведенному хронометражу десяти рабочих смен в пахоте дают следующее распределение рабочего времени в смену и при вспашке 1 га условной пахоты (табл. 4).

Таблица

Распределение времени по элементам	На одну рабочую смену		На 1 га условн. пахот	
	абсол.	%	абсол.	%
Переезд к месту работы	15,7'	1,7	1,09'	1,7
Пуск установки	15,4'	1,6	1,07'	1,6
Рабочее время в борозде	10 ч. 47 м.	70,0	45'	70,0
Повороты хол. хода на торце	54,7'	5,9	3,8'	5,9
Перспекки и ожидания	104,6'	11,4	7,35'	11,4
Техобслуживание	87,0'	6,8	4,39'	6,8
Запахка концов	25,6'	2,7	1,8'	2,7
Общее время	15 ч. 25 м.	100	81,5	100

Вспахано за смену 14,3 га. Эти данные позволяют определить удельные показатели производительности и затрат рабочего времени.

- Средняя производительность:
 - на валовое время — 0,94 га/час;
 - на рабочее время — 1,32 га/час.
- Затрата рабочего времени на вспашку одного условного га равна 45 мин. при общей затрате технически необходимого

мени на один условный га в 64,5 min. Приведенный анализ всего времени электротракторов за 1939 г. в количестве 8 часов дал следующее распределение по элементам:

- а) работа в борозде . . . 776 час., или 75,7%
б) простои 252 » » 24,3%

Всего . . . 1028 час., или 100%

Простои, по причинам их вызвавшим, распределяются следующим образом:

- а) неисправность электролиний . . 65 час., или 25,8%
б) шасси трактора и плуг 65 » » 25,8%
в) неисправность барабана 46 » » 18,2%
г) неисправность стрелы 12 » » 4,7%
д) неисправность токосъема 23 » » 9,1%
е) повреждение кабеля 16 » » 6,4%
ж) прочие причины 25 » » 10,0%

Всего 252 час., или 100%

Из данного анализа видно, что коэффициент использования в 1939 г. составил 0,757, что для экспериментальных машин надо признать весьма хорошим. Если отбросить простои за неисправности электролиний, то получим, что из-за механических неисправностей электротрактор простоял 7% от времени простоев, а по неисправности электрооборудования — лишь 9,8%. Обращает на себя внимание тот факт, что полностью отсутствуют простои электротрактора из-за неисправности электродвигателя, тогда как известно, что у обычного трактора большая часть простоев происходит по вине двигателя внутреннего сгорания.

За все шесть лет эксплуатации электродвигатели ни разу не ремонтировались, что совершенно несравнимо с результатами эксплуатации двигателей внутреннего сгорания. Последние, как показала практика, требуют частых, коротких и длительных ремонтов, вызываемых быстрой потерей мощности двигателем из-за износов в поршневой группе. Можно привести данные НАТИ по потерям мощности двигателем внутреннего сгорания в зависимости от продолжительности работы в часах (табл. 5).

Таблица 5

Срок работы в часах	Средний процент потери мощности от максимальной
250	5
500	13
750	22

Из приведенной таблицы видно принципиальное отличие электродвигателя, срок амортизации которого измеряется не годами, а десятилетиями.

В этом — одно из основных и принципиальных отличий электротрактора от трактора с двигателем внутреннего сгорания. Это отличие, выражающееся в значительно большей длительности межремонтной работы электротрактора, должно иметь далеко идущие последствия во всем построении энергетики сельскохозяйственного производства в целом, а не только земледелия.

В самом деле, трактор с двигателем внутреннего сгорания принципиально, по своим техническим возможностям, — исключительно универсальная машина. Он может быть использован и как тяговая машина на всех полевых работах, и как транспортирующая машина на перевозках, и, наконец, как самоходный передвижной двигатель на любой стационарной работе, требующей механического привода.

Однако, как показала многолетняя практика, тепловой трактор в сельском хозяйстве преимущественно используется только как тяговая машина на полевых работах и в незначительной степени — на стационарных работах (главным образом только на молотье). Использование же трактора на транспортных работах неоднократно ограничивалось специальными распоряжениями. Основная причина — сравнительно быстрая потеря мощности двигателем и необходимость восстановления этой мощности путем частых ремонтов. По той же причине во внесезонное время (зимой) в сельском хозяйстве бездействует огромный энергетический парк в несколько миллионов лошадиных сил. При построении энергетики сельскохозяйственного производства в основном на базе электро-

трактора положение должно резко измениться в положительном направлении, учитывая способность электродвигателя к длительной работе.

На электротракторах были установлены электродвигатели типа АТ завода «Вольта». Высказывавшиеся опасения относительно возможности применить двигатели открытого типа в полевых условиях оказались неосновательными. Длительная эксплуатация показала их надежность в работе, слабую (благодаря вентиляции) забиваемость пылью и пр.

Легкость электродвигателя (7 кг на 1 л. с. вместо 21,7 кг у теплового двигателя), его дешевизна (23—24 руб. за 1 л. с. вместо 92 руб. у теплового), простота конструкции — все эти качества позволяют рекомендовать и в дальнейшем установку на электротракторах электродвигателей открытого типа.

Работа кабелей. Основное электрооборудование, необходимое для выполнения одного электротракторного агрегата (электротрактор и передвижная подстанция), и структура фактической стоимости этого оборудования приведены в табл. 6.

Таблица 6

Наименование электрооборудования	Марка	Количество	Стоимость (% к итогу)
Кабель шланговый	ГРШ	750 m	56
Трансформатор 100 kVA	ТМ-100	1	16,7
Двигатель трехфазный 44 kW . .	АТ-931/8	1	11,0
Разъединитель	РН-3	1	3,5
Пусковые ящики	ША-100	2	3,4
Двигатель трехфазный 2,5 kW . .	ТТ-5/4	1	3,5
Трансформатор напряжения . . .	НТС	1	1,6
Осветительная арматура	Компл.	1	1,6
Счетчик трехфазного тока	И	1	0,5
Трансформатор тока	ТК-7	2	0,5
Прочее мелкое оборудование . .	—	—	1,7
Всего: а) в %	—	—	100%
б) в тыс. руб.	—	—	12,8

Из приведенных данных видно, что 56% стоимости всего электрооборудования агрегата падает на кабель.

При указанном выше объеме работы за 6 лет двумя кабелями электротракторов выполнена следующая механическая работа:

Вспахано га	Покрыто кабелями km	Всего перегибов (раз)
6 223	26 136	82 140

В среднем на вспашку 1 га требовалось покрыть расстояние в 4,2 km и сделать 13,2 перегиба кабеля. Очевидно, что эти нормативы отвечают той ширине прицепа, с которым работал электротрактор (в данном случае 8 плужных корпусов).

Объективным же измерителем срока амортизации кабеля могут быть взяты или покрытое кабелем расстояние (тыс. km), или же количество перегибов кабеля. В специально поставленном эксперименте кабелем аналогичной конструкции с работавшими на электротракторах было дано 25 000 перегибов, после чего его техническое состояние оставалось еще вполне удовлетворительным. Если принять, что 25 000 перегибов являются сроком жизни кабеля, то по приведенным выше нормативам (13,2 перегиба на 1 га) один кабель может обеспечить вспашку $(25\,000 : 13,2) = 1\,890$ га условной пахоты. Фактическое использование кабеля на электротракторах на 73% выше. В качестве первого приближения можно считать сроком амортизации кабеля 45—50 тыс. перегибов.

В процессе эксплуатации подмечены удлинение кабеля на 2—2,5% от первоначального размера и некоторое смещение жил в опрессовке. За шесть лет эксплуатации наблюдалось шесть случаев обрыва кабеля, из них два — прямой разрез кабеля лемехом работающего плуга. Следует отметить большую механическую и электрическую прочность кабелей марки ГРШ производства завода «Укркабель», проработавших столь длительный срок, особенно если принять во внимание, что кабели на первых электротракторах подвергались всевозможным испытаниям и часто находились в ненормальных условиях эксплуатации (большие натяжения, многократные закручивания и т. п.).

При работе электротрактора кабель непрерывно размаг-
няется с барабана и вновь наматывается. Для исследования
вопроса нагрева кабеля аналитически была определена максим-
альная температура нагрева навитого на барабан кабеля
в 71°С при нормальной нагрузке и окружающей температуре
в 35°С. Аналогично у развернутого кабеля температура была
определена в 54°С. В действительности должна была
наблюдаться некоторая средняя температура.

Опыт по проверке нагрева кабеля был поставлен следую-
щим образом: по всей длине кабеля на равных расстояниях
были прикреплены термометры. Электротрактор работал на
второй скорости и имел среднюю нагрузку по току в 72 А.
При каждой намотке и разматке замерялся перегрев шланга
кабеля в каждой точке, имеющей термометр. Опыт продол-
жался 8 час. Окружающая температура воздуха была 32°С.
В результате опыта была найдена точка с максимальной тем-
пературой в 51°С. Учитывая, что перепад температур между
шлангом кабеля и жилами колеблется в пределах 10—15°С,
можно считать, что в опыте мы имели нагрев жил кабеля
равным 61—66°С, т. е. величины весьма близки к установ-
ленным расчетам.

Энергетические показатели электротрактора ВИМЭ-2.
В табл. 7 и 8 приведены средние энергетические показатели
электротрактора ВИМЭ-2 при работе с 8-корпусным плугом.

Таблица 7

Скорость передвижения	Единица измерения	Подводящая мощность	Мощность на само-перегрев	Мощность, теряемая в кабеле	Мощность намотки кабеля	Мощность на крюке
Первая — 0,943 м/сек	kW	46,2	13,3	5,4	1,0	26,6
	%	100	28,7	11,6	2,0	57,7
Вторая — 1,23 м/сек	kW	58,7	15,5	8,0	1,0	34,2
	%	100	26,4	13,5	1,8	58,3

Таблица 8

Показатели	Единица измерения	I скорость	II скорость
1. Данные по регистратору			
Ток	A	58,2	71,2
Напряжение	V	539,0	529,0
Мощность	kW	46,2	58,3
cos φ		0,85	0,9
Усилие на крюке по динамометру Горячкина	kg	2691	2685
То же по балансу	kg	2871	2839
Средняя ширина захвата	cm	246	245
Средняя глубина пахоты	cm	23,2	23,2
Удельное сопротивление почвы	kg/cm³	0,53	0,50
Коэффициент нагрузки трансформатора	—	0,54	0,69
Коэффициент нагрузки электродвигателя	—	0,9	1,1
К. п. д. агрегата	—	0,577	0,583
К. п. д. электротрактора	—	0,667	0,69

Примеч:

а) Коэффициент нагрузки трансформатора

$$K_{н.т} = \frac{P_c}{P_{тр} \cos \varphi},$$

где P_c — потребляемая мощность в сети низкого напряжения;
 $P_{тр}$ — мощность трансформатора в kVA.

б) Коэффициент нагрузки двигателя

$$K_{н.д} = \frac{P_c - p_{лк} - p_{нк}}{P_m},$$

где $p_{лк}$ — потери в кабеле; $p_{нк}$ — потери от намотки кабеля;
 P_m — мощность моторной установки.

в) К. п. д. агрегата

$$\eta_{агр} = \frac{P_{кр}}{P_c},$$

где $P_{кр}$ — мощность на крюке.

г) К. п. д. электротрактора

$$\eta_{вт} = \frac{P_{кр}}{P_c - p_{лк} - p_{нк}}$$

Рассмотрение данных по энергетическим показателям
звонит сделать следующие выводы: а) полезная мощ-
ность электротрактора на крюке составляет от 57 до 84% от
нальной мощности двигателя; б) соответственно мощности
самоперегрева — от 30 до 35%; в) очевидно, что
мощность трансформатора может быть взята не в 100,
75 kVA, как и предусматривалось проектом.

Сравнительная стоимость ремонта электротракторов
тракторов с двигателем внутреннего сгорания. Фактиче-
ские расходы на ремонт электротракторов и тепловых тра-
кторов в условиях Энгельской МТС характеризуются дан-
ными табл. 9.

Таблица 9

Год эксплуата-ции	Фактический расход по ремонту, руб. на 1 га выпашенной пашы		Расходы на ремонт электротрактора, % к расходам на тепловых тракторах
	тепловой трактор	электротрактор	
1938	8,28	0,82	9,9
1939	9,64	3,65	37,7
1940	6,07	6,27	103,0
1941	5,24	1,82	34,5
1942	4,25	0,99	11,9
1943	11,4	1,68	14,6

Всего за 6 лет	49,9	15,2	30,5
В средн. на га	8 р. 15 к.	2 р. 54 к.	

Фактические расходы на ремонт в условиях Энгель-
ской МТС по тепловому трактору в 2,4 раза превосходят расхо-
ды установленные нормами Наркомзема СССР, и в 3,2 раза вы-
ше расходов по ремонту электротракторов. Последние состав-
ляют не менее 75% установленных нормами НКЗ расходов
(3 р. 40 к.). При этом следует подчеркнуть, что такое со-
отношение получено с первыми опытными образцами элект-
ротракторов, изготовленными кустарно в условиях неспециали-
зованного (мотороремонтного), а не тракторостроитель-
ского завода. В них, как первых экспериментальных машинах,
сомненно, были допущены дефекты при изготовлении. С-
ледует отметить, что двигатели двух тепловых тракторов,
которые проводятся сравнение, за 6 лет прошли пять ка-
питальных ремонтов и 12 текущих ремонтов (т. е. на кажды-
й двигатель за 6 лет приходилось 2,5 капитального и 6 те-
кущих ремонтов). В то же время электродвигатели за ука-
занный период не ремонтировались ни разу. Шасси тракто-
ров ремонтировались три раза.

Затраты труда и подсобной тягловой силы при рабо-
те электро- и тепловых тракторов. Экономия в рабочей силе
подсобной тягловой силы при работе электротракторов по-
лучается за счет передачи электроэнергии по проводам, а та-
же из-за отсутствия у электротракторов потребности в
лаждающей воде. При работе тепловых тракторов необхо-
дима постоянная подвозка топлива и воды. Следует также отме-
тить, что электротракторы, потребляя на 70% меньше смазоч-
ных материалов по сравнению с тепловыми тракторами, уже
шаюг затраты и по этому виду перевозок.

Таблица 10

Требуется	Требуется при дру- гой паше двух тракто- ров	
	тепловых	электрических

а) Рабочая сила:		
Трактористов	4	4
Прицепщиков	4	4
Бригадиров	1	1
Учетчиков-заправщиков	1	—
Горючезовозов	2	—
Водовозов	2	—
Кухарок	1	1
Сторожей горючего	1	—

Всего:	16	10
или	100%	62,5%

б) Подсобная тягловая сила:		
Лошадей для бригадиров	1	1
Лошадей для подвозки горючего	4	—
Лошадей для подвозки воды	2	—

Всего	7	1
или	100%	14,3%

для установления количественной разницы в затратах на и подсобной тягловой силы при работе электротрактора и тепловых тракторов приведем сравнительный состав сад при двухсменной работе по данным Энгельской МТС (табл. 7).

Из табл. 10 видно, что при указанной организации сад для обслуживания электротракторов требуется на 5% меньше рабочей силы и в семь раз больше подсобной тягловой силы. Помимо этого сокращения потребного количества рабочих рук

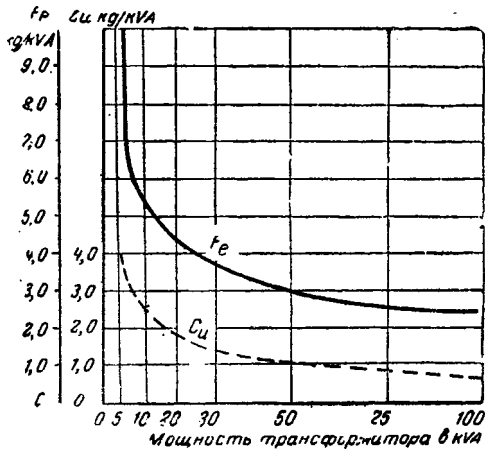


Рис. 2. Удельные расходы меди и железа в трансформаторах, по данным ГЭМ

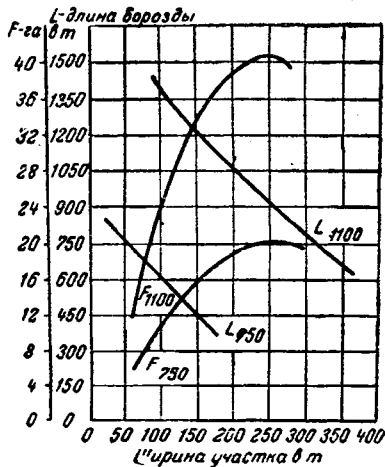


Рис. 3

следует также учитывать быстрый и простой пуск электродвигателя в ход, без каких-либо предварительных операций, а главное, без больших физических усилий, что обеспечивает полную возможность применения на электротракторах женского труда.

Потребность в материалах при внедрении электротракторов. Электрификация полеводства требует материальных вложений в виде меди и каучука. В табл. 11 приведены удельные и суммарные расходы указанных материалов в электродвигателях, кабеле, в передвижных трансформаторах и полевых электролиниях при электротракторах.

При разработке табл. 11 взяты следующие исходные данные: а) мощность двигателей электротрактора принята в 55 kW, на 1000 V рабочего напряжения с удельным расходом меди в 2,4 кг/кВт; б) кабель принят сечением 4×10, длиной в 1100 м с удельным расходом меди и каучука по данным ГЦМО; в) трансформатор для передвижной подстанции принят мощностью в 75 kVA с удельным расходом меди по данным ГЭМ (рис. 2); г) по 6- или 10-kV электролиниям взято сечение 10 мм² и на каждый электротрактор для годовой его загрузки принято 3 kW с возможностью обработать от них 600 га натуральных или 1800—2000 га условных на трактор. Площади, возможные к обработке от одного присоединения к сети при длине кабеля в 1100 м, а для сравнения и при длине кабеля в 750 м приведены на кривых рис. 3; затраты металла 35 kV электролиний здесь не учитываются; д) затрата меди в генераторах нами не учитывается потому, что электрификация полеводства не потребует до-

Расход материалов кг	По электротрактору		По электролебедкам	
	медь	каучук	медь	каучук
В двигателях				
На 1 kW	2,4	—	2,4	—
На 1 агрегат	132	—	264	—
На 1 га обрабатываемой земли	0,22	—	0,44	—
В кабеле				
На 1 пог. м	0,354	0,644	0,756	0,974
На 1 агрегат	339,4	708,4	831,6	1071,4
На 1 га обрабатываемой земли	0,65	1,18	1,38	1,78
В трансформаторах				
На 1 kVA	0,91	—	0,885	—
На 1 агрегат	68,0	—	88,5	—
На 1 га обрабатываемой земли	0,113	—	0,147	—
В электролиниях				
На 1 пог. м	0,267	—	0,267	—
На 1 агрегат	825	—	1650	—
На 1 га обрабатываемой земли	1,37	—	2,75	—
Суммарные затраты				
На 1 агрегат	1414,4	708,6	2834,0	1071,4
На 1 га обрабатываемой земли	2,357	1,18	4,72	1,78

полнительных генерирующих мощностей, как нагрузка, не участвующая в максимуме.

Для сравнения в той же таблице приводятся аналогичные данные по электролебедкам канатной тяги. Приведенные сравнительные данные в табл. 11 по затратах меди и каучука в электротракторах и электролебедках канатной тяги показывают, что электролебедки требуют двойного количества меди и полторного каучука по сравнению с электротракторами.

Если исходить из того, что электротракторный агрегат, для работы которого мы должны затратить по приведенным нормативам 1414 кг меди, обработает за год 1800 га условной пахоты, то: а) вложенная медь позволит заменить 30,6 т жидкого топлива местным топливом или гидроэнергией, или на каждую тонну вложенной меди освобождается для других потребителей 21,6 т жидкого топлива ежегодно; б) на каждую тонну вложенной меди будет освобождено из сельского хозяйства рабочей силы в количестве 200 человеко-дней и тягловая сила — 270 коней ежегодно.

Возможности использования существующих 6-kV электролиний для работы электротракторов. В целях выяснения реальных возможностей электрификации полевых работ от существующих 6-kV электролиний в качестве примера было проведено обследование колхозов и совхозов нескольких районов Московской области. При обследовании выяснилась следующая возможность использования уже имеющихся 6-kV фидеров сельскохозяйственного назначения для работы электротракторов (табл. 12).

Таблица 12

Районы	Количество 6-kV сельскохозяйственных фидеров в системе Моссельэлектро	Тротяженность 6-kV сетей, км		Процент возможного использования сетей для электротракторов	Количество колхозов, под которыми расположены волонеры	Земельная площадь под фидерами, га
		Общая	по полям колхозов			
Подольский	10	195	140	72	91	13 000
Ленинский	4	83	45	54,2	41	4 240
Краснопольск.	4	56	24	43,0	16	2 100
Всего	18	334	209	62,5	148	19,340

С учетом возможных к электрообработке площадей, от существующих 6-kV сетей других организаций, площадь полей в трех районах может составить 45—50% от всей площади полевой пашни в указанных районах.

За последнее время ряд краевых и областных организаций ставит вопрос о комплексной электрификации сельского хозяйства отдельных районов, группы районов и т. д. (Ленинград, Свердловск, Челябинск, Саратов и др.). Осуществление комплексной электрификации сельского хозяйства с включением электрификации полеводства и орошения обеспечит приемлемую плотность нагрузки и достаточно большое число часов использования основного электрооборудования, т. е. даст экономически эффективное решение. Следует при этом учитывать положительное влияние электрификации полеводства как нагрузки, выравнивающей годовой график электростанции и к тому же не требующей дополнительных генерирующих мощностей.

Выводы. 1. Впервые проведена сравнительно длительная работа электротракторов в условиях хозяйственной их эксплуатации, доказавшая возможность применения кабельного питания движущихся по полю тяговых машин на всем основном комплексе полевых сельскохозяйственных работ, с достаточно высокими производственными показателями и отличной оценкой качества их работы со стороны колхозников.

2. Весь электротракторный агрегат создан из оборудования массового производства отечественных заводов.

3. Преимущества электротрактора вытекают из принципиальных преимуществ короткозамкнутого электродвигателя, работающего в полевых условиях, по сравнению с двигателем внутреннего сгорания а именно:

а) Короткозамкнутый электродвигатель—самая простая, наиболее легкая и дешевая из машин, дающих механическую энергию, тогда как двигатель внутреннего сгорания—сложная конструкция, более тяжелая, дорогая и требующая большого ассортимента запасных частей.

б) Наличием всего одной вращающейся детали (ротора) объясняется большая надежность и большая долговечность работы электродвигателя в сравнении с тепловым двигателем.

в) С вращательным движением ротора связано сохранение высокого к. п. д. в течение всего срока работы электродвигателя, чего нет у теплового тракторного двигателя, двигателя поршневого типа.

г) Несравненно большая перегрузочная способность электродвигателя позволяет комплектовать прицепной агрегат на полную его мощность, что, как известно, не практикуется у тракторов с двигателем внутреннего сгорания.

д) При наличии электроэнергии на тракторе возможны: передача электроэнергии на сложные прицепные машины в целях их электрификации (комбайны, косилки и др.), любая

степень интенсивности освещения ночных работ, наибольшая простота, а во многом и автоматичность производства таких процессов, как пуск в ход, остановки, реверсирование, заплата и пр. Все это обеспечивает полную возможность использования для работы на электротракторах женского труда при более легком и отвечающем санитарно-гигиеническим требованиям обслуживании (отсутствие выхлопных газов, гарь шума и пр.).

4. Передача электроэнергии по проводам, освобождает около 40% персонала тракторных полевых бригад и в то же время в 7 раз уменьшает потребность в подсобной тягловой силе.

5. Оборонное значение электротракторов, базирующихся на местных энергоресурсах (торф, уголь, вода), заключается в высвобождении жидкого топлива и в разгрузке железнодорожного и речного транспорта от топливоперевозок для сельского хозяйства. Таким образом внедрение электротракторов приводит к качественному изменению топливного баланса в сельском хозяйстве и мобилизации местных энергоресурсов.

6. Ремонтные кампании тракторного парка в МТС даже перестали быть внутренним делом МТС. На проведение ремонтов тракторного парка требуются значительные затраты запасных частей и рабочей силы. В производство запасных частей включается значительная часть промышленности страны. Затраты по ремонту нередко в несколько раз превышают первоначальную стоимость машины.

Острота проблемы ремонта определяется главным образом факторами, заключающимися в природе современного тракторного двигателя внутреннего сгорания: его относительная недолговечность, относительно быстрая потеря мощности и т. д.

Все это наряду с другими факторами определяет актуальность изучения новой энергетической схемы полеводства и внедрения электротракторов.

Разумеется, речь идет в первую очередь о некоторых районах с активным электробалансом, с достаточно экономичными условиями электроснабжения, на базе местных топлив.

Организация сельскохозяйственного производства в этих районах в основном на базе электроэнергии, при гармоничном дополнении ее другими видами энергии, при надежности и относительной долговечности электротракторов приводит к единой энергобазе для полеводства и стационарных сельскохозяйственных работ, что в результате даст повышение производительности сельского хозяйства и производительности труда.

О значении дизель-электрической тяги в промышленном транспорте¹

Инж. А. Д. СТЕПАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В статье инж. А. Д. Степанова приводится сравнение эксплуатационных показателей паровозов, электровозов и тепловозов при работе их в промышленном транспорте, а также указываются конструктивные параметры различных промышленных локомотивов. Из анализа этих данных вытекают значительные преимущества дизель-электрической тяги, что подтверждается практикой США, где тепловозы в заказах промышленного транспорта и маневровой работе почти целиком вытеснили паровозы.

Дизель-электрическая тяга является самой молодой из трех основных видов тяги в железнодорожном транспорте: паровой, электрической и дизель-электрической. Первый маневровый тепловоз с электрической передачей всего 20 лет тому назад был пущен в эксплуатацию. Большие преимущества тепловоза в маневровой работе и в близкой к ней по характеру работе промышленного транспорта делают его в последние годы ведущим типом локомотива в этих областях.

Развитие тепловозов в США. Далеко не сразу дизель как источник движущей энергии получил признание на железных дорогах. Сложность производства и дороговизна ди-

зелей, необходимость промежуточной, переменной передачи между дизелем и ведущими осями, большой вес дизеля (40—50 кг/л. с.), необходимость в расходовании наиболее ценного и дорогого топлива—нефти,—все это заставляло железнодорожников скептически относиться к тепловозам в первые годы их применения, и очень многие еще недавно предсказывали, что только в отдельных специальных областях работы может быть оправдано применение тепловозов вместо паровозов и электровозов.

В дальнейшем, однако, развитие дизельной тяги приобрело широкий размах, и в мае 1943 г. американские инженеры Wilcox и Oehler в статье о выборе вида тяги пишут (Л. 1), что, начиная с 1935 г., тепловозы продвигаются вперед быстрее, чем каждый из их конкурентов, т. е. паровая и электрическая тяга в любой период их развития.

¹ По материалам доклада автора на конференции по промышленному транспорту, организованной Секцией по разработке научных проблем транспорта Академии наук СССР и Домом ученых в Москве в 1944 г.

Динамика заказов на локомотивы в США

Год заказа	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942
Паровозы	1 055	382	62	5	17	72	30	415	173	56	95	219	302	368
Электропоезда	95	21	91	0	0	76	7	24	36	29	32	13	38	12
Тепловозы	80	18	21	7	25	37	60	77	145	100	246	462	1 096	875
Всего	1 230	421	174	12	42	185	97	516	354	265	373	694	1 436	1 255

Таблица 2

Мощность в л. с.	до 600	601—1 000	1 001—2 000	2 001—3 000	3 001—4 000	> 4 000	Итого
Маневровые и промышленные	1 249	1 340	15	2	—	—	2 605
Товарные	3	17	52	9	—	140	221
Пассажирские	5	5	75	9	61	12	167
Всего	1 257	1 362	142	20	61	152	2 994

Таблица 3

Тип локомотива	Формула осей	Длительная мощность в л. с.	Рабочий вес в т	Макс. усилие на обод в кг	Макс. скорость км/ч
Тепловоз Alco-GE . .	0-2-0	150	22,5	6 800	32
Паровоз Одесского завода	—	140	27	4 500	29,4
Электропоезд 1 КП — 5Б .	0-2-0	ок. 180	21	6 000	40
Паровоз № 155 Коломенского завода	0-2-0	—	33	5 630	40
Тепловоз GE	0-2-2-0	380	40	12 000	56
Тепловоз Alco-GE . .	0-2-2-0	500	72	ок. 20 000	56
Паровоз ОБ с тендером	0-4-0	ок. 550	расч. 95	10 500	50
Тепловоз Alco-GE . .	0-2-2-0	1 000	104	31 000	96
Паровоз Э с тендером	0-5-0	ок. 1 100	85 + 52	16 132	55

Наибольшее развитие дизельная тяга получила в США, где она достигла высокого технического уровня. В последние 5—6 лет техническая пресса и научно-технические организации США проявляют большой интерес к проблемам выбора тяги для железных дорог и к дизельной тяге в частности. В Американском институте инженеров-электриков, в Американском институте инженеров-механиков, в Американской ассоциации железнодорожных инженеров неоднократно ставились и обсуждались на конференциях доклады на эти темы и собраны богатые статистические материалы, позволяющие сравнивать различные виды тяги.

В связи с этим представляется весьма интересным проледить развитие дизельной тяги и определить ее значение для промышленного транспорта по данным США.

В табл. 1 приведены данные о количестве локомотивов, оказывавшихся ежегодно железными дорогами, индустриальными фирмами и правительством в США, взятые из январских номеров журнала *Railway Age* за ряд лет.

Из табл. 1 видно, что после периода резкого упадка 1930—1935 гг. наблюдается тенденция увеличения ежегодных заказов на локомотивы и что это увеличение идет в основном за счет тепловозов. Еще более интенсивно идет процесс вытеснения паровозов тепловозами в промышленном транспорте. Так, например, из 327 промышленных локомотивов, за-

казанных промышленностью США в 1942 г., было 312 тепловозов.

В табл. 2 приведено распределение заказанных до 1943 г. тепловозов по роду службы и мощности. Из таблицы видно, что подавляющее большинство тепловозов предназначено для маневровой и промышленной службы. Мощные тепловозы для пассажирского движения стали вводиться лишь в последнее десятилетие, товарные же тепловозы стали применяться всего 3—4 года тому назад.

Основные параметры промышленных тепловозов США. Столь крупный успех тепловозов, в особенности в маневровой службе и промышленном транспорте, объясняется их высокими техническими достоинствами и экономическими показателями.

Ряд ведущих локомотивостроительных фирм США — General Motor, American Locomotive в кооперации с General Electric Co, Baldwin Co в кооперации с Westinghouse и др. — разработал серии стандартных промышленных тепловозов, в которых учтен уже накопленный опыт эксплуатации и применены многочисленные усовершенствования в конструкции дизелей, электрооборудования и механической части. Все современные тепловозы делаются с электрической передачей. Применявшаяся ранее механическая зубчатая передача подвержена сильному износу и повреждениям, приводит к потере силы тяги и резким ударам при переходе с одной скорости на другую, требует высокой квалификации машиниста, снижает использование мощности дизеля вследствие ступенчатой характеристики и т. д. Электрическая передача не только устраняет все перечисленные выше недостатки, но и добавляет целый ряд новых преимуществ, из которых главными являются более широкие пределы регулирования силы тяги и скорости, высокая степень автоматизации управления и защиты оборудования, что делает крайне простым управление и резко повышает надежность работы при обслуживании тепловоза одним человеком, а также обеспечивает плавный пуск и регулирование скорости, электрический запуск дизеля и т. д.

В табл. 3 приведены основные данные некоторых промышленных локомотивов, имеющих применение в СССР, и промышленных тепловозов, выпускаемых фирмами Alco-GE в США.

Высокие тяговые свойства тепловозов особенно эффективны в промышленном транспорте, где наиболее частым режимом работы являются короткие передвижки больших грузов при небольших скоростях. Мощность паровоза, выбираемого по условиям сцепления, не используется полностью, отчего к. п. д. падает; в тепловозе же мощность и вес используются полностью.

Существенным для промышленного транспорта является минимальный радиус кривой, в которую может вписываться локомотив. В этом отношении преимущество также остается за тепловозами, вписывающимися в кривые радиуса 12—15 м, в то время как специальные промышленные паровозы требуют радиуса не меньше 40 м, а крупные паровозы О^В и Э — свыше 140 м.

Преимущества и недостатки тепловозов. Рассмотрим основные технико-экономические показатели локомотивов.

1. Коэффициент полезного действия. В отношении к. п. д. тепловоз, в котором применен самый совершенный тепловой двигатель-дизель, стоит вне конкуренции.

По американским данным средний к. п. д. промышленных паровозов составляет 2—3%. В СССР, как указал в своем докладе академик В. Н. Образцов, промышленные паровозы имеют эксплуатационный к. п. д. 1,5—2%. Магистральные электропоезда при тягании от тепловых электростанций имеют к. п. д. 14—16%. В промышленном транспорте к. п. д. электропоездов снижается вследствие потерь в

реостатах, во время частых пусков и на малых скоростях и, можно полагать, достигает в среднем около 10%. Магистральные тепловозы имеют к. п. д. 27—29%, промышленные, по американским данным,—в среднем 22%. К. п. д. мотовозов составляет 15—17%.

Таким образом в промышленном транспорте к. п. д. тепловоза в 10—12 раз выше, чем паровоза, в 2 раза выше, чем электровоза, и приблизительно в 1,5 раза выше мотовоза.

Коэффициент использования. Паровозы требуют только на промывку и ревизию котла около 20% всего времени эксплуатации. По американским данным общий коэффициент использования времени паровоза на магистральной работе составляет около 70%, в промышленном транспорте он снижается до 40—60%. Коэффициент использования времени тепловоза и электровоза достигает 90—95%, т. е. в 1,5—2 раза выше, чем паровоза. К этому следует добавить более благоприятные пусковые и тяговые характеристики.

Расход топлива. Несомненно, самым крупным недостатком тепловоза является потребление им наиболее ценного вида топлива — нефти. В этом отношении паровоз, который потребляет главным образом уголь, включая местные дешевые сорта его, имеет безусловное преимущество перед тепловозом. В еще большей степени это относится к электрической тяге, при которой энергия получается от электрических станций, расходующих такие дешевые сорта топлива, как торф, угольная пыль и т. п., и в особенности от гидроэлектрических станций, вырабатывающих энергию без расхода топлива. С другой стороны, расход топлива тепловоза гораздо ниже, чем электровозов и в особенности паровозов.

По данным Секции по разработке научных проблем транспорта Академии наук СССР на магистральных железных дорогах НКПС средний расход условного топлива (7000 Cal) в паровозах при средневзвешенном к. п. д. паровозного котла составляет 370 кг/10⁴ ткм. В промышленном транспорте, где к. п. д. паровоза в 3—4 раза ниже, расход топлива возрастает до 1000—1500 кг/10⁴ ткм.

Магистральные электровозы при питании от тепловых станций потребляют около 100 кг/10⁴ ткм. В промышленном транспорте, учитывая пониженный к. п. д., следует ожидать потребления топлива около 150 кг/10⁴ ткм.

Тепловозы Ашхабадской ж. д. за 1937—1942 гг. показали средний расход условного топлива 60 кг/10⁴ ткм. Для условий промышленного транспорта, как можно полагать, расход топлива составит 70—80 кг/10⁴ ткм.

При таком соотношении может оказаться более выгодным перерабатывать уголь в жидкое топливо и питать им тепловозы, чем непосредственно сжигать уголь в паровозе. Например, по данным проф. Некрасова при гидрировании угля из 1 т угля получается 140—160 кг бензина.

Стоимость эксплуатации. В заграничной печати приводится много данных о сравнительной стоимости эксплуатации тепловозов и паровозов в различных областях работы. Так, в докладе А. Н. Candee о работе локомотивов на сталелитейных заводах США (Л. 2) приводятся следующие средние за 15 лет работы, расходы в долларах за час работы локомотивов одинаковой мощности:

	Паровоз	Тепловоз
Зарплата машиниста	0,940	0,940
„ кочегара	0,730	0
Топливо	0,656	0,178
Ремонт	1,690	0,730
Вода, смазка, помещение и т. п. . .	0,560	0,120
Полная стоимость 1 ч эксплуатации	4,576	1,968
Амортизация	0,490	0,975
Итого	5,066	2,943

Таким образом расходы на эксплуатацию тепловозов в 1,5—1,6 раза меньше, чем паровозов.

По данным Ашхабадской ж. д. стоимость эксплуатации советских тепловозов 2-5-1 составляет 60—66% стоимости эксплуатации паровозов СО^к. Пробег тепловозов между ремонтами в 1,5—2 раза больше, чем у паровозов СО^к.

Первоначальные затраты. В США стоимость паровозов составляет 30—35 долларов на 1 л. с. установленной мощности, стоимость же промышленных тепловозов равняется 55—70 долларам за 1 л. с.; таким образом тепловозы стоят приблизительно вдвое дороже паровозов. Следует, однако, принять во внимание, что один тепловоз заменяет 1,5—2 паровоза такой же мощности и что затраты на постройку обслуживающих помещений: депо, топливные склады, водоснабжение и пр., при тепловозной тяге значительно меньше, чем при паровозной. Поэтому в ряде случаев и общим первоначальным затратам тепловозная тяга может оказаться более дешевой, чем паровозная.

Вес локомотива. По данным американской печати (Л. 3) средние веса магистральных локомотивов, отнесенные к единице установленной длительной мощности, составляют: паровоз, включая тендер, 85—100 кг/л. с., тепловоз 68—72 кг/л. с., электровоз 45—55 кг/л. с.

Локомотивы промышленного транспорта, которые должны развивать высокие усилия тяги при относительно малых мощностях, имеют, как правило, значительно больший вес. Удельный вес промышленных локомотивов приблизительно равен: паровоз, включая тендер, 120—170 кг/л. с., тепловоз 105—150 кг/л. с., электровоз 80—120 кг/л. с.

Расход воды. Тепловоз требует воды лишь для охлаждения дизеля, и так как система охлаждения имеет замкнутую циркуляцию, — расход воды ничтожен.

Управление. В современных тепловозах регулирование скорости производится автоматически так, что мощность дизеля поддерживается постоянной. Все управление производится рукояткой реверсора, с помощью которой машинист выбирает направление движения, и рукояткой подачи топлива, которой машинист пользуется при пуске. По управлению тепловоз является самым простым локомотивом. Промышленные тепловозы в США обслуживаются одним человеком. Схема электровоза сложнее, чем тепловоза, и управление им требует большей квалификации.

Соображения о применении тепловозов в промышленном транспорте СССР. После войны со всей остротой возник вопрос о коренной реконструкции локомотивного хозяйства промышленного транспорта. Поэтому выбор типов промышленных локомотивов является важной народнохозяйственной проблемой.

Основными возражениями против широкого применения тепловозов в СССР были их высокий вес, высокая стоимость и потребление ими нефти. Как было показано выше, резкое снижение веса дизеля и электрооборудования, которое было достигнуто за последние годы в США, привело к тому, что вес тепловозов стал ниже, чем вес паровоза с тендером.

По стоимости, однако, тепловозы значительно дороже паровозов, тем не менее общие первоначальные затраты при оборудовании тепловозной тягой новых предприятий оказываются не выше, а нередко и ниже, чем при паровозной тяге. Следует к тому же учесть, что по американским и английским данным одна только экономия в эксплуатационных расходах при тепловозной тяге по сравнению с паровозной окупает за несколько лет полную стоимость тепловозов. Опыт эксплуатации советских тепловозов в Средней Азии полностью подтверждает это.

Тепловоз в условиях работы промышленного транспорта имеет эксплуатационный к. п. д. в 10—12 раз выше, чем паровоз. Это значит, что если заменить весь локомотивный парк промышленного транспорта тепловозами, то будет сэкономлено не только все количество угля, потребляемое промышленностью и паровозами, но и будет, кроме того, сокращен расход нефти, так как часть промышленных паровозов работает на нефти.

Разработка конструкций промышленных тепловозов является неотложной задачей промышленности. Необходимо разработать серии тепловозов различной мощности от 150 до 1000 л. с. Целесообразно также более подробно ознакомиться с современной практикой эксплуатации дизель-электрического промышленного транспорта в США.

Литература

1. Wilcox и. Oehler, El. Eng., № 5, 1943.
2. Candel A. H. Iron and Steel Engineer, № 3, 1936.
3. El. Eng., № 4, 1940.

Закон электромеханического подобия и универсальные диаграммы переходных процессов электродвигателей постоянного тока

Профессор, инж.-капитан 1 ранга В. И. ПОЛОНСКИЙ

Военно-морская академия им. Ворошилова

Существующие методы расчета переходных процессов в электродвигателях отличаются своей сложностью и не дают достаточно точных решений. Автор предлагает новый метод расчета, который основан на сформулированном им законе электромеханического подобия и применении разработанных им универсальных диаграмм переходных процессов в электродвигателях постоянного тока. Статья печатается в порядке обсуждения.

Несмотря на все более и более возрастающее значение переходных процессов при работе электродвигателей в современных установках и необходимость расчета этих сложных процессов, до сих пор еще не существует достаточно удобных и четких методов. Наиболее изученной является область переходных процессов шунтовых электродвигателей постоянного тока, например (Л. 1—3). Однако даже для этих электродвигателей предложенные ранее методы расчета переходных процессов еще не вполне совершенны и точны, так как требуют целого ряда допущений, например, допущения постоянства магнитного потока, постоянства значения коэффициента самондукции главной цепи.

При всем, однако, разнообразии существующих аналитических и графических методов расчета переходных процессов в электродвигателях постоянного тока им свойственны следующие общие недостатки: 1) громоздкость и сложность расчетов, вызывающие большие затраты времени и труда, 2) неточность получаемых результатов, обусловливаемая указанными выше допущениями и пренебрежениями, 3) неуниверсальность применяемых до настоящего времени методов, характеризующая тем, что для каждого типа электродвигателей используются различные методы решения проблемы.

Анализируя указанные недостатки, автор настоящей статьи пришел к заключению, что основной причиной этих недостатков является то, что применяемые до сих пор методы базируются на математических зависимостях, построенных в функции времени. Нелинейный характер этих зависимостей, вызываемый влиянием насыщения железа, токами Фуко, реакцией якоря и другими факторами, органически связан с этими недостатками, которые в силу этого не могут быть изжиты при прежних способах подхода к решению. Для преодоления всех трех групп недостатков необходимо в корне изменить характер подхода к разрешению проблемы расчета переходных процессов в электродвигателях вообще, и электродвигателях постоянного тока, в частности.

Основой изысканий новых более совершенных методов для расчета переходных режимов должно, в первую очередь, служить стремление освободиться от необходимости интегрирования дифференциальных уравнений. Во вторую очередь следует придать новому методу достаточно широкую обобщенность и, следовательно, универсальность.

Автор предлагает, что наиболее удобным методом для решения проблемы расчета переходных процессов в электродвигателях является предлагаемый им закон электромеханического подобия переходных процессов и разработанные на базе этого закона универсальные диаграммы переходных процессов.

Электромеханическое подобие переходных процессов электродвигателей постоянного тока. В гидродинамике, акустике, термодинамике и других областях знаний на протяжении уже многих десятилетий установились понятия о подобии явлений и процессов и существует целый ряд методов (например метод Фруда, метод Рейнольдса, метод Нуссельта и др.) для использования этих подобий при решении инженерных и физических задач.

Истоки вопроса о подобии физических явлений, как известно, восходят еще ко второй половине семнадцатого столетия. Первые соображения о подобии физических явлений были высказаны Марпоттом в 1679 г. в одном из его трактатов (Л. 4). Уже Ньютоном были разработаны первые основы кинематического и динамического подобия. В его знаменитом трактате Principia (Л. 5) отчетливо сформулированы необходимые требования для обозначения механического

подобия. После Ньютона на протяжении довольно длительного периода идеи о подобии физических явлений не привлекали исследователей и только примерно с середины девятнадцатого столетия целый ряд ученых обратился к изучению этой области. Некоторые из наиболее известных их работ приведены в перечне литературы в конце настоящей статьи (Л. 6—16). В последнее время благодаря трудам академика М. В. Кирпичева теория подобия начала широко применяться в области моделирования тепловых устройств.

Попытки установления понятий о подобии и аналогиях делались одновременно различными исследователями и в области электротехники. В качестве примеров можно указать на работы Forbes, Gorman, Nickle, Brainerd, Neufeldt (Л. 17—19), работы Национальной физической лаборатории в Англии, Бюро стандартов в США и др. В отличие от упомянутых выше областей здесь удалось пока разработать и развить, главным образом, идеи об электромеханических аналогиях, которые дают в настоящее время возможность производить расчеты и проверки в отношении электрических машин и электроэнергетических систем. Значительно меньше сделано пока в области электромеханического моделирования и установления законов электромагнитного и электромеханического подобия.

В наиболее общей форме зависимости электрических и электромагнитных подобий были предложены Brainerd и Neufeldt в виде следующих условий подобия:

$$\mu_1 \omega_1 A_1 = \mu_2 \omega_2 A_2, \quad (1)$$

$$\mu_1 k_1 \omega_1^2 A_1^2 = \mu_2 k_2 \omega_2^2 A_2^2. \quad (2)$$

Первое условие подобия относится к явлениям, для которых можно пренебречь токами смещения, второе условие — для случаев, когда можно пренебречь токами проводимости. В выражениях (1) и (2) приняты следующие обозначения: μ — магнитная проницаемость, γ — удельная проводимость, k — диэлектрическая постоянная, $\omega = 2\pi f$ — угловая скорость вращения, f — частота, A , c_1 и c_2 — постоянные коэффициенты.

Выражения (1) и (2) для условия подобия имеют локальный характер и потому не получили практического применения, но они весьма интересны, как первые шаги на пути установления общих электротехнических методов подобия.

Отметим основные моменты сходства и различия между подобиями электрического и неэлектрического характера.

Чрезвычайно важный в практическом отношении момент сходства заключается в том, что эти методы дают возможность решать инженерные проблемы, связанные как с установленными, так и не установленными явлениями без интегрирования дифференциальных уравнений, путем сравнительно простых математических операций. Сходство между методами подобия обоих типов заключается также в возможности дифференцирования их по грациям сложности.

Изучение области подобия механических систем показывает, что подобия в этих системах могут быть большей или меньшей сложности или, как мы бы сказали, более или менее высокого ранга. Чем сложнее характер подобия и чем, следовательно, выше его ранг, тем требуется выполнение большего количества условий для обозначения такого подобия. Если условиться, что добавление каждого нового условия повышает ранг на единицу, то можно было бы принять, что номер ранга определяется числом необходимых условий. В качестве иллюстрации высказанных соображений может служить табл. I, где приведено распределение по рангам нескольких видов подобия механических систем.

Таблица 1

Вид подобия	Условия для выполнения подобия	Основные константы подобия	Ранг подобия
1. Геометрическое подобие	$c_l = \text{const}$	$c_l = \text{const}$	1
2. Кинематическое подобие	$c_l = \text{const}; c_v = \text{const}$	$c_l = \text{const}; c_\tau = \text{const}$	2
3. Механическое подобие	$c_l = \text{const}; c_v = \text{const}; c_p = \text{const}$	$c_l = \text{const}; c_\tau = \text{const}; c_m = \text{const}$	3
4. Термодинамическое подобие	$c_l = \text{const}; c_v = \text{const}; c_p = \text{const}; c_\theta = \text{const}$	$c_l = \text{const}; c_\tau = \text{const}; c_m = \text{const}; c_\theta = \text{const}$	4

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения:

$$c_l = \frac{l_1}{l_2}; c_v = \frac{v_1}{v_2}; c_\tau = \frac{\tau_1}{\tau_2}; c_p = \frac{p_1}{p_2}; c_m = \frac{m_1}{m_2}; c_\theta = \frac{\theta_1}{\theta_2},$$

где индексы 1 и 2 относятся к первой и второй системам подобия, l — длина, v — скорость, τ — время, p — массовая плотность, m — масса, θ — температура соответствующих друг другу элементов.

Электрические и электромеханические подобия также следуют до некоторой степени особенностям подобия механических систем в отношении рангов сложности. Для иллюстрации рассмотрим соотношения между критериями электрокинетического и электромеханического подобия.

Найдем сначала критерий электрокинетического подобия. Для этого составляем табл. 2 харак-

Таблица 2

Название величины	Символ	Формула размерности
Скорость вращения	ω	$[T^{-1}]$
Сила тока	i	$[M^{1/2} L^{1/2} T^{-1}]$
Сопротивление	R	$[L T^{-1}]$
Коэффициент самоиндукции	L	$[L]$

теристик цепи якоря электродвигателя постоянного тока в кинетическом и электрическом отношениях. Обозначив критерий или инвариант подобия через Z и напомним для него выражение, связывающее его функционально с вышеприведенными символами.

$$z = \omega i^a R^\beta L^\gamma. \quad (3)$$

Подставляя в выражение (3) вместо символов их размерности, получим

$$z = [T^{-1}] \left[M^{\frac{a}{2}} L^{\frac{a}{2}} T^{-a} \right] [L^\beta T^{-\beta}] [L^\gamma]. \quad (4)$$

Принимая во внимание безразмерный характер инвариантов подобия, получаем систему уравнений

$$\frac{a}{2} = 0; \quad \frac{a}{2} + \beta + \gamma = 0; \quad -1 - a - \beta = 0, \quad (5)$$

откуда получаем: $a = 0; \beta = -1; \gamma = 1$. Таким образом имеем: $z = \omega \frac{L}{R}$. (6)

Из табл. 2 видно, что полученный инвариант подобия связан с физическими величинами, имеющими в качестве составных размерностей длину (L) и время (T), поэтому вид подобия можно отнести к группе подобий 2-го ранга.

Если обратиться к подобиям электромеханического характера, то, как будет показано ниже, инварианты подобия будут иметь следующую структуру:

$$x = \frac{U R i}{L J \omega^4}, \quad z = \omega \frac{L}{R}, \quad (7)$$

$$y = \frac{R^4 J i^2}{L^3 M^2 \omega^2}, \quad \omega = \frac{L^3 J^2}{R^2 J}.$$

За исключением инварианта подобия z все остальные инварианты системы (7) связаны с размерностями, в состав которых входят длина $[L]$, масса $[M]$ и время $[T]$, почему вид подобия электромеханического характера можно отнести

к группе подобий 3-го ранга. Следовательно, можно констатировать, что и для электрических систем при переходе к подобиям электрокинетического характера к подобию электрокинетического ранг подобия повышается на единицу. В то же время наблюдается некоторое сходство механических и электрических систем.

Наряду с этим сходством имеется и существенное различие.

Характерной особенностью подобий электрокинетического и электромеханического характера является то обстоятельство, что они не требуют обязательного соблюдения геометрического подобия. Действительно, если мы вместо выражения (3) написали бы для инварианта подобия z , выражаемого в более сложной форме, введя дополнительный множитель, характеризующий линейные размеры якоря электродвигателя, т. е. положили бы

$$z = \omega i^a R^\beta L^\gamma \delta,$$

то получили бы при тех же значениях показателей $\delta = 0$, привело бы нас к прежней структуре инварианта подобия $z = \omega \frac{L}{R}$, аналогичной выражению (6).

Это положение имеет чрезвычайно важное практическое значение, так как позволяет получать подобие электромеханических процессов, происходящих в двигателях, при отсутствии у них геометрического подобия. Если бы этого не было, то ввиду отсутствия у реально строящихся электродвигателей геометрического подобия мы не имели бы и для них, очевидно, и подобных электромеханических процессов.

Закон электромеханического подобия? Прежде чем переходить к установлению условий электромеханического подобия переходных процессов в электродвигателях постоянного тока, отметим важное принципиальное отличие в характеристиках подобия стационарных и нестационарных режимов. В случае явлений стационарного характера каждый инвариант подобия, независимо от времени, имел бы постоянное численное значение для всех подобных между собой систем. При этом каждый процесс для любой из подобных систем характеризовался бы некоторой вполне определенной точкой, если бы для характеристики воспользоваться координатами. В зависимости от числа инвариантов, характеризующих процесс, система координат имела бы большую или меньшую сложность. Для явлений, характеризующихся всего одним инвариантом, характеристическая точка расположилась бы на единственной оси. В случае наличия двух инвариантов координатная система представляла бы собой плоскость. Следовательно, с тремя инвариантами соответствовал бы пространственный координатный систем. Можно представить еще более сложные случаи с числом инвариантов $m > 3$, что приводит к пространственным координатным системам с m измерениями. Однако для любых систем координат каждый стационарный процесс будет характеризоваться всего лишь одной точкой.

Другая картина получится в случае процессов нестационарного, переходного характера. В этом случае, хотя для соответственных моментов времени инварианты подобия будут у подобных процессов одинаковы, однако численное значение будет во времени изменяться. Поэтому если обратиться к координатным системам и откладывать по координатным осям значения инвариантов, отвечающие соответственным друг другу моментам времени, то вместо одной характеристической точки получаются кривые, которые можно назвать характеристиками переходных процессов.

Пользуясь понятием о характеристиках переходных процессов, можем закон электромеханического подобия выразить в следующей форме:

Два переходных процесса электродвигателей постоянного тока являются электромеханически подобными между собой, если они изображаются одной и той же характеристикой переходных процессов.

Первым основным вопросом на пути выявления особенностей электромеханического подобия переходных процессов является установление факторов, влияющих на течение этих процессов в электродвигателях постоянного тока. В качестве таких факторов, которые мы назовем параметрами, могут служить три величины конструктивного характера R, L, J , четыре эксплуатационных фактора U, i, ω и M .

* Характерные особенности закона электромеханического подобия универсальных диаграмм переходных процессов электродвигателей постоянного тока были первоначально разработаны автором в период 1939-1941 гг. и изложены в его докладе на Научно-технической конференции 5-го факультета Военно-морской академии им. Ворошилова в 1942 г.

Составим таблицу размерностей для выбранных нами факторов (табл. 3).

Из таблицы видно, что число символов превышает на 10 число величин, характеризующих размерности. Отсюда следует, что число независимых друг от друга инвариантов подобия равно также четырем.

Т а б л и ц а 3

Фактор	Символ	Формула размерности
Сопротивление главной цепи	R	$[LT^{-1}]$
Коэффициент самоиндукции этой цепи	L	$[L]$
Момент инерции вращающихся частей электропривода	J	$[ML^2]$
Напряжение сети	U	$[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}]$
Момент сопротивления на валу якоря	M	$[ML^2 T^{-2}]$
Сила тока в якоре	I	$[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}]$
Скорость его вращения	ω	$[T^{-1}]$

С целью облегчения расчетных операций нам выгодно, чтобы структура инвариантов подобия позволяла сравнительно легко находить по известным величинам инвариантов численные величины отдельных параметров электродвигателя. Поэтому структура инвариантов должна быть выбрана, если это представляется возможным, с последовательным нарастанием числа параметров, подлежащих определению. Принимая во внимание, что инварианты электромеханического характера имеют высокого ранга и потому более сложны для вычисления, нам необходимо стремиться число инвариантов этого рода иметь возможно малым, достаточным лишь для определения параметров электромеханического характера. Так как, например, таких параметров (табл. 3) имеется всего два, а именно U и M , то наименьшее желательное число электромеханических инвариантов подобия также равно двум. Такие инварианты могут быть электрокинетического характера, т. е. менее сложной структуры.

Найдем сначала выражения для инвариантов подобия электрокинетического характера. В рассматриваемой проблеме нас особенно интересуют величины i и ω . Выберем поэтому показатели для ω и i произвольно, как основу для расчета остальных.

Известная П-теорема Букингема показывает, что существуют независимые системы показателей, которые могут быть приписаны ω и I , причем эти системы могут быть выбраны бесконечным числом способов. Логика вещей показывает, что целесообразнее всего выбрать две простейшие системы, одна из которых будет содержать в первой степени только i , вторая только ω . Обозначая электрокинетические инварианты подобия через z и w , можно таким образом по-

$$z = \omega R^{\alpha_1} L^{\beta_1} J^{\gamma_1} \quad (9)$$

$$w = IR^{\alpha_2} L^{\beta_2} J^{\gamma_2} \quad (10)$$

Заменяя в выражениях (9) и (10) параметры через размерности, соответственно получим:

$$\text{Для } z \left[T^{-1} \right] \left[L^{\alpha_1} T^{-\alpha_1} \right] \left[L^{\beta_1} \right] \left[M^{\gamma_1} L^{2\gamma_1} \right].$$

$$\text{Для } w \left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2} \right] \left[L^{\alpha_2} T^{-\alpha_2} \right] \left[L^{\beta_2} \right] \left[M^{\gamma_2} L^{2\gamma_2} \right].$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= 0, \\ \alpha_1 + \beta_1 + 2\gamma_1 &= 0, \\ -1 - \alpha_1 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11) \quad \left. \begin{aligned} \frac{1}{2} + \gamma_2 &= 0, \\ \frac{1}{2} + \alpha_2 + \beta_2 + 2\gamma_2 &= 0, \\ -1 - \alpha_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Корни уравнений систем (11) и (12)

$$\alpha_1 = -1; \beta_1 = 1; \gamma_1 = 0 \quad \alpha_2 = -1; \beta_2 = \frac{3}{2}; \gamma_2 = -\frac{1}{2}.$$

Таким образом структура инвариантов подобия z и w

$$\text{получилась в виде } z = \omega \frac{L}{R} \text{ и } w = \frac{L^{\frac{3}{2}} i}{R J^{\frac{1}{2}}}.$$

Придавая для инварианта w более удобную квадратичную форму, чтобы избавиться от дробных степеней, получим:

$$z = \omega \frac{L}{R} \text{ и } w = \frac{L^2 i^2}{R^2 J}. \quad (13)$$

Найдем далее выражения для инвариантов электромеханического характера. В качестве параметров с произвольными показателями возьмем в этом случае U и M . Обозначив искомые инварианты подобия через x и y , получим:

$$x = UR^{\alpha_3} L^{\beta_3} J^{\gamma_3} \omega^{\epsilon_3}, \quad (14)$$

$$y = MR^{\alpha_4} L^{\beta_4} J^{\gamma_4} \omega^{\epsilon_4}. \quad (15)$$

Размерности для компонентов x и y в развернутом виде равны

$$\text{Для } x \left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2} \right] \left[L^{\alpha_3} T^{-\alpha_3} \right] \left[L^{\beta_3} \right] \left[M^{\gamma_3} L^{2\gamma_3} \right] \left[M^{\frac{\epsilon_3}{2}} L^{\frac{\epsilon_3}{2}} T^{-\epsilon_3} \right].$$

$$\text{Для } y \left[M L^2 T^{-2} \right] \left[L^{\alpha_4} T^{-\alpha_4} \right] \left[L^{\beta_4} \right] \left[M^{\gamma_4} L^{2\gamma_4} \right] \left[M^{\frac{\epsilon_4}{2}} L^{\frac{\epsilon_4}{2}} T^{-\epsilon_4} \right].$$

Отсюда получаем системы определяющих уравнений.

$$\left. \begin{aligned} \text{Для } x \\ \frac{1}{2} + \gamma_3 + \frac{\epsilon_3}{2} &= 0, \\ \frac{3}{2} + \alpha_3 + \beta_3 + 2\gamma_3 + \frac{\epsilon_3}{2} &= 0, \\ -2 - \alpha_3 - \epsilon_3 - 2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Для } y \\ 1 + \gamma_4 + \frac{\epsilon_4}{2} &= 0, \\ 2 + \alpha_4 + \beta_4 + 2\gamma_4 + \frac{\epsilon_4}{2} &= 0, \\ -2 - \alpha_4 - \epsilon_4 - 2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Отсюда корни уравнений (16) и (17) будут равны

$$\alpha_3 = 1; \beta_3 = -1; \gamma_3 = -1, \quad \alpha_4 = -2; \beta_4 = \frac{3}{2}; \gamma_4 = -\frac{1}{2}; \\ \epsilon_3 = 1; \epsilon_4 = -4. \quad \delta_4 = -1; \epsilon_4 = 1.$$

Следовательно,

$$x = \frac{URI}{LJ\omega^4}, \quad (18) \quad y = \frac{R^4 J^2}{L^3 M^2 \omega^2}. \quad (19)$$

Обращаясь к выражениям (13), (18) и (19), можно заметить, что для целей определения численных величин по инвариантам подобия интересующих нас эксплуатационных факторов ω и i нам достаточно ограничиться лишь тремя из найденных инвариантов. Это обстоятельство создает значительные удобства, так как позволяет при построении пространственных характеристик оставаться в пределах трехмерных координатных систем. В качестве используемых в дальнейшем инвариантов подобия остановим свой выбор на инвариантах x, y и z , удовлетворяющих поставленному выше требованию последовательности нарастания числа неизвестных факторов ω, I и M .

Во многих случаях для получения большей наглядности при изучении особенностей характеристик переходных процессов удобнее будет переходить от пространственных координат к плоскостным. В этом случае условимся заменять пространственные характеристики в системе координат x, y, z двумя системами характеристик $y = f_1(x)$ и $z = f_2(x)$.

Ближайшее ознакомление с характеристиками переходных процессов показывает, что помимо электродвигателей, у которых наблюдается совпадение пространственных характеристик переходных процессов в системе x, y, z , имеются электродвигатели, процессы которых характеризуются лишь

совпадением порознь или характеристик $y=f_1(x)$, или $z=f_2(x)$. Группы таких переходных процессов, у которых обеспечивается совпадение не самих пространственных характеристик, а только цилиндрических поверхностей, на которых расположены эти характеристики, будем называть квазиподобными.

Перейдем теперь к рассмотрению особенностей характеристик переходных процессов.

Характеристики и универсальные диаграммы переходных процессов электродвигателей постоянного тока, построенных предложенным нами способом в виде систем кривых $y=f_1(x)$ и $z=f_2(x)$, показывает, что они обладают целым рядом замечательных свойств.

Первое их замечательное свойство состоит в том, что для нагрузочных моментов, изменяющихся по одному и тому же закону, характеристики эти, в пределах практических границ их использования, не пересекаются между собой. Это обстоятельство имеет чрезвычайно важное значение, так как открывает возможность для широкого промышленного использования этих характеристик при расчетах переходных режимов в электродвигателях. Действительно, если заранее установить известные категории типовых нагрузок в пределах переходных режимов, то можно для этих нагрузок построить раз навсегда диаграммы переходных процессов, которые позволят весьма легко, как показано будет ниже, определять для любого электродвигателя изменение сначала инвариантов x, y и z , а затем по ним и численные значения зависимостей $\omega = \varphi_1(t)$ и $i = \varphi_2(t)$.

Принимая во внимание, что разгон и торможение даже быстроходных электродвигателей происходят на промежутке не более 2—3 оборотов, можно остановиться на нагрузках, как на наиболее типичных, имеющих скоростные зависимости, т. е. на нагрузках следующих классов:

1. $M = k_0 \omega^2 = k_0 = \text{const}$ — нагрузки нулевого класса.
2. $M = k_1 \omega$ — нагрузки первого класса.
3. $M = k_2 = \omega_2$ — нагрузки второго класса.

Нагрузки в функции пути и угла в подавляющем большинстве случаев, в силу высказанных выше соображений, можно отнести в пределах переходных процессов к нагрузкам нулевого класса. Таким образом достаточно будет иметь в виду всего три серии нагрузок, чтобы охватить все случаи пуска и торможения электродвигателей, имеющие практический характер.

Диаграмма рис. 1 дает картину семейства характеристик переходных процессов, вычисленных аналитически для нагрузок 1-го класса. Эти характеристики, именуемые универсальной диаграммой переходных процессов, для большей компактности представлены в логарифмических шкалах. Интересно отметить одно характерное обстоятельство, вытекающее из общей структуры инвариантов x и y . Если обратиться к выражениям (18) и (19), то можно видеть, что в случае нагрузок следующих зависимостей $M = k_3 \omega^2$ отношение

$$\frac{y}{x^3} = \left(\frac{R^4 J i^2}{L^3 M^2 \omega^3} \right) : \left(\frac{U R i}{L J \omega^4} \right)^2 = \frac{R^4 J^3}{L U^2}$$

не содержит ω и i и потому при постоянном приложенном к двигателю напряжении будет сохранять в пределах неизменных значений L, R и J , постоянное значение. Таким образом для этого типа нагрузок диаграмма характеристик переходных процессов, построенная в логарифмических шкалах $\lg y = \psi(\lg x)$, имела бы прямолинейный характер и могла бы быть легко построена без эксперимента по граничным условиям в виде параллельных прямых, проходящих через точки сопряжения переходного и стационарного процесса.

Второе замечательное свойство характеристик переходных процессов заключается в том, что они являются универсальными, т. е. одинаково пригодны для расчетов как шунтовых, так серийных и компаундных электродвигателей.

Для иллюстрации степени совпадения характеристик шунтовых и серийных электродвигателей в системе инвариантных координат x и z могут служить диаграммы рис. 2 и 3. Кривые $y_c = f_1(x)$ и $z_c = f_2(x)$ на рис. 2 относятся к серийному электродвигателю КП-1003 75 завода «Динамо»¹ (мощностью $P = 8 \text{ kW}$; напряжение $U = 210 \text{ V}$; скорость вращения $n = 960 \text{ об/мин}$; сила тока в якоре $I_n = 44 \text{ A}$; сопротивление главной цепи $R = 0,59 \Omega$; коэффициент самоиндукции главной цепи $L = 0,037 \text{ H}$; маховой момент вращающихся частей $G D^2 = 2,5 \text{ kgm}^2$).

¹ Фр'е й д з о н. Переходные режимы работы двигателей постоянного тока, стр. 249.

Согласно снятым осциллограммам при характере нагрузки соответствующем случаю, для которого момент сопротивления изменяется по закону $M = k \omega = 0,0889 \omega$, сила то

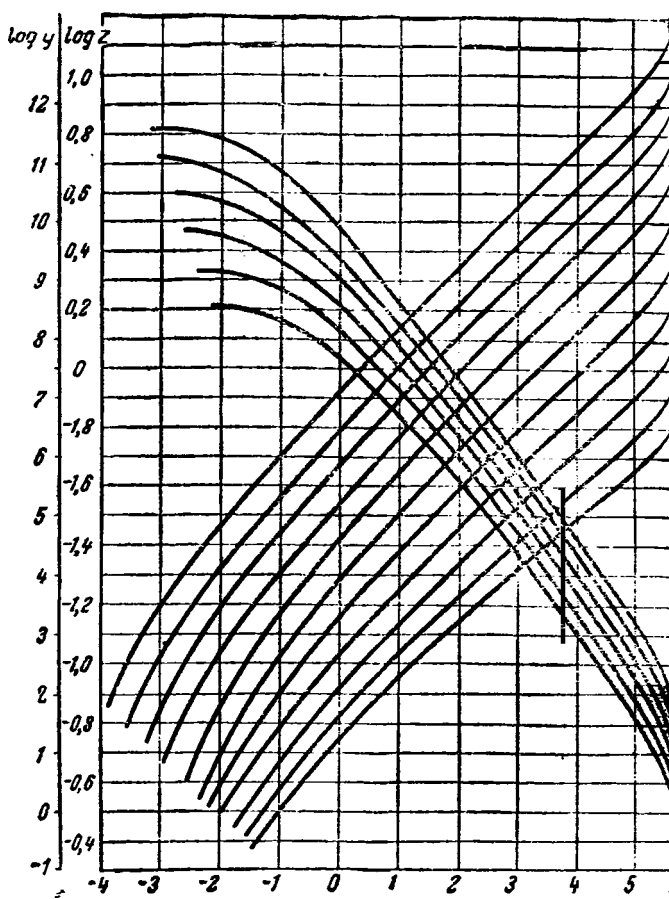


Рис. 1. Универсальная диаграмма переходных процессов электродвигателей постоянного тока

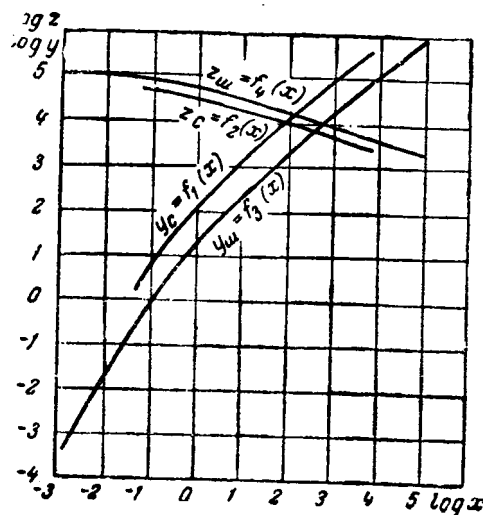


Рис. 2. Характеристики переходных процессов шунтового и серийного электродвигателей одного габарита

и скорость вращения изменялись в соответствии с данными табл. 4.

Таблица

t sec	I A	ω rad/sec	t sec	I A	ω rad/sec
0,02	75	4,57	0,15	83,8	75,0
0,03	122	10,95	0,20	61,6	82,4
0,04	176	18,3	0,25	53,7	87,0
0,05	185,8	27,8	0,30	48,4	90,6
0,10	140,7	63,2			

численные значения инвариантов подобия x , y и z , полученные для тех же моментов времени, что и в табл. 4, приведены в логарифмическом виде в табл. 5.

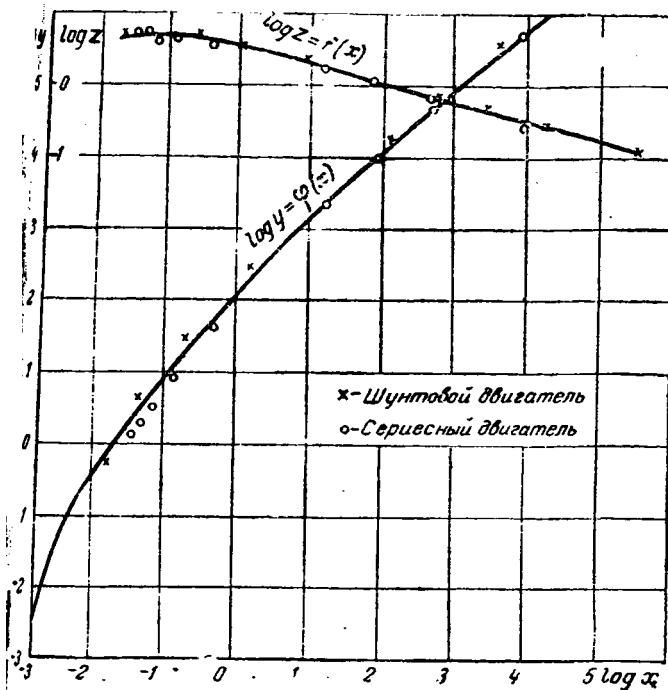


Рис. 3. Характеристики переходных процессов электро-механически подобных шунтового и серийного электродвигателей

Таблица 5*

t sec	$\log x$	$\log y$	$\log z$	t sec	$\log x$	$\log y$	$\log z$
0,02	3,9533	5,6702	1,4592	0,15	1,1416	0,9356	0,6744
0,03	2,6818	4,6422	1,8387	0,20	2,8448	0,4752	0,7158
0,04	1,9143	4,0006	0,0618	0,25	2,6908	0,2616	0,7388
0,05	1,2336	3,3672	0,2433	0,30	2,5742	0,1008	0,7554
0,10	1,6643	1,6534	0,6000				

В случае замены у двигателя КП-1003/75 серийной обмотки шунтовой, он бы имел следующие параметры при прежней мощности $P=8 \text{ kW}$: сопротивление главной цепи $R=0,34 \Omega$; коэффициент самоиндукции главной цепи $L=0,034 \text{ H}$; электромагнитная постоянная времени главной цепи $T=\frac{L}{R}=0,1 \text{ sec}$; электро-механическая постоянная времени

$$B=0,0594 \text{ sec}; \text{ параметр } \Omega = \sqrt{1 - \frac{4T}{B}}; \Omega = 2,4j.$$

Результаты вычислений силы тока, скорости вращения и инвариантов подобия для шунтового электродвигателя при-

Таблица 6*

t sec	$\frac{t}{2T}$	\sqrt{t}	I A	ω rad/sec	$\log x$	$\log y$	$\log z$
0,02	0,1	0,24	111,8	2,75	4,9093	5,7784	1,4392
0,03	0,15	0,36	158,5	5,86	3,6465	4,7672	1,7679
0,04	0,20	0,48	129,4	10,05	2,8090	3,9294	0,0022
0,05	0,25	0,60	236	19,82	2,0942	3,3878	0,1992
0,10	0,50	1,2	315	49,8	0,2280	1,6466	0,6972
0,15	0,75	1,8	277	83,8	1,2698	0,6330	0,9297
0,20	1,0	2,4	179,2	106,7	2,6586	1,8326	1,0282
0,25	1,25	3,0	76,6	115,8	2,2075	2,9524	1,0336
0,30	1,50	3,6	4,3	105,9	3,0336	4,6078	1,0245

ведены в табл. 6. Вычисления произведены по формулам:

$$i = I_{\infty} [1 - e^{-\frac{t}{2T}} (\cos \sqrt{t} - a \sin \sqrt{t})], \quad (20)$$

$$\omega = \omega_{\infty} [1 - e^{-\frac{t}{2T}} (\cos \sqrt{t} + \frac{1}{\Omega} \sin \sqrt{t})], \quad (21)$$

где i_{∞} и ω_{∞} — сила тока и скорость вращения при установившемся режиме $\Omega_1 = \frac{\Omega}{j} = 2,4; \nu = \frac{\Omega_1}{2T} = 12; a =$

$= \frac{1}{\nu L} \left(\frac{U}{I_n} - \frac{R^*}{2} \right) = 11,25; R^*$ — приведенное значение сопротивления главной цепи с учетом нагрузки при моменте сопротивления $M = M_n = 8,14; R^* \approx R$.

Полученные значения $\log x$, $\log y$ и $\log z$ нанесены в виде кривых на диаграмму рис. 2 и обозначены $y_{ш} = f_3(x)$ и $z_{ш} = f_4(x)$. Несовпадение полученных кривых характеристик серийного и шунтового электродвигателей показывает, что переходные процессы их не являются электро-механически подобными. Однако отсутствие тенденции у этих кривых к пересечению наталкивает на мысль, что процессы эти близки к квазиподобию. Действительно, если несколько изменить величину нагрузки шунтового электродвигателя, заставив моменты сопротивления следовать закономерности $M = 0,035 \omega$, то процесс в отношении характеристик $y_{ш} = f_3(x)$ получит квазиподобный характер. Значения $\log x$ и $\log y$ для этого случая приведены для тех же моментов времени в табл. 7, а степень совпадения характеристик для серийного и шунтового электродвигателей показана на диаграмме рис. 3.

Таблица 7*

t sec	$\log x$	$\log y$	t sec	$\log x$	$\log y$
0,02	4,9093	6,5870	0,15	7,2698	1,4416
0,03	3,6465	5,5758	0,20	2,6586	0,6412
0,04	2,8090	4,7380	0,25	2,2075	1,7610
0,05	2,0942	4,1964	0,30	3,0536	3,4164
0,10	0,2280	2,4552			

Если изменить приложенное к якору шунтового электродвигателя напряжение с 210 на 100 В, оставив прежним напряжение у зажимов шунтовой обмотки, то можно было бы считать, что новая номинальная скорость вращения двигателя

$$\text{будет } \omega_{1n} = \frac{100}{210} \omega_n = 43,6 \text{ rad/sec. Произведя пересчет ве-}$$

личин силы тока i , скорости вращения ω и инвариантов подобия x и z для $M = 0,0889 \omega$, получим результаты, приведенные в табл. 8.

Таблица 8*

t sec	I A	ω rad/sec	$\log x$	$\log z$
0,02	56,8	1,21	5,4910	0,1173
0,03	80,0	2,79	4,3163	0,4486
0,04	94,4	4,80	3,4301	0,6811
0,05	119,4	7,53	2,7389	0,8785
0,10	167,8	23,75	0,9179	0,3752
0,15	157,0	40,0	1,9834	0,621
0,20	114,8	51,0	1,4254	0,7076
0,25	66,2	55,4	1,0428	0,7435
0,30	29,6	50,6	2,8504	0,7042

Полученные в табл. 8 результаты сопоставлены с кривой $\log z = f(x)$ для серийного двигателя на диаграмме рис. 3 и дают возможность констатировать почти полное совпадение характеристик переходных процессов как шунтового, так и серийного электродвигателя. Это обстоятельство показывает, что степень компаундировки двигателей не отражается на характеристиках переходных процессов, почему эти характеристики названы нами универсальными, а семейства кривых из характеристик для нагрузок одного и того же класса мы предлагаем называть универсальными диаграммами переходных процессов.

Принимая во внимание первое и второе свойство характеристик переходных процессов, можно считать, что достаточно построить, пользуясь экспериментальными данными, всего три универсальных диаграммы, по числу трех вышеустановленных классов нагрузок, чтобы по этим диаграммам можно было производить точные расчеты переходных режимов любых электродвигателей постоянного тока с учетом

* Цифры отрицательных характеристик набраны жирным шрифтом.

влияния насыщения железа, реакции якоря, токов Фуко и других факторов, нарушающих линейный характер дифференциальных уравнений.

Покажем теперь, как практически использовать для расчетов универсальные диаграммы переходных процессов.

Для использования методов универсальных диаграмм переходных процессов необходимо для каждого класса нагрузочных процессов иметь готовой составленную на

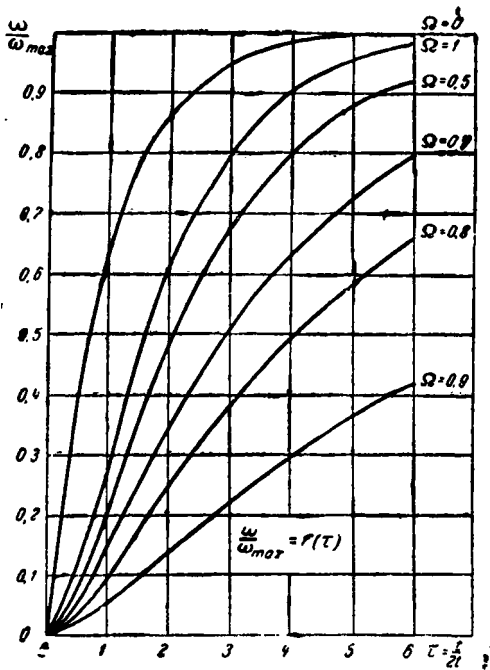


Рис. 4. Скоростная универсальная диаграмма

основе осциллографических записей универсальную диаграмму переходных процессов для электродвигателей постоянного тока. Каждая такая диаграмма состоит из двух частей. Первая часть содержит в относительных единицах кривые зависимостей скорости электродвигателя в функции от времени

$$\frac{\omega}{\omega_{\max}} = \psi_1(\tau),$$

где $\tau = \frac{t}{2T}$ — время в относительных единицах, $T = \frac{L}{R}$ — электромагнитная постоянная времени главной цепи двигателя.

Кривые эти должны быть построены для различных значений параметра $\Omega = \sqrt{1 - \frac{4T}{B}}$, характеризующего значениями электромагнитной постоянной времени T и электро-

механической постоянной B вращающихся частей электропривода.

Вторая часть диаграммы представляет собой семейство кривых $y = f_1(x)$ и $z = f_2(x)$ в логарифмических шкалах, которые получаются на основе экспериментальных данных, на базе также осциллографических записей и расчетов по приведенным выше формулам (13), (18) и (19) для инвариантов подобия x , y и z .

В качестве наглядного образца приводятся на рис. 1 и 4 вычисленные аналитическим путем универсальные диаграммы для нагрузочных процессов 1-го класса.

Способ пользования универсальными диаграммами переходных процессов состоит в следующем:

1. Вычисляют по данным электродвигателя величину его параметра $\Omega = \sqrt{1 - \frac{4T}{B}}$, характеризующего рассматриваемый переходный процесс, и для ряда моментов времени $\tau = \frac{t}{2T}$ по диаграмме $\frac{\omega}{\omega_{\max}} = \psi_1(\tau)$, аналогичной диаграмме рис. 4, находят значения $\frac{\omega}{\omega_{\max}}$ и соответствующие им значения $\omega_i = \psi_1(\tau)$.

2. По найденным значениям ω_i определяют вычисленные величины

$$\log z_i = \log T + \log \omega_i. \quad (22)$$

3. Определяют для данного процесса точки $\log x_{cc}, \log z_{cc}$ универсальной характеристики $\log z = f_2(x)$, соответствующей переходу процесса в стационарное состояние, и этим определяют положение универсальной характеристики рассматриваемого переходного процесса на универсальной диаграмме.

4. Пользуясь выбранной таким образом универсальной характеристикой $\log z = f_2(x)$ и найденными ранее величинами $\log z_i$, находят соответствующие значения $\log x_i$.

5. По полученным значениям $\log x_i$ находят величины тока $\log i_i$ по формуле

$$\log i_i = \log \left(\frac{JT}{U} \right) + 4 \log \omega_i + \log x_i, \quad (23)$$

и, после антилогарифмирования, зависимость $i = \varphi_2(\tau)$.

Таким образом после установления численного значения величины характеристического параметра Ω для определения кривых зависимостей $\omega = \psi_1(\tau)$ и $i = \varphi_2(\tau)$ необходимо произвести две серии отсчетов по универсальным диаграммам аналогичным диаграммам рис. 1 и 4, и несложные вычисления по формулам (22) и (23).

Для иллюстрации проведения расчетов с помощью универсальных диаграмм переходных процессов ниже помещаются примеры, относящиеся к переходным режимам 1-го класса. Для возможности сравнения результатов, получаемых методом универсальных характеристик, приводимые примеры рассчитаны аналитически и графически и указаны средние погрешности, отнесенные как к средним арифметическим, так и средним амплитудным значениям.

Пример 1. Рассчитать кривые зависимостей $\omega = \psi_1(\tau)$ и $i = \varphi_2(\tau)$ для электродвигателей с независимым возбуждением ПН-28,5 со следующими данными, в случае пуска его в ход при моменте сопротивления, изменяющемся по закону $M = k\omega$.

Номинальная мощность двигателя $P = 5,3$ kW; номинальное напряжение $U = 220$ V; номинальная сила тока $I_n = 29,3$ A; номинальная скорость вращения $n_n = 2800$ об/мин; пограничная скорость вращения $n_0 = 2950$ об/мин; сопротивление главной цепи $R = 0,377\Omega$; электромагнитная постоянная времени $T = 0,0125$ sec; электрохимическая постоянная времени $B = 0,078$ sec; маховой момент электропривода, приведенный к валу двигателя, $GD^2 = 0,42$ кгм²; характеристический параметр $\Omega = 0,6$; статический момент сопротивления при номинальной скорости вращения $M = M_n = 1,845$ кгм.

Находим расчетом значения $\log x_n$ и $\log z_n$ соответствующие установившемуся процессу при номинальных условиях

$$\log x_n = \log \left(\frac{UI_n}{TJ\omega^4} \right) = \log \left(\frac{220 \cdot 29,3}{0,0125 \cdot 0,0107 \cdot 294^4} \right) = 3,8108,$$

$$\log z_n = \log T + \log \omega_n = \log 0,0125 + \log 294 = 0,5645.$$

По найденным значениям x_n и z_n определяем на диаграмме рис. 1 положение универсальной характеристики $\log z = f_1(x)$ для данного случая.

Принимая во внимание, что $\Omega = 0,6$, обращаемся к диаграмме рис. 4 и, пользуясь кривой, соответствующей

этому значению параметра Ω , находим ряд величин $\frac{\omega_i}{\omega_n}$ для различных значений $\tau = \frac{t}{2T}$ в пределах от $\tau_1 = 0,5$ до $\tau_7 = 6,0$.

Умножая полученные значения $\frac{\omega_i}{\omega_n}$ на величину $\omega_n = 291$, получим численные величины ω_i , помещенные в 3-м столбце табл. 9.

Далее, пользуясь формулой

$$\log z_i = \log T + \log \omega_i,$$

проводим на диаграмме рис. 1, на уровне полученных значений $\log z_i$, ряд прямых, параллельных оси абсцисс, и в точках пересечения их с найденной ранее универсальной характеристикой проводим ординаты. Положения этих ординат определяют значения $\log x_i$, помещенные в 5-м столбце той же табл. 9.

Пользуясь затем формулой

$$\log i_i = \log \left(\frac{TJ}{U} \right) + 4 \log \omega_i,$$

Для полученных значениям $\lg x_i$ и $\lg \omega_i$ численные значения i_i .

Величина $\log \left(\frac{TJ}{U} \right) = 7,7832 = \text{const}$ для всех промежуточных зависимостей значений $\log I_i$. Найденные после логарифмирования значения $i = \varphi_2(\tau)$ нанесены на график рис. 5 и обозначены кружками (о).

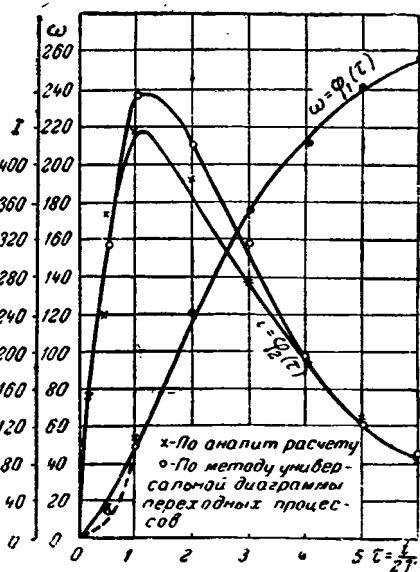


Рис. 5

Аналитический расчет зависимостей $\omega = \varphi_1(\tau)$ и $i = \varphi_2(\tau)$ выполнен по формулам, аналогичным (20) и (21), с тем лишь различием, что вместо круговых функций в формулах взяты гиперболические, так как для $\Omega = 0,6$ процесс носит апериодический характер. Кривые полученных зависимостей нанесены на диаграмму рис. 5 и отмечены крестиками.

Таблица 9*

$\tau = \frac{t}{2T}$	$\frac{\omega}{\omega_n}$	ω	$\log z$	$\log x$	$\log i$	i
0,5	0,05	14,7	1,2532	4,05	2,5024	318
1,0	0,17	50	1,7952	2,10	2,6792	478
2,0	0,415	122	0,1826	0,50	2,6288	425
3,0	0,595	175	0,3392	1,75	2,5052	320
4,0	0,73	215	0,4286	1,17	2,2828	192
5,0	0,82	242	0,4800	2,77	2,0884	122,6
6,0	0,88	260	0,5112	2,50	1,0544	90,0

Сравнительные данные аналитического расчета и расчета по универсальной диаграмме переходных процессов сил тока i и скоростей вращения ω и относительные погрешности приведены в табл. 10.

* Цифры отрицательных характеристик набраны жирным шрифтом.

τ	ω_p	ω_g	$\frac{\Delta \omega_{cp}}{\omega_{cp}} \cdot 100$	$\frac{\Delta \omega_{cp}}{\omega_{max\ cp}} \cdot 100$	i_p	i_g	$\frac{\Delta i}{i_{cp}} \cdot 100$	$\frac{\Delta i_{cp}}{(i_{max})_{cp}} \cdot 100$	Примечание
0,5	17,05	14,7	7,2	0,4	349	318	4,6	3,4	ω_p — скорость вращения по аналитическому расчету ω_g — та же скорость по универсальной диаграмме i_g — сила тока по универсальной диаграмме i_p — сила тока по аналитическому расчету $\Delta \omega_{cp} = \frac{\omega_p - \omega_g}{2}$ $(\omega_{max})_{cp} = \frac{\omega_{maxp} + \omega_{maxg}}{2}$ $\Delta i_{cp} = \frac{i_p - i_g}{2}$ $(i_{max})_{cp} = \frac{i_{maxp} + i_{maxg}}{2}$
1,0	53,2	50	3,1	0,55	437	478	-4,5	-4,5	
2,0	122,0	122	0	0	380,5	425	-5,6	-4,9	
3,0	176,7	175	0,48	0,29	276	320	-7,4	-4,8	
4,0	215	215	0	0	184	192	-2,1	-0,8	
5,0	241	242	-0,2	0,17	127	122,6	+1,7	-0,5	
6,0	260,5	260	0,1	0,08	84,6	90	-3,1	-0,6	

Пример 2. Рассчитать кривые зависимостей $\omega = \varphi_1(\tau)$ и $i = \varphi_2(\tau)$ для шунтового электродвигателя МП-607 (ИБК-20) для режима пуска его в ход при моменте сопротивления, изменяющемся по закону $M = k\omega$. Данные электродвигателя следующие: номинальная мощность $P = 4\ 900\ \text{kW}$; номинальное напряжение $U = 1\ 000\ \text{V}$; номинальная сила тока $I_n = 5\ 190\ \text{A}$; номинальная скорость вращения $n_n = 300\ \text{об/мин}$; сопротивление главной цепи $R = 6,35 \cdot 10^3\ \Omega$; электромагнитная постоянная времени $T = 0,048\ \text{sec}$; электрохимическая постоянная времени $B = 0,265\ \text{sec}$; момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя, $J = 4\ 020\ \text{kgm}^2\text{sec}$; характеристический параметр $\Omega = 0,525$; статический момент сопротивления при номинальной скорости $M = M_n = 15\ 900\ \text{kgm}$.

Расчеты проведены аналогично примеру первому. Результаты расчета представлены на рис. 6 в виде кривых $\omega = \varphi_1(\tau)$ и $i = \varphi_2(\tau)$. Кривые, соответствующие аналитическому расчету, отмечены крестиками, а полученные из универсальной диаграммы переходных процессов обозначены кружками.

Заключение. Изложенный в настоящей статье закон электрохимического подобия переходных процессов электродвигателей постоянного тока является частным случаем более общих закономерностей, характеризующих течение нестационарных явлений в цепях электрохимических переменного тока, освещение которых предполагается автором в одной из следующих статей. Закон электрохимического подобия дает ключ к построению универсальных диаграмм переходных

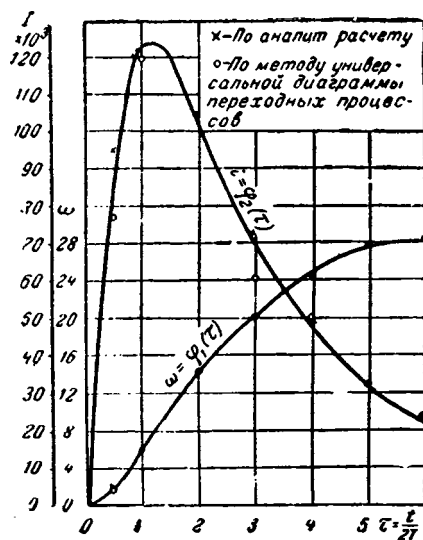


Рис. 6

процессов, позволяющих путем весьма простых манипуляций получать зависимости $\omega = \varphi_1(t)$ и $i = \varphi_2(t)$ для электродвигателей постоянного тока. Нам кажется, что было бы целесообразно широко использовать замечательные свойства универсальной диаграммы переходных процессов, для чего следовало бы поручить электромашиностроительным заводам

Таблица 10

собрать осциллографические записи безреостатного пуска и торможения электродвигателей постоянного тока при их серийных испытаниях, на базе которых можно было бы строить диаграммы нулевого, первого и второго класса.

Исследования автора показывают, что универсальные диаграммы переходных процессов не только помогают быстро получить кривые тока и скорости вращения электродвигателей при пуске и реверсе, но и позволяют находить влияние изменения параметров электродвигателя на течение его переходных процессов. Стабильность универсальных характеристик переходных процессов обеспечивает им столь же важное значение в будущем, какое имеют в настоящее время широко используемые обычные характеристики электрических машин при стационарных режимах.

Литература

1. Rüdén berg. Elektrische Schaltvorgänge und verwandte Störungserscheinungen in Starkströmanlagen. Издание Springer, 1923.
2. Эфрос. Пуск, реверс и торможение двигателей постоянного тока. Вестник электропромышленности, стр. 32, № 10, 1937.
3. Зильберман. Переходные режимы в схемах с шунтовыми двигателями постоянного тока при постоянном статическом моменте нагрузки и постоянном потоке возбуждения. Труды ЛИИ, № 5, раздел электротехники, 1937.
4. Mariotte. Traité de la percussion des corps., 1679.
5. Newton. Philosophiae naturalis principia mathematica, Libr. II, sect II, propos, 32, 33, 1687.

6. Fourier. Des racines imaginaires, 1827; Theorie analytique de la chaleur, chapitre 2, sect. IX, 1822.
7. W. Froude. On experiments with H. M. S. „Grayhound“. Trans. of the Institution of Naval Architects. CV. XV, 187.
8. Helmholtz. Monatsberichte der Kaiser Akad. der Wissenschaften, 1873.
9. Reynold. Philos. Transaction of the Royal Society 1883.
10. Афанасьева-Эренфест. Принцип подобия и ее применения. Журн. Русского Физ.-Хим. Общества, том XVI 1911. Matem. Annalen 1915; Philos. Magazin, Vol. I, 1925.
11. Nusselt. Gesundheitsing, 1915.
12. Karman. Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz. Verbands 3, Intern. Kongr. Techn. Mess., Stockholm, 1930.
13. М. В. Кирпичев. Теория подобия. Изд. ЭНИН, т. I, 1933.
14. М. В. Кирпичев и Гухман. Изв. Ленингр. общ. научно-исследов. теплотехн. института, вып. 1, 1931.
15. М. В. Кирпичев и М. А. Михеев. Моделирование тепловых устройств. Изд. Академии наук СССР, 1936.
16. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование (Электронтегратор). Изд-во Академии наук СССР, 1943.
17. Forbes and Gormann. Skin Effect in rectangular conductors. El. Eng., V. 52, стр. 636, 1933.
18. Nickle. Oscillographic solution of electromechanical Systems. Journ. AIEE, 1925, Dec. p. 1277.
19. Brainerd and Neufeldt. Similarity relations in electrical engineering. El. Eng., стр. 268, March, 1935.

Критерии подобия электромеханических явлений и их применение к моделированию электросистем

Кандидат техн. наук, доц. В. А. ВЕНИКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В статье устанавливаются условия, обеспечивающие подобие протекания процессов в электрических системах различной мощности, и дается описание опытов, проведенных на модели электрической системы. Предлагаемые способы моделирования проверяются экспериментально и аналитически.

Известно, что моделирование имеет особо большое значение в такой области, как электрические системы, расчеты которых, например, при проверке аварийных и послеаварийных режимов базируются на огромном числе допущений и приближений, часто весьма произвольных, заметно искажающих результаты. Методы моделирования могут применяться здесь как для обработки результатов опытов, проведенных в реальных системах, так и для постройки малых моделей систем.

Эксперименты на моделях могут быть не только вспомогательным средством, уточняющим теоретические положения, но и в ряде случаев с успехом могут заменять сложные расчеты. Особенно выгодно применять модели, построенные на частоте большей, чем частота оригинала (150—200 Hz вместо 50 Hz), что позволяет получить миниатюрные, легко управляемые генераторы-модели, легко обеспечивающие подобие. Такие модели являются своего рода расчетными столами, построенными с соблюдением физического подобия.

Важное значение модель может иметь при анализе аварий, происшедших в электросистемах, позволив воспроизвести все условия возникновения, развития аварии и ее ликвидации, правильно отразив при этом влияние различных аппаратов (регуляторов напряжения, первичного двигателя и т. д.), а также и возможное вмешательство персонала системы.

1. Критерии подобия процессов, происходящих в системе, и процессов в модели получаются или согласно правилам теории подобия (Л. 1) нахождением интегральных аналогов или же из сравнения записанных в относительной системе единиц основных дифференциальных уравнений элементов модели (машины, трансформаторы, линии и т. д.) с соответствующими уравнениями оригинала, что совершенно равноценно (Л. 2). Критерии находятся по отдельным элементам, так как подобие элементов обеспечивает и подобие системы в целом, при условии одинаковости критериев общих для отдельных элементов (Л. 2 и Л. 3).

Для вращающихся машин¹ из основных уравнений магнитно-связанных перемещающихся друг относительно друга электрических контуров получаем требование соответствия (инвариантности « inv ») у модели и оригинала электромагнитных величин и механической скорости, а также его монокронности.

Соответствие критерия электромагнитных скоростей заключается в требовании одинаковых собственных и взаимных постоянных времени, выраженных в относительной системе единиц

$$T_k = inv \text{ и } \frac{ia}{i_k} T_{ak} = inv. \quad (1)$$

Под взаимными постоянными времени понимаем отношения взаимных индуктивностей к активным сопротивлениям контуров, т. е. $T_{ak} = \frac{L_{ak}}{r_k}$. В случае емкостной связи конту-

ров — аналогично $T_{ak} = \frac{C_{ak} r_k}{t} = \frac{C_{ak}}{g_k t}$. Критерий (1) является таким образом критерием подобия скорости электромагнитных и электрических процессов в любых сложных электрических цепях.

2. Критерий механической скорости выражается

$$M = inv \text{ или } \frac{J_0}{M_{мех} t^2}, \quad (2)$$

где M — постоянная индукция генератора; J_0 — момент инерции; $M_{мех}$ — момент на валу генератора.

3. Критерий гомокронности определяет соответствие во времени (см. рис. 1, I и II) у модели и оригинала мгновенных

¹ Приведенные ниже критерии (кроме 2) справедливы и для не вращающихся элементов системы (трансформаторов линий и т. д.), рассматриваемых как сосредоточенные постоянные.

линей переменных величин (u , i , δ и т. д.). При применении осциллографической системы единиц этот критерий, выражающий соотношение между масштабом времени и частотой, следует непосредственно из определения единицы времени; в именованной теме критерий может быть представлен:

$$\omega t = \text{inv.} \quad (3)$$

4. Дополнительным (не определяющим) будет условие:

$$r_k = \text{inv. или } \frac{i_k r_k}{u_k} k = \text{inv или } \frac{W r_k}{u_k^2} = \text{inv.} \quad (4)$$

В соответствии в этом условии выбираются масштабы тока, напряжения и мощности, причем два из них могут быть выбраны произвольно. Масштабы времени и мощности

характеристик холодного хода, выраженных в относительных единицах, одинаковости потерь в железах и на трение. Возможно моделирование и более грубое, не учитывающее тех или иных деталей процесса, отраженных в основных уравнениях; так при приближенном или усредненном моделировании, отбрасывая критерий гомохронности, т. е. отказываясь от моделирования мгновенных значений переменных i , u (статора) и переходя к моделированию их огибающих (рис. 1, II), упрощаем критерии, сводя их к требованию:

$$M \text{ и } T_0 = \text{inv или } \frac{M}{T_0^2} = \text{inv, где } T_0 \text{ — постоянная времени ротора.}$$

Выбор масштаба времени теперь производится независимо от частоты; изменяя его, изменяем M и T_0 модели.

При приближенном моделировании, при увеличении постоянной времени только за счет масштаба времени, еще необходима инвариантность $\frac{x}{r}$ в цепях статора (как определяющий критерий).

Действующая модель была построена в лаборатории электрических систем Энергетического института им. Кржижановского АН СССР. Работы по ее сооружению проводились под общим руководством члена-корреспондента АН СССР И. С. Брук, давшего автору ряд ценных советов и указаний. Модель состояла из одного генератора, работающего через сеть параллельно с шинами бесконечной мощности или параллельно с другим генератором. Электрическая схема модели приведена на рис. 2. Моделирование первичного двигателя осуществлялось специальным двухмашинным агрегатом постоянного тока, дававшим зависимость вращающего момента от оборотов $M_{\text{мех}} = f(n)$ аналогичную характеристике реальных турбин (моделирование граничного условия).

Для осуществления подобия необходимо, чтобы постоянным модели можно было придавать любые значения, добиваясь таким образом инвариантности критериев. В построенной модели постоянная инерция (M) изменялась в пределах от 1 до 16 сек при помощи набора дисков, насаживаемых на вал генератора-модели. Постоянная времени T_0 изменялась при помощи сериесного генератора постоянного тока, включенного в цепь возбуждения и создававшего в ней отрицательное сопротивление.

Активное сопротивление статора генератора-модели, имевшего мощность 14 кВА, не было уменьшено и имело величину около 6%. Это сужало возможности опытов, позволять 220V

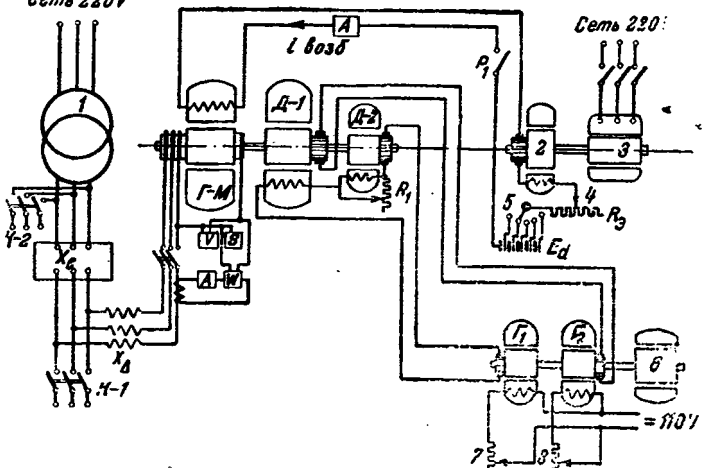


Рис. 2. Электрическая схема модели системы (генератор-шины бесконечной мощности)

1-потенциальный регулятор; 2-сериесный генератор [R]; 3-асинхронный двигатель 3000 об/мин; 4-сопротивление R_0 для регулировки T_0 ; 5-переключатель для регулировки тока возбуждения; 6-асинхронный двигатель; 7-сопротивление для изменения активной мощности; 8-сопротивление для изменения характеристики первичного двигателя

у всех элементов системы должны быть одинаковыми. Масштабы тока и напряжения на разных ступенях трансформации могут быть различными; последнее обстоятельство облегчает установление на модели нужного полного сопротивления линий передач, которое может подбираться за счет изменений коэффициента трансформации трансформаторов. Возможность искусственного изменения параметров при моделировании весьма велика: так, например, из критериев (4) и (2) следует, что трудно осуществимое изменение реактивных сопротивлений генератора модели можно заменить пропорциональным изменением сопротивлений сети, с одновременным изменением мощности первичного двигателя и момента инерции.

Если линии и кабели системы в модели представить не в виде элементов с сосредоточенными постоянными, а в виде уменьшенных линий и кабелей, получив подобие процессов распространения волны тока и напряжения вдоль линии, то критерии подобия будут:

$$T_L \text{ и } T_C = \text{inv, т. е. } \frac{L_0}{R_0 l} \text{ и } \frac{C_0}{G_0 l} = \text{inv,} \quad (5)$$

где L_0 — индуктивность; G_0 — проводимость; R_0 — активное сопротивление линии; C_0 — емкость линии.

Указанные параметры даны на единицу длины. Этот критерий равносильен критерию (1).

Пространственное подобие процессов будет обеспечено критерием

$$l^2 R_0 G_0 \text{ или } l^2 \omega^2 L_0 C_0 = \text{inv,} \quad (6)$$

где l — длина; критерий гомохронности, конечно, также должен быть выдержан.

Кроме соблюдения этих критериев необходимо еще и соблюдение граничных условий.

Критерии подобия определялись, исходя из уравнений в той или иной степени идеализированных, т. е. не учитывавших ряда факторов. Для того чтобы эта идеализация не внесла искажений в моделируемые процессы, необходимо отразить ее дополнительными условиями, определяемыми по конкретным задачам опытов. Например, для вращающихся машин, при изучении вопросов, связанных с устойчивостью (Л. 2), эти условия сведутся к требованию тождественности

воля осуществлять только такие процессы и схемы сети, при которых слишком большое активное сопротивление статора могло быть отнесено к сопротивлению сети. Изменение угла δ наблюдалось и регистрировалось при помощи специальной стробоскопической установки. Вращающийся момент, передаваемый от первичного двигателя к генератору, замерялся по закручиванию вала при помощи индукционного микрометра.

Первая серия опытов на модели была проведена при частоте 50 Гц, при работе параллельно с шинами городской,

сети. Вторая серия опытов проводилась при повышенной частоте 70 Hz и при пониженной частоте 35 Hz, при работе параллельно со вторым генератором, развивавшим мощность значительно большую, чем первый генератор. Характер процессов при моделировании с изменением частоты приведен на рис. 1. Опыты, проводимые при нестационарных процессах в системе, при различных ее режимах и параметрах (различные $x, r, M, P_{мех}$), но при одинаковых критериях подобия, дали хорошее совпадение результатов.

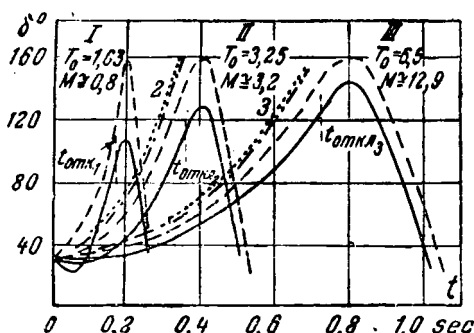


Рис. 3. Проверка точности приближенного моделирования

Кривые I, II, III при $\frac{x}{r} = 16$ и $\frac{M}{T_0} = 0,3$.

Кривые 2,3 при $\frac{x}{r} = 160$ и $\frac{M}{T_0} = 0,3$.

Кривые I, II, III (пунктиром) и кривые 2,3 (точками) — приближенный расчет (без учета $p\delta$ и $p\psi$).

Кривые I, II, III (полные линии) и кривые 2,3 (точки — тире) — расчет по формулам Парка.

Третья серия опытов (характер осциллограмм которых был показан на рис. 1 I, II) была проведена для проверки приближенного моделирования. Отказ от моделирования мгновенных значений вносил неточность, обнаруживающуюся в виде нарушения подобия зависимостей $i\delta = f(t)$ при малых M и T_0 при $\frac{M}{T_0^3} = \text{inv}$. Выяснить природу этой неточности

можно, воспользовавшись известными уравнениями Парка (Л. 4), из рассмотрения которых следует, что при изменении масштаба времени независимо от частоты в модели не точно воспроизводится влияние дополнительной скорости $p\delta$, влияние периодической составляющей тока ротора и апернодической составляющей тока статора (влияние $p\psi_d, p\psi_q$).

Вопрос о погрешностях, получающихся при приближенном моделировании, сводится, таким образом, к вопросу о влиянии членов $p\delta, p\psi$ в уравнениях Парка. Установление границ влияния этой неточности было произведено на основании большого количества расчетов (проделанных аналитически и на механическом интеграторе, построенном И. С. Брук),

пока что это влияние ничтожно, если $\frac{x}{r}$ цепи статора достаточно велико (порядка 100 + 200) и весьма заметно при малом $\frac{x}{r}$, при том тем заметнее, чем меньше T_0 и M генератора.

Из рис. 3, на котором приведены результаты расчетов, мы видим, что учет $p\delta$ и $p\psi$ не оказывает влияния на характер процессов; так при $\frac{x}{r} = 160$. Так при $\frac{M}{T_0^3} = 0,3$ при различных

значениях M (например, при 12,9; 3,2) процессы действительно оказываются практически подобными, отличаясь только масштабом времени. Из этого же рис. 3 очевидно, что при уменьшении $\frac{x}{r}$ до 16, при сохранении остальных соотношений, подобие процессов заметно нарушается.

Результаты экспериментов на модели дали хорошее совпадение с результатами этих расчетов.

Приближенное моделирование, следовательно, почти всегда осуществимо; его нельзя осуществлять только при моделировании систем, имеющих большие значения сопротивления в цепи статора. Так, например, исследование методами приближенного моделирования нестационарных процессов, при введении в цепь статора сопротивления Бергвалла, или при исследовании процессов в генераторах, связанных кабельной сетью, может привести к значительным ошибкам.

Отметим попутно и обратим внимание лиц, рассчитывающих электросистемы, что при этих условиях и обычно при-

нимаемая при расчетах устойчивости методика, основанная на известных уравнениях Лонгеля, соответствующих уравнениям Парка с отброшенными членами $P\delta, P\psi_d, P\psi_q$, дает ошибочные результаты (Л. 2).

Вывод критериев подобия. Уравнения электрической системы, содержащей любое число электрических контуров и содержащей вращающиеся машины, т. е. магнито-связанные, перемещающиеся друг относительно друга контуры могут быть в общем виде, с использованием метода контурных токов и уравнений Лагранжа записаны так (см. Л. 4)

Уравнение напряжений:

$$U_k = i_k r_k + \frac{di_k}{dt} + i_a \frac{dL_{ka}}{dt} \quad (A)$$

Уравнение электрических мощностей:

$$P_k = U_k i_k = i_k^2 r_k + L_{ka} i_k \frac{di_k}{dt} + i_k i_a \frac{dL_{ka}}{dt} \quad (B)$$

Уравнение электромеханических сил:

$$M_k = -\frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_{ab}}{d\alpha_k} - J_0 \frac{d\alpha_k}{dt} \quad (C)$$

Здесь α_k — угол поворота ротора, т. е. обобщенная геометрическая координата, равная ωt .

Для нахождения из уравнений (A) — (B) критериев подобия приводим их к безразмерному виду путем деления уравнений (A) на U_k ; (B) — на $U_k i_k$ и (C) на M_k . Найдя далее интегральные аналоги, получаем приведенные выше критерии (1), (2), (4). Анализ условий однозначности позволяет установить, что определяющими критериями будут (1) и (2), кроме того, поскольку индуктивность L является синусоидальной функцией α_k , то, для того чтобы в сходственные моменты времени сходственные величины были пропорциональными (условие подобия), необходимо, чтобы имел место критерий (3): $\alpha_k = \omega t = \text{inv}$, являющийся определяющим критерием, обеспечивающим однородность процессов во времени (гомохронность). Критерии подобия для элементов системы (линий электропередач, кабелей, смоток машин), с учетом содержащихся в них распределенных индуктивностей и емкостей, получаются из соответствующих дифференциальных уравнений, записанных в такой форме и с такими допущениями, которые отвечают конкретным целям исследования.

Так, для линий электропередач и кабелей приведенные выше критерии (5), (6) получаются из уравнения

$$\frac{\partial^2 U}{\partial l^2} = C_0 L_0 \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + (C_0 R_0 + G_0 L_0) \frac{\partial U}{\partial t} + R_0 G_0 U$$

(делением его на $R_0 G_0 U$ и нахождением интегральных аналогов), при этом не учитывается ряд явлений, например, явления, связанные с скин-эффектом, излучением, нагреванием. Если по условиям опыта окажется нужным учесть эти или какие-либо иные дополнительные процессы, то это легко сделать, связав их уравнения с уравнениями основного процесса и получив соответствующие дополнительные критерии. Например, желая моделировать нагревание провода линии электропередачи, из уравнения

$$i_2 r_0 (1 + \beta \tau) = \frac{\sigma}{dt} V_0 d\tau + k F \tau$$

(здесь β — температурный коэффициент; τ — температура; σ и k — коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи; V_0 — объем; F — поверхность, получаем $\frac{\sigma V_0}{k F t} = \text{inv}$, $\tau = \text{inv}$ и $\frac{i_2^2 r_0}{k F \tau} = \text{inv}$.

Непостоянство коэффициента теплоотдачи, имеющее место в действительности, отражаем дополнительным условием, требуя, чтобы k в модели и оригинале одинаково зависело от диаметра провода, скорости ветра, давления (конечно, только в интересующем нас интервале этих величин).

Литература

1. М. В. Кирпичев и М. А. Михеев. Моделирование тепловых устройств. Изд. АН СССР, 1936.
2. В. А. Веников. Моделирование электрических систем. Диссертация. МЭИ, 1940.
3. В. А. Веников. Изучение электрических систем на моделях с вращающимися машинами. Электричество № 2, 1941.
4. А. Е. Каплянский. Введение в общую теорию электрических машин, ГЭИ, 1941.

Электрические схемы для решения системы уравнений

Доктор техн. наук, проф. Л. И. ГУТЕНМАХЕР, инж. Н. В. КОРОЛЬКОВ, инж. В. А. ТАФТ

Энергетический институт им. К. Э. Жукотского Академии наук СССР

В статье рассматриваются электрические цепи, составленные по „матричным схемам“ из двухполюсников и четырехполюсников, а также из активных четырехполюсников — усилителей. Распределение напряжений и токов в этих цепях в переходном режиме описывается системой дифференциальных уравнений, а в установившемся режиме — системой линейных алгебраических уравнений. Эти схемы предлагаются использовать для моделирования физических явлений и решения математических задач.

В основу описываемых схем положены свойства несимметричного четырехполюсника — усилителя. Усилитель в идеальном случае должен не потреблять энергии на входе и иметь стабильный коэффициент усиления N , не зависящий от нагрузки. Если осуществить связи между несколькими такими идеальными усилителями, то можно получить схему для решения системы уравнений.

Мы различаем три способа осуществления связей между усилителями: 1) связь по току; 2) связь по напряжению; 3) связь комбинированная — по току и по напряжению.

По существу эти схемы являются развитием схемы одного усилителя с обратной связью в схему из n усилителей с об-

или

$$(A_k + B''_{kk} + B_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^n A_{ki} - B_{kk} N_{ka_{ik}}) u_k - \sum_{i=1, i \neq k}^n A_{ki} N_{ia_{ki}} u_i = A_k E_k.$$

Положим

$$A_k + B''_{kk} + B_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^n A_{ki} - B_{kk} N_{ka_{kk}} = A_{kk} N_{ka_{kk}}. \quad (2)$$

Тогда система уравнений может быть записана в наиболее удобной форме:

$$\sum_{i=1}^n (A_{ki} N_{ia_{ki}}) u_i + A_k E_k = 0, \quad (3)$$

(где $k = 1, 2, \dots, n$).

Здесь коэффициенты A могут быть действительными, мнимыми и комплексными величинами или операторными функциями, содержащими оператор Хивисайда $p = \frac{d}{dt}$.

Действительно, на нашей схеме A — проводимости, которые могут представлять в общем случае произвольного вида сложный комплекс элементов электрической цепи R, L и C .

Если проводимости A являются чисто активными, то коэффициенты A этой системы уравнений будут действительными числами. Если проводимости — реактивные (емкости или индуктивности), то коэффициенты A будут мнимыми при условии, что рассматривается установившийся режим при воздействии синусоидальных э. д. с.

$$\bar{E} = E \varepsilon j \text{ и } t.$$

Если проводимости представляют комплекс активных и реактивных проводимостей, то коэффициенты A будут комплексными числами.

Если рассматривать переходный режим в схеме, то при наличии реактивных проводимостей коэффициенты будут со-

держивать оператор Хивисайда $(p = \frac{d}{dt})$. Процессы в схемах

будут описываться системой дифференциальных уравнений при определенных начальных условиях.

Связи по напряжению. Рассмотрим теперь схему со связями по напряжению (рис. 2). В этом случае каждый усилитель должен иметь на выходе n напряжений, пропорциональных напряжению на входе (n — обмоточный выходной трансформатор). К каждой паре концов выходов усилителя в данном случае включается четырехполюсник. Все свободные концы четырехполюсников соединяются последовательно, и в цепь, образованную таким образом, включается также вход усилителя. Всего образуется n таких кольцевых цепей (по числу усилителей). В каждую цепь вводится э. д. с. — E . В результате мы получаем n уравнений:

$$\sum_{i=1}^n N_{ki} A_{ki} u_i = u_k - E A_k. \quad (4)$$

Здесь мы предположили, что на входе усилителя проводимость равна нулю. В более общем случае эта проводимость может быть отличной от нуля. Возможно, повидимому, представить себе смешанные связи и по току, и по напряжению. При этом получаются более сложные уравнения, однако мы не будем здесь их рассматривать. Во многих случаях схема со связями по току (рис. 1) имеет некоторые практические преимущества.

Конкретизация деталей одной из схем со связями по току. Рассмотрим схему со связями по току, показанную

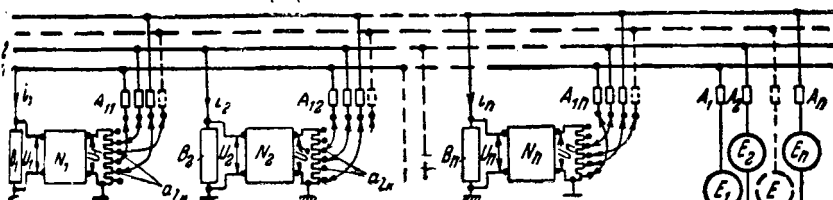


Рис. 1

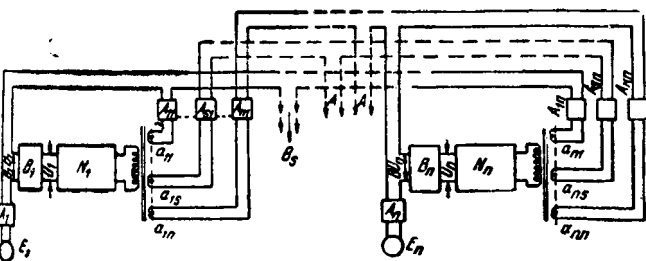


Рис. 2

ратной связью, работающих совместно. На рис. 1 и 2 приведены две принципиальные схемы соединения (подробности см. рис. 4). Вначале рассмотрим схемы, отличающиеся связью по току.

Связи по току. Составим уравнения Кирхгофа для схемы рис. 1:

$$B''_{11} u_1 = B_{11} (N_1 a_{11} u_1 - u_1) + A_{12} (N_2 a_{12} u_2 - u_1) + \dots + A_{1n} (N_n a_{1n} u_n - u_1) + A_1 (E_1 - u_1);$$

$$B''_{22} u_2 = A_{21} (N_1 a_{21} u_1 - u_2) + B_{22} (N_2 a_{22} u_2 - u_2) + \dots + A_{2n} (N_n a_{2n} u_n - u_2) + A_2 (E_2 - u_2);$$

$$B''_{nn} u_n = A_{n1} (N_1 a_{n1} u_1 - u_n) + A_{n2} (N_2 a_{n2} u_2 - u_n) + \dots + A_{nn} (N_n a_{nn} u_n - u_n) + A_n (E_n - u_n). \quad (1)$$

То же в сокращенной форме:

$$B''_{kk} u_k = \sum_{i=1, i \neq k}^n A_{ki} (N_{ia_{ki}} u_i - u_k) + B_{kk} (N_{ka_{kk}} u_k - u_k) + A_k (E_k - u_k) \quad (1a)$$

(где $k = 1, 2, \dots, n$) или, раскрыв скобки и перенеся все члены, за исключением содержащих E_k , влево, получим:

$$A_k u_k + B''_{kk} u_k + \sum_{i=1, i \neq k}^n A_{ki} u_k - B_{kk} N_{ka_{kk}} u_k - B_{kk} u_k - \sum_{i=1, i \neq k}^n A_{ki} N_{ia_{ki}} u_i = A_k E_k$$

при $(k=1, 2, \dots, n)$

на рис. 3. Здесь для простоты показано только два усилителя. Остальные $(n-2)$ усилители имеют такие же элементы связей.

Прежде всего следует определить характер проводимостей A и B . Представляется целесообразным не вносить чрезмерных усложнений в первую рассматриваемой здесь схеме и ограничиться случаем параллельного включения активной проводимости $G_{kk} = \frac{1}{R_{kk}}$ и емкости C_{kk} . Целесообразно все

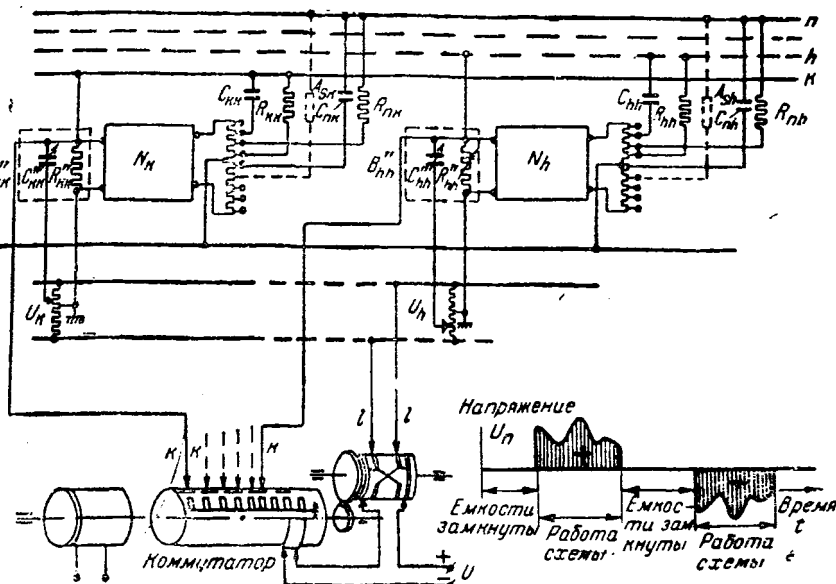


Рис. 3

проводимости сделать неизменными по величине; в этом случае $\sum_{i=1}^n A_{ki} + B_{kk} + A_k = \text{const}$ и коэффициенты $A_{kk}N_k a_{kk}$ легко подбирать, изменяя либо a_{kk} (при $B''_{kk} = 0$), либо B''_{kk} (при $a_{kk} = 0$). Какие конкретно проводимости в частном случае следует изменять, будет показано ниже.

Для удобства изменения коэффициентов следует на выход каждого усилителя включить делитель напряжения с достаточно малым сопротивлением, таким, чтобы включение всех возможных связей не смогло бы внести заметной ошибки в коэффициент усиления или в коэффициенты a_{ik} , которые показывают, какая часть полного напряжения используется для создания тока в данной связи.

Далее, для того чтобы иметь возможность изменять коэффициенты, содержащие оператор $p = \frac{d}{dt}$, независимо от коэффициентов, не содержащих оператор $p = \frac{d}{dt}$, следует иметь возможность присоединять емкости и сопротивления к различным точкам делителя на выходе усилителя. В результате мы приходим к такой системе уравнений, описывающей процессы в этой схеме:

$$\frac{1}{R''_{kk}} u_k + C''_{kk} p u_k = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{R_{ki}} N_i a'_{ki} u_i + C_{ki} N_i a''_{ki} p u_i \right] + \left(\frac{1}{R_k} + C_k p \right) (E_k - u_k) \quad (5)$$

$(k = 1, 2, \dots, n).$

Так как

$$R_{ki} = R = \text{const}, \quad N_i = \text{const} = N$$

и $C_{ki} = C = \text{const},$

то окончательно получим:

$$\frac{1}{R''_{kk}} u_k + C''_{kk} p u_k = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{R} N a'_{ki} u_i + C N a''_{ki} p u_i \right] + \left(\frac{1}{R_k} + C_k p \right) (E_k - u_k) \quad (5a)$$

$(k = 1, 2, \dots, n).$

В этом случае схема приобретает вид, показанный на рис. 3.

Изменение всех коэффициентов, за исключением делительных, производится путем приключения проводимостей к различным точкам делителей напряжения.

Изменение диагональных коэффициентов производится путем изменения проводимостей и емкостей на входе усилителей.

Вполне очевидно, что таким путем можно получить только положительные коэффициенты. Для получения отрицательных коэффициентов следует вводить обратные связи с выхода усилителя на вход. Применение такого способа для получения положительных коэффициентов нежелательно вследствие большой опасности возникновения генерации на высоких частотах.

Периодизация явлений. Описываемое устройство предназначается для решения самых различных задач. Вследствие этого и решения могут быть самыми разнообразными. В частных случаях истинное решение может содержать некоторую постоянную составляющую. Ввиду этого следовало бы, очевидно, применить усилители по схеме усиления "постоянного тока". Однако такие усилители весьма неудобны в эксплуатации, так как они требуют наличия разделенных источников питания, которые к тому же должны иметь относительно высокое напряжение.

Кроме того стабилизация коэффициента усиления путем применения негативной обратной связи или каким-либо иным путем в случае применения усилителей постоянного тока весьма усложнена.

В связи с этим идея применения усилителей переменного тока является весьма заманчивой. Для того чтобы реализовать эту идею, удалось найти способ, при помощи которого любое явление, даже совершенно не периодическое по своему характеру, можно искусственно сделать периодическим.

Этот способ заключается в том, что применяется специальный коммутатор (рис. 3), который, во-первых, включает напряжение $E(t)$, во-вторых, по истечении весьма малого промежутка времени (в течение которого протекает исследуемый процесс) приводит схему в первоначальное состояние (разряжает конденсаторы через цепи k). После того как схема приведена в начальное состояние, коммутатор включает напряжение — $E(t)$ (уже в противоположном направлении), затем опять схему приводит в начальное состояние. Работа коммутатора показана справа внизу на рис. 3.

В результате применения подобного коммутатора в схеме не могут появиться напряжения с частотой ниже частоты работы коммутатора. Это дает возможность применить усилители переменного тока, которые должны пропускать низшую частоту — частоту работы коммутатора без значительных искажений. Применение подобного коммутатора дает дополнительно одно чрезвычайно важное преимущество: благодаря невозможности возникновения в схеме процессов с частотой ниже частоты работы коммутатора, очевидно, совершенно исключается возможность возникновения паразитной генерации на низкой частоте.

Задание начальных условий. Во многих задачах является интересным решение при произвольных, отличных от нуля, начальных условиях. Задание произвольных начальных условий в случае применения схемы с емкостями сводится к зарядке конденсаторов до некоторых напряжений, определяемых каждый раз по условиям задачи. Однако осуществить процесс зарядки нужно с большой скоростью и, кроме того, после зарядки требуется синхронное включение всех емкостей в схему. Осуществление подобного процесса является весьма трудной конструктивной задачей, так как даже небольшое несовпадение моментов включения емкостей может привести к появлению значительных погрешностей.

Нам удалось применить специальную схему, которая совершенно не дает подобных погрешностей.

Принцип построения схемы заключается в том, что проводники от емкостей, которые должны быть присоединены к общему проводнику (отрицательный полюс источника питания), присоединяются не непосредственно к этому проводнику, а к группе низкоомных делителей напряжения (рис. 3), которые в свою очередь присоединяются к отрицательному полюсу источника питания анодных цепей усилителей. Все делители соединены параллельно и подключаются все вместе к источнику постоянного напряжения через коммутатор (цепи l на рис. 3).

Нетрудно показать, что процесс будет протекать точно так же, как если бы конденсаторы были заряжены до напряжений делителей u_{dk} , а затем все одновременно включены в схему.

Действительно, конденсатор, заряженный до разности потенциалов u , совершенно эквивалентен цепи, состоящей из заряженного конденсатора с последовательно включенной э. с. равной u ; «в режиме холостого хода» в обоих случаях не имеет место разность потенциалов u , а «внутреннее сопротивление» в обоих случаях будет также одинаковым — $X_c = \frac{1}{Cp}$. Некоторая погрешность возникает из-за влияния сопротивления делителей (источников э. д. с.), однако оно может быть сведено до ничтожной величины путем снижения сопротивления делителей.

Измерение полученных результатов решения. Исследование процессов, протекающих в схеме, может быть произведено при помощи шлейфового осциллографа с предварительным усилением для уменьшения потребления на входе. Можно также применять катодный осциллограф для получения решений с точностью не выше 5%. Возможно и применение шайбы Жубера.

Пример применения схемы. Рассмотрим в виде примера выведенные Парком уравнения синхронной машины при постоянной скорости.

Для синхронной машины с демпферной обмоткой в продольной и поперечной оси, если приближенно положить

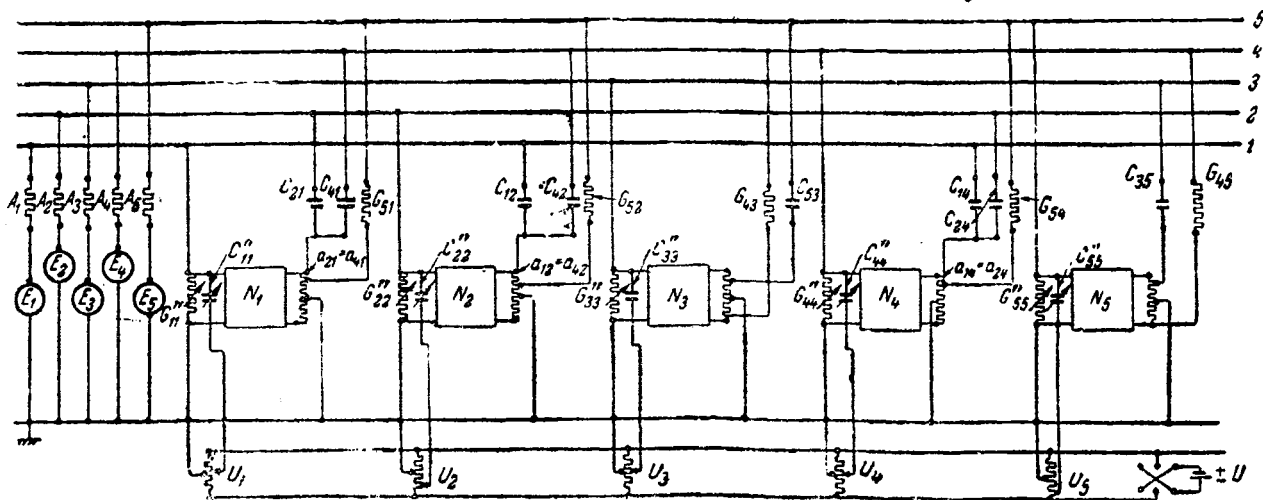


Рис. 4.

Решение нелинейных задач и задач с переменными коэффициентами. Во многих практических задачах коэффициенты уравнений являются функциями либо независимой переменной, либо зависимых переменных. Решение подобных задач невозможно непосредственно при помощи описанного аппарата, однако подобные задачи легко можно решить по методу «шаг за шагом» (step by step), используя этот же аппарат. В этом случае процесс ведется в течение такого промежутка времени Δt_1 , за который изменение параметров должно быть незначительным. По истечении этого промежутка измеряются все значения напряжений в схеме, затем параметры схемы изменяются в функции от измеренных напряжений или в функции времени, а измеренные значения напряжений задаются в виде новых начальных условий, после чего процесс опять рассматривается в течение промежутка Δt_2 и т. д. В частном случае Δt_1 может быть равно Δt .

Легко установить при этом порядок величины погрешности путем повторного решения с другим шагом Δt , используя обычные математические способы оценки решений, полученных разностным методом.

$X_{sld} = X_{ald} = X_{afd} = X_{ad}$ и считать, что демпферная обмотка в продольной оси и в поперечной оси друг с другом электрически не связаны, система уравнений Парка (Л. 5—6) запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} e_{df} &= (r_f + X_f p) idf + X_{ad} p i dk + X_{ad} p i da; \\ e_{dk} &= X_{ad} p idf + (r_{kd} + X_{kd} p) i dk + X_{ad} p i da; \\ e_{qk} &= (r_{kq} + X_{kq} p) i qk + X_{aq} p i qa; \\ e_{da} &= X_{ad} p idf + X_{ad} p i dk - X_{aq} p i qk + (r + X_{dp}^2) i da - X_{qf} p i a; \\ e_{qa} &= X_{ad} p idf + X_{ad} p i dk + X_{aq} p i qk + X_{ad} p i da + (r + X_{qp}^2) i a. \end{aligned} \quad (6)$$

Параметры, входящие в систему уравнений (6), легко могут быть подсчитаны на основании каталожных данных ($X_d, X_q, X'_d, X'_q, X''_d, X''_q, T_d, T'_d, T_0$) по известным формулам (Л. 9). Полагаем, что неизвестные функции [уравнение (5)] соответствуют $u_k N$. На рис. 4 показана схема с усилителями, собранная таким образом, чтобы система уравнений (5) для этой схемы соответствовала системе уравнений синхронной машины (6). В табл. 7 показаны соответствия между

$\frac{1}{NR'_{11}} + \frac{C'_{11}}{N} p$	$a''_{12} Cp$		$a''_{14} Cp$	
$r_f + X_f p$	$X_{ad} p$		$X_{ad} p$	
$a''_{21} Cp$	$\frac{1}{NR'_{22}} + \frac{C'_{22}}{N} p$		$a''_{24} Cp$	
$X_{ad} p$	$r_{kd} + X_{kd} p$		$X_{ad} p$	
		$\frac{1}{NR'_{33}} + \frac{C'_{33}}{N} p$		$a''_{25} Cp$
		$r_{kq} + X_{kq} p$		$X_{aq} p$
$a''_{41} Cp$	$a''_{42} Cp$	$-\frac{1}{R}$	$\frac{1}{NR'_{41}} + \frac{C'_{41}}{N} p$	$-\frac{1}{R}$
$X_{ad} p$	$X_{ad} p$	$-X_{aq} (p^0)$	$r + X_{dp} p$	$-X_{qf} (p^0)$
$a'_{51} \frac{1}{R}$	$a'_{52} \frac{1}{R}$	$a''_{53} Cp$	$a'_{54} \frac{1}{R}$	$\frac{1}{NR'_{55}} + \frac{C'_{55}}{N} p$
$X_{ad} (p^0)$	$X_{ad} (p^0)$	$X_{aq} p$	$X_{ad} (p^0)$	$r + X_{qp} p$

(7)

величинами, входящими в уравнения синхронной машины, и величинами, входящими в уравнение для схемы, на основании которых легко могут быть вычислены параметры схемы.

Для вычисления параметров схемы уравнения (7) необходимо привести к безразмерному виду. Разделив все величины на базисные A_0, E_0 , получим систему уравнений в безразмерном виде. Вычислим для примера несколько коэффициентов.

Положим

$$N=100; A_0=10^{-5} \left(\frac{1}{\Omega} \right) \text{ или } R_0=10^5 \Omega;$$

$E_0=100 \text{ В}; \tau_0=10^{-3} \text{ сек.}$ Кроме того возьмем следующие параметры машины:

$$X_d=1,1; X_q=0,75; X_s=0,1; r_f=0,22.$$

Так как

$$\frac{C'_{11}}{NA_0\tau} = X_f = 1,0 \text{ и } \frac{a''_{12}C}{A_0\tau_0} = X_{ad} = 1,0; \quad \frac{a''_{14}C}{A_0\tau_0} = X_{ad} = 1,0$$

и

$$\frac{1}{NR'_{11}A_0} = r_f = 0,22,$$

откуда

$$C'_{11} = 100 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-3} = 10^{-6} \text{ Ф} = 1 \mu\text{Ф};$$

полагая

$$a''_{12} = a''_{14} = 1,$$

получим:

$$C = 10^{-5} \cdot 10^{-3} = 10^{-8} \text{ Ф} = 10^{-3} \mu\text{Ф},$$

$$R'_{11} = \frac{1}{100 \cdot 0,22 \cdot 10^{-5}} = 4545 \Omega.$$

Элементы A_{ki} состоят в данном случае из двух параллельных проводимостей $\left(\frac{1}{R_{ki}} + C_{kip} \right)$.

Диагональные элементы B_{kk} легко найти по формуле

$$B''_{kk} = \left(\frac{1}{R'_{kk}} + C'_{kkp} \right) - \sum_{i=1, i \neq k}^n A_{ki} - A_k$$

$$(k=1, 2, \dots, n).$$

Рассмотренные в этой статье электрические схемы являются развитием известных устройств, разработанных Кельном, Мэллоком, Боде и др. (Л. 1—4) для решения систем уравнений. Обзор известных систем и их связь с рассмотренными здесь системами будут сделаны в специальной работе. В настоящее время проводится экспериментальное исследование схем с усилителями, результаты которого будут опубликованы отдельно.

Литература

1. Н. Г. Бруевич. Машины для решения алгебраических уравнений, „Вестник металлопромышленности“ № 1 1938, стр. 51—73.
2. Р. Меллок. Электрическая счетная машина, „Успехи математических наук“, вып. 4, 1938, стр. 79.
3. Bode. ZAMM, стр. 213, август 1937.
4. Н. Г. Бруевич. Машины для интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, „Вестник металлопромышленности“ № 6, 1937, стр. 40—49.
5. G. Kron. Equivalent circuit of the salientpole synchronous machine, GER, стр. 679, № 12, 1941.
6. G. Kron. Equivalent circuits for the hunting of electrical machinery, El. Eng., стр. 290, № 5, 1942.

Влияние насыщения на угловые характеристики синхронной машины

Доктор техн. наук, проф. Г. Н. ПЕТРОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В статье рассматриваются весьма существенные вопросы, связанные с расчетами статической устойчивости электрических систем; дается подробный анализ угловых характеристик активной и реактивной мощностей машины; выявляется влияние насыщения на эти характеристики и приводится метод расчета активной и реактивной мощностей явнополюсной и неявнополюсной синхронной машины с учетом насыщения.

Угловыми характеристиками синхронной машины называют зависимость ее активной P_a и реактивной P_r мощностей от угла ϑ сдвига фаз между векторами напряжения \vec{U} и э. д. с. \vec{E}_0 , соответствующей намагничивающей силе $\vec{\theta}_2$ ротора. Угловые характеристики являются исходными при оценке статической устойчивости и работы машины в системе.

При построении этих характеристик, как правило, исходят из предположения, что машина не насыщена и что реактивное сопротивление обмотки статора постоянно. Вопрос о влиянии насыщения на угловые характеристики синхронных машин исследован мало¹. Поэтому представляет интерес выявить степень этого влияния и дать по возможности простой метод расчета активной и реактивной мощности, вращающего момента, токов синхронной машины и построения угловых характеристик с учетом действительного насыщения машины при ее работе в системе.

Неявнополюсные машины. При исследовании неявнополюсной ненасыщенной машины исходят из диаграммы Бен-Эшенбурга. Обозначим через x_d — полное индуктивное сопротивление обмотки статора в ненасыщенном состоянии. Предположим, что индуктивности по продольным и поперечным осям машины одинаковы ($x_d = x_q$). Исходя из векторной диаграммы, получим уравнение угловой характеристики активной мощности:

$$P_a' = \frac{m U E_0'}{x_d} \sin \vartheta, \quad (1)$$

где напряжение $U = \text{const}$, э. д. с. $E_0' = \text{const}$, m — число фаз. Как видно из уравнения (1), угловая характеристика при таком допущении представляет собой синусоиду. Рассмотрим, в какой мере это справедливо для реальной насыщенной машины и правильно ли уравнение (1) передает количественную связь между действительной активной мощностью P_a и углом ϑ при $U = \text{const}$ и $\theta_2 = \text{const}$. При рассмотрении процессов в насыщенной машине будем исходить из диаграммы Потье, пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора (рис. 1).

Из подобия $\triangle OAB \sim \triangle OA_1B_1$ следует, что

$$\frac{\theta_2}{\theta} = \frac{E_0''}{E} \quad \text{или} \quad E_0'' = E \frac{\theta_2}{\theta} = \frac{\theta_2}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Величину ε назовем „относительным насыщением“ машины.

Соотношение (2) позволяет связать (рис. 2) реальную характеристику холостого хода с фиктивной э. д. с. E_0'' .

Из подобия тех же треугольников, полагая $\theta_1 = kI$, имеем

$$\frac{I x_d}{I k} = \frac{E}{\theta} \quad \text{или} \quad x_d = k \frac{E}{\theta} = \frac{k}{\varepsilon}. \quad (3)$$

По аналогии с равенством (1) из рис. 1 получаем

$$P_a = \frac{m U E_0''}{x_d + x_a} \sin \vartheta. \quad (4)$$

¹ Д. А. Городский. Влияние насыщения на статическую устойчивость, Труды ВЭИ, вып. 40, 1940.

Так как $E_0'' = \frac{\theta_2}{\epsilon} = \frac{E_0 \theta_2}{E_0 \epsilon} = E_0 \frac{\epsilon_0}{\epsilon}$, то формула (4) может быть представлена в следующем виде:

$$P_a = \frac{mUE_0}{\epsilon(x_s + x_a)} \sin \theta = \frac{mUE_0}{x_n} \sin \theta, \quad (5)$$

где $\epsilon_0 = \frac{\theta_2}{E_0}$, x_n — расчетное индуктивное сопротивление насыщенн. машины, равное (3):

$$x_n = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}(x_s + x_a) = \frac{x_s \epsilon + k}{\epsilon_0}. \quad (6)$$

Из полученных равенств (5) и (6) следует, что активная мощность P_a реальной насыщенн. неявнополюсной машины может быть определена по формуле (1) для ненасыщенн. машины, если вместо расчетной э. д. с. E_0' в числителе поставить реальную э. д. с. E_0 , взятую для данного возбуждения из характеристики холостого хода (рис. 2), а в знаменателе — расчетное сопротивление x_n , определенное из равенства (6).

При построении угловой характеристики U, E_0, θ_2, x_s и заданы. Поэтому задача определения мощности P_a сводится к нахождению относительного насыщения $\epsilon = \frac{\theta}{E}$, как функции угла θ . Зная эту зависимость, легко определить искомое расчетное сопротивление x_n насыщенн. машины по формуле (6).

Рассмотрим решение этой задачи. Повернем диаграмму намагничивающих сил (рис. 1) на 90° и совместим ее с диаграммой э. д. с. (рис. 3). Тогда $OA = \theta_2$, $AD = \theta_1 = k$, $OD = \theta$. Из подобия $\triangle ADC \sim \triangle BFC$ следует

$$\frac{AD}{BF} = \frac{k}{x_s} = \frac{AC}{CB}.$$

Поэтому для определения неизвестного направления искомого вектора \vec{E} достаточно соединить прямой точки A и B и найти на ней точку C , которая делит отрезок AB на части

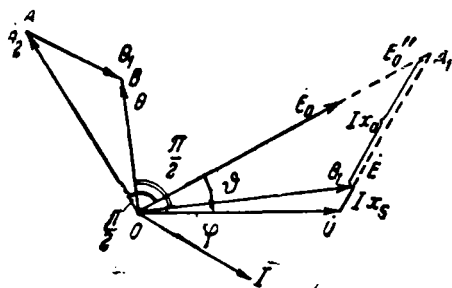


Рис. 1.

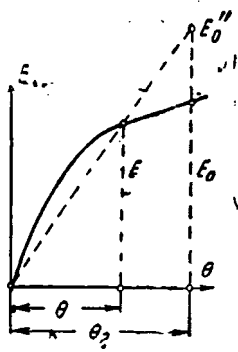


Рис. 2

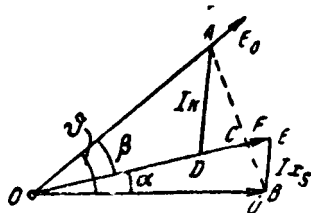


Рис. 3

пропорциональные k и x_s . Таким образом заданный угол θ разбивается на углы α и β .

После этого на характеристике холостого хода (рис. 4) откладывают вектор \vec{U} под углом α к оси ординат и вектор $\vec{\theta}_2$ под углом β к оси абсцисс. Из конца A вектора \vec{U} проводят прямую, перпендикулярную вектору $\vec{\theta}_2$, до ее пересечения в точке B с осью ординат. Из конца C вектора $\vec{\theta}_2$ про-

водят прямую, перпендикулярную вектору \vec{U} , до ее пересечения в точке D с осью абсцисс. Соединяя прямой точки B и D , находят по точке F пересечения ее с характеристикой холостого хода искомые значения E, θ и ϵ :

$$GF = E, \quad OG = \theta, \quad \frac{OG}{GF} = \epsilon.$$

Правильность такого построения легко обосновать. Вначале нам не известно положение точек H и G на осях коор-

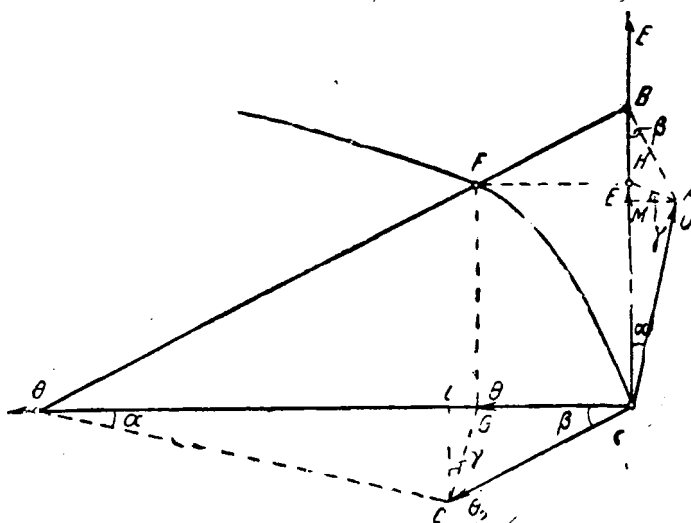


Рис. 4

динат. Известно только, что всегда $CG \perp AH$. Из рис. 4 следует, что при этом условии

$$E = OH = U \cos \alpha + U \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma, \\ \theta = OG = \theta_2 \cos \beta - \theta_2 \sin \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma.$$

Исключая из этих двух уравнений неизвестный угол γ , найдем, что E и θ связаны между собой линейной зависимостью:

$$E = U \cos \alpha + U \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta - \frac{U \sin \alpha}{\theta_2 \sin \beta} \theta, \quad (7)$$

которая является уравнением прямой BD .

Когда точка H совпадает с началом O координат, точка G совпадает с точкой D . Когда же точка G совпадает с точкой O , точка H попадает в положение B . С другой стороны, величины E и θ связаны между собой характеристикой холостого хода. Поэтому их истинное значение определяется точкой пересечения прямой BD с характеристикой холостого хода.

Проведение прямой BD может быть упрощено, если отрезки OB и OD определять аналитически непосредственно через угол θ . Из рис. 4 имеем

$$\frac{OD}{OB} = \frac{CL}{AM} = \frac{\theta_2 \sin \beta}{U \sin \alpha} = \frac{CG}{AH} = \frac{k}{x_s}, \quad (8)$$

откуда

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{Uk}{\theta_2 x_s}. \quad (9)$$

Из рис. 3 находим

$$\alpha + \beta = \theta. \quad (10)$$

Поэтому из $\triangle OAB$ имеем

$$\frac{OB}{\sin(\pi - \alpha - \beta)} = \frac{OB}{\sin \theta} = \frac{U}{\sin \beta}. \quad (11)$$

Решая совместно (9), (10) и (11), получим

$$OB = U \sqrt{1 + \sigma^2 + 2\sigma \cos \theta}, \quad (12)$$

где $\sigma = \frac{\theta_2 x_s}{Uk}$, и из равенства (8)

$$OD = OB \frac{k}{x_s}.$$

Следовательно, уравнение прямой BD окончательно принимает вид:

$$E = OB - \frac{x_s}{k} \theta. \quad (13)$$

тора. Исследование таких режимов может быть проведено теми же методами, если x_s считать равным сумме индуктивных сопротивлений рассеяния и лин. и. На рис. 9 приведены в качестве примера угловые характеристики, построенные точным и первым приближенным методом для той же машины для случая

$$U=1, \theta_2=2,5 \ (E_0=1,43), x_s=0,5, x_d=1,8, k=1.$$

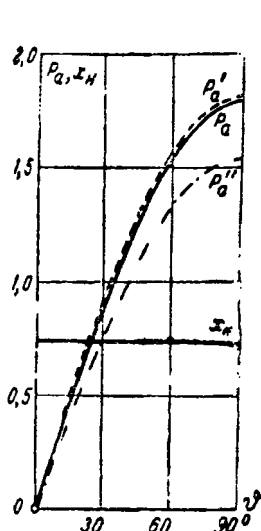


Рис. 7

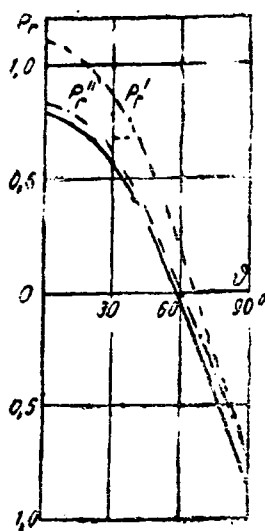


Рис. 8

Для анализа причин и степени расхождения результатов, получаемых точным и приближенными методами, обратимся к равенствам (5) и (16). Равенства (5) и (16) могут быть преобразованы следующим образом:

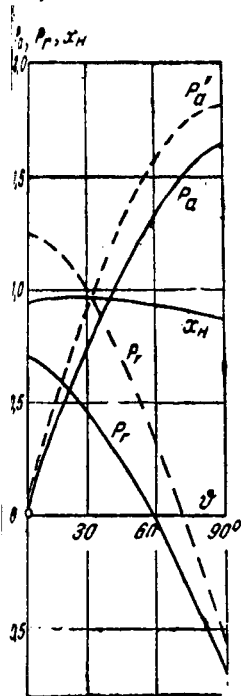


Рис. 9

$$P_a = \frac{mUF_0}{\epsilon} \sin \vartheta = \frac{mU\theta_2}{\epsilon x_s + k} \sin \vartheta, \quad (22)$$

$$P_r = mU \frac{\theta_2 \frac{E}{\theta} \cos \vartheta - U}{x_s + k \frac{E}{\theta}} = \frac{mU\theta_2}{\epsilon x_s + k} \cos \vartheta - \frac{mU^2 \epsilon}{\epsilon x_s + k}. \quad (23)$$

При прямолинейной характеристике холостого хода $\epsilon = \frac{1}{U_0}$,

$\epsilon x_s + k = \frac{x_d}{U_0}$, $E'_0 = \theta_2 U_0$ и равенства (22) и (23) принимают вид:

$$P'_a = \frac{mUE'_0}{x_d} \sin \vartheta, \quad (24)$$

$$P'_r = \frac{mUE'_0}{x_d} \cos \vartheta - \frac{mU^2}{x_d}. \quad (25)$$

Таким образом формулы (24) и (25), применяемые обычно для приближенных расчетов угловых характеристик ненасыщенной машины, представляют собой частный случай более общих точных формул (5) и (16).

Как следует из формул (22) и (23), приближенные значения мощностей P'_a и P'_r тем лучше будут совпадать с точными значениями P_a и P_r , чем ближе будет ϵ к значению $\frac{1}{U_0}$. При $x_s \ll k$ (рис. 7) расчеты по формулам (22) и (24)

близко совпадают друг с другом, так как в этом случае сумма $\epsilon x_s + k$ мало зависит от выбора точного значения ϵ . Формулы (23) и (25), наоборот, могут дать различные результаты, главным образом за счет второго члена, прямо пропорционального ϵ (рис. 8).

При относительно больших значениях x_s (рис. 9) формулы (24) и (25) приводят к заметным ошибкам из-за большого влияния величины ϵ .

Явнополюсные машины. Будем и ходить из векторной диаграммы Блонделя. Обозначим: E_0 — э. д. с. машины с учетом насыщения $\psi = \varphi + \vartheta$; активная составляющая тока $I_a = I \cos \psi$; реактивная составляющая тока $I_d = I \sin \psi$; x_q — полное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси в насыщенном состоянии.

Активная и реактивная мощности явнополюсной машины равны:

$$P_a = mUI \cos(\psi - \vartheta) = mUI_a \sin \vartheta + mUI_q \cos \vartheta, \quad (26)$$

$$P_r = mUI \sin(\psi - \vartheta) = mUI_a \cos \vartheta - mUI_q \sin \vartheta, \quad (27)$$

где $\psi = \varphi + \vartheta$, причем углы φ и ϑ имеют те же значения, что и на рис. 3 $I_d = I \sin \varphi$, $I_q = I \cos \varphi$.

Подставляя в соответствии с диаграммой Блонделя полу-

$$I_d = \frac{E_0 - U \cos \vartheta}{x_{dH}}, \quad I_q = \frac{U \sin \vartheta}{x_q},$$

чим уравнения угловых характеристик активной и реактивной мощности

$$P_a = \frac{mUF_0}{x_{dH}} \sin \vartheta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_{dH}} \right) \sin 2\vartheta, \quad (28)$$

$$P_r = \frac{mUF_0}{x_{dH}} \cos \vartheta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_{dH}} \right) \cos 2\vartheta - \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_{dH}} \right). \quad (29)$$

Так как сопротивление x_{dH} является неизвестной переменной величиной, зависящей от насыщения машины, то непосредственное использование формул (28) и (29) невозможно.

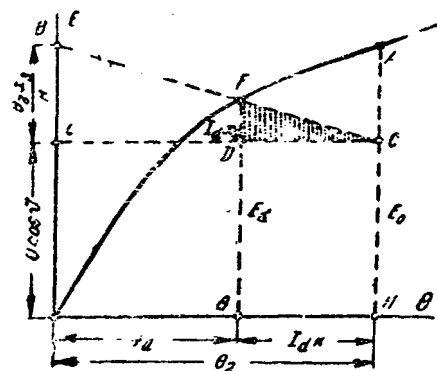


Рис. 10

При приближенных расчетах это затруднение обходят тем, что вместо x_{dH} берут известное сопротивление x_d для ненасыщенного состояния машины и действительную э. д. с. E_0 заменяют э. д. с. E'_0 , взятой по прямолинейной характеристике холостого хода для заданного возбуждения θ_2 .

Если при построении угловых характеристик исходят из заданного расчетного режима, определенного величинами U , I и $\cos \varphi$, то вначале находят угол ϑ :

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{I x_d \cos \varphi}{U + I x_q \sin \varphi}, \quad (30)$$

а затем определяют э. д. с. E'_0 по формуле

$$E'_0 = U \cos \vartheta + I x_d \sin(\vartheta + \varphi). \quad (31)$$

Это значение э. д. с. подставляют в (28) и (29), полагают $E'_0 = \text{const}$, $x_{dH} = x_d$ и таким путем находят приближенные значения P_a и P_r .

Рассмотрим более точный метод построения угловых характеристик с учетом насыщения машины. С этой целью

Этой э.д.с. по характеристике холостого хода соответствует $\theta_d = 1,05$. Поэтому

$$\theta_2 = \theta_d + k I_d = 1,05 + 0,832 = 1,88 \text{ и } E_0 = 1,305.$$

Возбуждению $\theta_2 = 1,88$ по прямолинейной характерной кривой холостого хода соответствует э.д.с. $E'_0 = U_0 \theta_2 = 1,16 \cdot 1,88 = 2,18$.

$$k = \frac{x_d - x_s}{U},$$
$$x_{dH} = \frac{AC}{I_d} = \frac{k(E_0 - U \cos \vartheta)}{\theta_0 - \theta_d}. \quad (32)$$

Graph showing the function $E \cdot x_{dn}$ versus θ for various values of $\cos \psi$.

The x-axis represents θ (ranging from 0 to 3.0) and the y-axis represents $E \cdot x_{dn}$ (ranging from 0 to 1.5).

Curves are plotted for $\cos \psi$ values: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0.

Key points and values:

- Point A is marked on the curve for $\cos \psi = 0.75$ at $\theta = 1.305$.
- Point C is marked on the curve for $\cos \psi = 0.51$ at $\theta = 0.885$.
- The horizontal distance between the vertical lines through A and C is labeled $x_{dn} = 0.51$.
- The label "прямая" (straight line) is present near the curves.

Рис. 11

$$OB - \frac{x_s}{k} \theta_d = f(\theta_d). \quad (33)$$

Пример расчета угловых характеристик явнополюсной машины. Рассмотрим в качестве примера синхронную явнополюсную машину, характеристика холостого хода которой представлена на рис. 11.

Коэффициент k для этой машины равен

$$k = \frac{1,25 - 0,1}{1,15} = 1.$$

По формуле (30) найдем

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{0,6 \cdot 0,8}{1 + 0,6 \cdot 0,6} = 0,353.$$

По формуле (31) получим

$$E'_0 = 0,943 + 1,25 \cdot 0,832 = 1,983.$$

Для определения действительной э.д.с. E_0 найдем

$$E_d = U \cos \vartheta + I_d x_s = 0,943 + 0,832 \cdot 0,1 = 1,026.$$

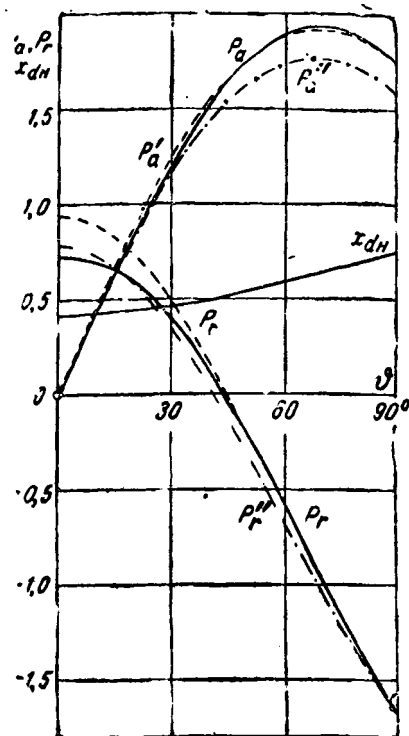


Рис. 12

При расчете угловых характеристик удобно предварительно построить простую номограмму для определения χ_{di} (рис. 11). Эта номограмма вытекает из рис. 10. Для любой

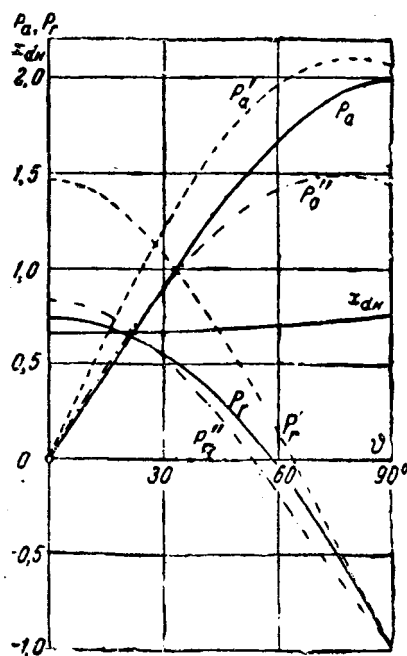


Рис. 13

точки C характеристики холостого хода (рис. 11) сопротивление x_{dK} определяется в этой номограмме по формуле, аналогичной равенству (32),

$$x_{dH} = x_s + \frac{BC \cdot k}{AB}.$$

На рис. 12 приведены угловые характеристики активной и реактивной мощности, построенные точным и приближенным способами. Кривые P_a и P_r определялись по формулам (28) и (29) с помощью номограммы рис. 11. Кривые P_a' строились в предположении, что $E_0' = 2,18$ и $x_{dh} = x_d = x_d'$. Кривые P_a'' и P_r'' — в предположении, что $E_0'' = 1,983$ и $x_{dh} = x_d = x_d''$.

В качестве второго примера рассмотрим случай, когда машина работает на сеть бесконечно большой мощности через реактивное сопротивление 0,4. За исходный режим примем $U = 1, I = 1, \cos \varphi = 0,8$ в месте присоединения к сети.

В этом случае $x_s = 0,1 + 0,4 = 0,5$; $x_d = 1,25 + 0,4 = 1,65$; $x_d' = 0,6 + 0,4 = 1$.

Как и в первом примере, находим: $E_0 = 1,49$, $\theta_0 = 2,95$, $\theta = 2,37$ и по прямолинейной характеристике $E_0' = 1,16 \cdot 2,95 = 3,42$.

На рис. 13 приведены угловые характеристики, построенные по этим данным. Как видно из кривых, расхождение

между точным и приближенными расчетами в этом случае получается большим. Это расхождение может быть объяснено с помощью равенств (26) и (27): с увеличением насыщения машины увеличивается ошибка при определении тока I_d приближенными методами, поэтому ошибка в определении P_a и P_r получается тем больше, чем больше удельный вес имеет слагаемое, пропорциональное току I_d .

Заключение. Приведенный выше анализ угловых характеристик активной и реактивной мощностей синхронной машины показывает, что расчеты, проводимые с пренебрежением насыщения машины, во многих случаях могут приводить к значительным ошибкам и неправильным выводам относительно запаса статической устойчивости и синхронизирующей способности машины.

В значительных интервалах изменения угла δ сопротивления x_n и x_{dn} остаются почти постоянными, это дает возможность во многих случаях, пользуясь формулами (5) и (28) и полагая приближенно x_n и x_{dn} неизменными, уточнить расчеты, сохраняя их простоту.

РАБОТ СОВЕТСКИХ ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ

Краткие сообщения

Автоматическое регулирование напряжения компаундированных синхронных генераторов

Кандидат техн. наук Л. В. ЦУКЕРНИК

Институт энергетики Академии наук УССР

Компаундирование возбуждения синхронных генераторов на нагрузку, осуществляемое в настоящее время в энергосистемах СССР¹, предназначено в основном для повышения

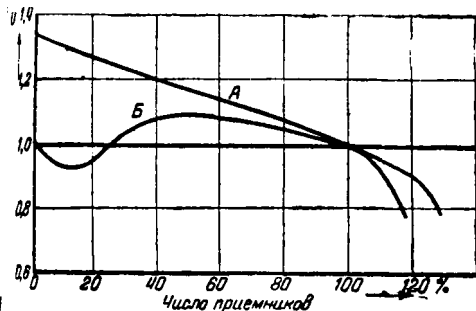


Рис. 1. Зависимость напряжения на клеммах генератора, питающего двигательно-осветительную нагрузку, от числа присоединенных приемников (с учетом статических характеристик последних)

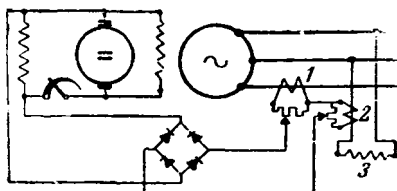


Рис. 2. Схема компаундирования от тока и напряжения:

1 — основной трансформатор тока; 2 — промежуточный трансформатор тока; 3 — дроссель

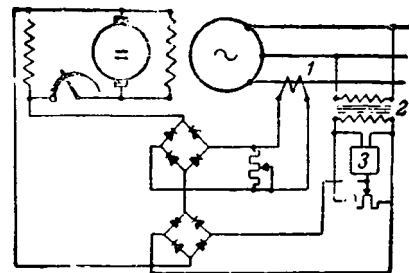


Рис. 3. Схема компаундирования с коррекцией напряжения:

1 — основной трансформатор тока; 2 — трансформатор напряжения; 3 — измерительный орган АРН

статической и динамической устойчивости как параллельно работающих электростанций, так и отдельных генераторов, питающих сравнительно мощные асинхронные двигатели (например, генераторы собственных нужд и др.). Даже при простой схеме компаундирования выполняет функцию автоматического регулирования напряжения при меняющейся нагрузке (рис. 1) 2.

Ближайшей задачей является еще большее уменьшение колебаний напряжения компаундированного генератора при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной, а также обеспечение поддержания напряжения генератора при повышении нагрузки сверх номинальной путем полной форсировки возбуждения при снижении напряжения до критического значения. К разрешению этой задачи ведут следующие пути.

Нелинейные сопротивления в схеме компаундирования. Если выполнить установочное сопротивление компаундирования так, чтобы его величина возрастала при увеличении проходящего через него тока, или, наоборот, ввести в цепь компаундирующего тока сопротивление, величина которого умень-

шалась бы при возрастании тока, то этим было бы достигнуто дальнейшее улучшение внешней характеристики компаундированного генератора. Практически это может быть осуществлено при помощи сопротивления с резко выраженной положительной температурной характеристикой — в первом случае (предложено акад. В. М. Хрущовым) или при помощи тиритового сопротивления — во втором случае. Все же при изменяющемся в широких пределах коэффициенте мощности нагрузки, а также из-за гистерезиса и магнитного насыщения возбуждателя таким путем не удастся еще получить желательную стабильную внешнюю характеристику.

Компаундирование от тока и напряжения. Если осуществить схему компаундирования тока, как показано на рис. 2, где дополнительное возбуждение генератора зависит и от тока нагрузки, и от напряжения на клеммах генератора, сдвинутого по фазе от тока на 90° , то внешняя характеристика генератора в отличие от предыдущего теоретически не будет зависеть от коэффициента мощности меняющейся нагрузки. Недостатком этой схемы является сохранение влияния гистерезиса и магнитного насыщения возбуждателя, причем последнее по-прежнему сильно проявляется при возрастании нагрузки сверх номинальной. Кроме того соединение вторичных цепей трансформатора тока и трансформатора напряжения не может быть выполнено непосредственно, а требует дополнительного усложнения схемы путем введения, например, как показано на чертеже, сравнительно мощного дросселя со своим трансформатором тока.

Коррекция компаундирования измерительным органом автоматического регулятора напряжения. Радикальное решение вопроса может быть получено путем использования измерительного органа какого-либо из существующих типов автоматических регуляторов напряжения для коррекции компаундирования. При этом измерительный орган АРН может воздействовать при изменении тока нагрузки или на устано-

¹ Противоварийный циркуляр Технического отдела НКЭС СССР № 23, май 1943 г. «О компаундировании синхронных генераторов».

² Расчет выполнен инж. К. А. Смирновым.

мочное сопротивление обычной схемы компаундирования, или может быть связан с дополнительным (корректирующим) блоком, питающимся от трансформатора напряжения, как показано на рис. 3.

Последняя схема представляется наиболее целесообразной, так как обеспечивает необходимое регулирование также при холостом ходе генератора и сохраняет простоту и высокую надежность основного компаундирующего блока от тока нагрузки, выполняемого во всех случаях одинаково и лишь при необходимости дополняемого корректирующим блоком. При использовании в качестве измерительного органа цепи электронного регулятора напряжения, управляющего подмагничиванием дросселя, являющегося установочным сопротивлением³, устройство отдельного корректирующего блока, питаемого от трансформатора напряжения, исключает значительное повышение напряжения на выпрямителях в первый момент короткого замыкания (вследствие электромагнитной инерции дросселя). Это короткое замыкание может возникнуть в том случае, когда дроссель является непосредственно установочным сопротивлением компаундирующего блока от тока нагрузки.

В схеме, показанной на рис. 3, установочное сопротивление основного компаундирующего блока может быть выполнено нерегулируемым, причем оно выбирается таким образом, чтобы при нормальном компаундировании (шунтовой реостат возбудителя находится в положении хода генератора) трансформаторы тока обеспечили возбуждение, соответствующее полной нагрузке генератора при наиболее высоком коэффициенте мощности, требуемом реальными эксплуатационными режимами. Увеличение реактивной нагрузки, например, до номинальной величины потребует добавочного возбуждения, которое подается корректирующим блоком от трансформатора напряжения. Минимальный эксплуатационный коэффициент мощности генератора или работа при холостом ходе определяют, с другой стороны, диапазон корректирующего добавочного возбуждения.

Как показали проведенные расчеты компаундирования для турбогенераторов различных габаритов от 1,5 MW до 100 MW, мощность, требующаяся для добавочного возбуждения при нормальном компаундировании и номинальной нагрузке, не превышает 80—90 VA на фазу, а с учетом потерь в установочном сопротивлении — 250—300 VA на фазу. Мощность корректирующего устройства составит лишь небольшую долю указанных величин, поэтому в большинстве случаев не понадобится установка специальных трансформаторов напряжения.

Совместная работа системы компаундирования с электро-механическими регуляторами напряжения. В существующих энергосистемах большинство основных генераторов имеет электро-механические регуляторы напряжения (АРН). Как показали расчеты, подтвержденные двухлетним опытом эксплуатации ряда компаундированных генераторов электростанций Урала, совместная работа системы компаундирования с АРН как на одной и той же машине, так и при различных сочетаниях в параллельной работе происходит вполне устойчиво.

Компаундирование облегчает работу АРН, разгружая последние в пределах их зоны нечувствительности. С другой стороны, АРН, будучи установленными лишь на части генераторов системы, обеспечивают поддержание постоянства напряжения.

Поэтому при введении в эксплуатацию новых генераторов в схемах, где имеется уже значительное количество установленных и работающих АРН, компаундирование может осуществляться по простой схеме, в зависимости от тока нагрузки, без корректировки от напряжения. В этом случае при напряженном балансе мощности в системе целесообразно устанавливать на мощных компаундированных генераторах, работающих без АРН, реле понижения напряжения для форсировки возбуждения при посадках напряжения до величины, приближающейся к критической. Форсировка возбуждения может быть осуществлена как закорачиванием шунтового реостата возбудителя, так и введением добавочного сопротивления в цепь установочного реостата компаундирования.

Таким образом применение корректировки от напряжения для компаундированных генераторов может быть ограничено, во всяком случае до организации выпуска соответствующих регуляторов нашей электропромышленностью, генераторами без АРН, работающими отдельно от системы.

³ Подобное устройство разрабатывается в настоящее время на кафедре автоматики и релейной защиты МЭИ под руководством проф. С. А. Лебедева.

При совместной работе системы компаундирования и АРН на одной и той же машине, как показали анализ и экспериментальный опыт, целесообразно оставлять АРН включенным в цепь шунтового реостата возбудителя. Регулирующий эффект его при этом сохраняется достаточно высоким, и в дельных случаях требуется лишь произвести новую наладку АРН, изменив соотношение между величиной нерегулируемого и регулируемого сопротивления.

Схема замещения явнополюсной синхронной машины

Кандидат техн. наук Р. П. ЖЕЖЕРИН

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

В теории двух реакций явнополюсной синхронной машины токи и напряжения рассматриваются в проекциях на продольную и поперечную оси. Такому рассмотрению соответствует диаграмма Blondela. Картину физических процессов в машине можно сделать более наглядной, если принять за основные оси направление вектора магнитного потока в воздушном зазоре Φ_a и нормальное к нему направление вектора напряжения U_a .

Такая трактовка рабочего процесса в явнополюсных синхронных машинах облегчает исследование целого ряда вопросов, как, например, рабочих характеристик машин, их параллельной работы, исследования насыщения, самовозбуждения и т. д.

Вектор U_a назовем вектором напряжения на клеммах идеальной явнополюсной синхронной машины и будем под идеальной машинной подразумевать машину без потерь, без рассеяния и без насыщения. Рассматриваем конструкцию без демиферной обмотки. Для идеальной машины, обладающей продольным реактивным сопротивлением X_{ad} и поперечным X_{aq} , легко определить величину и направление вектора э. д. с. возбуждения E_0 , а также направление продольной и поперечной осей машины, если заданы напряжение U_a и также ток и фаза нагрузки I_a и φ_a .

Рассмотрим случай генератора и построим заданные векторы $OU = U_a$; $OI = I_a$ (рис. 1); откладываем перпендикулярно к I_a векторы $UC = I_a X_{aq}$ и $UD = I_a X_{ad}$ и строим CD , как на диаметре, окружности с центром в M . Назовем фигуру $UCFDJC$ „маятником э. д. с. реакции якоря“.

После этого величина и направление вектора возбуждения E_0 определяется отрезком OE прямой, проведенной из точки O через точку C „маятника“ до пересечения в точке E с окружностью диска „маятника“. Направление поперечной оси будет определяться прямой, проходящей через точки C и E , а направление продольной оси — прямой, проходящей через E и D . Направления эти показаны на рис. 1 прямоугольниками. Угол между поперечной осью OL и напряжением U_a обозначен через θ_a и между OL и током I_a — через φ_a . Из рис. 1 следует, что

$$\varphi_a = \theta_a + \varphi_a,$$

и, кроме того, следует, что

$$\sin \theta_a = \frac{X_{aq} \cos \varphi_a}{\sqrt{(z_{an} + X_{aq} \sin \varphi_a)^2 + X_{aq}^2 \cos^2 \varphi_a}};$$

$$\sin \varphi_a = \frac{X_{aq} + z_{an} \sin \varphi_a}{\sqrt{(X_{aq} + z_{an} \sin \varphi_a)^2 + z_{an}^2 \cos^2 \varphi_a}},$$

где $z_{an} = \frac{U_a}{I_a}$ — модуль полного сопротивления внешней

нагрузки идеального генератора. Таким образом достаточно знать параметры машины и нагрузки X_{aq} , z_{an} и φ_a , чтобы

разделить углы θ_a и ψ_a . Заметим, что на рис. 1 угол CDE равен ψ_a и угол CME равен $2\psi_a$. Напряжение реакции якоря представится на рис. 1 вектором $U_\delta = UE$. Этот вектор складывается из двух составляющих — из активной GE , параллельной току I_a , и из реактивной UG , перпендикулярной к I_a . Рассмотренная диаграмма (рис. 1) будет диаграммой соотношений, если масштаб всех векторов уменьшить в I_a раз. В такой диаграмме вектор OU представит собой полное явление нагрузки идеального генератора, его составляющие будут $OR = r_{an}$ и $RU = X_{an}$. Далее, вектор UC равен X_{aq} и $UD = X_{ad}$. Полное сопротивление реакции якоря $= UE$ будет состоять из двух составляющих — из активной GE , которая будет равна

$$r_{ad} = \frac{X_{ad} - X_{aq}}{2} \sin 2\psi_a = X_{ac} m \sin 2\psi_a,$$

реактивной UG , равной

$$X_{ad} = X_{ac} (1 - m \cos 2\psi_a),$$

где $X_{ad} = \frac{X_{ad} + X_{aq}}{2} = UM$ — среднее значение синхрон-

ного реактивного сопротивления, а $m = \frac{X_{ad} - X_{aq}}{X_{ad} + X_{aq}}$. За-

метим, что r_{ad} может принимать не только положительные, но и отрицательные значения. Назовем r_{ad} и X_{ad} активным

и реактивным действующими синхронными сопротивлениями якоря. Полное синхронное сопротивление будет равно

$$Z_{ad} = \sqrt{r_{ad}^2 + X_{ad}^2} = X_{ac} \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos 2\psi_a},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{ad} = X_{ad} : r_{ad} = (1 - m \cos 2\psi_a) : m \sin 2\psi_a.$$

Отношение $E_0 : I_a$ будет играть роль „генерирующего сопротивления“. Понятия о сопротивлениях r_{ad} и X_{ad} — сопротивлениях реакции якоря машины — позволяют построить схему замещения идеальной машины, которую назовем серийной схемой и которая изображена на рис. 2.

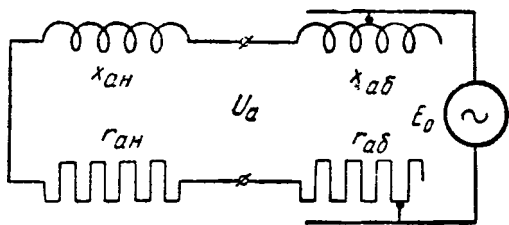


Рис. 2

На этой схеме генератор E , не имеющий реакции якоря, т. е. которого равно E_0 , работает на внешнюю цепь, состоящую из последовательно соединенных сопротивлений r_{an} и X_{an} внешней нагрузки идеального генератора и из синхронных сопротивлений r_{ad} и X_{ad} , величина которых определяется величиной и фазой нагрузки и параметрами машины.

Помимо серийной схемы для той же машины может быть построена шунтовая схема замещения. Для этого построим сначала векторную диаграмму, из которой можно было бы определить величину и направление тока возбуждения идеальной машины.

Строим (рис. 3), как и в случае рис. 1, заданные векторы I_a и I_0 и откладываем от конца вектора OI векторы $IB = U_a : X_{ad} = U_a b_{ad}$ и $IA = U_a : X_{aq} = U_a b_{aq}$, направляя их перпендикулярно к U_a в сторону отставания. Строим затем на отрезке AB , как на диаметре, окружность с центром в точке M . Если соединить точку O с A , то пересечение OA с окружностью позволит определить вектор „тока реакции якоря“ I_y , иначе, вектор тока намагничивания машины со стороны ротора IS и вектор тока возбуждения машины со стороны

ротора SO , который преодолевает размагничивающий эффект тока I_a и намагничивает машину со стороны ротора.

Направление продольной оси определится прямой AS и направление поперечной оси — прямой SB . Заметим, что угол BAS равен θ_a и угол BKS равен $2\theta_a$. Кроме того зам. тим, что ток реакции якоря $I_y = IS$ складывается из реактивной составляющей IH и активной (отрицательной) составляющей HS .

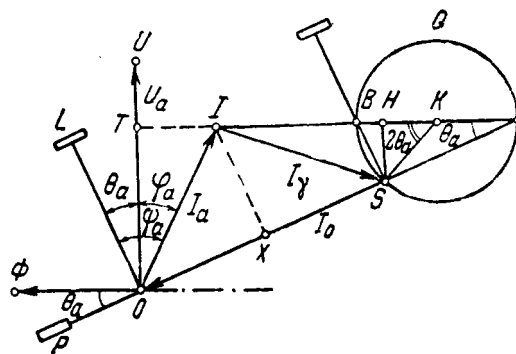


Рис. 3

Диаграмма токов на рис. 3 преобразуется в диаграмму проводимостей, если масштаб ее уменьшить в U_a раз. Тогда вектор OI представит собой проводимость внешней цепи идеального генератора Y_{an} ; его активная компонента будет $g_{an} = OT$, а реактивная $b_{an} = TI$.

Вектор IS представит „проводимость реакции якоря“, реактивная компонента которой IH будет равна

$$b_{ay} = b_{a0} (1 - m \cos 2\theta_a),$$

где величина

$$b_{a0} = \frac{b_{ad} + b_{aq}}{2} = \frac{X_{ad} + X_{aq}}{2X_{ad}X_{aq}} = IK,$$

называемая основной синхронной проводимостью, а модуляция

$$m = \frac{X_{at} - X_{aq}}{X_{aq} + X_{aq}} = \frac{b_{aq} - b_{at}}{b_{aq} + b_{ad}}.$$

Активная составляющая проводимости реакции якоря будет равна

$$g_{ay} = b_{a0} m \sin 2\theta_a = HS.$$

Заметим, что g_{ay} может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Назовем b_{ay} и g_{ay} реактивной и активной синхронными проводимостями машины. Полная проводимость реакции будет равна

$$Y_{ay} = b_{a0} \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos 2\theta_a}$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi_{ay} = b_{ay} : g_{ay} = (1 - m \cos 2\theta_a) : m \sin 2\theta_a.$$

Отношение тока возбуждения $I_0 = SO$ к U_a назовем „генерирующей проводимостью“.

Соответственно диаграмме проводимостей на рис. 3 можно построить схему замещения, которая изображена на рис. 4. На этой схеме не имеющий реакции якоря генератор,

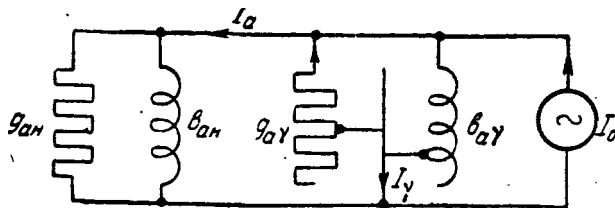


Рис. 4

ток которого равен I_0 , работает на внешнюю цепь, которая состоит из параллельно соединенных проводимостей g_{an} и b_{an} внешней нагрузки, а также из синхронных проводимостей g_{ay} и b_{ay} . Величина последних определяется величиной

и фазой нагрузки и синхронными проводимостями машины b_{ad} и b_{aq} .

Переходя от случая идеальной машины к машине с потерями, с рассеянием и с насыщением, будем попрежнему основными осями считать оси Φ_a и U_a . Кроме того ограничим себя рассмотрением машины, которая насыщена вне активной зоны. Под машиной, насыщенной вне активной зоны, будем понимать машину, у которой форма кривой распределения магнитного потока в зазоре и, следовательно, форма кривой э. д. с. холостого хода не изменяются с насыщением и остаются синусоидальными. Для такой машины диаграмма напряжений (сопротивлений) и диаграмма токов (проводимостей) представлены на рис. 5.

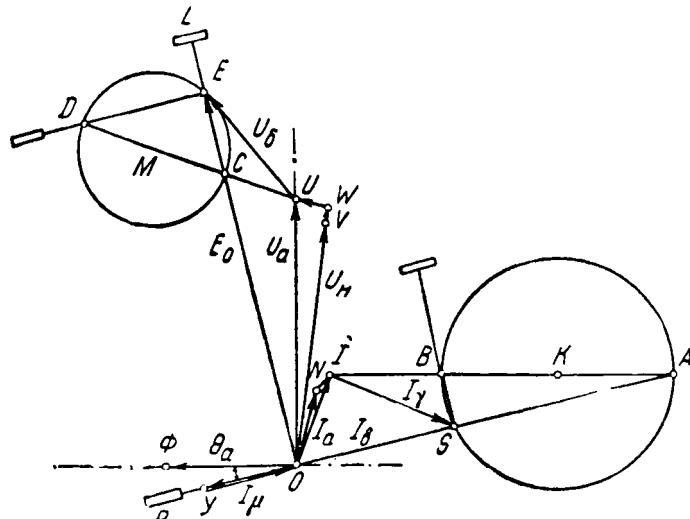


Рис. 5

На этом рисунке напряжение на клеммах действительной машины представлено вектором $OV = U_n$, падение напряжения в обмотке — векторами $VW = I_n r_s$ и $WU = I_n X_s$. Вектор $OU = U_a$ попрежнему будет вектором напряжения идеальной машины. „Маятник э. д. с. реакции якоря“ строится так же, как и в случае рис. 1.

Ток идеальной машины $OI = I_a$ будет представлен на рис. 5 суммой двух токов: тока действительной нагрузки $ON = I_n$ и тока потерь в железе (токи Фуко и гистерезис), приведенного к обмотке статора, $NI = I_f$. Кроме активной слагающей ток I_f имеет и реактивную слагающую. „Маятник тока реакции якоря“ строится так же, как и в случае рис. 3.

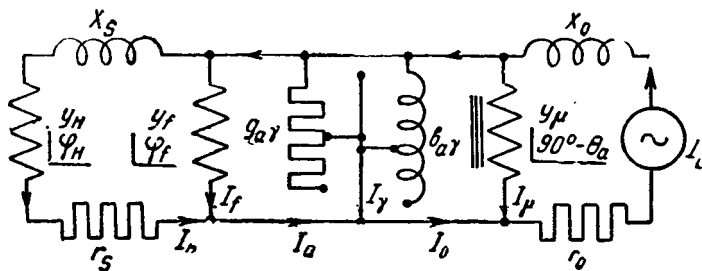


Рис. 6

Ток возбуждения машин со стороны ротора $SY = I_b$ состоит из двух составляющих — из тока $SO = I_0$, намагничивающего воздушный зазор и преодолевающего размагничивающий эффект тока I_a , и из тока $OY = -I_\mu$, намагничивающего со стороны ротора железо машины по продольной оси. Эта составляющая тока направлена противоположно току намагничивания железа со стороны статора $I_\mu = YO$. Заметим, что сумма всех токов: I_b , I_μ , I_0 , I_n , I_f и I_γ (ток реакции) равна нулю.

Схема замещения действительной машины (без демпферной обмотки) представлена на рис. 6, где индексы при параметрах имеют тот же смысл, что и в тексте. Проводимость намагничивания железа по продольной оси — нелинейная, ее величина зависит от U_a . В цепи тока возбуждения на рис. 6 показаны активное сопротивление ротора r_0 и его реактивное сопротивление рассеяния X_0 .

Номограмма нагрузочной способности силового трансформатора

Кандидат техн. наук Л. М. ШНИЦЕР

Московский трансформаторный завод им. Куйбышева

В одной из предыдущих работ [Л. 1] автором показано, что нагрузочная способность силового трансформатора определяется семейством кривых (прямых), соответствующих различным значениям коэффициента S заполнения максимума суточного графика нагрузки. Это семейство прямых построено по данным, полученным путем предварительно произведенного ряда довольно кропотливых вычислений. Однако анализ полученной номограммы и лежащих в основе ее построения принципиальных положений показывает, что для удовлетворяющего нормам нагрева трансформатора можно заранее построить прямую нагрузочной способности для любого значения S .

Абсцисса n_s точки B_s данной прямой (рис. 1) представляет собой максимальное число часов за сутки n_{\max} течение которых трансформатор может работать при максимальной нагрузке при данном коэффициенте заполнения графика. Это максимальное число n_{\max} определяется двухступенчатым графиком (рис. 2), а поэтому $n_{\max} = S \cdot 24$ h; тогда

S	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
n_{\max}	12	14,4	16,8	19,2	21,6	24

Ордината K_s точки B_s , представляющая допустимую течение этого промежутка времени $(S \cdot 24)$ нагрузку $\frac{I_{\max}}{I_{\text{но}}}$

определяется выражением

$$K_s = 1 + 0,26 \log \frac{0,8}{\gamma_0},$$

где γ_0 — относительный износ изоляции трансформатора при суточном графике с коэффициентом заполнения

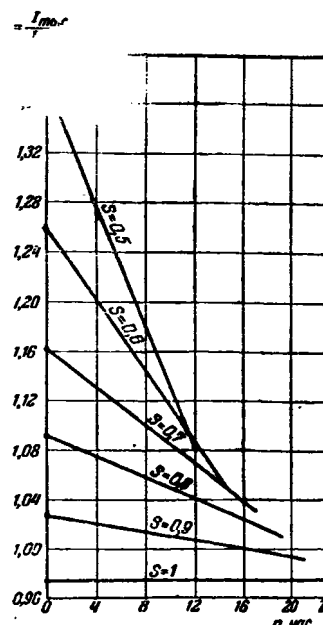


Рис. 1.

При среднегодовой температуре θ_s окружающего воздуха, отличной от $+5^\circ$, ординаты K должны быть помножены на коэффициент

$$A = 1 + \frac{5 - \theta_s}{100}$$

и с суточным максимумом, равным номинальной нагрузке трансформатора.

Но для $n = S \cdot 24$ час. имеем $\gamma_0 \approx S^{1,33}$ [Л. 2], а потому ордината точки B_s определяется выражением

$$s = 1 + 0,26 \log \frac{0,8}{S^{1,33}}.$$

Абсцисса точки A_s есть $n = 0$.

Ордината точки A_s , определяющая систематически допустимый мгновенный максимум, как оказывается, обратна

ирциональна \sqrt{S} . (Этого а priori предвидеть было можно, хотя оно и логично.) Таким образом для любого зна-

откуда

$$C = S \frac{I_{\max}}{I_{\text{ном}}} \quad (3)$$

Из соотношения (3) следует, что для лучшего использования мощности при данном коэффициенте заполнения S графика предпочтительнее иметь возможно больший суточный максимум в течение меньшего промежутка времени, чем меньший суточный максимум в течение большего промежутка времени. Так, например, при $S = 0,7$ при суточном максимуме $K = 1,14$ в течение $n = 1,5$ час. имеем $C = 0,7 \cdot 1,14 = 0,8$; при суточном максимуме $K = 1,7$ в течение $n = 11$ час. имеем $C = 0,7 \cdot 1,07 = 0,75$.

Литература

1. Электрические станции № 10, 1943 г.
2. Электрические станции № 9, 1942 г.

Трансформаторно-выпрямительные агрегаты для электрической очистки газов

Доктор техн. наук, проф. А. М. БАМДАС
Москва

Электрическая очистка промышленных газов применяется для получения газа, пригодного к промышленному использованию, для улавливания частиц ценных материалов, а также для выпуска газа в атмосферу без загрязнения окружающей среды. В СССР электрическая очистка газов начала применяться с 1925 г. Следует ожидать широкого развития электрической очистки газов на электростанциях и в разных отраслях промышленности: черной и цветной металлургии, на химических, цементных и других заводах.

Очистка газа производится в особых аппаратах—электрофильтрах, являющихся капитальными техническими сооружениями; достаточно указать, что фильтр ДМ-9 для очистки 80 000 м³/ч доменного газа представляет собой башню высотой около 35 м. Электрофильтры бывают двух типов: трубчатые и пластинчатые (рис. 1).

Принцип действия фильтра заключается в использовании коронного разряда. Под действием электрического поля заряды двигаются от коронирующих проводов к заземленным, так называемым осадительным электродам. В фильтре вокруг коронирующих проводов образуется зона ударной ионизации, и частицы пыли, взвешенные в газе, заряжаются. Под действием поля заряженные частицы двигаются к заземленным электродам, осаждаются на них и затем удаляются в бункеры. Для улавливания частиц пыли необходимо наличие в фильтре достаточного электрического заряда и сильного поля. Существенное влияние на процесс очистки оказывает ряд факторов—скорость газа, его влажность и температура, а также размеры подлежащих осаждению частиц.

Электрическая очистка газов имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами очистки, обеспечивая более полное очищение, относительно малый расход энергии (0,16 кВт/ч на 1 000 м³ газа), а также дает возможность очищать газы, содержащие кислоты.

Электрическая очистка газов протекает значительно лучше при питании фильтра не переменным током, а током одного направления. В настоящее время коронирующие провода промышленных фильтров подключают к отрицательному полюсу цепи высокого напряжения. Такой выбор полярности вызван большей подвижностью отрицательно заряженных частиц по сравнению с положительными и большей электрической крепостью фильтра при отрицательной короне. Требуемый для фильтра ток одного направления получают путем выпрямления напряжения, получаемого от высоковольтных трансформаторов. Применение генераторов постоянного тока для электрофильтров неэкономично.

Для выпрямления напряжения в СССР применяют высоковольтные механические выпрямители; в США наряду с ними получили распространение кенотроны и газотроны; в Англии разработаны для той же цели меднозакисные выпрямители. Следует признать, что механические выпрямители значительно дешевле, не нуждаются в сложной автоматике и при частых коротких замыканиях в фильтре несравненно долговечнее, чем кенотроны.

В СССР, до Отечественной войны, выпускался только один универсальный тип трансформаторно-выпрямительного агрегата для электрофильтров на номинальные напряжения 220, 380 или 500 В при вторичном напряжении 28—90 кВ_{макс}

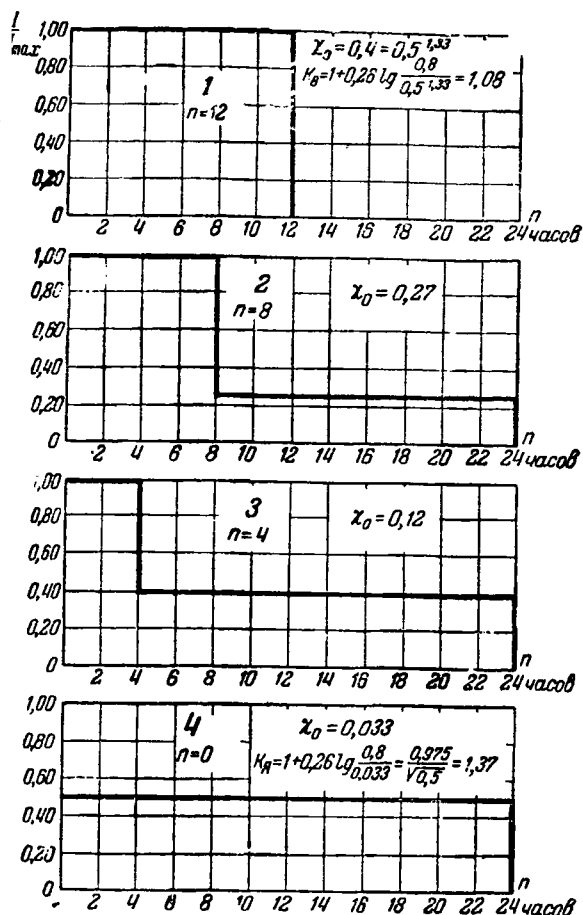


Рис. 2. Нагрузки с коэффициентом заполнения

нения S можно построить прямую нагрузочной способности трансформатора чрезвычайно просто, а именно:

1. Откладываем координаты точки B_s :

$$n_s = S \cdot 24, \quad K_s = 1 + 0,25 \log \frac{0,8}{S^{1,33}}.$$

2. Откладываем координаты точки A_s :

$$n = 0, \quad K_s = \frac{K_1}{\sqrt{S}} = \frac{9,75}{\sqrt{S}},$$

где K_1 — значение K_s при $S = 1$ (см. таблицу).

Прямая, соединяющая эти две точки A_s и B_s , есть искомая. Рис. 1 представляет собой номограмму, построенную для значений S от 0,5 до 1.

S	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$n_s = S \cdot 24$	12	14,4	16,8	19,2	21,6	24
$K_s = 1 + 0,25 \log \frac{0,8}{S^{1,33}}$	1,08	1,05	1,03	1,01	0,99	0,975
$\frac{K_1}{\sqrt{S}} = \frac{9,75}{\sqrt{S}}$	1,375	1,26	1,16	1,03	1,025	0,975

По этой номограмме можно регулировать нагрузку трансформатора в течение суток наиболее удобным образом, т. е. так, чтобы при данном коэффициенте заполнения S графика иметь возможно больший коэффициент использования C мощности.

Действительно, по самому определению S и C имеем:

$$S = \frac{\int_0^t idt}{I_{\max} t}; \quad C = \frac{U_n \cdot \frac{1}{t} \int_0^t idt}{U_n I_n},$$

и предельном значении выпрямленного тока 200 мА. Иностранные фирмы изготавливают агрегаты разных мощностей — от 5 до 45 kVA.

Необходимо наладить изготовление трех типов трансформаторно-выпрямительных агрегатов — для выпрямленного тока в 150, 200 и 350 мА с питанием от номинального первичного напряжения в 380 В. Лишь небольшое число агрегатов должно быть универсальным — для 380 и 500 В. Агрегаты для электрофильтров должны выполняться с регулируемым вторичным напряжением.

Пределы регулирования напряжения существующих агрегатов отечественного производства чрезмерно велики, что их сильно удорожает. Достаточно регулирование в пределах от 60 до 100%; целесообразен выпуск агрегатов с разными вторичными номинальными напряжениями, например, 40—70 kV_{max} и 60—100 kV_{max}. Для промышленных фильтров вполне достаточно простая система ступенчатого регулирования напряжения; плавное регулирование нужно только для лабораторных установок. Для ступенчатого регулирования напряжения теперь пользуются добавочным автотрансформатором с переключением числа витков, от чего следует

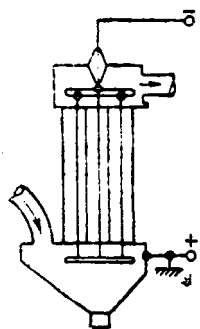


Рис. 1

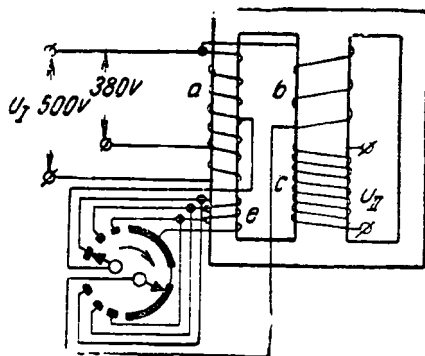


Рис. 2

отказаться, а выполнять регулируемым высоковольтный трансформатор электрофильтра (Л. 1). В обычных агрегатах нужно переключать число витков первичной обмотки трансформатора, а для универсальных агрегатов применять трансформатор особой системы (Л. 2). В этом случае можно применить новую оригинальную конструкцию (рис. 2), имеющую вдвое меньшее число отпаек и соединительных проводов по сравнению с прежней конструкцией. Обмотка *b* подключается с помощью коммутатора с двумя щетками к первичной обмотке *a*, имеющей добавочную цепь *e*, присоединенную последовательно или соответственно навстречу. Для лабораторных фильтров следует применять автотрансформатор с подвижной короткозамкнутой обмоткой (Л. 3).

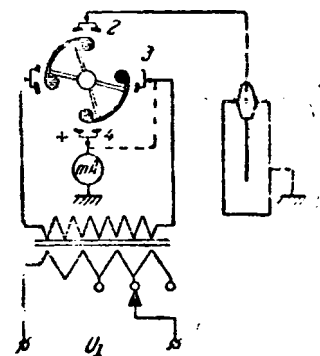


Рис. 3

переключателем, при помощи которого периодически меняется порядок присоединения зажимов в цепи фильтра к выводам высоковольтной обмотки трансформатора.

Выполнение по предложению автора неподвижных контактов выпрямителей из двух раздвигаемых частей (Л. 4) дает возможность изменять продолжительность замыкания. Механические выпрямители вращаются четырехполюсными синхронными реактивными двигателями.

На рис. 3 дана схема устройства рациональной конструкции двухполупериодного выпрямителя. Двойные щетки 1 и 3 соединены со вторичной обмоткой регулируемого трансформатора; выпрямленное напряжение получается на щетках 2 и 4. Выпрямитель, изображенный на рис. 3, может быть легко превращен по предложению автора, в полупериодный выпрямитель типа МВ. Нужно только снять щетки 3 и 4 и

соединить наглухо идущие к ним провода (соединение заизолировать).

В США выпускаются агрегаты для одновременного очередного питания двух фильтров полупериодным током. Такой выпрямитель имеет два вращающихся креста, контактных дугами; первый крест выпрямляет напряжение, а второй его распределяет. В течение одного полупериода ток идет в первый фильтр, в течение другого — во второй. Легко заметить, что трансформатор нагружен в оба периода и, следовательно, хорошо использован. Выпрямитель с двумя крестами, однако, громоздок; представляет интересная разработка подобной конструкции, но только с одним крестом.

Трехфазные выпрямители западноевропейских стран сложны. Значительно более простым и компактным является трехфазно-двухфазный выпрямитель типа СБ системы авт. Он обладает лучшими свойствами по сравнению с трехфазным и требует примерно в два раза меньше площади. Одной особенностью выпрямителя СБ является осуществление непрерывного приключения цепи фильтра к обмоткам трансформатора (Л. 5).

Степень очистки растет с увеличением силы тока; большее значение определяется предельно допустимой частотой выпрямленного напряжения и формой его кривой. Возможная амплитуда напряжения зависит от электрической прочности фильтра. Последняя, в особенности для фильтра с непроводящей пылью, может быть разной при применении различных типов выпрямителей. В наших опытах с фильтром для очистки газа с непроводящей пылью электрическая прочность при многофазном выпрямителе равнялась 50 kV, а при двухполупериодном превышала 65 kV_{max}.

Выпрямитель СБ, по-видимому, целесообразнее других фильтров с проводящей пылью. При этом выпрямителе, может быть, получена лучшая степень очистки газа. Однако, особенно полупериодные, выпрямители более рациональны для фильтров с непроводящими частицами. Вопрос о лучшем типе полностью, однако, еще не разрешен.

В заключение отметим, что новейшие американские агрегаты автоматизированы; в них осуществлено многократное повторное включение при пробоях в фильтре, защита сдержкой времени и т. д. Подобные агрегаты смогут найти себе применение главным образом для очистки дымовых газов на электростанциях. Первоочередной задачей электротехники является выпуск агрегатов с механическими выпрямителями, с автоматическим пуском при заданной полярности цепи выпрямленного напряжения.

Литература

1. А. М. Бамдас. Выбор системы регулирования напряжения для аппаратов. Электричество № 4, 1944.
2. А. М. Бамдас. Регулируемые трансформаторы. Электричество № 1—2, 1944.
3. А. М. Бамдас и Б. В. Беляев. Автотрансформаторы системы Норриса. Успехи рентгеновской техники № 1, 1944. Электричество № 9, 1 40.
4. А. М. Бамдас и Г. В. Голодолинский. Раскоммутационные устройства выпрямителей. Успехи рентгеновской техники № 1, 1937.
5. А. М. Бамдас. Мощный механический выпрямитель СБ. Электричество № 12, 1936.

К вопросу о грозопоражаемости нефтяных озер

Инж. И. Е. БАЛЫГИН
Ленинград

В журнале «Электричество» № 8—9 за 1944 г. помещены статьи доктора техн. наук И. С. Стекольниковой и кандидата техн. наук В. С. Комелькова о грозопоражаемости нефтяных озер. Из теоретических и опытных данных ими найдено, что вероятность удара молнии в озеро, с воспламенением после него, весьма мала и оценена как один раз в несколько тысяч лет. Практические выводы, хотя и не высказаны авторами, однако, результаты работ рекомендуются учитывать в практике.

При таком положении может создаться впечатление, что защита нефтяных озер от ударов молнии не является обязательной и что нефть в озерах уже «защищена» законом теории вероятности. Ввиду большой важности этого вопроса целесообразно обсудить все это с учетом некоторых факторов и осуществленных в этой области мероприятий.

известно, какими значениями вероятности поражения нефтяных озер руководствовались некоторые нефтяные компании в Калифорнии (США), но их огромные нефтяные запасы оставались не тщательно защищенными до апреля 1926 г., когда произошел случай поражения, нанесший компаниям миллионные убытки, по отзывам американской печати сравнимые с убытками от землетрясения в Сан-Франциско (1906 г.).

С момента последнего удара молний в место, где потом оборудованы Калифорнийские нефтяные озера, очевидно прошло уже несколько тысячелетий, и в 1926 г. был, повидно, срок для нового посещения этого места грозой и для удара молнии.

По данным периодической американской печати (Л. 1—9) было известно, что нефтяные компании не стали надеяться на то, что новый удар молнии в нефтехранилища произойдет через несколько тысячелетий, но сразу же привлекли к разработке вопроса о грозозащите соответствующие лаборатории, институты, а также отдельных лиц, компетентных в этой области, и срочно произвели усиленную грозозащиту этих нефтяных объектов.

На основании полученных данных весьма широко поставленных научно-исследовательских работ уже к 1927 г. были изобретены в основном три способа защиты от молнии нефтяных объектов.

1. Высокие (45 м) стальные мачты с хорошими заземлениями (рекомендованы Ликом). Эти мачты должны были служить молниеприемниками для прямых ударов (Shell, Corp. of California).

2. Металлические заземленные сетки (предложены Скермом) для защиты главным образом от индуктированных паров и возможных других поражений при близком раз-

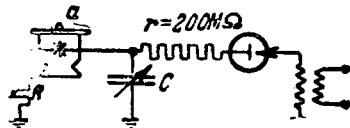


Рис. 1.

ря процесса разряда. Сетка над озером укрепляется на железных столбах вокруг озера и по нему (применяется также Shell Co).

3. Колочая проволока (предложена Кейджем). Она навешивается на стальных мачтах высотой 24—28 м в три ряда с расстоянием 1,2 м между рядами. Этот вид защиты предназначен главным образом для такого разряда грозового облака до потенциалов, при которых разряд развиваться не может (применяет Rap-American Petroleum Company).

В смысле возможности воспламенения нефти пары летучих фракций нефти, находящиеся в непосредственной близости от зеркала резервуара, представляют большую опасность. Поэтому некоторые американские нефтяные компании применяют еще одну разновидность защиты от воспламенения — заполнение крытых резервуаров, в том числе и земных пространств, между зеркалом нефти и крышей инертным газом.

И. С. Стекольников и В. С. Комельков нашли, что траектория разряда молнии отклоняется в сторону у краев проводящего включения в почве к местам с лучшей проводимостью, и эти данные учли в выводах по вероятности поражения озера молнией и воспламенения его.

Если принять во внимание наличие над поверхностью паров легко воспламеняемых смесей этих летучих фракций нефти с воздухом, то с выводами авторов о возможности поражения озера нельзя согласиться. Эти смеси, конечно, и у краев озера, будут также диффундировать разноситься воздушными течениями даже по берегу, и не будет большой разницы, ударит ли молния прямо в нефть или удар ее придется на край берега. Все равно озеро воспламенится.

Но каковы особенности воспламенения этих смесей? В этом отношении не лишним будет вкратце сообщить о проведенных автором опытах с воспламенением от электрических искр паров бензина удельного веса 0,718 в различной смеси с воздухом, в зависимости от тока, проходящего через искру, при неизменной форме импульса. Опыты производились по схеме на рис. 1, где Γ — сосуд с исследуемой смесью. Расстояние между железными электродами цилиндрической формы при опытах оставалось неизменным. Это расстояние пробивалось при $10 \text{ kV}_{\text{макс}}$ импульса. R и C каждый раз подбирались таким образом, что произведение

их оставалось постоянным. Длина импульса была 50 псес. Ток через искру изменялся в пределах от 0,001 до 417 А. Сопроотивление искры при токах, близких к дуговому разряду, и токах, характерных для тихого разряда, оставалось значительно меньше Λ и не могло заметно влиять на точность опытов.

То же можно сказать и в отношении ограничивающего сопротивления $r=200 \text{ M}\Omega$. Смесь исследовалась в эксикаторе емкостью 2,5 л. В крышке этого эксикатора было просверлено отверстие $d=1,2 \text{ мм}$, через которое пропусклась нитка от крышки стеклянной ампулки, в которую помещалось определенное весовое количество бензина. В закрытом эксикаторе ампулка открывалась посредством нитки и содержимое ее путем поворота парезного рычажка выливалось на подку эксикатора. Отверстие, в которое была пропущена нитка, закрывалось, и запускался вентилятор на дне эксикатора, приводимый в движение электродвигателем.

Сильная струя воздуха способствовала быстрому испарению бензина и перемешиванию паров его с воздухом. После 5—10 мин. перерыва вентилятор запускался вновь, после чего отверстие в крышке эксикатора ($d \approx 1,2 \text{ мм}$) открывалось на 5—10 мин. для выравнивания давления. Таким путем можно было создавать смеси определенных концентраций при нормальном давлении.

Опыты производились следующим образом: на электроды сосуда подавалось напряжение, и при соответствующей зарядке конденсатора (при напряжении 10 kV) проскакивала искра в атмосфере данной смеси. Токи изменялись ступенями в указанных выше пределах (15 ступеней), причем, если при проскакивании 5—10 искр смесь не воспламенялась, то величина тока увеличивалась на следующую ступень, и так до воспламенения, начиная с первой ступени. Из произведенных опытов было выявлено, что смесь 6% (объемные проценты) при $t=12^\circ \text{C}$ не воспламенялась при токах $1,1 \cdot 10^{-3}$ и $1,39 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ и воспламенение произошло только при токах $2 \cdot 10^{-3} \text{ А}$. Смесь же 5,3% воспламенилась и при $1,39 \cdot 10^{-3} \text{ А}$.

Бедные смеси, например, 1,5—1,6%, начинали воспламеняться только при токе через искру 250 А. Смесь же 1,4% воспламенялась при токе 250 А только при температуре 60°C (испытывалась в термостате), а смесь 1,3% не воспламенялась при этой температуре даже и при 417 А. При нормальной же температуре смесь 1,5% и ниже не воспламенялась даже при накаливании спирали из нихрома до ее перегорания. Строгая повторяемость опыта дает основание говорить об определенных закономерностях воспламенения смесей от величин токов, текущих через искру.

Применительно к грозозащите нефтяных озер можно из вышеприведенного сказать, что выводы И. С. Стекольников и В. С. Комелькова только тогда были бы правильными, если бы в самое жаркое время года концентрация паров летучих смесей нефти с воздухом над зеркалом озера не превышала 1,4—1,3% (объемные проценты), если эти летучие фракции по своим свойствам были бы близки к бензину с удельным весом 0,718.

Если же концентрация паров велика (3—4%), то такую смесь способен воспламенить самый незначительный стример с током в несколько мА, могущий появиться в результате

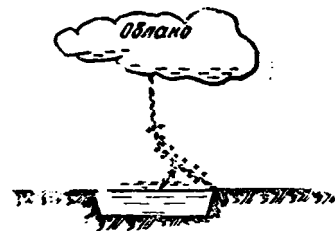


Рис. 2.

электростатической индукции от развивающегося вблизи разряда молнии. Появление такого рода стримеров весьма вероятно. Они, как известно, сфотографированы Мак Икроном и Мак Морисом (Л. 10). Принципиально нечто похожее наблюдалось и в лабораторных условиях Стекольниковым и Беляковым (Л. 11).

Предположим, что траектория разряда молнии в соответствии с выводами И. С. Стекольников и В. С. Комелькова отклонилась и что разряд уже закончен. Но в месте его прохождения, особенно в областях, прилегающих к земле, где создаются условия для развития главного разряда после прохождения сквозного лидера, останутся положительные ионы (рис. 2) с большой объемной плотностью.

Не сразу исчезнут и ионы противоположного знака на поверхности нефти, электростатически наведенные при разряде. Вместе эти заряды вполне могут создать потенциалы, достаточные для образования стримеров, которые, как говорилось выше, могут вызвать воспламенение.

Защита озера заземленной сеткой по Скеферу в этом отношении может быть весьма эффективной. На моделях В. С. Комелькова такие стримеры вызвать, конечно, было нельзя, но с ними все-таки нужно считаться.

В теоретических выводах И. С. Стекольниковой учтен только динамический процесс разряда, а все электростатические взаимодействия, весьма существенные в деле защиты указанных объектов, совсем не учтены и поэтому по выводам затруднительно судить о всей полноте процесса разряда. Аллюр падения напряжения (см. рис. 4 статьи И. С. Стекольниковой) относится именно к этому динамическому процессу, по окончании которого исчезнет и аллюр, но останется еще электростатический потенциал, который как последствие динамического разряда может быть опасен в отношении воспламенения нефти в озере.

В заключение нужно сказать, что исследования, проведенные И. С. Стекольниковой и В. С. Комельковым, конечно, представляют большой интерес и невозможно требовать исчерпывающих сведений о грозозащите, когда физика разряда еще очень неясна. Но работы указанных авторов нельзя принимать как ориентир в практических вопросах защиты нефтяных озер; нельзя эти работы понимать так, что защита нефтяных озер не является обязательной по причине очень небольшой вероятности поражения их молнией и воспламенения.

Литература

1. Diecke. Eng. News Record, июль, 1927.
2. Lisanan. El. World, V. 9, стр. 775, 1927.
3. Schaeffer. Bull. Amer. Petrol. Inst., V. 7, Apr., p. 168, 1926.
4. Schaeffer. AIEE, 46, Dec., стр. 1358, 1927.
5. Wilcox. Nation. Petrol. News, 9, 1927.
6. Peek. El. World, 83, Sept 18, стр. 572, 1923.
7. Peek. AIEE, 46, Febr., стр. 179, 1927.
8. Peek. GER, 31, стр. 117, 1927.
9. Peek. AIEE, 45, Dec., стр. 246, 1926.
10. McEachron and McMorris. GER, 39, стр. 493, 1936.
11. И. С. Стекольников и А. П. Беяков, ЖЭ и ТФ, вып. 4, 1938.

О заметке И. Е. Балыгина "К вопросу о грозопоражаемости нефтяных озер"

Доктор техн. наук И. С. СТЕКОЛЬНИКОВ
Кандидат техн. наук В. С. КОМЕЛЬКОВ

В своих замечаниях по поводу опубликованных нами статей И. Е. Балыгин считает, что их «нельзя принимать как ориентир в практических вопросах защиты нефтяных озер; нельзя эти работы понимать так, что защита нефтяных озер не является обязательной по причине очень небольшой вероятности поражения молнией и воспламенения их». По существу же И. Е. Балыгин, отвергая оценку целесообразности грозозащиты с учетом вероятности поражения, не вносит каких-либо определенных предложений.

Свои выводы автор обосновывает положениями: 1) наличием грозозащиты нефтяных озер, введенной некоторыми американскими нефтяными компаниями после случая поражения в апреле 1926 г., 2) воспламенением паров бензина от сравнительно ничтожных токов искрового разряда, наблюдаемых автором в его экспериментах, и в связи с этим—3) возможностью воспламенения паров летучих фракций, окружающих озеро, от стримеров, могущих возникнуть как в результате поля развивающейся молнии, так и от зарядов, остающихся на поверхности озера после завершения прямого удара молнии.

Все эти соображения учитывались при выполнении работ с привлечением значительно большего материала, чем это приводится автором, и были оценены следующим образом.

1. Заключение экспертов США по поводу пожара в Калифорнии не указывает на прямой удар молнии как на единственную причину пожара; материалов обследования оказалось недостаточно для вполне определенного вывода; возможной

причиной мог быть не только прямой удар, но и индуцированный искровой разряд или какая-либо причина иного порядка.

2. Наличие облаков легко воспламеняемых газов над поверхностью озера и в прилегающих районах принципиально возможно, но, как правило, не в таких количествах и не в тех концентрациях, как это предполагает И. Е. Балыгин.

Дело в том, что легкие летучие фракции довольно быстро испаряются из озер нефти и последние существуют длительное время, уже потеряв их. В этом, между прочим, новая причина того, что открытие нефтехранилища на нефтепромыслах избегаются, так как ценность нефти резко снижается. Бензины и газолин получаются уже в результате крекинг-процессов, а не прямой перегонкой.

Следует заметить, что заполнение свободных промежутков над зеркалом нефти в крытых хранилищах не преследует единственной цели уменьшения воспламенения нефти в ударах молний.

3. Эксперименты именно с такой нефтью, с отогнанными летучими, нами проводились в Энергетическом институте Академии наук СССР. Наша модель не исключала возможности образования встречных стримеров (они действительно), а тем менее исключало образование стримеров поверхностных зарядов, так как предзарядные градиенты были значительно выше, чем это могло иметь место в естественных условиях. Стримеров в опытах, однако, замечено не было.

Правда, при испытаниях на модели слой нефти был сотни раз меньше, чем в натуральном нефтехранилище, уменьшалось сопротивление утечки зарядов с зеркала озера. Этот недостаток частично компенсировался, а может быть перекрывался, теми повышениями предзарядных градиентов и малыми временами разряда, которые имели место в опытах.

Что касается практических рекомендаций по грозозащите нефтехранилищ, то они никогда не определялись одной лишь вероятностью поражения, как бы она мала или велика была. Вопрос в каждом конкретном случае решается с учетом возможных убытков при прямом ударе молнии, воспламенении озера нефти и тех капиталовложений, которые необходимы для осуществления грозозащиты. Для кого рода заключений опубликованный нами материал не является необходимыми показатели, не предвещая вопроса о необходимости защиты или отказа от нее.

В заключение укажем, что вероятность поражения или иного объекта определяется И. Е. Балыгиным неправильно. Если она оценивается, например, величиной в 0,01 то это совсем не значит, что нужно ждать поражения 100 лет или что интервалы между поражениями исчисляются таким же числом лет. Вероятность, как известно, представляет собой статистическую величину, от которой действительный случай может отклоняться в ту или иную сторону.

Магнитное поле кольцевых токов

Доктор техн. наук В. Ю. ЛОМОНОСОВ
Иваново

Пусть вектор плотности тока j направлен всюду касательным к окружностям, лежащим в параллельных плоскостях и центры которых находятся на одной оси. В цилиндрической системе координат ($x = r \cos \varphi$; $y = r \sin \varphi$; z — вектор j будет иметь одну составляющую j_φ).

Пользуясь формулой:

$$\bar{A} = \frac{1}{4\pi} \int \bar{j} \frac{dv}{R};$$

$$A_x = \frac{1}{4\pi} \int j_\varphi \frac{dv}{R} \quad \text{и т. д.}$$

(\bar{A} — вектор потенциал магнитного поля, dv — элемент объема, занимаемого токами, R — расстояние между dv и точкой наблюдения), можно разделить поле!

Правильным решением задачи о магнитном поле кольцевых токов будет следующее. Обозначив через z, r, φ координаты точки наблюдения, а через z_1, r_1, φ_1 координаты элемента объема, занимаемого токами, можно написать

$$A_x = \frac{1}{4\pi} \int j_\varphi(z_1, r_1) \frac{dV}{R}; \quad A_y = \frac{1}{4\pi} \int j_\varphi(z_1, r_1) \frac{dV}{R}, \quad A_z = 0$$

¹ Обращаем внимание на часто встречающуюся ошибку. Из формулы

$$(1) \text{ не вытекает } A_\varphi = \frac{1}{4\pi} \int j_\varphi \frac{dv}{R}.$$

в нашем случае плотность тока от координаты φ не зависит. Проекция какого-нибудь вектора \vec{a} на направления x, y, z связана с проекциями того же вектора на направления φ, θ, ψ формулами:

$$a_x = a_\varphi \cos \varphi - a_\psi \sin \varphi; \quad a_y = a_\varphi \sin \varphi + a_\psi \cos \varphi; \quad a_z = a_\theta$$

принимая во внимание, что по условию задачи $j_\varphi = j_\psi = 0$, можно написать:

$$A_\varphi \cos \varphi - A_\psi \sin \varphi = -\frac{1}{4\pi} \int j_\varphi(z_1, \rho_1) \sin \varphi_2 \frac{dV}{R};$$

$$A_\varphi \sin \varphi + A_\psi \cos \varphi = \frac{1}{4\pi} \int j_\varphi(z_1, \rho_1) \cos \varphi_1 \frac{dV}{R},$$

тогда

$$A_\varphi = -\frac{1}{4\pi} \int j_\varphi(z_1, \rho_1) \sin(\varphi_1 - \varphi) \frac{dV}{R} = 0; \quad (2)$$

$$A_\psi = -\frac{1}{4\pi} \int j_\psi(z_1, \rho_1) \cos(\varphi_1 - \varphi) \frac{dV}{R}.$$

используя выражение (2), находим R:

$$A_\psi = \frac{1}{4\pi} \int \rho_1 j_\psi(\rho_1, z_1) dS \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\cos(\varphi_1 - \varphi) d\varphi_2}{[\rho_1^2 - 2\rho_2 \rho_1 \cos(\varphi_1 - \varphi) + \rho_2^2 + (z_1 - z)^2]},$$

dS — элемент сечения контура тока меридианной плоскости. Внешний интеграл проще всего вычисляется в сферических координатах ($\rho = r \sin \vartheta$; $z = r \cos \vartheta$), а именно

$$\int_{-\pi}^{\pi} \frac{\cos(\varphi_1 - \varphi) d\varphi_1}{R} \left\{ \frac{1}{r_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)} \left(\frac{r}{r_1}\right)^n \frac{d}{d\vartheta} F_n(\cos \vartheta) \cdot \frac{d}{d\vartheta_1} P_n(\cos \vartheta_1) \right. \\ \left. - \frac{1}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)} \left(\frac{r_1}{r}\right)^n \frac{d}{d\vartheta} P_n(\cos \vartheta) \cdot \frac{d}{d\vartheta_1} P_n(\cos \vartheta_1) \right\}$$

где $P_n(\cos \vartheta)$ означают функции Лежандра. Верхний результат относится к случаю $r_1 > r$, нижний — к случаю $r > r_1$.

В виде примера решим следующую задачу. Шар, радиус которого равен a , имеет заряд, объемная плотность которого $\tau = \text{const}$, и вращается с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси, проходящей через его центр. В этом случае

$$j_\varphi = \omega \tau r_s \sin \vartheta_1, \quad dS = r_1 dr_1 d\vartheta_1, \quad a > r_1 > 0,$$

и, следовательно, вне шара, т. е. при $r > a > r_1$

$$A_\varphi = \frac{\omega \tau}{2r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d}{d\vartheta} \frac{P_n(\cos \vartheta)}{n(n+1)r^n} \int_0^a r_1^{n+3} dr_1 \int_0^\pi \sin^2 \vartheta_1 \frac{d}{d\vartheta_1} P_n(\cos \vartheta_1) d\vartheta_1.$$

Но внешний интеграл равен нулю для всех n , кроме $n=1$, и для этого значения его величина составляет $-\frac{4}{3}$. Поэтому

$$A_\varphi = \frac{\omega \tau a^5 \sin \vartheta}{15r^2} \quad (r > a).$$

Аналогичным образом для точек внутри шара получается

$$A_\varphi = \frac{1}{6} \omega \tau a^3 \left(\frac{r}{a} - \frac{3r^3}{5a^3} \right) \sin \vartheta \quad (r < a),$$

а проекции вектора \vec{H} могут быть найдены из формул

$$H_r = \frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (A_\varphi \sin \vartheta) \quad H_\vartheta = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (A_\varphi r).$$

ПРОНИКА

К ознаменованию в Ленинграде 50-летия со дня изобретения радио

— По решению Ленинградского городского совета депутатов трудящихся утвержден под председательством заслуженного деятеля науки и техники, члена-корреспондента Академии наук СССР, проф. М. А. Шателена Комитет по проведению 50-летия со дня изобретения радио А. С. Попова. В составе Комитета: академик А. Ф. Иоффе, генерал-майор инженер технической службы, доктор техн. наук, проф. Г. Кляцкин, генерал-майор С. И. Муравьев, адмирал абвц, проф. Л. Б. Слепян, директор одного из старейших радиозаводов М. И. Соболев и др. Комитет утвердил основные мероприятия по проведению юбилея.

— 7 мая в г. Ленинграде и г. Кронштадте состоятся торжественные заседания, посвященные памяти А. С. Попова. Научно-исследовательских учреждениях, высших учебных заведениях, предприятиях связи, а также на заводах ленинградской электропромышленности будут проведены научно-технические конференции. В Ленинградском университете с докладом «Дифракция электромагнитных волн» выступит академик В. А. Фок. Проф. Модель на одном из радиозаводов сделает доклад «Принципы сложения мощностей ламповых генераторов». Научный обзор «Развитие взглядов на распространение радиоволн за 50 лет» подготовил проф. А. Н. Кушпир. На конференции работников связи инж. Кушпир сделает доклад «Работа средств радиосвязи Ленинграда в военных блокадах».

— 7 мая занятия во всех высших учебных заведениях и средних школах Ленинграда начнутся кратким вступительным лекторов и преподавателей о замечательном русском изобретателе.

— На могиле А. С. Попова на Волковом кладбище будет проведен траурный митинг.

— В Ленинграде восстанавливается пострадавший от вражеских артиллерийских обстрелов Центральный музей связи. Наряду с оборудованием радиовыставки особенное внимание в музее уделяется организации кабинета А. С. Попова, в котором будут представлены документы, многочисленные фотографии, отражающие жизнь и деятельность творца радио, а также собственноручно изготовленные А. С. Поповым радиостанции.

— Деятельно готовится к юбилею школа связи им. Попова Балтфлота, которая в связи с 70-летием своего существования награждена недавно орденом Красного Знамени. В стенах этой школы, как известно, с 1883 по 1901 г. работал А. С. Попов. В школе сохранился физический кабинет, в котором работал изобретатель. Здесь имеются его личные приборы, книги, отдельные радиоприемники, изготовленные по схемам А. С. Попова в Кронштадтской водолазной и механической мастерской, а также французской фирмой Дюкрете. Все это будет показано в Кронштадте на специальной выставке.

— Лениблиздат выпускает к юбилею сборник архивных документов о жизни и деятельности А. С. Попова. В сборник включены рапорты, отчеты и докладные записки изобретателя радио в Главный морской штаб, Морской технический комитет, Управление кораблестроения и снабжения флота. Массовым тиражом издается художественный плакат об А. С. Попове. Кроме этих изданий оригинальные материалы будут опубликованы в трудах Ленинградского университета, Военно-

электротехнической академии им. Буденного, Морской академии и др. 50-летию радио посвящается и специальный номер журнала «Вестник ленинградской электропромышленности».

— Ближайший друг и помощник А. С. Попова П. Н. Рыбкин закончил книгу своих воспоминаний «10 лет с изобретателем радио». Книга будет издана к юбилею.

— В Ленинградском университете организуется выставка документов и фотографий о студенческих годах А. С. Попова — питомца университета. В исторической аудитории, где впервые 50 лет назад выступил А. С. Попов с докладом о своем изобретении и демонстрировал грозоотметчик, состоится торжественное заседание. Старейший член Русского физико-химического общества проф. К. К. Баумгардт сделает на заседании доклад «А. С. Попов — член Русского физико-

химического общества» и поделится своими воспоминаниями о великом русском ученом.

— В Ленинградском дворце пионеров школьники извеляют грозоотметчик А. С. Попова, делают приборы воспроизведения различных опытов с когерером. Там же кроется выставка работ юных радиолюбителей.

В апреле месяце Комитет совместно с Городским отдел народного образования созывает инструктивные совещания преподавателей физики городских школ с методическими докладами: «А. С. Попов и изобретение радио», «50 лет диотехники», «Радио в Отечественной войне».

Г. И. ГОЛОВИ

Ответственный секретарь Юбилейного Комитета
Ленгорисполком

В Техническом совете Наркомата электростанций СССР

Требования НКЭС к отечественной электропромышленности по аппаратуре релейной защиты

Выпускавшаяся до войны аппаратура релейной защиты не удовлетворяла запросам энергосистем НКЭС вследствие несовершенства защит, медленности их действия, низкой селективности и конструктивных недостатков самих реле.

Недостаточное внимание к усовершенствованию и повышению качества изделий в области релейного строительства в значительной степени объяснялось тем, что последнее проводилось не на специализированных заводах, а осуществлялось в цехах промышленных предприятий наряду с другими основными объектами производства и являлось там производством второстепенного значения.

Для повышения качества изготавливаемой аппаратуры релейной защиты и расширения ее номенклатуры Технический совет НКЭС разработал следующие общие технические требования к электропромышленности в отношении усовершенствования ранее выпускавшихся, разработки новых видов защит и организации их промышленного производства.

1. В первую очередь должен быть обеспечен выпуск: а) аппаратуры для релейной защиты линий 110—220 кВ с применением токов высокой частоты; б) новых конструкций импедансных защит для сложных сетей 35 кВ, обеспечивающих ускорение отключения коротких замыканий; в) упрощенных и быстродействующих дифференциальных защит трансформаторов; г) простой и надежной защиты от замыканий на землю генераторов.

2. Должен быть организован выпуск улучшенных и новых конструкций реле и в первую очередь: а) новой серии универсальных реле с индукционной магнитной системой и с подвижным органом в виде барабанчика; б) простых типов реле повышенной надежности для работы в тяжелых условиях эксплуатации; в) вторичных реле прямого действия с применением переменного оперативного тока.

3. Должен быть организован выпуск реле с уменьшенными габаритами.

4. Должно быть восстановлено производство реле прямого действия высокого напряжения, упрощающих и удешевляющих защиту распределительных сетей и электродвигателей.

5. Нужно организовать выпуск комплектов защит с клеммниками, тест-блоками и аппаратурой для испытания реле.

6. Параллельно с развитием приборов релейной защиты необходимо развивать аппаратостроение в части высоковольтных и низковольтных плавких предохранителей, которые во многих случаях могут с успехом заменить приборы релейной защиты.

7. При восстановлении и развитии производства приборов релейной защиты должны учитываться основные требования НКЭС к аппаратуре релейной защиты, изложенные в «Технических условиях на основные характеристики защитных реле», разработанных МЭИ.

8. Требования НКЭС по отдельным видам аппаратуры релейной защиты заключаются в следующем:

I. Реле для сложных защит косвенного действия

Реле направления мощности. а) Реле направления мощности должны выпускаться однофазными и трехфазными с односторонним и двухсторонним действием. Трех-

фазные реле должны иметь модификацию с дополнительным тормозной системой. б) Однофазные реле мощности должны иметь следующие характеристики вращающих моментов:

$$U_p i_p \cos(\varphi_p + 45^\circ); i_p i_{p_2} \cos \varphi_p; \\ U_p i_p \sin(\varphi_p + 15^\circ); U_p i_p \cos \varphi_p.$$

Одноэлементные трехфазные реле должны иметь максимальную чувствительность при трехфазном коротком замыкании при угле сдвига тока 35÷50°. в) Реле мощности с висимой характеристикой выдержки времени не должны иметь зависимость выдержки времени от тока.

Реле для дистанционных защит. Необходимо выпуск реактансных реле с параметрами по качеству ниже гарантируемых фирмой ГЭС для реле СХ.

Реле для дифференциальных и балансных токовых защит. а) Основным требованием для дифференциальной защиты трансформаторов является быстрдействие, ради которого можно идти на снижение чувствительности. Целесообразно исследовать применение промежуточных трансформаторов, снижающих влияние на токи небаланса периодической составляющей тока короткого замыкания. б) Для дифференциальной защиты шин желательно реле несколькими тормозными катушками. в) Для балансной токовой защиты линий пригодны реле типа ЭВ-20 при условии уменьшения влияния на тормозную характеристику сдвига токов по фазе. г) Из продольных дифференциальных защит вполне удовлетворительные результаты дает защита типа НСВ фирмы Westinghouse.

Защиты с применением токов высокой частоты. На ближайшее время следует ориентироваться на направленную защиту с высокочастотной блокировкой, так как у нас и за границей эти защиты проверены и дали хорошие результаты. Защиты с иными принципами использования токов высокой частоты пока распространения не получили.

Прочие типы реле и вспомогательной аппаратуры. а) Номенклатура выпускаемых электропромышленности реле должна содержать также: реле частоты, в лучившие широкое распространение для защиты систем от перегрузок и сохранения устойчивости; автоматы повторного включения, испытательные блоки и аппаратуру для испытания реле. б) Необходимо выпускать быстродействующие автоматы для установки взамен предохранителей в цепях напряжения защит. Применение предохранителей для быстродействующих защит резко снижает их надежность.

II. Вторичные реле косвенного действия для простых защит

Реле максимального тока мгновенного действия. Конструирование реле должно идти по пути повышения надежности контактов (устранения их выбивания ускорения времени действия и времени возврата и повышения коэффициента возврата).

Реле максимального тока с выдержкой времени. а) Выпускавшиеся ХЭМЗ реле типа ИТ-80 следует считать удовлетворительными. Желательно расширить диапазон уставок отсечек, повышение коэффициента возврата.

чение нового типа характеристики выдержки времени от с более резко выраженной зависимостью от тока. Помимо реле типа ИТ-ВО нужны реле с высоким коэффициентом возврата после замыкания контактов для использования их в системах сигнализации.

Реле минимального напряжения. а) В реле необходимо устранить вибрации якоря реле, вызывающие порчу подшипников. б) Желательно выпуск трехфазных реле минимального напряжения.

Реле времени. Учитывая чрезвычайно широкое применение реле времени в разнообразных защитах (как простых, так и самых сложных), необходимо повысить их надежность и доброкачественность. Реле времени типа ЭВМЗ обладают в основном следующими недостатками: 1) застревание в середине хода; 2) повышенная выдержка времени при первом срабатывании; 3) значительное потребление тока.

Газовые реле. а) Необходимо выпуск реле для различных мощностей трансформаторов с регулятивной трогания скорости масла. В эксплуатации наблюдались случаи действия газовой защиты при перегрузках трансформаторов, что совершенно недопустимо. б) Для установок с переменным током газовые реле должны предусматривать пары отключающих контактов для цепей отключения: одну для цепи, питаемой от трансформатора напряжения, и другую — для цепи, питаемой от трансформатора тока.

Реле промежуточные и сигнальные. а) Основными задачами конструирования является разработка многоконтактных реле малого габарита, большой скорости действия. б) Необходимо улучшить конструкцию блинкеров. Блинкеры типа ЭС-90 имеют большой габарит, грубую регулировку и обладают ненадежностью действия.

Общие требования к вторичным реле косвенного действия. а) Вторичные реле косвенного действия должны выпускаться двух категорий: 1) реле первой категории, включающие всю номенклатуру защитных реле, предназначенные для установки в специальных помещениях в легких условиях эксплуатации; 2) реле второй категории, ограничиваемые номенклатурой простейших реле, для установки в помещениях с тяжелыми условиями эксплуатации.

б) Все реле, за исключением промежуточных и реле времени, должны иметь указатели действия, а реле времени обязательно должны снабжаться указателями, отмечающими длительность их действия.

в) Для всех типов основных защитных реле должны быть предусмотрены модификации, конструктивно совмещающие реле с испытательным блоком.

г) Основное внимание в конструировании реле должно быть обращено на надежность и особенно на контакты. Необходимо предусмотреть возможность простой регулировки контактов.

д) Кожухи реле и их комплектов должны выполняться с прозрачными крышками для возможности осмотра всех элементов реле без вскрытия.

III. Вторичные реле прямого действия и переменный оперативный ток

а) Необходимо выпуск приводов к выключателям, не требующих применения постоянного оперативного тока и требующих для отключения малой мощности переменного тока (порядка 20 ВА). б) При выпуске вторичных реле максимального тока прямого действия следует устранить такие дефекты, как несовершенство переключателя установки тока трогания, низкий коэффициент возврата, большое потребление тока, быстрый износ механизма выдержки времени, отсутствие указателя действия. в) Реле максимального тока должны удовлетворять требованиям защиты линий и двигателей. Возможен выпуск двух типов реле — одного для защиты линии (с малой выдержкой времени) и другого для защиты двигателей (с большой выдержкой времени). Оба типа должны иметь отсечку. г) Реле минимального напряжения должны иметь выдержку времени.

IV. Первичные реле прямого действия

Первичные реле максимального тока и минимального напряжения должны выпускаться с выдержкой времени. Реле максимального тока должны удовлетворять требованиям защиты двигателей и защиты линий; соответственно возможен выпуск двух различных типов реле.

V. Плавкие предохранители

а) Необходимо выпуск инерционных предохранителей, обеспечивающих надежную защиту двигателей и предотвращающих их отключение при кратковременных перегрузках, связанных с посадками напряжения. б) Плавкие предохранители должны обладать возможно большим токоограничивающим эффектом.

В научно-техническом обществе Московского энергетического института им. Молотова

Заседание электротехнической секции научно-технического общества при МЭИ, состоявшееся в феврале с. г., было посвящено высоковольтным кабелям. Лауреат Сталинской премии, доктор техн. наук, проф. С. М. Брагин сделал доклад «Типы высоковольтных кабелей на послевоенный период».

Изложив вкратце историю развития высоковольтных кабелей и остановившись на современном состоянии кабельной техники за границей, где высоковольтные кабели находят самое широкое применение, докладчик отметил, что основные типы высоковольтного кабеля должны войти в практику послевоенного энергетического строительства СССР. В первую очередь кабели должны быть использованы для глубокого ввода в городах, для переходов через реки и озера и, наконец, для прокладки на магистральных участках высоковольтной передачи. Дав техническую характеристику различных типов кабелей, докладчик наметил области их применения. Кабели с газом под давлением, выполняемые в стальных трубах, или же с общей свинцовой оболочкой чрезвычайно дороги и сравнительно недолговечны. Эти кабели в первую очередь должны найти применение для прокладки на кругонаклонных трассах (например, на гидростанциях).

Маслонаполненный кабель используется преимущественно при высоких напряжениях порядка 110—220 кВ; являясь довольно дорогим, он обладает огромным преимуществом — весьма высокой надежностью. За двадцать лет, истекшие с момента постройки первой линии на этой линии не было ни одной аварии из-за пробоя кабеля. Такой кабель в первую

очередь применим преимущественно на ровных трассах, для глубоких вводов в больших городах и для прохода через небольшие водные пространства, железнодорожные магистрали и т. д.

Маслостатические кабели являются наиболее поздней из всех существующих конструкций. Будучи довольно сложными и дорогими, они имеют пока сравнительно ограниченное применение в США. Кабели этого типа рационально применять для соединения турбогенераторов с высоковольтной подстанцией.

Учитывая перспективы и особенности нашего энергетического хозяйства, следует полагать, что все известные типы кабеля должны найти свое применение в СССР. Для обеспечения их широкого внедрения необходима большая работа как по дальнейшему совершенствованию конструкций кабелей, так и по изысканию способов механизации и рационализации работ по устройству кабельных сетей.

Подчеркивая острую необходимость этих работ, проф. С. М. Брагин констатирует отставание по освоению новейшей кабельной техники в СССР. Докладчик отмечает, что НКЭС и НКЭП, не уделявшие до сего времени этому важному вопросу должного внимания, должны дать задание промышленности на выпуск хотя бы небольшого количества высоковольтных кабелей новейших типов, а также приступить к сооружению нескольких опытных участков кабелей с газом под давлением.

В прениях по докладу проф. С. М. Брагина выступил лауреат Сталинской премии, заслуженный деятель науки и тех-

тики, доктор техн. наук, проф. А. А. Глазунов, главный инженер кабельного завода, лауреат Сталинской премии, кандидат техн. наук В. А. Привезенцев, доктор техн. наук, проф. А. Я. Буйлов, начальник района высоковольтной сети Мосэнерго — кандидат техн. наук Б. А. Князевский, кандидат техн. наук, доцент М. А. Бабилов, директор Центральной кабельной лаборатории инж. С. Б. Минц, инж. И. Л. Баркан (НКЭС) и др.

В выступлениях отмечались своевременность и актуальность постановки вопроса о развитии работ по освещению

новейших типов высоковольтных кабелей; подчеркивалась необходимость проведения опытной эксплуатации отдельных участков кабелей различных типов; отмечалась также необходимость организации научно-исследовательских работ по историческим проблемам высоковольтной кабельной техники в Академии наук СССР.

В заключительном слове проф. Брагин подчеркнул необходимость создания специальной организации, координирующей и направляющей работы по высоковольтным кабелям.

Кандидат техн. наук, доц. В. А. Валик

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

Об актуальных вопросах проектирования и эксплуатации городских электрических сетей

В связи с задачами восстановления хозяйства многих городов СССР, разрушенных немецко-фашистскими захватчиками, особенно важное значение приобретают технико-экономические вопросы проектирования, реконструкции, строительства и эксплуатации городских электросетей. Этим письмом хотелось бы привлечь внимание к ряду актуальных вопросов в этой области, в том числе к таким, которые не получили до сих пор вполне определенного решения.

Определение электрических нагрузок продолжает оставаться основным вопросом проектирования городских электросетей. Некоторые проектировщики пытаются исходить при расчетах сетей из показателей нагрузок, приводившихся в технической литературе 15—20 лет тому назад, однако показатели эти претерпели большие изменения.

В тех случаях, когда восстановительные работы в городской сети по существу сводятся к построению ее заново, вопроса о выборе напряжения сети и о способе ее выполнения (кабельная или воздушная сеть) не возникает. Являвшийся долгие годы дискуссионным и разрешенный еще до войны вопрос о выполнении всех новых городских сетей напряжением в 380/220 В, несомненно, не подлежит пересмотру, так же как и преимущественное повышение сетей воздушными. Однако в ряде случаев, когда часть сети, ранее работавшей при более низком напряжении, сохранилась, выбор напряжения может подлежать обсуждению.

Перевод участков сети на повышенное напряжение для увеличения пропускной способности сети, выполнявшийся в Ленинградской и Московской кабельных сетях разными методами (использование свинцовой оболочки кабеля в качестве нулевого провода, создание искусственной нулевой точки, прокладка отдельного нулевого провода и т. д.) для ряда существующих сетей, выполненных трехжильным кабелем, остается в достаточной мере актуальным. С этой проблемой тесно связана проблема режима нейтрали сети низкого напряжения («Электричество» № 11, 1940).

Одним из актуальнейших вопросов при значительной реконструкции городской сети, и тем более при создании ее заново, попрежнему является выбор оптимального числа и мощности сетевых трансформаторов. Хотя выпуск «Руководящих указаний по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока» (НКЭС, 1940) по существу подвел итог многолетней дискуссии в нашей печати, проектная практика еще не является в достаточной мере установившейся.

Вопросы методики технико-экономических расчетов являются попрежнему дискуссионными. Введение коэффициента дефицитности меди, срок окупаемости первоначальных затрат, размер отчислений на амортизацию — предоставлены произволу проектировщика.

При полной реконструкции сети было бы совершенно и допустимым безоговорочное воссоздание ее по старой радиальной схеме без попытки перейти на новую замкнутую схему городской сети. Если создание замкнутых сетей с автоматами обратной мощности в настоящий момент и прежде временно, то схема «замкнутой» сети без сетевых автоматов («Электричество» № 7, 1939 и № 12, 1940) в настоящее время уже в достаточной мере разработана для ее применения.

Селективная система плавких вставок для предохранителей является необходимой предпосылкой для возможности осуществления такой электрической сети. Тщательно разработанная система плавких вставок с характеристиками, обеспечивающими защиту элементов сети от перегрузки, имеет огромное значение и для радиальных сетей для полужамкнутых сетей, а также для сетей промышленных предприятий. Правильный выбор сечения проводов заводской распределительной сети тесно связан с защитой их предохранителями. Вопросы создания более совершенных типов предохранителей, в частности инерционных, попрежнему остаются нерешенными. Следует особо отметить, что качество выпускаемых предохранителей пока недопустимо низко, такие типы, как ПР-1, дороги, требуют большого расхода дефицитного цветного металла, имеют большие габариты. Возможность плавкого предохранителя, как простейшего и доступнейшего защитного устройства, еще далеко не изучены и не исчерпаны.

Из эксплуатационных проблем следовало бы уделить внимание снижению потерь в сетях и компенсации реактивной мощности в больших системах. К числу противоаварийных мероприятий, представляющих особый интерес в настоящий момент, относятся такие мероприятия, как повышение разрывной мощности предохранителей высокого напряжения; компенсация емкостных токов замыкания на землю в сетях 6000—10 000 В без применения обычных дугогасящих устройств (соответствующие испытания производились в системе Ленэнерго до войны, но не были закончены); разработка эксплуатационных схем городской сети высокого и низкого напряжения, позволяющих снизить потери при обеспечении бесперебойности электроснабжения потребителей без применения сложной релейной защиты («Энергетический сборник Ленэнерго» № 1, 1940).

Перечисленные вопросы представляются нам наиболее актуальными в настоящий момент, когда уже необходимо постепенно готовиться к переходу энергоснабжающих систем и установок потребителей электрической энергии на работу в условиях мирного времени. Этим вопросам необходимо обеспечить первоочередное внимание со стороны проектирующих и научно-исследовательских организаций, электротехнической и энергосистем.

Инж. Б. Л. Айзенберг
Ленинград

Американская книга по электроприводу

ПРОДВИГАТЕЛИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ D. R. Shoults, C. J. Rife, T. C. Johnson John Wiley & Sons, New-York, 1942, 389 стр. 219 руб.

Книга относится к серии изданий, обслуживающих курс повышения квалификации инженеров фирмы General Electric Co. Появилась она в итоге опыта фирмы с обучением молодых инженеров в расчетно-конструкторских бюро, лабораториях и т. п.

Книга состоит из 13 глав. Первые две главы посвящены вопросам снабжения промышленных предприятий электрической энергией, включая рациональный выбор схемы электропитания, вопросы коэффициента мощности и его улучшения, общую характеристику паровых турбин и устройств для образования тока. Третья глава рассматривает основные физические процессы в синхронных и асинхронных двигателях. Математическая трактовка вопроса почти отсутствует. В четвертой главе авторы приводят подразделение асинхронных двигателей в зависимости от обеспечиваемой ими скорости и касаются самых основных конструктивных типов фирмы GEC, рассматривая в самой элементарной форме механические характеристики двигателей с короткими кольцами, короткозамкнутых двигателей обычной конструкции, с ротором Бушера и с глубоким пазом. Сюда отнесены многоскоростные короткозамкнутые двигатели. Пятая глава охватывает применение асинхронных двигателей. Приводятся различные способы пуска короткозамкнутых двигателей, рассматриваются особенности однофазных двигателей, конденсаторных, репульсионных, с расщепленной фазой. Сюда же включены каскадные схемы: Шербиуса, с преобразователем частоты, двигатель Шраге.

Глава шестая рассматривает формы кривых пусковых моментов синхронных двигателей, особенности работы этих двигателей при пульсирующей нагрузке и физические процессы работы самосинхронизирующихся систем (самосинхов). В седьмой весьма подробно разбирает механические характеристики двигателей постоянного тока: шунтовых, серийных двигателей, включая и сложные схемы включения, характеристики системы Леонарда с трехобмоточным генератором. Расчетные данные отсутствуют, приводятся лишь графическое построение многочисленных характеристик. Об амплитуде имеется лишь краткое упоминание его назначения. Приведены данные о влиянии колебаний напряжения на момент, превышение температуры двигателей и т. д.

В восьмой главе весьма кратко описываются некоторые типы автоматических управлений электроприводом. В де-

вятой главе даются основные сведения по общим вопросам динамики электропривода.

Глава десятая рассматривает применение регулируемых электроприводов с точки зрения требований рабочих машин и возможностей их удовлетворения. В качестве примеров рассмотрены приводы гидравлического экскаватора, бумагоделательной машины, многодвигательный привод металлорежущих станков, плоскочечная машина, опрокидыватель вагонов, экскаватор, подвесная дорога, шахтный подъемник, реверсивный прокатный стан. Глава одиннадцатая характеризует задачи согласования скоростей отдельных звеньев рабочих машин, поддержания постоянства скорости с автоматическими регуляторами, синхронизирующего хода. В качестве примеров использованы: сахарная мельница типа Тандем, рольганг прокатного цеха, бумагоделательная машина с угольным регулятором и самосинхами, накатной аппарат, стан холодной прокатки, суперкаландр, разводной пролет моста.

Главы двенадцатая и тринадцатая дают основное представление об ионно-электронных приборах и рассматривают некоторые типичные случаи их применения — фотореле, нонный привод, электросварка посредством тиратронов, программное регулирование фотоэлементами, применение в текстильных процессах, электронное реле времени.

Расчетного материала книга практически не содержит. Библиография дана лишь в самом незначительном объеме.

Рецензируемая книга может служить для первоначального ознакомления с задачами электропривода и основной методикой их решения в отношении выбора типа электродвигателей и аппаратов. Структура автоматических схем управления электроприводом в книге не затрагивается. В учебных целях каждая глава сопровождается некоторым количеством контрольных вопросов.

Книга пронизана мыслями о необходимости при решении задач электропривода достижения максимального соответствия конструкции и параметров электропривода свойствам соответствующей рабочей машины.

Весьма интересны с точки зрения развития современного электропривода приведенные в книге данные о мощности двигателей постоянного тока, установленных фирмой GEC в промышленности за последние 5 лет.

Доктор техн. наук проф. **В. К. ПОПОВ**

Новые книги

Михайлов Д. С. Электронавигационные приборы. М., Морской транспорт, 1944, 284 стр.

Мосесов Н. С. Эксплуатация электроустановок и электросетей в нефтяной промышленности. Баку, Азнефтьиздат, 1944, 240 стр. с черт. и схем. (Азербайджанское отделение Всесоюз. инж.-техн. об-ва нефтяников (АзНИТОН)). Цена 22 р.

Палалекси Н. Д. Радиопомехи и борьба с ними. Изд. М.—Л., Гостехиздат, 1944, 103 стр.

Патон Е. О. и Островская С. А. Скоростная автоматическая сварка под слоем флюса. Достижения за последние годы. М.—Л., Машгиз, 47 стр., 1944.

Пионтковский Б. А. Гальванические элементы. М., Связь, 1944, 44 стр.

Полотовский Л. С. Электроматериаловедение. Л., Ленингр. воен.-возд. акад. Красной Армии, 1944, 1 стр. с черт.

Пресняков К. П. Расчет токов короткого замыкания для аппаратуры и оборудования. Баку—Москва, Азгос-

топтехиздат, 1942, 99 стр. (Азербайджанский науч.-исслед. нефтяной ин-т им. В. В. Куйбышева).

Соколов Д. В. Основные пути упрощения электротехнических установок в условиях военного времени. М., Инст. технико-экономической информации Госплана СССР, 1944, 32 стр.

Соколов И. В. Кабельная электротехника. Пособие для курсантов военно-морских училищ. Изд. 2-е, М.—Л., Воениздат, 1944, 243 стр. (Высш. военно-морское орд. Ленина краснознаменное училище им. М. В. Фрунзе).

Труды Всесоюзной технической конференции по применению новых материалов и заменителей в электропромышленности. Изд. ЦБТИЭ, 1944.

Цегельский В. Л. и Жданов В. А. Электросварочное дело. Изд. 3-е, Москва—Свердловск, Машгиз, 1944, 384 стр. с иллюстр. и чертеж., 1 вкл. л. чертеж. Цена 25 руб.

Четверикова М. М. Автоматические колхозные и совхозные электростанции. М., Изд. МГУ, 1944, 48 стр.

Электротехника и электрохозяйство за границей

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Электричество на фермах. *El. Rev., стр. 182-184 и 218-222, № 3481 и 3482, 1944.*

В районе Aylesbery (Англия) электрическая энергия широко применяется в производственных процессах сельского хозяйства. Из многих видов применения электроэнергии значительный интерес представляет механическая дойка коров.

Доильная установка состоит из двух аппаратов и обслуживает 35 коров. Эксплуатируется она двумя работницами, которые, кроме того, выполняют ряд работ по уходу за скотом. Вакуум-насос установки приводится во вращение электродвигателем мощностью 1 л. с. Для стерилизации всех частей доильного аппарата фермой используется электродный трехфазный паровой котел мощностью 20 kW, вырабатывающий пар давлением 2,1 ат. Пар подается в трубопроводы установки, стерилизационный бак и, в случае необходимости получения в короткий срок кипятка, пропускается через воду в специальном резервуаре.

Для сушки травы применяется сушилка нового типа, осуществляющая также переработку полученного сена в муку. Свежая трава убирается элеватором, приводимым электродвигателем 2 л. с., и подается в сушильную камеру. В камере размером $6 \times 1,5 \times 0,9$ м имеются две бесконечные цепи — верхняя и нижняя, приводимые двигателем 1 л. с. Трава попадает сначала на верхнюю цепь, а с нее — на нижнюю и возвращается к входному отверстию. Время пребывания травы в камере может меняться от 9 до 20 мин. Горячие газы прогоняются через сушильную камеру от коксовой печи вентилятором с двигателем $7\frac{1}{2}$ л. с. Высохшая трава из камеры попадает на конвейер, где продувается воздухом, который ее охлаждает и уносит пыль. Вентилятор приводится двигателем 2 л. с., а конвейер — двигателем 1 л. с.

С конвейера готовое сено идет в соломорезку, откуда подается вентилятором в дробилку, а затем в виде готовой сенной муки идет на упаковку. Соломорезка, дробилка и вентилятор имеют групповой привод от двигателя 20 л. с. Общая производительность сушильной установки 200 kg сенной муки в час.

В одной из теплиц для выращивания овощей обогрев осуществляется электрическим током напряжением 12 V. В качестве нагревательных элементов используются гофрированные гальванизированные полосы шириной 50 mm. Полосы крепятся рейками прямо к стенам. Размеры теплицы $10,5 \times 6$ м. Для питания обогревательной системы по середине теплицы установлены два трансформатора по $1\frac{1}{2}$ kVA 230/12 V.

Кандидат сельскохозяйств. наук П. А. БУДЗКО

Электрическая пахота. *El. Rev., стр. 187-188, № 3481, 1944.*

В докладе, представленном С. А. Сатером Британской исследовательской ассоциации электропромышленности, дается обзор всех попыток применения электроэнергии для обработки почвы. Автор приходит к заключению, что наиболее многообещающей конструкцией в условиях Англии является электротрактор системы Н. Г. Кемп (Новая Зеландия). Пять таких машин находятся в эксплуатации с 1940 г. и проработали по 800 часов в год.

В тракторах обычного исполнения двигатель внутреннего сгорания заменен электрическим мощностью 20—25 л. с. На поворотном круге, укрепленном на тракторе, монтируется кабельный барабан, допускающий повороты электротрактора в любую сторону. Барабан приводится электродвигателем мощностью 0,7 л. с. Кабель направляется через специальный кронштейн к передвижной подстанции с трансформатором 30 kVA, установленной на грузовой автомашине. Подстанция подключается к воздушной линии трехфазного тока напряжением 6600 V. Обычно для воздушной линии применяются стальные провода сечением 13 mm² на деревянных опорах. На барабане трактора помещается 460 м трехжильного гибкого кабеля с резиновой оболочкой. Такая длина кабеля допускает обработку от одного присоединения 10—12,8 га.

Расход электроэнергии на пахоту составляет 94 kW га, а вместе с другими операциями, включая посев, 128 kWh на га.

Автор полагает, что после войны 10% всей пахотной площади Англии, т. е. 570 тыс. га, должны обрабатываться электротракторами, на что потребуется 3500 электротракторов, годовой расход электроэнергии которых составит 60 kWh электроэнергии. Экономия жидкого топлива при этом составит 23 тыс. т в год. Первая партия электротракторов, по мнению автора, может быть переоборудована из стандартных тепловых тракторов.

Автор предлагает организовать научно-исследовательскую работу с электротракторами Кемп для производства и испытаний электротракторами фирмы Broun Boveri, а также моторизованным культиватором Michigan.

Кандидат сельскохозяйств. наук П. А. БУДЗКО

Teage D. W. Экономичность электрификации сельского хозяйства. *Agricultural Eng., стр. 329-32 № 9, 1944.*

Электрификация ферм США достигла больших количественных успехов. В настоящее время присоединено к электросети более 40% ферм, тогда как в 1935 г. их было только 10. Однако применение электроэнергии ограничивается в основном только бытовым обслуживанием семьи фермера. Тем самым не используются большие возможности электрификации производства на ферме. С другой стороны, многие фермы не обладают достаточными средствами для покупки и эксплуатации бытовых приборов и ограничиваются только освещением.

Автор статьи, один из руководящих работников Администрации по электрификации сельского хозяйства (REI), предлагает начинать электрификацию ферм именно с производственного оборудования, которое немедленно приносит фермеру доход и дает ему возможность приобретать и эксплуатировать бытовые приборы. Наиболее эффективным является применение освещения в птичниках для повышения яйценоскости в зимнее время и электробрудеров — для выращивания птенцов. Далее, большой эффект дает применение насоса для полива огорода, холодильника для продуктов брудеров для поросят.

В статье рекомендуется «пятилетний план» электрификации фермы. В первый год оборудуется проводка в доме и птичнике, приобретаются радиоприемник, утюг, электробрудер, подогреватель воды для питья кур, малый насосный электродвигатель, брудер для поросят и насос. Во втором году устанавливаются: холодильник, стиральная машина и сушилка для сельскохозяйственной продукции. В третий год — электрическая плита, а четвертый — оборудование ванной, а на пятый — мощный подогреватель воды. Приводимые в статье подробные расчеты показывают, что только при использовании производственного эффекта электроэнергии фермер может широко применять ее в быту.

Кандидат сельскохозяйств. наук П. А. БУДЗКО

Электроснабжение сельского района. *Electrical Rev., стр. 311, № 3484, 1944.*

Сельский район вокруг города Garden City (Англия) имеет площадь 104 km². Он начал электрифицироваться в 1924 г. В настоящее время передача электроэнергии производится на напряжении 11 kV, а распределение по трехфазной четырехпроводной системе — на напряжении 415/240 V. Вся питающая сеть выполнена по замкнутой схеме. Большая часть сетей проложена под землей (39 km из 56 km 11 kV, 74 km из 77 km низкого напряжения). Там, где применяются воздушные линии, трансформаторы и выключатели на опорах почти не используются вследствие неудобства обслуживания. Все выключатели снабжены автоматическим повторным включением. Всего населения в районе до 12500 чел., из них около половины живет в городе. Общее потребление электроэнергии 40 млн. kWh в год, в том числе 70% на

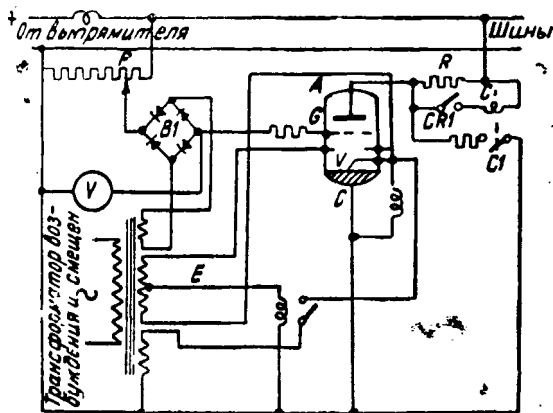
шленные цели. Из 52 крупных ферм (80—800 га) электрифицировано 46. Наибольшее применение на фермах находят кормоприготовительные машины для животноводства и насосные станции. В сельской части имеется 44 электрокормозапарников, 44 водоподогревателя, 26 котла для стирки, 157 чайников и 101 утюг. Процент охвата электротехникой весьма невысокий, если учесть, например, неэлектрифицированных кормозапарников имеет 2400.

Кандидат сельскохозяйств. наук И. А. БУДЗКО

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Milne. Рекуперация энергии. *El. Rev.*, стр. 25—26, 1944.

При рекуперативном режиме э. д. с. тягового двигателя, работающего как генератор, как известно, превосходит напряжение на шинах подстанции. Излишек напряжения в большинстве случаев поглощается сопротивлением, подключаемым к рекуперации посредством реле к шинам подстанции. Требуемое для срабатывания реле время колеблется от 1 до 1,0 сек. Поскольку это время велико, э. д. с. тягового двигателя успевает возрасти до величины, превосходящей



напряжение на 50—100%. Столь большие напряжения могут повлечь за собой значительные повреждения изоляции системы. Применение специальных быстродействующих реле может снизить время подключения сопротивления до 0,25 сек, но подобные реле очень сложны.

Одним из методов включения сопротивления в течение короткого времени является использование тиратрона для включения инитрона, который в свою очередь подключает к шинам подстанции нагрузочное сопротивление. В этой схеме инитрон выполняет роль чувствительного реле напряжения; инитрон зажигается, как только напряжение на шинах возрастает выше определенной величины, и после этого заставляет зажегаться инитрон.

В другом методе используется специальный управляемый тиристор, который приходит в действие и включает нагрузочное сопротивление в течение 0,0001 сек, не позволяя возрасти до опасных пределов.

Как видно из рисунка, оборудование, используемое для рекуперации, состоит из выпрямителя U и трансформатора E . Последовательно с анодами выпрямителя включаются сопротивления R , подсоединяемые параллельно к шинам подстанции. Сетка выпрямителя получает отрицательный потенциал от источника $B1$ который подключен в свою очередь к потенциометру P . При нормальном режиме работы напряжение на потенциометре, будучи несколько меньше по величине напряжения источника $B1$, направлено противоположно последнему. При рекуперации напряжение на потенциометре меняет полярность, сетка выпрямителя получает отрицательный потенциал выпрямителя, зажигается и R включается в цепь параллельно шинам. Позднее срабатывает такт CRI токового реле CI и шунтирует выпрямитель. Описанное оборудование очень просто и компактно и требует только одного выпрямителя, постоянно готового к нормальной работе.

Инж. М. Д. ТРЕЙВАС

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

P. L. Bellashi, P. Wane, Jr. Влияние высоты над уровнем моря на разрядные характеристики электрических аппаратов. *El. Eng.*, № 5, 1944.

Исследование производилось в герметически закрываемом микроцилиндре, в котором поддерживался соответствующий вакуум. Ниже приводятся основные результаты исследований:

а) Прочность при полной волне. Зависимость относительной прочности от относительной плотности воздуха при полной волне обеих полярностей следует закону прямой линии, и прочность пропорциональна относительной плотности плюс константа.

Для разрядных напряжений внешней (воздушной) изоляции обычно принимаемый закон изменения прочности пропорционально плотности воздуха дает некоторый запас прочности на больших высотах над уровнем моря. При малых относительных плотностях воздуха заметно удлинение времени запаздывания. Исследование участка еловой траверзы длиной 1,2 м показало, что ее импульсная прочность падает с понижением относительной плотности воздуха, однако несколько в меньшей степени, чем по закону пропорциональности, особенно при отрицательной волне.

При малых плотностях воздуха увеличивается время запаздывания. Это показывает, что импульсная прочность дерева в основном определяется прочностью воздуха. Иногда падение напряжения происходит постепенно и не до нуля, т. е. траверза ведет себя в некотором отношении подобно разряднику с зависимым сопротивлением. Прочность масла мало зависит от плотности воздуха. Твердая изоляция, пропитанная в масле, тоже, вероятно, ведет себя подобным образом, т. е. прочность внутренней изоляции аппаратов можно считать мало зависящей от плотности воздуха.

б) Поправка разрядного напряжения на фронте крутой волны 1000 $kV/\mu sec$ в пределах относительных плотностей от 0,5 до 0,9 составляет 0,5% на 1% изменения относительной плотности. В пределах плотностей 0,9—1,1 поправка меньше и составляет 0,35% на 1% изменения плотности воздуха.

в) Исследование при полной волне влияния влажности при положительной полной волне для стержневого промежутка 150 мм показало, что во влажной атмосфере наблюдается абсолютное приращение прочности на 8 kV независимо от значения плотности воздуха. При влажной атмосфере на всем диапазоне плотностей воздуха сохранялось примерно одно и то же давление водяных паров—около 20 мм рт. ст.

г) Разрядное и коронное напряжение при 60 Hz оказалось пропорциональным относительной плотности воздуха.

Инж. Е. В. КАЛИНИН

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

R. Akln и др. Нейлон как термопластик. *British Plastics*, стр. 65, № 177, т. 16, 1944; *Modern Plastics*, стр. 64, № 12, т. 20, 1943 и стр. 115, № 3, т. 2, 1943.

Нейлон—синтетический материал с линейной структурой высокополимерной молекулы полиамидного состава—с успехом применяется в качестве искусственного волокна с особо высокими диэлектрическими, механическими и другими свойствами. В самое последнее время нейлон получил новое применение—в качестве термопластичного материала для формовки из него разнообразных изделий весьма сложной конфигурации, в частности электроизоляционного назначения. Подходящим для нейлона оказался метод инжекционного формования. Нейлон обладает значительными преимуществами по сравнению с другими термопластичными пластмассами, отличающаяся значительной нагревостойкостью, стабильностью по отношению к тепловому старению и прекрасными механическими свойствами в широком интервале температур.

Для нейлона характерны высокая химическая инертность, стойкость к большинству растворителей, щелочам, слабым кислотам, хорошая обрабатываемость, низкий удельный вес—от 1,06 до 1,19. Электроизоляционные характеристики прессованного нейлона: пробивная напряженность при быстром подъеме напряжения 16 kV/mm , диэлектрическая проницаемость 3,8—4,0; $tg = 1,8—5,0\%$; удельное объемное сопротивление порядка $10^{13} \Omega cm$.

Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕВ

Фирма Metropolitan Vickers разработала и внедрила в производство материал, названный Metrosil. Этот материал, основной химического состава которого является карбид кремния (карборунд) SiC, близок к ранее известным материалам типа тирита; наиболее характерным свойством его является нелинейная зависимость между напряжением, приложенным к детали из метрозила, и величиной тока, проходящего через нее.

Метрозил выпускается в виде дисков, иногда с круглыми осевыми отверстиями, а также в виде стержней и т. п.; по механическим свойствам материал приближается к фарфору. Цвет материала темносерый. Торцевые поверхности дисков покрываются посредством горячего распыления металлом (обычно латунью), чтобы обеспечить хороший электрический контакт; диаметры (внешние) нормальных дисков—19—152 мм, стандартные стержни имеют диаметр 19 мм.

Связь между током I и напряжением U для нормальных дисков из метрозила выражается в виде $I = H \cdot U^{\alpha}$ или $U = KI^{\beta}$; показатель α порядка 4÷5 (соответственно, $\beta = 0,25 \div 0,20$). Параметр K изменяется от 60÷70 и даже меньших значений (для очень тонких дисков) до 2000÷3000 (для толстых дисков).

Сопротивление метрозила при определенном значении тока (или, соответственно, напряжения) уменьшается при возрастании температуры (в интервале температур от 0 до 100°C повышение температуры на 1°C соответствует увеличению тока при неизменном напряжении на 0,6% или же уменьшению напряжения при неизменном токе на 0,15%).

Электрические характеристики метрозила весьма стабильны и, если только диск не подвергается чрезмерному перегреву, сохраняются в течение неопределенно долгого времени постоянными с точностью $\pm 2\%$.

В статье приводятся ряд схем, в которых используются элементы сопротивления из метрозила, имеющие назначением защиту различных аппаратов, линий электропередач и пр. от перенапряжений различного происхождения, защиту электроизмерительных приборов от неправильного включения, регулирование напряжения, компенсацию изменения сопротивления проводников с положительным температурным коэффициентом сопротивления при меняющейся температуре и т. п.

Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

R. W. Gallay a G. Graham. Новый процесс для клеек. *Modern Plastics*, стр. 126—129 и 168—172, № 6, 1944; *British Plastics*, стр. 50, № 2, 1944.

Ранее был предложен и нашел широкое применение способ электростатического прогрева склеиваемых пакетов, при котором на пакеты действует электрическое поле высокой частоты, и за счет диэлектрических потерь материал прогревается быстро и равномерно по всей толщине. Однако высокочастотный прогрев при клееке требует применения специального дорогостоящего оборудования. В реферируемых статьях подробно излагается новый способ использования электрической энергии при клееке фанеры и тому подобных материалов, дающий возможность весьма быстрого и равномерного по толщине прогрева, но не требующий дорогих высокочастотных генераторов и другого сложного оборудования. Сущность нового способа заключается в том, что к связующему веществу, которым смазываются слои дерева, подлежащие склеиванию друг с другом, добавляется электропроводящий материал—мелкий порошок сажи. После помещения пакетов между холодными плитами пресса через материал, с помощью электродов, которые прикладываются с торцевых сторон пакетов, пропускается постоянный или переменный ток напряжением 60—220 В, и за счет джоулевого тепла, которое выделяется в саже, пакеты прогреваются. Способ чрезвычайно прост и дает склеенные материалы хорошего качества.

Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

L. W. Cook. Стартеры для флуоресцирующих ламп. стр. 37—42, № 7, 1944.

В реферируемой статье рассматриваются современные типы стартеров, их конструкция и работа в цепи флуоресцирующих ламп. Основное назначение стартера: нахладить катоды лампы и размыкание цепи подогрева, а также обеспечение образования импульса напряжения, достаточного для возникновения разряда в лампе. Для достижения высокой электронной эмиссии, получаемой при температуре около 800°K, стартер должен замыкать подогревающую цепь в течение около 1 сек. Размыкание цепи стартером должно быть настолько быстрым, чтобы индуцированное напряжение было по крайней мере в 5 раз выше нормального напряжения на лампе.

Современные автоматические стартеры могут быть разделены на две группы: возбуждаемые напряжением и возбуждаемые током. К первой группе относится известный стартер тлеющего разряда с U-образной биметаллической пластинкой. При включении напряжения в схему подогрева ток идет через угольный контакт и прижимающийся к серебряному контакту, укрепленный на биметаллической стинке. Разогрев контакта ведет к отклонению биметаллической стинки, разрыву цепи и зажиганию лампы. Рабочее напряжение, приложенное к сопротивлению, обеспечивает выделение тепла для поддержания биметалла в отклоненном состоянии. Погасании лампы на пусковое сопротивление падает напряжение, что ведет к увеличению его нагрева и заставляет биметалл отклониться далее до замыкания с контактом. Таким образом, цепь лампы оказывается замкнутой, а пусковое сопротивление шунтированным. Остывание биметалла приводит к его отклонению, размыканию цепи и зажиганию лампы.

Ко второй группе относятся известные конструкции стартеров, в которых используются две образующие контактные пластинки, вблизи которых смонтирован магнитный элемент, включенный последовательно в цепь лампы.

Интересны новые типы стартеров-реле, так называемые «немигающих стартеров», которые автоматически размыкают цепь зажигания в случае частого погасания лампы, что блюдается в конце срока ее службы. Стартеры-реле не только устраняют неприятное мигание ламп, но предохраняют приборы включения от перегрева и увеличивают срок службы самих стартеров.

В статье наряду с описанием различных типов стартеров дается сравнительная их оценка и формулируются требования, которым должны отвечать стартеры в условиях эксплуатации. В заключение указывается на разработку новой флуоресцирующей лампы 40 W, которая зажигается без предварительного подогрева катодов, т. е. без стартера. Это осуществляется путем применения нового типа катодов и специального прибора включения, дающего повышенное напряжение, пригодное для зажигания. Автор указывает, что новизна и значимость большого прогресса, однако она вряд ли сможет включить все схемы, где применяются стартеры.

Кандидат техн. наук Р. Г. ИЗВЕ

РАЗНОЕ

C. W. Frick. Упрощенный метод определения коэффициента влияния силовых систем, питающих выпрямители на провода связи. *El. Eng.*, стр. 91—96, № 3, 1944.

Влияние работы выпрямителя на провода связи определяется коэффициентом влияния на провода связи. Коэффициент относится к какой-либо гармонике напряжения или тока, как мешающие воздействия могут быть подразделены на электростатические, зависящие от напряжения силовой цепи, и электромагнитные, зависящие от тока. В статье описывается упрощенный метод определения коэффициента напряжения и тока в точке питания выпрямителя.

Статья иллюстрируется кривыми для определения коэффициентов в 25 периодических системах и рассматривает применение для различных схем и чисел выпрямителей. Рассматриваемый метод может применяться в тех случаях, когда требуется произвести ориентировочный подсчет коэффициентов.

Инж. М. Д. ТРЕЙМ

технический редактор *О. Залышкин*

во в пр-во 21 III 1945 г.

Подписано к печати 26/IV 1945 г.

Объем 7 п. л., 13,25 уч.-авт. л.

аж 60.00

Формат бумаги 60×92,8

Подписное издание

671

Тип. знак. в 1 псч. л. 80250

Заказ № 71

Типография Госэнергоиздата, Москва, Шлюзовая наб., 10

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Москва, Шлюзовая набережная, 10

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ:

- ГИДРОСИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ.** Описательный курс. Под ред. проф. д-ра техн. наук Т.Л. Золотарева. Допущено Комитетом по делам высшей школы при СНК СССР в качестве учебника для энергетических вузов. М.-Л., ГЭИ, 1944, ц. 20 руб., 261 стр.
- ГЛЫБОВСКИЙ И. И. и СОЛОПОВ С. Г.** Машины и оборудование торфяного производства. Допущено ВКВШ при СНК СССР в качестве учебного пособия для техникумов. Утверждено ГУТР в качестве учебника для ремесленных и железнодорожных училищ. М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, 447 стр., тираж 5000, цена без переплета 15 руб., в переплете 17 руб.
- * **ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО № 6/214** Оргрэнс. Применение литого пенобетона для изоляции тепловых сетей. М.-Л., ГЭИ, 1944, 5 стр., бесплатно.
 - * **ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО № 11/219** Оргрэнс. О мероприятиях по борьбе с износом дымососов. М., ГЭИ, 1944, 6 стр., бесплатно.
 - * **ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО № 17/225** Оргрэнс. О приспособлениях для насечки напильников и ножовочных полотен. М., ГЭИ, 1944, 15 стр., бесплатно.
 - * **ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО № 21/229** Оргрэнс. Подвесной набивной свод из огнеупорного бетона. М., ГЭИ, 1944, 12 стр., бесплатно.
 - * **ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО № 34/207** Оргрэнс. Об изготовлении цельносварных крышек насосов. М., ГЭИ, 1944, 4 стр., бесплатно.
 - * **ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО № 38/246** Оргрэнс. Морозостойкий изолирующий компаунд для заливки концевых муфт наружной установки кабелей 3-10 кв. М., ГЭИ, 1944, 12 стр., бесплатно.
 - * **ИЗМЕРЕНИЕ** вибрации лопаток паровых турбин шлейфным осциллографом. Оргрэнс. М.-Л., ГЭИ, 1944, 29 стр., ц. 3 руб.
 - * **ИНСТРУКЦИЯ** по монтажу сухих концевых разделок силовых кабелей напряжением 1-10 кв. НКЭС СССР, Технический отдел. М.-Л., ГЭИ, 1944, 13 стр. + 1 вкл. л., ц. 1 р. 50 к.
- ИНСТРУКЦИЯ** по оперативному контролю за техническим состоянием и механическими потерями энергии в станочном оборудовании. (Издается в соответствии с постановлением ГОКО от 15/XI 1944 г.). (Государственная инспекция по промышленности и энергонадзору при НКЭС СССР). М.-Л., ГЭИ, 1944, 11 стр., ц. 60 коп.
- * **ИНСТРУКЦИЯ VI-I** по учету потерь активной и реактивной мощности и электроэнергии в сети районов МКС Мосэнерго (Московская кабельная сеть Мосэнерго). М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 26, тираж 300, бесплатно.
 - * **ИНСТРУКЦИЯ** по уходу за щелочными кадмиево-никелевыми аккумуляторами. М.-Л., ГЭИ, 1944, 13 стр., бесплатно.
 - * **ИНСТРУКЦИЯ** по эксплуатации абонентского ввода теплосети для системы отопления (НКЭС СССР, Технический отдел). М.-Л., ГЭИ, 1944, ц. 1 р. 75 к.
 - * **КАТАЛОГ-ПРЕЙСКУРАНТ** отпускных цен на электрические машины. Вып. 1 (НКЭП СССР). М.-Л., ГЭИ, 1944, 123 стр., ц. 13 р. 50 к.
 - * **ОБСЛУЖИВАНИЕ И НАЛАДКА** работы гидрозолоудаления котельных цехов электростанций. Оргрэнс. М.-Л., ГЭИ, 1944, 18 стр., ц. 2 руб.
 - * **ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ** при эксплуатации электрических устройств станций и подстанций (НКЭС СССР, Технический отдел). М.-Л., ГЭИ, 1944, 79 стр., ц. 5 р. 25 к.
 - * **ПРИЕМКА**, эксплуатация и ремонт теплоизоляции на электростанциях. Изд. 2-е. Оргрэнс. М.-Л., ГЭИ, 1944, 40 стр., ц. 4 руб.
 - * **РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ** по прокладке силовых кабелей напряжением до 35 кв. НКЭС СССР, Технический отдел. М.-Л., ГЭИ, 1944, 59 стр., ц. 5 р. 50 к.
 - * **РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ** по эксплуатации брызгальных бассейнов (ВТИ). М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 45, тираж 3000, ц. 3 р. 25 к.
 - * **СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ** по обмену техническим опытом. Вып. 3. НКЭП СССР, Центральное бюро технической информации. М.-Л., ГЭИ, 1944, 38 стр. + 1 вкл. л., ц. 4 руб.
 - * **СБОРНИК** противоаварийных циркуляров (Технический отдел НКЭС), часть первая. Электрическое оборудование. М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 42, тираж 2600, ц. 2 р. 50 к.
 - * **СКОРОСТНОЙ МОНТАЖ** электростанций (материалы технической конференции Народного комиссариата электростанций СССР) под редакцией зам. наркома НКЭС И.И. Дмитриева. М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 115, тираж 2000, ц. 18 руб. в переплете 21 руб.
 - * **ТЕМНИК** рационализаторских предложений по торфяной промышленности. Вып. 1. М.-Л., ГЭИ, 1944, 46 стр., бесплатно.
 - * **ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ** на производство гидротехнических работ. Вып. 12. Возведение намывных плотин НКЭС Главгидроэнергострой СССР, Гидроэнергопроект. Отдел технической помощи. М.-Л., ГОИ, 1944, 33 стр., ц. 3 р. 25 к.
 - * **ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ** на восстановление барабанов паровых котлов помощью сварки (Технический отдел). М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 12, тираж 2500, ц. 1 р. 70 к.
 - * **ТИПОВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ** о правах и обязанностях младшего дежурного подстанции НКЭС (Технический отдел). М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 10, тираж 5500, ц. 60 коп.
 - * **ТИПОВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ** о правах и обязанностях дежурного инженера сетевого района (Технический отдел). М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 19, тираж 4000, ц. 70 коп.
 - * **ТИПОВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ** о правах и обязанностях старшего дежурного подстанции (Технический отдел). М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 22, тираж 5500, ц. 1 руб.
 - * **ТИПОВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ** о правах и обязанностях обходчика линий высокого напряжения (Технический отдел). М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 12, тираж 4000, ц. 60 коп.
 - * **ТИПОВОЕ ПОЛОЖЕНИЕ** о службах связи электростанций сетевого района электросистемы (Технический отдел). М.-Л., Госэнергоиздат, 1944, стр. 17, тираж 4000, ц. 70 коп.
 - * **ЭКСПЛУАТАЦИЯ** и ремонт турбогенераторов (Технический отдел). М.-Л., Госэнергоиздат, 1944 г., стр. 154, тираж 6000, ц. 10 руб.

ИЗДАНИЯ, ОТМЕЧЕННЫЕ ЗВЕЗДОЧКОЙ, В ПРОДАЖУ НЕ ПОСТУПАЮТ.