

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1957

11



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

## СОДЕРЖАНИЕ

Д. Г. Жимерин — Триумф ленинского плана электрификации . . . . .	1	А. А. Акопян — Исследование внутренних перенапряжений и условий работы выключателей на электропередаче 400 кв Куйбышевская ГЭС—Москва . . . . .	73
Н. И. Борисенко — Развитие электротехнической промышленности за 40 лет Советской власти . . . . .	9	Е. Д. Зейлидзон — Новое в автоматической частотной разгрузке энергосистем . . . . .	81
Н. А. Тищенко и В. С. Тулин — Развитие электропривода за 40 лет Советской власти . . . . .	16	<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
Ф. К. Архангельский, М. А. Гашев, Е. Г. Комар, И. Ф. Малышев, Н. А. Моносон, А. М. Столов и Н. С. Стрельцов — Электротехнические и конструктивные проблемы сооружения крупных циклических ускорителей . . . . .	25	Г. А. Менделевич — Беседа Ленина с Уэллсом об электрификации России . . . . .	85
Н. П. Иванов — Вопросы проектирования турбогенераторов с форсированным охлаждением . . . . .	34	<b>ДИСКУССИИ</b>	
Н. Георгиу — Развитие электроэнергетики Румынской Народной Республики . . . . .	40	О перспективах применения электропередач постоянного тока в Советском Союзе — В. Т. Енин, А. А. Сакович, А. Н. Филимонов . . . . .	88
Норберт Васс — К 40-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции . . . . .	47	<b>ХРОНИКА</b>	
Л. И. Двоскин и А. Б. Крикунчик — Тепловая электростанция большой мощности . . . . .	49	Совещание о конструкциях низковольтных аппаратов. Электроснабжение железнодорожных вагонов и автотранспорта на переменном токе . . . . .	94
И. А. Сыромятников — Применение напряжения 500 кв вместо 400 кв . . . . .	56	<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
С. А. Соловьев — Испытания статической устойчивости одноцепной электропередачи 400 кв . . . . .	58	И. С. Ефремов и Ю. М. Галонен — Книги В. Н. Стасюка „Электровозный транспорт на открытых разработках“ и „Электровозный рудничный подземный транспорт“ . . . . .	95
Л. Г. Мамиконянц, С. А. Соловьев и А. А. Хачатуров — Асинхронные режимы, несинхронные включения и ресинхронизация генераторов Куйбышевской ГЭС . . . . .	64	Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике . . . . .	96

## CONTENTS

The Triumph of Lenins Plan for the Electrification of the Soviet Union — D. G. Jimerin . . . . .  
 Development of the Electrical Industry During the Past 40 Years in the Soviet Union — N. I. Borisenko . . . . .  
 Development of Electric Drives for 40 Years in the Soviet Union — N. A. Tischenko, V. S. Tulin . . . . .  
 Electrical Engineering and Design Problems in Constructing Large Cyclic Accelerators — F. K. Archangelski, M. A. Gashev, E. G. Komar, I. F. Malyshev, N. A. Monozon, A. M. Stolov, N. S. Strel'tsov . . . . .  
 Problems in Designing Forced — Cooled Turbogenerators — N. P. Ivanov . . . . .  
 Development of the Electric Power Industry in the Romanian Peoples Republic — Nicolai Georgiu . . . . .  
 The 40th Anniversary of the Great October Socialist Revolution — Norbert Wass . . . . .  
 A Large Thermal Power Station — L. I. Dvoskin, A. B. Krikunchik . . . . .

On Using 500 kV Instead of 400 kV — I. A. Siromjatnikov . . . . .	56
1 Testing for the Steady-State Stability of Single-Circuit 400 kv Transmission Systems — S. A. Sovalov . . . . .	58
9 Asynchronous Operation, Non-synchronous Switching and Resynchronization of the Kuibishev Hydro-Station Generators — L. G. Mamikonjantz, S. A. Sovalov, A. A. Hatchaturov . . . . .	64
16 Investigating Internal Overvoltages and Circuit Breaker Duty on the Kuibishev—Moscow Transmission System — A. A. Akopjan . . . . .	73
25 What's New in Automatic Frequency Load Shedding in Power Systems — E. D. Zailidzon . . . . .	81
34 FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING . . . . .	85
40 DISCUSSION . . . . .	88
47 CHRONICLE . . . . .	94
49 BIBLIOGRAPHY . . . . .	95



### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. Андрианов, Н. И. Борисенко, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова, Н. Г. Дроздов (главный редактор),  
 Е. Г. Комар, М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, В. И. Попков, И. А. Сыромятников (зам. главного редактора),  
 А. М. Федосеев, М. Г. Чилинин

Адрес редакции: Москва К-12. Б. Черкасский пер., д. № 2. Телефон: К-4-24-80.

Адрес для телеграмм: МОСКВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтamt, почтовый ящик № 648.

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР

11  
1957  
НОЯБРЬ

*Да здравствует 40-я годовщина Великой Октябрьской социалистической революции!*

## Триумф ленинского плана электрификации

Д. Г. ЖИМЕРИН

Заместитель председателя Госплана РСФСР

Теперь, когда первая в мире страна социализма — СССР празднует сорокалетие своего существования, следует подвести итоги развития не только народного хозяйства в целом, но и отдельных его отраслей. Одной из важнейших отраслей народного хозяйства является электроэнергетика.

Маркс и особенно Энгельс со времени первых научных открытий в области технического применения электричества предвидели его особую роль.

Еще в 1883 г. Ф. Энгельс писал: «Это открытие окончательно освобождает промышленность почти от всяких границ, налагаемых местными условиями, делает возможным использование также и самой отдаленной водяной энергии, и если в начале оно будет полезно только для городов, то в конце концов оно станет самым мощным рычагом для устранения противоположности между городом и деревней»; а далее Энгельс написал пророческие слова: «Совершенно ясно, что благодаря этому производительные силы настолько вырастут, что управление ими будет все более и более не под силу буржуазии» (Соч., т. XXVII, стр. 281).

Электрификация — самый надежный и пока единственный фундамент, опираясь на который возможно обеспечить непрерывный и все возрастающий рост народного хозяйства и благосостояния народа. Именно поэтому В. И. Ленин, полностью осознав все значение высказываний Маркса и Энгельса о революционизирующем значении электричества, неустанно пропагандировал его и настойчиво внедрял в народное хозяйство после захвата власти пролетариатом в Октябре 1917 г. Гениальная формула Ленина «Коммунизм — это есть советская власть плюс электрификация всей страны» всем известна в нашей стране и широко за ее пределами.

В. И. Ленин, а затем И. В. Сталин подчеркивали, что под электрификацией нельзя понимать лишь сооружение отдельных электростанций,

электросетей и других энергетических объектов. Электрификация является ключом к техническому перевооружению промышленности и сельского хозяйства; это базис, который позволяет всем отраслям народного хозяйства не только обеспечить гигантское количественное развитие, но, пожалуй, и не менее важное качественное перевооружение.

В самом деле, разве не электричество позволило организовать новые отрасли промышленности — электрометаллургию, электрохимию, производство новых и редких металлов, электрификацию железных дорог. Электричество позволило раскрыть секрет атома и раскрепостить атомную энергию.

Некоторые империалистические круги используют это величайшее достижение техники не на пользу, а во вред человечеству. Однако в конечном счете оно несомненно будет целиком обращено на благо народа.

Основу электрификации нашей страны заложил В. И. Ленин, организатор и вождь Октябрьской революции, Коммунистической партии и великого содружества народов СССР. С момента разработки и утверждения плана ГОЭЛРО прошел сравнительно короткий исторический отрезок времени, но за это время электрификация страны, развиваясь бурными темпами, далеко шагнула вперед.

Царская Россия, огромная по территории и количеству населения страна, занимала по выработке электроэнергии 15-е место в мире. Известно, что в 1913 г. мощность всех электростанций России составляла немногим больше 1 млн. квт, а годовая выработка электроэнергии равнялась 2 млрд. квт·ч в год. Передовые капиталистические страны мира по электроэнергетике далеко опережали царскую Россию: в 1912 г. в США было отпущено потребителям 24,75 млрд. квт·ч, в 1913 г. в Германии было выработано 5,1 млрд. квт·ч, а в Англии было отпущено по-

потребителям 4,5 млрд. квт·ч. Слабая энергетическая база несомненно являлась одной из причин низкого уровня промышленного развития России.

В. И. Ленин отчетливо представлял себе, что без электрификации страны, без развития ее электроэнергетической базы невозможно осуществить ни общий прогресс, ни тем более индустриализацию России. Поэтому еще в 1918 г., т. е. непосредственно после захвата власти пролетариатом, он настойчивоставил вопрос о разработке плана электрификации, который, по его мнению, должен охватывать не только развитие собственно энергии, но и всего народного хозяйства. Перед комиссией специалистов была поставлена задача разработать единый народнохозяйственный план развития России на 10—15 лет. В 1920 г. VIII съезд Советов утвердил представленный комиссией план ГОЭЛРО.

Теперь, когда наша страна прошла славный путь осуществления ряда пятилетних планов, рождение и утверждение плана ГОЭЛРО кажется естественными. Однако в 1920 г., когда впервые в мире создавался единый народнохозяйственный план на длительный период, не все в него верили. Больше того, план ГОЭЛРО подвергся ожесточенной критике и нападкам со стороны буржуазных политиков. Противники плана были и в рядах Коммунистической партии; они не понимали сущности планирования, как неотъемлемой черты социалистического строя. Коммунистическая партия не только отстояла план ГОЭЛРО, но и обеспечила его перевыполнение.

По плану ГОЭЛРО было намечено ввести в действие 30 новых районных электростанций общей мощностью 1,5 млн. квт и расширить действующие электростанции, увеличив их мощность на 250 тыс. квт. Но уже к 1934 г., т. е. через 14 лет после принятия плана ГОЭЛРО, мощность районных электростанций достигла 3 666 тыс. квт и превысила задание плана ГОЭЛРО более чем в 2 раза.

Энергетическое строительство в последующие годы не только не ослабилось, но приобрело еще более широкий размах. Это позволило Советскому Союзу уже в 1937 г. занять третье место в мире по производству электроэнергии. Впереди СССР по этому показателю оставались лишь наиболее могущественные капиталистические страны — США и Германия.

Рост энергетики в этот период, осуществлявшийся в соответствии с первым и вторым пятилетними планами, характеризуется следующими данными: в первую пятилетку (1928—1932 гг.) было введено новых мощностей на электростанциях 2 772 тыс. квт и выработано электроэнергии в последнем году пятилетки (1932 г.) 13,54 млрд. квт·ч; во второй пятилетке (1933—1937 гг.) соответственно 2 652 тыс. квт и 36,1 млрд. квт·ч.

В третью предвоенную пятилетку (1938—1942 гг.) было намечено ввести на электростанциях 9 млн. квт новых мощностей и довести выработку электроэнергии в 1942 г. до 75 млрд. квт·ч. Нападение фашистской Герма-

нии на СССР в 1941 г. нарушило успешный ход социалистического строительства в стране и не позволило осуществить эти задания.

Во время войны (1941—1945 гг.) электростанции и электрические сети подверглись ожесточенному разрушению; были выведены из строя такие крупнейшие гидроэлектростанции, как Днепровская, Свирская, Волховская; варварскому разрушению подверглись крупнейшие тепловые электростанции страны — Сталиногорская, Зуевская, Днепродзержинская, Штеровская и др. В результате Советский Союз к 1943 г. по выработке электроэнергии был отброшен на 6—7 лет назад, т. е. к уровню 1935 г. Война нанесла большой урон и энергетическому машиностроению. Были сильно разрушены харьковские и ленинградские заводы.

Вместе с тем в военные годы успешно развивалось энергетическое строительство в восточных районах страны. В результате мощность электростанций на Урале возросла в 2,1 раза, в Узбекистане, Казахстане и Кузбассе в 2 раза. Были созданы новые энергосистемы: Омская, Томская, Барнаульская, Алтайская и др.

Развитие энергетики на Урале и в восточных районах страны обусловливало интенсивный рост промышленности в этих районах, что позволило Советскому Союзу не только приостановить на второй год войны нашествие фашистских полчищ, но и разгромить фашистскую Германию.

Энергетики Советского Союза вместе со всеми трудящимися СССР в военные годы, не покладая рук, работали над расширением электрификации страны и обеспечением роста промышленного производства.

В четвертом пятилетнем плане развития народного хозяйства СССР (1945—1950 гг.) была поставлена задача восстановления разрушенных электростанций. Эта задача была успешно решена. В 1950 г. мощность электростанций СССР достигла 19,6 млн. квт и превысила довоенную (1940 г.) на 8,5 млн. квт. Выработка электроэнергии в 1950 г. достигла 91,2 млрд. квт·ч против 48,3 млрд. квт·ч, выработанных всеми электростанциями СССР в 1940 г.

В пятой пятилетке (1951—1955 гг.) продолжался неуклонный рост советской электроэнергетики. К концу 1955 г. установленная мощность электростанций превысила 37 млн. квт, а выработка электроэнергии достигла 170,2 млрд. квт·ч.

В 40-ю годовщину своего существования Советский Союз вступил в полном расцвете своих сил. По уровню промышленного производства, в том числе и по уровню производства электроэнергии, наша страна прочно занимает второе место в мире, опередив все капиталистические страны кроме Соединенных Штатов Америки. К концу 1957 г. СССР сделает новый крупный шаг вперед в деле развития электроэнергетики. Установленная мощность электростанций СССР достигнет 46 млн. квт, а выработка электроэнергии превысит 200 млрд. квт·ч. В 1957 г. в Советском Союзе будет произведено электроэнергии

больше, чем в Англии и Западной Германии вместе взятых.

Перед нами стоит задача в исторически кратчайшие сроки догнать и перегнать по производству электроэнергии США и решить основную экономическую задачу, поставленную XX съездом Коммунистической партии Советского Союза — догнать наиболее развитые капиталистические страны по производству электроэнергии на душу населения. Не подлежит никакому сомнению, что эти задачи будут выполнены, так как преимущества социалистического строя, завоеванного нами 40 лет назад, позволяют нам двигаться вперед более быстрыми темпами, чем это может делать любая, даже самая передовая капиталистическая страна.

За период с 1928 по 1955 г. производство электроэнергии в СССР выросло в 34 раза, а в США за этот же период лишь в 5,8 раза. И это несмотря на то, что в этот период наша страна в течение 5 лет вела смертельную борьбу с фашистскими захватчиками, подвергалась разграблению и разрушению и, как указывалось выше, была отброшена по производству электроэнергии на 6—7 лет назад. Наоборот, в США за военные годы произошло заметное развитие промышленности и электроэнергетики.

Значительно уменьшилось наше отставание от США в отношении производства электроэнергии на душу населения. Если в 1929 г. в США производство электроэнергии на душу населения было в 25 раз больше, чем в СССР, то в 1956 г. оно было больше лишь в 4,4 раза.

Бурный количественный рост советской электроэнергетики сопровождался ее глубокими качественными изменениями.

План ГОЭЛРО предусматривал не только рост мощности электростанций, но и создание из разрозненных электростанций энергетических объединений. В результате осуществления этой задачи за годы пятилеток были созданы мощные энергетические системы.

К 1940 г. в Европейской части СССР действовали Южная, Центральная и Уральская объединенные энергетические системы. В Южную энергосистему входили электростанции Донбасса, Приднепровья и Ростова, а в Центральную — электростанции Московской, Ярославской, Ивановской, Владимирской, Горьковской, Тульской и Рязанской областей. Наиболее крупной была Уральская энергосистема, протянувшаяся от Березников на севере до Магнитогорска на юге на расстояние свыше 1 тыс. км. Были созданы энергетические системы в Грузинской, Армянской, Азербайджанской, Узбекской и других республиках.

Рост энергетических систем продолжался и в послевоенный период. В настоящее время на территории СССР действует 61 энергосистема.

В 1956 г. было осуществлено объединение Куйбышевской энергосистемы с Центральной объединенной энергосистемой путем сооружения уникальной электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва напряжением 400 кв. Этим было положе-

но начало созданию единой энергетической системы Европейской части СССР.

В 1958 г. будет завершено строительство линии электропередачи Куйбышевская ГЭС — Урал напряжением 400 кв, которая связывает Центральную и Куйбышевскую энергосистемы с Уральской и Башкирской. С вводом в действие в 1959 г. линии Стalingрадская ГЭС — Москва напряжением 500 кв к ним присоединится Южная объединенная энергосистема.

Таким образом в 1959 г. единая энергосистема Европейской части СССР охватит электростанции Юга, Центра и Урала, ее установленная мощность превысит 25 млн. квт. Единая энергосистема Европейской части СССР по мощности электростанций и протяженности линий электропередачи будет крупнейшей в мире.

Особенностью энергетики Советского Союза является широкое использование для производства электроэнергии местных низкосортных топлив. Использование на электростанциях торфа, бурых углей и штыба было предусмотрено еще планом ГОЭЛРО. В последующем эта линия получала все большее и большее развитие. В настоящее время в СССР в широких размерах используются подмосковные угли, антрацитовый штыб, богословские угли, сланцы и торф.

В 1953 г. в СССР на буром угле было выработано 34,6% электроэнергии, на торфе — 8,8% и на других видах низкосортного топлива — 2,5%. В том же году на высококалорийном угле в СССР было выработано 39,4%, а в США — 64,9% всей электроэнергии.

Энергетики Советского Союза в сотрудничестве с машиностроителями решили важнейшую экономическую задачу успешного сжигания в топках котлов электростанций многозольных и влажных топлив, добившись при этом высоких коэффициентов полезного действия. Об успешном решении этой задачи, в частности, говорит факт сооружения в Подмосковном угольном бассейне Черепетской ГРЭС с турбинами мощностью 150 тыс. квт, параметрами пара 170 ата и 550° С. В 1957 г. коэффициент полезного действия Черепетской ГРЭС составляет 33%, а коэффициент полезного действия электростанции Керни (США) с агрегатами мощностью 145 тыс. квт и давлением пара 165 ата — 35,9%.

По удельному расходу топлива на выработанный киловатт-час электростанции Советского Союза опережают электростанции Англии, Франции и Западной Германии, но несколько отстают от электростанций США. Однако если учесть, что в 1953 г. из общего количества сожженного на электростанциях США топлива было высококалорийного угля 64,9%, газа 23,6% и мазута 11,5%, то станет ясным, что меньший удельный расход топлива на американских электростанциях обусловлен более высоким качеством сжигаемого топлива. Несмотря на это, мы не сомневаемся в том, что советские энергетики совместно с работниками заводов энергетического машиностроения осуществляют такие практические ме-

ры, которые позволяют догнать по этому показателю электростанции США.

Необходимость высоких темпов развития советской энергетики требует строительства мощных электростанций. В довоенный период среди гидроэлектростанций наиболее мощной была Днепровская ГЭС мощностью 560 тыс. квт, а среди тепловых — Сталиногорская ГРЭС мощностью 400 тыс. квт. К сорокалетию Великого Октября мощность самой крупной в стране Куйбышевской ГЭС, первые агрегаты которой были пущены в 1955 г., достигла 2 100 тыс. квт, т. е. полной проектной мощности, и Советский Союз по установленной мощности гидроэлектростанции опередил все страны мира, в том числе и Соединенные Штаты Америки. В нашей стране сооружается Сталинградская ГЭС мощностью 2 310 тыс. квт и уникальная Братская ГЭС мощностью 3 600 тыс. квт. На великой сибирской реке Енисее начато строительство Красноярской ГЭС мощностью 4 000 тыс. квт. В текущем году мощность крупнейшей в Советском Союзе тепловой электростанции Щекинской ГРЭС достигла 610 тыс. квт, Приднепровской — 500 тыс. квт, Южно-Уральской — 600 тыс. квт. В СССР действует 12 тепловых электростанций, мощность каждой из которых превышает 400 тыс. квт.

Вместе с ростом установленной мощности отдельных электростанций росли и мощности единичных агрегатов. До 1940 г. на тепловых электростанциях СССР работали преимущественно агрегаты мощностью 25 тыс. квт, агрегатов мощностью 50 тыс. квт было сравнительно немного, а агрегатов мощностью 100 тыс. квт — всего лишь два. В послевоенный период удельный вес агрегатов мощностью 50 и 100 тыс. квт резко возрос. К концу 1956 г. на электростанциях СССР работали 41 турбогенератор мощностью по 100 и три турбогенератора мощностью по 150 тыс. квт. Существенно увеличились мощности единичных агрегатов и на гидроэлектростанциях. Если в 1940 г. наибольшая мощность одного агрегата составляла 72 тыс. квт (Днепровская ГЭС), то в послевоенный период она увеличилась до 105 тыс. квт (Куйбышевская ГЭС).

Приведенные данные характеризуют серьезные качественные изменения в нашей электроэнергетике, которые существенным образом улучшили технико-экономические показатели работы электростанций.

Советский Союз обладает огромными потенциальными запасами гидроэнергии. По подсчетам специалистов, в средний по водности год они превышают 300 млн. квт. По мощности своих рек наша страна занимает первое место в мире, значительно опережая все страны мира.

После СССР наибольшими запасами гидроэнергии располагают США и Канада. Однако их запасы во много раз меньше запасов СССР. Так, потенциальные запасы гидроэнергии США составляют немногим более 90 млн. квт, а Канады — 54 млн. квт.

Использование гидроэнергии — национального богатства нашей страны стало возможным с по-

бедой Великой Октябрьской социалистической революции, оно начало осуществляться по почину В. И. Ленина. Еще в 1918 г., до разработки и утверждения плана ГОЭЛРО, В. И. Ленин подписал декрет о сооружении крупной по масштабам того времени Волховской ГЭС мощностью 66 тыс. квт — первенца советского гидроэнергостроительства. В ходе строительства Волховской ГЭС воспитались многие, в дальнейшем прославленные советские гидроэнергостроители.

Планом ГОЭЛРО предусматривалось построить за 10—15 лет гидроэлектростанции общей мощностью 515 тыс. квт, что составляло 34,3% всей мощности электростанций. Этот грандиозный план был перевыполнен. К 1933 г. на гидроэлектростанциях СССР было введено 771 тыс. квт новых мощностей, т. е. 150% первоначальных заданий плана. За период 1920—1933 г. были сооружены и введены в действие следующие гидроэлектростанции: Волховская мощностью 66 тыс. квт (1926 г.), Ереванская — 7,5 тыс. квт (1926 г.), Земо-Авчальская — 37 тыс. квт (1927 г.), Кондопожская — 5,4 тыс. квт (1929 г.), Днепровская — 560 тыс. квт (1932 г.), Рионская — 48 тыс. квт (1933 г.), Нижне-Свирская — 100 тыс. квт (1933 г.) и ряд других.

Следует указать на трудности гидроэнергетического строительства в СССР.

Наиболее мощные реки в Европейской части СССР и в Сибири протекают в равнинных районах, в мягких грунтах, что осложняет возведение гидротехнических сооружений. Ярким примером того, как советские инженеры преодолевали эти трудности, может служить сооружение гидроэлектростанций на р. Свирь.

Дно и берега этой реки выложены мягкими, пластическими глинами, деформирующими под напором. Американские консультанты считали невозможным сооружать в таких геологических условиях гидроэлектростанции. Однако выдающийся советский инженер-гидротехник Г. О. Графтио нашел смелый и оригинальный путь преодоления этих трудностей, и теперь две гидроэлектростанции, построенные на этой реке, вырабатывают в год в среднем 1 млрд. квт·ч. Другой выдающийся советский гидротехник И. Г. Александров не менее смело и оригинально решил задачу сооружения уникальной плотины Днепровской ГЭС.

В ходе гидроэнергетического строительства формировались и воспитывались многочисленные кадры талантливых гидротехников-строителей и проектантов.

Война прервала строительство многих гидроэлектростанций в центре и на северо-востоке нашей страны. В восточных же районах и на Кавказе гидроэнергетическое строительство не только не прекращалось, но размах его несколько увеличился.

В военное время в Узбекской ССР были сооружены Аккавакские № 2 и 3, Актеринская, Саларская и Нижне-Бозсуйская гидроэлектростанции; шло строительство такой крупной гидро-

электростанции, как Фархадская на р. Сыр-Дарья. В Сибири строилась Усть-Каменогорская ГЭС на р. Иртыше, на Урале — Пермская на р. Каме, на Кавказе — Гюмушская на р. Занге и многие другие.

В послевоенный период строительство гидроэлектростанций получило особенно широкий размах. Сооружались Мингечаурская ГЭС на р. Кура мощностью 360 тыс. квт, Верхне-Свирская — 160 тыс. квт, Нивские № 3 и № 1 на р. Ниве, Каховская — 360 тыс. квт на р. Днепре, Дубоссарская на р. Днестре и т. д. Кроме этого, были развернуты грандиозные строительства Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанций и Волго-Донского канала с Цимлянской ГЭС.

За 12 лет, прошедшие после окончания второй мировой войны, в Советском Союзе только в системе Министерства электростанций было построено и введено в действие 68 гидроэлектростанций суммарной мощностью 7 943 тыс. квт. К концу 1957 г. общая мощность гидроэлектростанций в СССР достигнет 9 095 тыс. квт. В настоящее время удельный вес электроэнергии, вырабатываемой на гидроэлектростанциях, в общем производстве электроэнергии в стране составляет 16%. В Армянской ССР, в Мурманском экономическом районе практически вся электроэнергия вырабатывается на гидроэлектростанциях, в Грузинской ССР удельный вес электроэнергии, вырабатываемой на гидроэлектростанциях, составляет 72%, а в Узбекской ССР — 79%.

Только за один 1957 г. все гидроэлектростанции страны сэкономят более 16 млн. т условного топлива, что означает экономию многих миллиардов рублей на строительстве угольных шахт. Но дело не только в экономии капитальных затрат.

Гидроэлектростанции сберегают стране самый ценный капитал — человеческий труд. Количество персонала на гидроэлектростанциях в 5 раз меньше, чем на тепловых станциях той же мощности. Если прибавить к этому шахтеров, добывающих для тепловых станций уголь, и работников транспорта, доставляющих его на электростанции, то экономия труда увеличится во много раз.

При сооружении гидроэлектростанций в Советском Союзе решается целый комплекс народнохозяйственных задач. Так, например, после сооружения на Волге каскада гидроэлектростанций создается единый глубоководный путь, свободный от обмеления. Сооружение только одной Днепровской гидроэлектростанции позволило прикрыть знаменитые днепровские пороги и создать сплошной водный путь по Днепру.

В принципе комплексности гидроэнергетического строительства, который последовательно проводится при строительстве гидроэлектростанций на всех реках, во всех районах страны, находят яркое проявление преимущества планового социалистического хозяйства.

Только недомыслием некоторых горе-специалистов можно объяснить их утверждение о каких-то особых преимуществах тепловых электростанций перед гидроэлектростанциями. При тех-

нико-экономическом сравнении тепло- и гидроэлектростанций нельзя исходить только из одного фактора — первоначальных капитальных затрат.

Богатейшие и вечно возобновляющиеся гидроэнергетические ресурсы нашей страны должны с каждым годом, с каждой новой пятилеткой использоватьсь во все возрастающих масштабах. Принятое недавно Центральным Комитетом КПСС и Советом Министров СССР постановление о составлении перспективного плана развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 гг. будет способствовать более правильному планированию развития гидроэлектростанций и капитальных вложений.

За годы советской власти был осуществлен серьезный технический прогресс энергетического хозяйства, были внедрены новые, более совершенные машины и аппараты, результатом чего явилось повышение коэффициентов полезного действия агрегатов и электростанций и сокращение удельного расхода топлива и электроэнергии на собственные нужды.

В отношении снижения удельного расхода топлива районные электростанции добились значительных успехов. Если в 1940 г. на выработанный киловатт-час расходовалось 598 г условного топлива, то в 1950 г. на этих же электростанциях этот расход составлял 543 г. В 1956 г. удельный расход топлива на выработанный киловатт-час был снижен до 463 г условного топлива.

За последние годы расход энергии на собственные нужды и потери в электросетях несколько снизились. В 1956 г. расход на собственные нужды составил 6,52%, а потери в сетях — 7,47%. Однако их уровень все еще остается высоким.

Снижение удельного расхода топлива на тепловых электростанциях было обусловлено двумя факторами: во-первых, широким внедрением установок высокого давления и, во-вторых, непрерывным совершенствованием использования действующих агрегатов.

В 1951 г. мощность установок высокого давления составляла 2 847 тыс. квт, или 27,2% общей мощности тепловых электростанций. За 5 лет (1951—1956 гг.) она увеличилась более чем в 3 раза. В 1956 г. удельный вес установок высокого давления в общей мощности тепловых станций составил уже 56,8%.

За 5 лет (1951—1956 гг.) производительность котлов, имеющих топки с жидким шлакоудалением, увеличилась в 3 раза. В 1956 г. шахтномельничные топки были установлены на 231 котлоагрегате.

В послевоенные годы все более широкое применение находит автоматизация управления тепловыми и гидравлическими электростанциями. В 1956 г. в Советском Союзе полностью автоматизирована 101 гидроэлектростанция с установленной мощностью 7 621,6 тыс. квт, что составляет 99,4% всей установленной на гидроэлектростанциях мощности. В настоящее время гидроэлектростанции переходят на более высокую сту-

пень автоматизации — телемеханизацию, позволяющую обходиться без обслуживающего персонала и управлять гидроэлектростанцией на расстоянии. К началу 1957 г. было телемеханизировано управление 46 гидроэлектростанциями, мощность которых составляет 46,5% общей мощности гидроэлектростанций.

Телемеханизация осуществлена также на 267 трансформаторных подстанциях страны, что резко повышает производительность труда в электроэнергетике и позволяет более гибко и оперативно решать вопросы энергоснабжения потребителей.

За последние годы во все возрастающих масштабах производится автоматизация регулирования процесса горения котельных агрегатов на тепловых электростанциях. К началу 1957 г. было автоматизировано 805 котлоагрегатов, паропроизводительность которых составляет 79,8% суммарной паропроизводительности котлов районных тепловых электростанций.

Кроме перечисленных мероприятий, в электроэнергетике СССР проводятся работы по автоматической синхронизации генераторов, автоматизации повторного включения линий электропередачи, автоматизации включения резервных агрегатов, автоматической частотной разгрузке.

В результате широкого проведения мероприятий по внедрению более совершенной техники, механизации работ, гидрозолоудаления, автоматизации и телемеханизации на электростанциях и в сетях значительно увеличилась производительность труда и сократилась удельная численность персонала. Если в 1950 г. на гидроэлектростанциях на каждую тысячу киловатт установленной мощности приходилось 2,58 человека персонала, то в 1956 г. этот показатель снизился до 1,12 человека. На тепловых электростанциях за последние 5 лет (1952—1956 гг.) удельная численность персонала сократилась почти в 2 раза.

Отличительной особенностью советской энергетики является то, что в ней получило широкое распространение комплексное производство электрической и тепловой энергии. Теплофикации промышленных предприятий и городов в Советском Союзе уделяется большое внимание. Производство и отпуск тепловой энергии непрерывно возрастают. Многие наши крупнейшие города, в том числе Москва, Ленинград, Харьков, Киев, Новосибирск и другие, получают промышленное тепло и горячую воду от теплоэлектроцентралей, мощность и удельный вес которых непрерывно возрастают.

Если в 1932 г. мощность районных теплоэлектроцентралей не превышала 300 тыс. квт, что составляло всего лишь 11,4% всей мощности паровых турбин, то к концу 1956 г. она увеличилась до 6 095 тыс. квт, удельный вес теплофикационных турбин повысился до 30,4%.

Задача заключается в том, чтобы и впредь расширять строительство теплоэлектроцентралей, увеличивать комбинированную выработку электроэнергии и тепла, теплофикацию новых и новых городов.

Политика Коммунистической партии и Советского правительства заключается в том, чтобы наиболее правильно и рационально использовать энергетические ресурсы страны, применять наиболее совершенные способы производства тепловой и электрической энергии и этим обеспечивать непрерывный технический прогресс в области энергетики.

В последние годы в Советском Союзе открыты богатейшие месторождения природного газа, что позволяет значительно улучшить топливный баланс электростанций. В 1957 г. на электростанциях, сжигающих природный газ, будет выработано свыше 13 млрд. квт·ч. Удельный вес электростанций, работающих на природном газе, будет и впредь увеличиваться. Это позволит более полно автоматизировать управление агрегатами электростанций, повысить производительность труда на них и улучшить их технико-экономические показатели.

Теперь, когда совершенно четко определились богатейшие запасы природного газа, перед энергетиками страны стоит важнейшая задача — наиболее правильно использовать этот ценнейший вид топлива. Для осуществления этой задачи необходимо переходить к строительству электростанций, оборудованных газовыми турбинами.

В дальнейшем в Советском Союзе по-прежнему будут широко использоваться все виды местных топлив, но наряду с этим там, где это представляется экономически целесообразным, топливный баланс электростанций будет пополняться более ценными видами топлива — природным газом и мазутом.

Развитие энергетики и электрификация Советского Союза практически целиком и полностью базировались на отечественном энергетическом машиностроении. За годы советской власти наше энергомашиностроение проделало большой путь технического совершенствования и гигантски выросло в количественном отношении.

На первых советских электростанциях, например на Каширской ГРЭС, устанавливались агрегаты иностранного изготовления. Однако огромный размах работ по электрификации страны потребовал создания в СССР крупных заводов по производству котлов, паровых и гидравлических турбин, генераторов и другого энергетического и электротехнического оборудования.

В первые пятилетки советские энергомашиностроители выпускали сравнительно мелкие агрегаты: турбины и генераторы мощностью 12—25 тыс. квт, котлы паропроизводительностью 75—110 т в час. Крупный шаг вперед был сделан Ленинградским металлическим заводом и заводом «Электросила», которые изготовили для Днепропетровской ГЭС девять гидротурбин с генераторами мощностью по 72 тыс. квт.

Особенно крупных успехов советские энергомашиностроители добились в послевоенные годы. За 12 лет (1945—1956) отечественные заводы изготавлили паровых турбин на общую мощность 27 400 тыс. квт, гидравлических — 7 650 тыс. квт, трансформаторов — 133 809 тыс. ква, а также со-

ответствующее котельное и другое вспомогательное оборудование.

В послевоенный период основное направление в энергомашиностроении заключается в увеличении единичной мощности агрегатов, повышении параметров машин и коэффициента полезного действия. Например, турбина высокого давления ВК100-2 мощностью 100 тыс. квт расходует тепла на выработанный киловатт-час на 4,6% меньше, чем турбина высокого давления ВК25 мощностью 25 тыс. квт.

Теперь наши заводы прочно встали на путь серийного изготовления паровых турбин и генераторов мощностью 100 и 150 тыс. квт и теплофикационных турбин мощностью 25 и 50 тыс. квт. К концу 1957 г. Ленинградский металлический завод завершит изготовление и выпустит паровую турбину мощностью 200 тыс. квт. Кроме того, в настоящее время этот завод работает над созданием паровой турбины мощностью 300 тыс. квт, которая должна быть выпущена к 1960 г. В соответствии с увеличением единичной мощности паровых турбин возрастают паропроизводительность котлов и мощности другого вспомогательного оборудования.

В отношении гидроэнергетического оборудования можно с уверенностью сказать, что советское машиностроение способно решить любые задачи, которые перед ним выдвигает развивающаяся гидроэнергетика. Как известно, Ленинградский металлический завод и завод «Электросила» в короткий срок освоили производство гидротурбин и генераторов мощностью по 105 тыс. квт для Куйбышевской и Стalingрадской гидроэлектростанций. Сейчас разрабатываются агрегаты мощностью 200—300 тыс. квт для Братской и Красноярской гидроэлектростанций. Несомненно, что и эта большая и почетная задача советскими машиностроителями будет выполнена с честью.

Следует особо подчеркнуть большую заслугу конструкторов и работников заводов по созданию целого ряда оригинальных конструкций энергетических машин, паровых котлов, в топках которых сжигаются различные виды низкосортных топлив (кусковой и фрезерный торф, бурье угли, антрацитовый штыб и т. п.). Для сжигания низкосортных топлив большое значение имели жидкое шлакоудаление и циклонное сжигание топлива. Эти серьезные технические задачи также с успехом были решены нашими заводами.

В области конструирования крупных паровых и гидравлических машин и другого энергетического оборудования Советский Союз прочно занимает передовые позиции в мире. Мы несколько уступаем США в отношении единичной мощности паровых турбин, но зато мы превзошли их в отношении мощности гидроагрегатов.

Перед советскими машиностроителями стоит серьезная и большая задача дальнейшего технического совершенствования энергетического машиностроения, решительной борьбы за увеличение коэффициента полезного действия машин,

увеличения единичной мощности агрегатов и решительного сокращения веса машин.

Показателем зрелости советских энергетиков и машиностроителей является создание в СССР первой в мире промышленной атомной электростанции. В противоположность многим капиталистическим странам, и в первую очередь США, в нашей стране были приложены большие усилия к созданию оборудования, строительству и вводу в действие первой атомной электростанции. Опыт работы, накопленный при ее создании, позволил поставить задачу строительства в СССР более крупных атомных электростанций.

Коммунистическая партия и Советское правительство, верные ленинским идеям мирного существования и соревнования между социалистической и капиталистической системами, уделяют огромное внимание мирному использованию атомной энергии. Советский Союз стоял и продолжает стоять за всемерное использование атомной энергии для развития экономики страны и увеличения благосостояния народа.

В соответствии с Директивами XX съезда КПСС в Советском Союзе начато строительство нескольких атомных электростанций с различными типами реакторов. В результате будет накоплен еще больший опыт, который позволит обеспечить дальнейшее развитие атомной энергетики в нашей стране. Советские энергомашиностроители сейчас усиленно работают над созданием реакторов и оборудования для строящихся атомных электростанций. Есть все основания полагать, что строящиеся атомные электростанции будут введены в строй в сроки, установленные правительством.

40-я годовщина существования Советского государства совпадает со вторым годом шестой пятилетки развития народного хозяйства. В 1956 г. Советский Союз успешно справился с задачами развития народного хозяйства во всех областях. В 1957 г. наша промышленность выпустит продукции на 9—10% больше, чем в 1956 г. Такой годовой прирост промышленной продукции недостигаем для капиталистической экономики. Это лишний раз подчеркивает преимущество социалистической системы хозяйства. Таким образом, итоги первых двух лет шестой пятилетки показывают, что Директивы XX съезда Коммунистической партии Советского Союза успешно выполняются.

В области электрификации XX съезд КПСС поставил грандиозные задачи. В 1960 г. производство электроэнергии на всех электростанциях страны достигнет 300 млрд. квт·ч, в том числе на гидроэлектростанциях 51 млрд. квт·ч. Будут значительно расширены энергетические системы в экономических районах и республиках страны, произойдет объединение крупнейших объединенных энергосистем Центра, Урала и Юга. Все это обеспечит лучшее маневрирование энергетическими ресурсами и резервами и создаст предпосылки для наилучшего обеспечения электроэнергией всех отраслей народного хозяйства.

В шестой пятилетке намечено значительно увеличить отпуск электроэнергии промышленности и, особенно, бытовым потребителям как в городах, так и в колхозах. Производится коренная реконструкция железнодорожного транспорта путем перевода его на электровозную и тепловозную тягу. Только за счет лучшего использования топливных ресурсов на электростанциях и электрификации железнодорожного транспорта в 1960 г. будет сэкономлено около 70 млн. т угля.

Коммунистическая партия и Советское правительство уделяют исключительное внимание развитию и совершенствованию советской энергетики, делу электрификации нашей страны.

Советский Союз, верный идеям интернационализма, работает в содружестве со всеми страна-

ми социалистического лагеря, использует в своей работе опыт энергетиков Китая, Чехословакии, Польши и других стран и охотно предоставляет возможность энергетикам всех стран знакомиться с достижениями советской энергетики.

Перед нашей страной стоят величественные задачи по дальнейшему развитию производительных сил страны и осуществлению великих заветов Ленина о сплошной электрификации нашей великой Родины. Советские энергетики, воодушевленные грандиозным размахом социалистического строительства, вместе со всеми трудящимися нашей страны под руководством Коммунистической партии и Советского правительства смело и уверенно идут по пути строительства коммунистического общества.



*Запуск первого в мире искусственного спутника Земли открывает новую эру в истории мировой науки.*

*Слава советским ученым, инженерам, техникам и рабочим, осуществившим под руководством Коммунистической партии дерзновенную мечту человечества!*

*Да здравствует передовая советская наука—детище социализма!*

# Развитие электротехнической промышленности за 40 лет Советской власти

Инж. Н. И. БОРИСЕНКО

Госплан СССР

Величествен путь, пройденный советским народом со времени победы рабочих и крестьян России, под руководством Коммунистической партии во главе с Владимиром Ильичем Лениным в дни Великого Октября. Социалистическая революция разорвала цепи старых производственных отношений и создала условия для свободного развития производительных сил и безграничного расцвета творческой инициативы освобожденного многонационального советского народа.

Электротехники нашей Родины с честью боролись за осуществление лозунга В. И. Ленина «Коммунизм — это есть советская власть плюс электрификация всей страны».

Первый план электрификации страны, план ГОЭЛРО, разработанный по указанию В. И. Ленина, положил начало развитию отечественной электротехнической промышленности.

Электротехническая промышленность развивалась как в области производства энергетического электрооборудования, вырабатывающего и передающего электроэнергию к потребителю, так и в области производства электрооборудования для преобразования электрической энергии в другие необходимые человеку виды энергии.

В электротехнической промышленности сформировались научно-исследовательские и проектно-конструкторские организации. Одной из задач этих организаций является изучение условий, в которых работают электротехническое оборудование, изделия и материалы, а также предъявляемых к ним требований для учета последних при разработке номенклатуры, технических и конструктивных данных электротехнических изделий.

До Великой Октябрьской социалистической революции электротехническая промышленность в России была очень слабой. Общий выпуск в 1913 г. всех электротехнических заводов, включая и слаботочную электротехническую промышленность, составлял всего 66 млн. руб., а количество рабочих не достигало и 15 тыс. чел. Заводы, основанные главным образом иностранным капиталом, представляли собой преимущественно сборочные мастерские. Работа в них велась по чертежам ведущих заводов иностранных фирм-хозяев. Многие узлы и детали завозились из-за границы.

Гражданская война и борьба молодой Советской республики с интервентами полностью дезорганизовали и без того слабую электротехническую промышленность. Однако при первой же передышке рабочие и инженерно-технические работники электротехники взялись за преодоление трудностей, стоявших на пути восстановления и развития электротехнической промышленности. Уже тогда было положено начало созданию научно-исследовательских учреждений электротехнического направления. В конце 1921 г. по указа-

нию В. И. Ленина был организован Государственный экспериментальный электротехнический институт, ныне Всесоюзный электротехнический институт имени В. И. Ленина.

Советская электротехническая промышленность вступила на путь самостоятельного развития, создавая и расширяя техническую базу электрификации всей страны. В электротехнической промышленности сформировались следующие отрасли производства: 1) генераторостроение; 2) трансформаторостроение; 3) высоковольтное аппаратостроение; 4) низковольтное аппаратостроение; 5) электромашиностроение; 6) производство электровозов и электрооборудования для тепловозов и других видов транспорта; 7) производство ртутных выпрямителей и других статических преобразователей тока; 8) производство электротермического сварочного электрооборудования; 9) производство светотехнического электрооборудования; 10) производство рентгенотехнического электрооборудования; 11) производство химических источников тока и электроугольных изделий; 12) производство электрокабельных изделий; 13) производство электроизоляционных и электрокерамических изделий.

Наряду с производством отдельных электротехнических изделий в электротехнической промышленности сформировалось также производство сложных комплектных устройств, используемых во всех областях народного хозяйства. Прогресс в электротехнической промышленности революционизировал техническое развитие всех отраслей народного хозяйства. Производство электротехнических изделий развивалось быстрее других отраслей промышленности и уже в 1925 г. значительно превысило довоенный уровень. Количество рабочих, занятых в электротехнической промышленности, в 1925 г. удвоилось по сравнению с довоенным. Сопоставляя рост производства электротехнической промышленности и промышленности СССР в целом за 1913—1932 гг., получаем, принимая 1913 г. за 100%: в 1932 г. по всей промышленности 335%, а для электротехнической — 1 890% (рис. 1).

Одновременно с ростом объема производства началось освоение целого ряда новых видов изделий и новых отраслей производства, не имевшихся в дореволюционной России. Было положено начало специализации электротехнических заводов. В 1924 г. были построены первые советские турбогенераторы.

По окончании второй мировой войны возобновилось бурное развитие электротехнической промышленности. Принимая 1940 г. за 100%, ожидаемый выпуск электротехнических изделий в 1957 г. составит 1 170% (рис. 2).

Одновременно с ростом объема выпуска продукции расширялась номенклатура изделий для удовлетворения возросших потребностей народно-

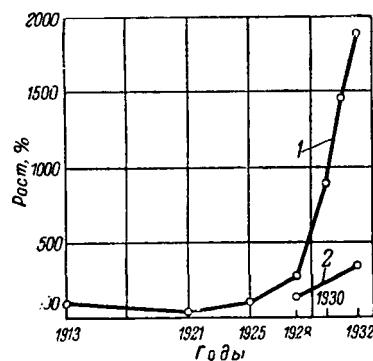


Рис. 1.

1—электротехническая промышленность; 2—вся промышленность.

го хозяйства. В настоящее время электротехническая промышленность удовлетворяет весь спрос, и необходимость в импорте сведена практически к нулю.

Темпы роста электротехнической промышленности и в настоящее время значительно превышают средние темпы роста промышленности в целом (см. таблицу).

	1940 г.	1950 г.	1955 г.	1956 г.
Численность рабочих и служащих:				
во всей промышленности	100	125	155	162
в электротехнической промышленности . . . . .	100	150	375	410
Валовая продукция:				
всей промышленности . . . . .	100	173	320	354
электротехнической промышленности . . . . .	100	360	850	1 010

Все большее и большее проникновение электрической энергии буквально во все поры народного хозяйства и в быт и бурный рост автоматизации процессов производства требуют еще более высоких темпов развития электротехнической промышленности как по объему, так и по номенклатуре производства.

В одной, даже обзорной, статье невозможно хотя бы только перечислить всю номенклатуру электротехнической промышленности. Поэтому ниже освещаются только основные направления развития и достижений советских электротехников.

**Генерирование электрической энергии.** Для всех производимых в стране первичных двигателей — паровых, гидравлических, тепловых — во всем диапазоне мощностей от 1 квт до 150 Мвт электротехническая промышленность поставляет генераторы в количествах, обеспечивающих выполнение планов электрификации. Небезынтересно напомнить, что выпуск генераторов с 10 Мвт за 1924 г. в текущем 1957 г. составит 5,7 Гвт (рис. 3).

Турбогенераторы мощностью от 750 квт до 25 Мвт на 3000 об/мин строятся с воздушным

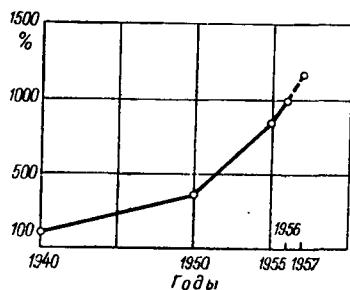


Рис. 2.

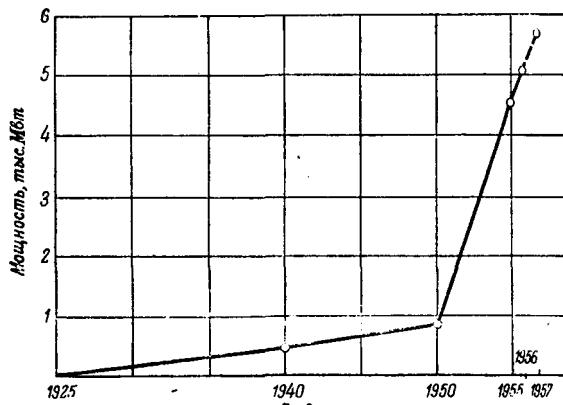


Рис. 3.

охлаждением, а от 30 Мвт и выше — с водородным охлаждением.

В производстве находятся турбогенераторы мощностью 200 Мвт с применением в электрических обмотках непосредственного охлаждения меди водородом (рис. 4). Создание сверхмощных турбогенераторов технически наиболее совершенными, надежными и экономическими стимулируется социалистическим соревнованием двух заводов.

Разрабатываются проекты турбогенераторов на 300 Мвт с еще более форсированным охлаждением водородом. Начата разработка опытных машин с жидкостным охлаждением обмоток как прототипов генераторов на мощности до 500 Мвт.

Расход материалов на 1 ква мощности сведен до 1,5 кг, в то время как в первых советских турбогенераторах расход составлял до 7 кг на 1 ква.

Больших успехов добилась электротехническая промышленность и в гидрогенераторостроении; в подавляющем большинстве гидроэлектростанций Советского Союза обеспечиваются гидрогенераторами собственного производства.

Очень удачно разрешен важный конструктивный узел гидрогенераторов — пяты, допускающие нагрузку до 3 500 т.

В последнее время в результате исследований в конструкцию гидрогенераторов внесены улучшения, значительно повышающие эффективность действия охлаждающего воздуха.

Переход на ионное возбуждение на гидрогенераторах для Куйбышевской ГЭС позволил, помимо улучшения динамических характеристик этих генераторов, облегчить и их вес.

Коллективы заводов «Электросила», «Уралэлектроаппарат» и Новосибирского турбогенераторного работают над проектами гидрогенераторов мощностью 200 Мвт для Братской гидроэлектростанции и 250...300 Мвт для Красноярской ГЭС.

Плановая система социалистического хозяйства позволила создать для так называемой малой и передвижной энергетики единые серии генераторов трехфазного, однофазного и постоянного тока; причем за прошедшие 40 лет сменилось в процессе совершенствования несколько таких серий и в настоящее время заканчивается проектирование новых серий, имеющих более высокие

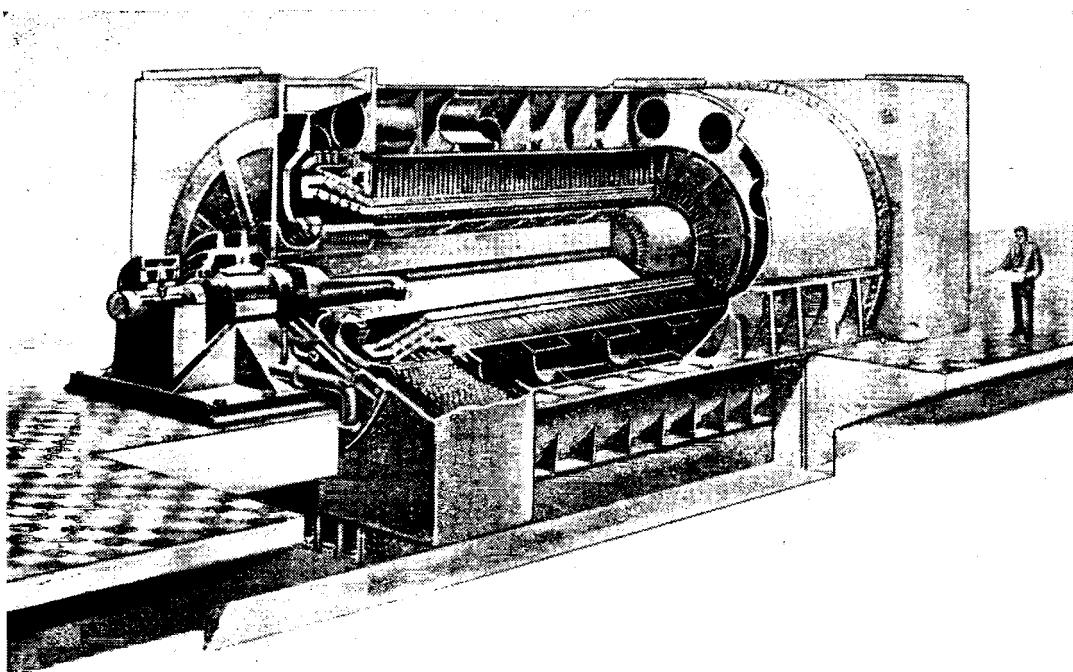


Рис. 4.

технические и экономические показатели. Так, например, единая серия генераторов свыше 1 Мвт заменит 10 действующих серий, устарелых по уровню унификации узлов и технологичности конструкций; единая серия синхронных машин от 100 квт до 1 Мвт заменит две старые серии и будет широко унифицирована с серией асинхронных электродвигателей; единая серия синхронных генераторов до 100 квт заменит четыре устаревших серии. Кроме унификации, создающей большие выгоды для производства и эксплуатации, генераторы новых серий будут легче примерно на 10% и значительно технологичнее генераторов старых серий.

Дальнейшему развитию электромашиностроения даст толчок освоение химической промышленностью новых изоляционных материалов — тонких пленок высокой электрической и механической прочности, и металлургической промышленностью — динамостали с высокой магнитной проницаемостью и низкими потерями.

**Трансформаторостроение.** Трансформаторостроение развилось в самостоятельную широко разветвленную отрасль, обслуживающую соответственные нужды электрификации всей страны.

Первый специализированный трансформаторный завод появился в 1928 г. В настоящее время годовой объем производства трансформаторов достиг внушительной цифры — свыше 26 Гва при 3,5 Гва за 1940 г. (рис. 5).

Производство трансформаторов охватывает все напряжения и мощности, необходимые для всех целей преобразования электрической энергии, включая потребности электропривода, электрометаллургии, электротяги, электротермии,

испытательных электротехнических установок и быта.

Последняя задача, разрешенная трансформаторостроителями, вслед за созданием комплекса оборудования на 400 кв, заключалась в разработке и поставке мощных автотрансформаторов вместо трансформаторов, в числе которых можно отметить автотрансформаторы на напряжение 420/242 кв, мощностью 3×167 Мва. Применение автотрансформаторов экономит значительное количество материалов (до 30%).

Проводимое в настоящее время проектирование новых серий трансформаторов имеет целью: увеличение к. п. д. и уменьшение веса и габаритов; оно основывается на широком использовании холоднокатаной трансформаторной стали с малыми удельными потерями и высокой магнитной проницаемостью.

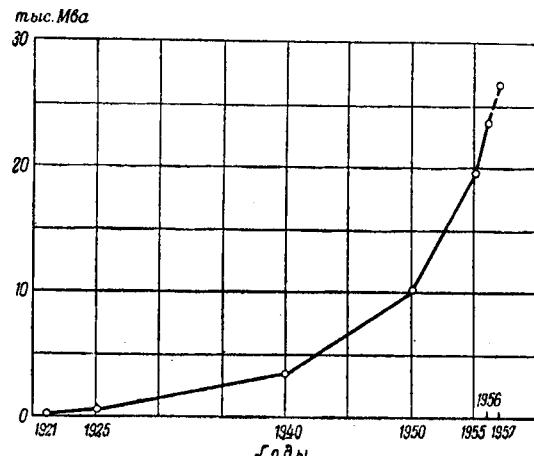


Рис. 5.

Ближайшая задача трансформаторостроителей заключается в создании мощных трансформаторов, исполнение которых допускает перевозку по железным дорогам с минимальной степенью демонтажа и в создании трансформаторов на напряжение 500 кв.

**Аппаратостроение.** Развитие высоковольтного аппаратостроения характеризуется необходимостью, с одной стороны, удовлетворения все возрастающих потребностей электрификации страны по величине отключаемой мощности и по величине номинального напряжения, а с другой — обеспечения технического прогресса в коммутационных схемах электрических станций и подстанций.

Научно-исследовательские работы по созданию надежных методов испытания высоковольтных аппаратов, по изучению процессов гашения дуги, по созданию измерительных средств для записи переходных процессов создали необходимую основу для развития высоковольтного аппаратостроения. Воздушные выключатели мощностью 15 Гва на напряжение 400 кв были достижением в этой быстро развивающейся отрасли электротехнического производства.

В результате совместной работы работников эксплуатации электротехнических установок и работников электротехнической промышленности создана дугогасящая камера для масляных выключателей, позволившая поднять мощность масляных выключателей на напряжение от 220 кв до 5 Гва в режиме с автоматическими повторными включениями. Над созданием новых масляных выключателей на напряжение 400 кв мощностью до 15 Мва, новой серии высоковольтных разъединителей значительно меньших габаритов по сравнению с существующими, новой серии мало-масляных выключателей и многих других новых изделий работают исследователи, конструкторы и производственники институтов и заводов высоковольтного аппаратостроения. Задачей этих коллективов являются также разработка и освоение необходимого для электрификации комплекса высоковольтных аппаратов на напряжение 500 кв.

Наряду с созданием отдельных коммутационных аппаратов высокого напряжения электротехническая промышленность приступила к организации выпуска комплектных распределительных устройств на напряжение 6, 10 и 35 кв и комплектных трансформаторных подстанций мощностью до 1,8 Мва.

За 40 лет низковольтное электроаппаратостроение, начав с производства простейших аппаратов, выполнявших функции коммутации электрического тока и пуска электродвигателей, развилось в широкую разветвленную отрасль электрических средств коммутации, управления и автоматизации низковольтных электротехнических установок.

На смену рубильнику с предохранителем, долгое время бывшим основным средством коммутации и защиты от перегрузок приемников тока, пришли современный установочный автоматический выключатель с тепловой и электромагнитной защитой и магнитный пускатель с дистанционным или автоматическим управлением.

Разработкой и освоением серий контакторов, реле управления командоаппаратов и датчиков было положено начало автоматизации пуска и регулирования электрических двигателей и на этой основе автоматизации большого числа технологических процессов в народном хозяйстве.

Изготовление отдельных разрозненных аппаратов в настоящее время постепенно заменяется изготовлением комплектных изделий — панелей управления, комплектных устройств и др.

**Электромашиностроение.** В настоящее время отечественным электромашиностроением удовлетворяются потребности народного хозяйства в электрических двигателях различного исполнения.

Наиболее распространеными электродвигателями являются асинхронные электродвигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором, общепромышленного применения мощностью от 0,6 до 100 квт. Изготовление этих электродвигателей ведется по единым чертежам на многих заводах. Опыт внедрения единой серии электродвигателей показал большую технико-экономическую эффективность такого мероприятия. Серия имеет продолжение в диапазоне мощностей от 100 квт до 1 Мвт. Среди преимуществ серии можно отметить: твердую шкалу мощностей, более высокие энергетические показатели (к. п. д. повышен на 1%,  $\cos \phi$  повышен на 0,014), снижение расхода проводниковых материалов (цветных металлов) на 5% и конструктивных материалов на 15%.

Для угольных разработок промышленность выпускает серии взрывобезопасных электродвигателей и специальных электродвигателей для врубовых машин и комбайнов. Для кранов и подъемно-транспортных механизмов разработаны и выпускаются серии крановых электродвигателей постоянного и переменного тока. Во внедренной ныне серии двигателей снижены маховые моменты якорей на 30% и общий вес уменьшен на 20%, при этом проведена широкая унификация деталей и узлов, и на основе эксплуатационного опыта внесены конструктивные улучшения, направленные на повышение надежности в эксплуатации.

Получили развитие новые серии погружных электродвигателей для использования при откачке нефти и воды в диапазоне мощностей от 2,5 до 60 квт при скорости вращения 3 000 об/мин.

Электротехнической промышленностью изготавливается большое количество разнообразных электрических машин постоянного тока. Новая внедряемая в настоящее время серия машин постоянного тока мощностью от 0,30 до 200 квт характеризуется снижением веса на 26% и махового момента на 34% при сохранении к. п. д. на прежнем уровне.

Для привода крупных механизмов изготавливается большое количество крупных машин постоянного и переменного тока, преобразовательных агрегатов (рис. 6). Любой механизм (насос, вентилятор, компрессор, металлообрабатывающий станок, экскаватор, прокатный стан, подъемник и т. д.) может быть снабжен для привода элек-

тродвигателем, изготовленным на советских заводах. Должны быть отмечены электродвигатели мощностью до 6 500 квт, изготовленные для привода реверсивных прокатных станов (рис. 7). Вращающий момент при перегрузках у этих электродвигателей достигает 300 т/м, а реверсирование происходит меньше, чем за 1 сек. Такие высокие показатели достигнуты применением двух- и трехходовых обмоток, уменьшением диаметра якоря и, следовательно, махового момента. Уменьшение махового момента в сравнении со старыми электродвигателями почти двукратное. Применение шихтованной станины позволило уменьшить время реверсирования при соблюдении хорошей коммутирующей способности. Накопленный опыт конструирования и эксплуатации позволил создать эти, работающие в чрезвычайно тяжелых условиях, электродвигатели надежными, практически безотказными. Величина произведения мощности на число оборотов в минуту, характеризующая технический уровень генераторов постоянного тока, доведена до  $2,5 \cdot 10^6$ . Величина произведения мощности на число оборотов в минуту и на кратность регулирования скорости вращения снижением возбуждения, характеризующих технический уровень электродвигателей постоянного тока, доведена до  $3,2 \cdot 10^6$ .

Для дальнейшего прогресса электромашиностроения будет использовано, помимо упомянутых выше — повышения качества электротехнической стали, возможности дальнейшего уменьшения толщины изоляции при сохранении ее механической и электрической прочности, также улучшение аэродинамических характеристик машин для усиления их охлаждения.

С развитием номенклатуры и ростом производства электрических машин и электрических средств автоматики развивается и электропривод. Автоматизированный электропривод стал основой

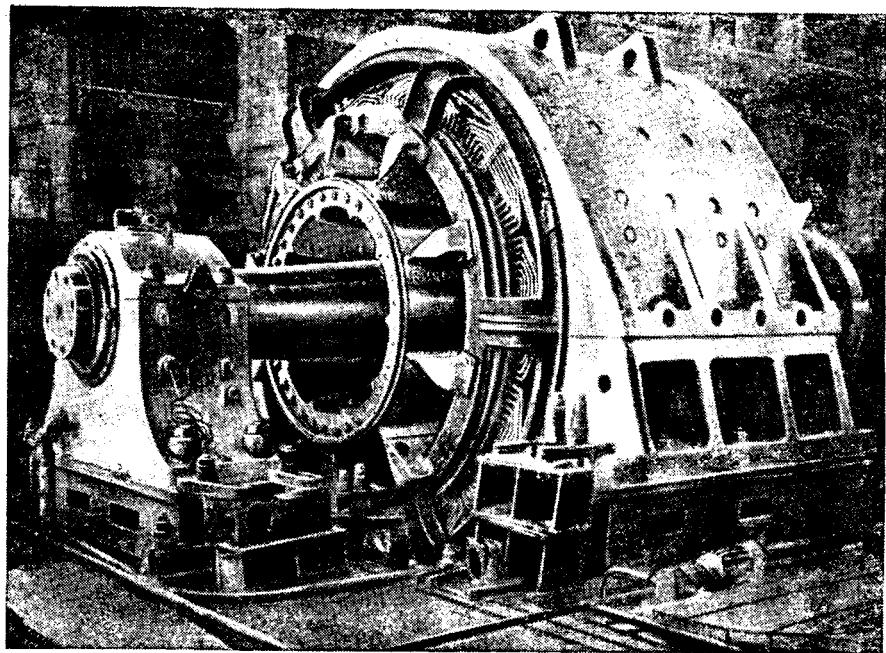


Рис. 7.

механизации и автоматизации весьма многих производственных процессов. Применение электрических средств автоматизации управления электроприводами (электромашинные, магнитные, электронные и полупроводниковые усилители, электрические датчики, счетно-решающие устройства и др.) позволило резко повысить технический уровень большинства технологических процессов в народном хозяйстве.

Так, глубина подъема полезных ископаемых в настоящее время значительно превышает 1 000 м, грузоподъемность подъемных машин доходит до 25 т, а скорость подъема до 16 м/сек. Электропривод и автоматика реверсивных горячепрокатных станов обеспечивают производительность станов свыше 3 млн. т в год. Скорость прокатки на толстолистовых и тонколистовых горячепрокатных станах доведена до 10 м/сек, а на станах холодной прокатки — до 22,5 м/сек, причем в проектировании находится электрооборудование станов холодной прокатки со скоростью прокатки 35 м/сек. Скорость бумагоделательных машин доходит до 600 м/мин. Точность поддержания скорости позволяет изготавливать любые сорта бумаги, вплоть до самых тонких сортов кабельной бумаги (толщина 14 мкн).

**Электрификация транспорта.** Ряд заводов электротехнической промышленности специализировался на разработке и изготовлении электрооборудования для транспорта и достиг в этой области больших успехов. Ими поставляется электрооборудование, отвечающее современным требованиям техники для трамваев, троллейбусов, метрополитена, пригородных поездов, пассажирских вагонов дальнего следования и др.

В Советском Союзе в настоящее время выпускаются генераторы, электродвигатели и аппаратура для тепловозов мощностью 4 тыс. л. с.

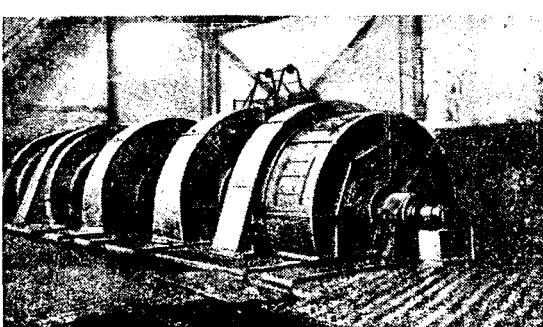


Рис. 6.

В разработке и изготовлении находятся образцы электрооборудования для тепловозов 6 тыс. л. с.

Значительно усовершенствованы и увеличены по мощности также и электровозы. Восьмиосный магистральный электровоз постоянного тока мощностью часового режима 4,2 Мвт и скоростью 42 км/ч имеет сцепной вес 183 т и конструктивную скорость 90 км/ч. Успешно работают опытные шестиосные электровозы переменного тока промышленной частоты с напряжением на токоприемнике 20 кв, мощностью часового режима 2,4 Мвт, скоростью 40,5 км/ч. Осваиваются электровозы переменного тока мощностью 3,9 Мвт. На электровозах установлены игнитронные выпрямительные установки с безнасосными запаянными вентилями. От мощности 17 квт на 1 т веса первых конструкций советских электровозов теперь достигнута мощность 23 квт на 1 т веса и создается новый электровоз переменного тока мощностью 30 квт на 1 т веса.

Ближайшей задачей электротехнической промышленности является обеспечение электроподвижным составом и соответствующим электрооборудованием работ по внедрению переменного тока высокого напряжения при переводе железных дорог на электрическую тягу.

**Ртутные и полупроводниковые выпрямители.** Зародившееся в первые годы Советской власти производство ртутных выпрямителей получило значительное развитие. Преимуществом ртутных выпрямителей перед мотор-генераторными преобразователями, как известно, являются отсутствие вращающихся частей, меньший вес, более высокий к. п. д.

Наибольшее применение ртутные выпрямители нашли на тяговых подстанциях и при электролизе. Область применения ртутных выпрямителей расширилась, охватив привода нереверсивных прокатных станов, подъемников, возбуждения крупных генераторов; решением задачи применения ртутных выпрямителей в реверсивных приводах заняты работники электротехнической промышленности.

Разработаны прогрессивные конструкции выпрямителей с запаянными вентилями в металлических корпусах. Промышленные образцы таких ртутных преобразователей мощностью 4 Мвт, 3 300 в, 1 200 а из шести одноанодных вентиляй успешно работают в тяжелых условиях на железнодорожных тяговых подстанциях.

Промышленное производство ртутных выпрямителей должно быть значительно расширено в ближайшее время.

Большим достижением электротехнической промышленности является разработка заканчивающихся изготовлением опытных партий высоковольтных вентилей на напряжение 130 кв и ток 900 а для линий передачи электрической энергии постоянным током.

В последние годы советские ученые создали новые промышленные типы полупроводниковых выпрямителей. Основными преимуществами этого вида преобразователей, как известно, являются высокий к. п. д. (до 98%) и малые габариты в сравнении с любым другим видом преобразователя.

Советскими металлургами и электротехниками освоена технология производства силовых германьевых выпрямителей на токи в элементе от 2 до 200 а и обратное напряжение 50 в.

В первую очередь выпрямительные германьевые устройства (рис. 8) будут применены в синхронных генераторах вместо возбудителей, для гальванических цехов вместо электромашинных агрегатов, для аккумуляторных батарей вместо зарядных электромашинных агрегатов и в других установках, требующих применения постоянного тока напряжением до 250 в.

**Электросварочное и электротермическое оборудование.** Электросварочное оборудование, созданное советской электротехнической промышленностью, отвечает требованиям передовой техники. Технология электросварки и производство электросварочного оборудования бурно развивались во взаимодействии. Прогресс в сварочном оборудовании побуждался совершенствующейся технологией сварки и расширением областей ее применения.

Достижением заводов и Научно-исследовательского института электросварочного оборудования являются разработка и освоение серийного выпуска 120 типов машин и аппаратов для сварки и большего количества различного вида автоматов индивидуальных исполнений (например, специальных многоточечных машин для автоматической сварки арматурных сеток и каркасов, производительность такого автомата для сварки сеток шириной свыше 2 м из прутков до 10 мм составляет 180 м сетки в час; специальной сты-

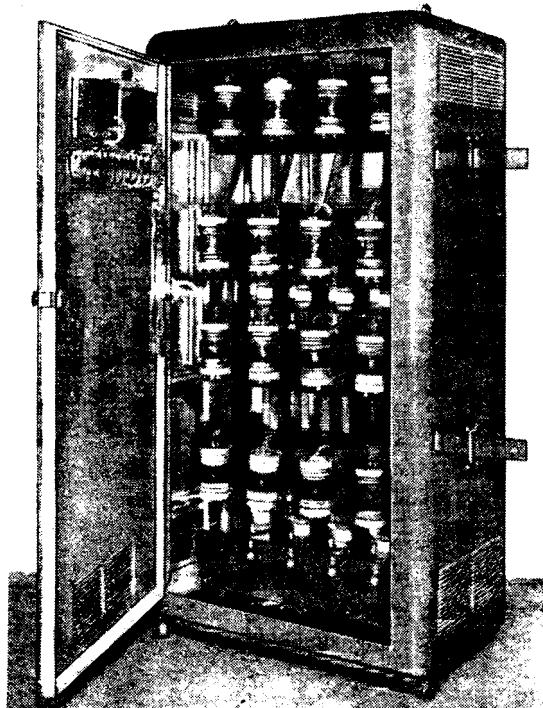


Рис. 8.

ковой электросварочной машины для сварки автомобильных колес мощностью 750 квт и др.).

Разработано и освоено различное оборудование для шовной, точечной и стыковой сварки легких сплавов толщиной от 0,1 до 4 мм; оборудование для автоматической сварки в среде защитных газов для сварки тонких цветных материалов и легированных сталей. Разработаны и изготовлены машины для сварки трением и холодной сварки.

Производство электротермического оборудования организовано при советской власти. Выпускается широкая номенклатура изделий, включая дуговые механизированные сталеплавильные электропечи емкостью до 80 т, ферросплавные и рудно-термические электропечи мощностью до 40 Мвт в единице, индукционные электропечи промышленной и повышенной частоты для плавки цветных металлов и стали открытые емкостью до 15 т и вакуумные до 500 кг, механизированные электропечи для поточных и автоматических линий производств, шахтные электропечи для проведения скоростного процесса газовой цементации, высокочастотные установки с ламповыми генераторами мощностью до 500 квт для поверхностной закалки, плавки и нагрева диэлектриков и целый ряд уникального электротермического оборудования.

За время с 1940 по 1957 г. выпуск электротермического оборудования в штуках вырос более чем в 20 раз, и притом более сложного и дорогостоящего оборудования.

**Кабельное производство.** Рост этой отрасли электротехнической промышленности также огромен (рис. 9). В сравнении с 1913 г. кабельное производство выросло более чем в 100 раз. Но, несмотря на это, в настоящее время все еще не покрываются полностью потребности народного хозяйства в кабельных изделиях.

Кабельная промышленность нашей страны в настоящее время способна давать необходимые по номенклатуре провода для передачи электрической энергии для всех целей: для передачи силовой электроэнергии, энергии для телефонной и телеграфной связи, для радиовещания и телевидения.

Научно-исследовательский институт кабельной промышленности, созданный после Великой Октябрьской социалистической революции, ведет большие разработки новых видов кабельных изделий. Из многих достижений этой отрасли электротехнического производства следует выделить разработку и освоение газонаполненных и маслонаполненных силовых кабелей на напряжение до 220 квт, разработку и освоение кабелей связи, в том числе высокочастотных, коаксиальных, позволяющих передавать до 2 тыс. телефонных разговоров одновременно, разработку и освоение гибких шланговых кабелей для угольной промышленности, гибких шланговых кабелей для экскаваторов и др.

Большим достижением кабельной промышленности является применение алюминиевой жилы в качестве электропроводника взамен медной и в силовых кабелях алюминиевой оболочки взамен

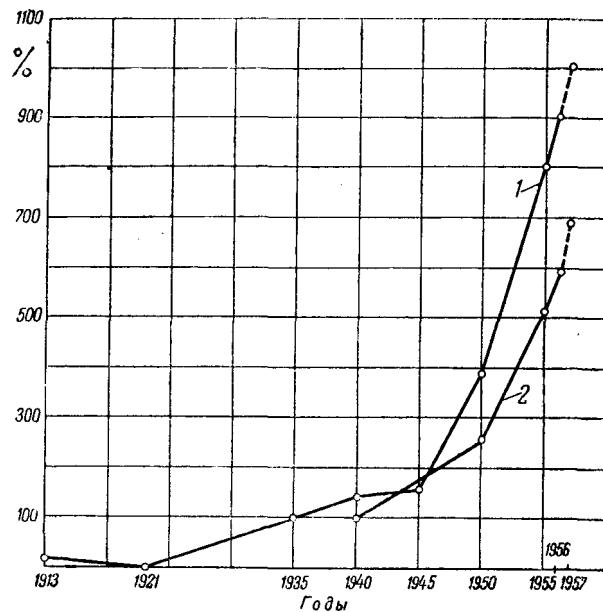


Рис. 9.  
1 — в ценном выражении; 2 — по весу меди.

свинцовой. Это дает эффект, кроме замены дефицитной меди, в уменьшении стоимости кабелей на 25 ... 30 %.

Внедрение хлорвинилового пластика в качестве изоляции проводов вместо резины дало большой технико-экономический эффект и представляется перспективным.

Внедрение непрерывных автоматизированных технологических процессов вулканизации резиновых проводов и полуавтоматических линий по изготовлению резиновых смесей также является бесспорным достижением советских кабельщиков.

Перед электрокабельной промышленностью стоит задача дальнейшего расширения производства силовых кабелей, кабелей связи, обмоточных круглых и прямоугольных проводов с прочной, теплостойкой, влагостойкой, эмалевой изоляцией и отказ от толстой изоляции из хлопчатобумажной пряжи или других подобных материалов (асбест, шелк, стекло).

**Изделия широкого бытового потребления.** Развитие социалистической экономики, поднявшее материально-культурный уровень населения, вызвало большое потребление электроэнергии для быта и, следовательно, электротехнических изделий широкого потребления. В заметных количествах они начали появляться в начале 30-х годов. С тех пор это производство выросло в десятки раз. Номенклатура изделий широкого потребления с каждым годом увеличивается, охватывая новые области быта, облегчая домашний труд женщин, содействуя созданию комфорта, уюта и хороших условий для отдыха и развлечений трудающихихся.

Для медицинского обслуживания больных электропромышленность создала целый ряд диагностических и терапевтических рентгеновских установок и гамма-аппаратов с применением радиоактивного кобальта. Выпуск рентгеновского

оборудования по сравнению с 1940 годом вырос в 11 раз.

Производство светотехнической продукции и установочных изделий также значительно развилось, но требует дальнейшего расширения как производства, так и номенклатуры.

\* \* \*

За прошедшие 40 лет коренным образом изменились внешний облик, конструктивные черты и технология производства электротехнических изделий. Существенную роль в этом играло применение новых материалов и новых технологических процессов, а также огромное внимание, оказываемое государством развитию рационализаторского движения и изобретательства.

На электротехнических заводах решающими стали сварная конструкция и электросварочная технология. Бес чугунного и стального литья в настоящее время составляет не более 20% от веса всего черного металла, применяемого в конструкциях (исключая динамосталь). Значительно расширилось применение штамповки, вытяжки деталей в комбинации с гибкой из листа и с контактной сваркой. Применение деталей и узлов из прессованных пластических масс стало массовым. Прессованная деталь из пластмасс практически не требует механической обработки перед передачей на сборку, в нее может быть легко запрессованы металлические детали, она имеет хороший внешний вид. Аналогично этому литье под давлением большого количества деталей значительно упростило технологию производства, уменьшило механическую обработку, значительно снизило себестоимость и улучшило качество изделий. Применение металлокерамики в аппаратах значительно подняло их технический уровень. Освоение

электротехнической промышленностью технологии порошковой металлургии облегчило создание установочных автоматов и др.

Начавшееся применение металлокерамических магнитов также революционизирует производство электроизмерительных приборов и других электроаппаратов.

Изоляционные лаки и материалы, изоляционная технология стали неизвестны, и достижения в этой области за эти годы значительны. От протяжной обмотки с гильзовой изоляцией в пазу, требующей большого количества ручного труда, электротехническая промышленность перешла на более качественную и менее трудоемкую двухслойную обмотку из катушек, пропитанных изоляционным компаундом под давлением. Кремнийорганические лаки вместе со стекловолокнистой изоляцией проводов, разработанные советскими учеными, позволили повысить уровня допустимого нагрева обмоток машин и аппаратов и одновременно значительно удлинить срок их службы. Применение кремнийорганической изоляции в сочетании со стеклянным волокном в обмотках втулочных электродвигателей удлинило срок службы этих электродвигателей в 3,5 раза.

40 лет пройденного пути знаменуются большими достижениями во всех отраслях электротехнической промышленности. Проведенная реорганизация управления промышленностью еще больше развязывает инициативу творческих коллективов предприятий, позволит полнее использовать резервы производства и быстрее устранять недостатки. Имеется много примеров, подтверждающих это. Электротехническая промышленность на базе новой техники обеспечит дальнейшую успешную электрификацию страны и повышение технического уровня всех технологических процессов в народном хозяйстве.

[14. 8. 1957]



## Развитие электропривода за 40 лет Советской власти

**Инж. Н. А. ТИЩЕНКО**

**ЦКБ „Электропривод“**

**инж. В. С. ТУЛИН**

**Госплан СССР**

Гениальное предвидение В. И. Ленина: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» все более становится объективным экономическим законом, определяющим развитие народного хозяйства нашей страны. Уже первый хозяйственный план Советской власти — план ГОЭЛРО — был не только планом строительства центральных электрических станций, но также планом электрификации производства.

С той поры внедрение электрохимии, электротермии, электросварки и в особенности электропривода все в более значительной степени опреде-

ляет масштабы и скорости технологических процессов в нашем хозяйстве, их технический уровень, соответствующую ему производительность общественного труда и в конечном счете характеризует успехи нашей страны в решении главной экономической задачи, поставленной XX съездом КПСС: «Догнать и перегнать наиболее развитые капиталистические страны по производству продукции на душу населения».

Новые открытия физики — расщепление атома и использование ядерной энергии — не только не отменяют, но усиливают роль электрификации в техническом прогрессе. Великим итогом социа-

листического строительства в нашей стране являются достигнутый высокий абсолютный и относительный уровень и высокие темпы роста потребления электроэнергии. К 40-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции годовое потребление электроэнергии более чем в 100 раз превысило ее потребление в России в 1913 г. и составляет свыше 1 000 квт·ч на душу населения. Наиболее значительная часть этой энергии потребляется электроприводом.

Современный развитый электропривод состоит из системы электродвигателей, использующих электрическую энергию, генерируемую централизованно, автономно или запасенную в аккумуляторах; из системы передаточных механизмов, соединяющих электродвигатели с исполнительными органами машин, и из системы электрических средств управления, защиты и автоматизации, действующих на электропривод и на технологию производственного процесса.

Таким образом, современный электропривод включает в себя две из трех частей, совокупность которых образует современное машинное устройство, причем является в этом устройстве не только источником силы, но и средством обеспечения наиболее целесообразного использования этой силы. Последнее обстоятельство получит еще более важное значение, когда в состав средств автоматизации электропривода широко войдут счетно-решающие устройства.

Развитие электропривода в значительной мере определяет направление и темпы технического совершенствования современных машинных устройств и технологий.

Для предыдущего развития отечественной энергетики был характерен дефицит производства электроэнергии, который ограничивал ее потребление. Директивы XX съезда КПСС предусматривают опережающее развитие электроэнергетики. В некоторых энергетических районах нашей страны электроэнергия уже перестала быть дефицитной, в других такое положение наступит в ближайшее время. Поэтому в настоящее время особое внимание должно быть обращено на технические преимущества и возможности применения электропривода в тех отраслях народного хозяйства, электрификация которых несколько запоздала: на сухопутном и водном транспорте, в сельском, коммунальном хозяйстве и в быту.

**Развитие теории и практики электропривода.** В дореволюционной России промышленное производство элементов электропривода — электромашин и аппаратов — началось на заводах — дочерних предприятиях немецких и американских фирм, организованных в начале XX столетия. Заводы перед первой мировой войной по чертежам иностранных фирм изготавливали электродвигатели постоянного и переменного тока мощностью до 2 500 квт, пусковые реостаты и регуляторы скольжения, металлические сопротивления, электрооборудование для трамваев и пр. Наиболее ответственные и сложные изделия, узлы и детали электрооборудования доставлялись из-за границы. Электрические заводы России не имели

самостоятельного технического лица. При их помощи фирмы приспосабливались к действовавшей тогда в России системе пошлин на ввозимое из-за границы оборудование, изготавливая наиболее тяжелые и облагаемые пошлиной детали в пределах России.

Великая Октябрьская социалистическая революция покончила с полуколониальным положением русской промышленности и создала все предпосылки для превращения нашей Родины в могучую индустриальную державу.

В восстановительный период (до 1927 г.) советская электротехническая промышленность восстановила производство всей довоенной номенклатуры изделий и постепенно освоила ряд новых изделий.

Однако подлинный подъем нашей электропромышленности и превращение ее в современную техническую базу, способную решать все задачи электрификации страны и электросиловой автоматизации производства, начался с 1930 г., когда были поставлены новые задачи оснащения новостроек предвоенных пятилеток современным электрооборудованием, и на заводах сконцентрировались значительные силы специалистов, преданных Советской власти.

Особое значение в предвоенные 30-е годы имели работы ХЭМЗ в области электроаппаратостроения и комплектного электропривода, завода «Динамо» им. Кирова в области тягового и кранового электропривода и завода «Электросила» им. Кирова в области электромашиностроения. Представление о темпах и характере количественного развития электропривода в послевоенные годы дает табл. 1.

Развитие электропривода в целом характеризуется как развитием электрических преобразователей и двигателей, передаточных механизмов и средств автоматизации, так и отраслевого комплектного электропривода.

**Развитие электродвигателей** шло в следующих основных направлениях:

1. Создание новых единых универсальных серий двигателей общего применения постоянного и переменного тока мощностью от нескольких ватт до 1 Мвт, отличающихся более высокими эксплуатационной надежностью и энергетическими показателями: коэффициентами мощности и полезного действия. Общей тенденцией в послевоенные годы было значительное увеличение потребления более надежных в эксплуатации закрытых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Эти серии двигателей разработаны заводом «Электросила» и др.

2. Создание единых специализированных серий двигателей: краново-металлургических постоянного и переменного тока, рольганговых и др., отличающихся более высокими эксплуатационной надежностью и более высокими динамическими показателями — большим отношением врачающего момента двигателя к маховому моменту ( заводы «Динамо» и «Сибэлектромотор»).

3. Создание единых специализированных серий взрывозащищенных двигателей переменного

Таблица 1

## Рост производства электродвигателей, электровозов и магнитных станций в послевоенные годы

Электрооборудование	1940 г.	1950 г.	1955 г.	1956 г.	Первое полугодие 1957 г.
Электродвигатели от 0,6 до 100 квт:					
тыс. шт. . . . .	259,5	791,7	1 532	1 714	1 000
% . . . . .	100	305	585	660	
Крупные индивидуальные электромашины <sup>1</sup> :					
шт. . . . .	319	1 383	3 535	4 229	2 500
% . . . . .	100	437	1 110	1 340	
Электровозы магистральные:					
шт. . . . .	9	102	194	216	133
% . . . . .	100	1 134	2 160	2 400	
Электрооборудование для теплоэлектрозвозов:					
компл. . . . .	—	131	136	161	150
% . . . . .	—	100	107	123	
Магнитные станции:					
шт. . . . .	4 672	14 152	28 835	38 970	
% . . . . .	100	303	607	834	

<sup>1</sup> 90% крупных индивидуальных электромашин составляют электромашины, применяемые в электроприводе.

тока для всех групп и категорий взрывоопасных сред, более надежных в эксплуатации и с более высокими энергетическими показателями ( завод «Кузбассэлектромотор» и ХЭМЗ).

4. Создание специализированных серий двигателей переменного и постоянного тока для текстильной промышленности, судостроения и других отраслей народного хозяйства. Двигатели в наибольшей мере соответствуют специфическим особенностям эксплуатации (круглогодичной работе), отличаются меньшим весом, высоко надежны (ХЭМЗ и др.).

5. Создание индивидуальных конструкций двигателей, специально предназначенных для различных машинных устройств: врубовых машин, металорежущих станков, механизмов прокатных станов и доменных печей, экскаваторов, кранов, тельферов, насосов и пр.

В послевоенные годы заводами электротехнической промышленности были разработаны и освоены десятки тысяч крупных, средних и мелких индивидуальных конструкций электродвигателей постоянного и переменного тока. Общей тенденцией при разработке индивидуальных двигателей было увеличение их мощности по сравнению с мощностью ранее применявшимся двигателей, изменение конструкции для более органического сращивания двигателей и исполнительных органов рабочих машин, уменьшение веса и размеров, увеличение теплостойкости и качества электрической изоляции.

6. Создание модификаций универсальных и специализированных серий двигателей и двигателей индивидуального исполнения, способных работать на кораблях во влажной окружающей среде и при повышенной температуре, а также двигателей в специальном тропическом исполнении. Эти работы составляли значительный объем работы научно-исследовательских организаций и заводов электротехнической промышленности, особенно в последние годы.

Машинные устройства и агрегаты, работающие в Советском Союзе (прокатные станы, доменные печи, врубовые машины, станки, экскаваторы, прессы и др) при равных паспортных данных оказываются более производительными, чем аналогичные машины, работающие в капиталистических странах. Поэтому во многих случаях оказалось необходимым создать уникальные двигатели, не известные за границей. Показательны в этом отношении реверсивные прокатные двигатели постоянного тока для блюмингов. В США максимальная мощность таких двигателей в одноякорном исполнении не превышает 8 000 л. с. В Советском Союзе в 1957 г. изготовлен реверсивный прокатный двигатель постоянного тока в одноякорном исполнении мощностью 10 000 л. с. (ХЭМЗ) и разрабатывается двигатель мощностью 12 000 л. с. ( завод «Электросила»).

Технический уровень электродвигателестроения в СССР в целом высок и в ряде случаев превышает заграничный, хотя некоторые серии и конструкции двигателей явно устарели. Главной задачей дальнейшего совершенствования конструкций двигателей является повышение их эксплуатационной надежности, которая должна быть значительно выше, чем надежность двигателей, изготавливаемых капиталистическими электротехническими фирмами. Высокое использование машин во многих отраслях народного хозяйства, достигнутое в СССР, значительно превосходящее использование их в капиталистических странах, высокие коэффициенты сменности и количество часов использования агрегатов в СССР, поточный характер производства — все это требует от двигателей особой надежности в работе.

Остановки в производстве при повреждениях двигателей настолько убыточны, что практически значительные любые затраты на улучшение качества и повышение надежности работы двигателей в СССР оказываются оправданными.

В развитии электросиловых преобразователей в Советском Союзе в послевоенные годы можно

отметить два этапа: широкое внедрение системы генератор — двигатель и начавшееся в последние годы внедрение управляемых ртутных выпрямителей, заменяющих врачающиеся электромашинные преобразовательные агрегаты.

В отличие от заграничной практики в Советском Союзе машикоевые преобразовательные агрегаты с асинхронным двигателем в настоящее время не применяются. Вместо них применяются более экономичные преобразовательные агрегаты с приводным синхронным двигателем.

До последнего времени в Советском Союзе ртутные выпрямители с управляющими сетками широко применялись для питания и управления нереверсивными двигателями постоянного тока мощностью от 500 квт и выше.

Примерно такое же применение в электроприводе находят управляемые ртутные выпрямители в США. Однако в Германии управляемые ртутные выпрямители применяются значительно шире: для питания и управления двигателями постоянного тока мощностью от 100 квт и выше, в том числе и для реверсивных электроприводов с рекуперацией энергии.

Область применения управляемых ртутных выпрямителей в электроприводе в США определяется рентабельностью. Два комплекта ртутных выпрямителей, необходимые для осуществления надежной реверсивной работы электропривода с рекуперацией энергии, стоят в США дороже, чем один электромашинный врачающийся преобразовательный агрегат.

В СССР стоимость двух комплектов ртутных выпрямителей также была в ряде случаев выше, чем стоимость одного врачающегося электромашинного агрегата. Однако это не должно служить препятствием для широкого внедрения в СССР управляемых ртутных выпрямителей для реверсивных электроприводов.

Преимущества ртутных выпрямителей по сравнению с системой генератор — двигатель общеизвестны. Важнейшим из них является большая надежность при эксплуатации. Для снижения себестоимости ртутных выпрямителей необходимо расширить их производство и одновременно значительно усовершенствовать ртутные выпрямительные агрегаты. Необходимо шире применять схемы включения трансформаторов, обеспечивающие снижение установленной мощности и стоимости их, разработать и освоить в производстве запаянные одноанодные ртутные выпрямители с высокой перегрузочной способностью (до 4 ... 5-кратной номинального тока), сократить и упростить аппаратуру и принадлежности ртутных выпрямителей и уменьшить в них вес меди, который еще сравнительно велик. Все эти задачи должны быть решены одновременно с расширением производства запаянных металлических ртутных выпрямителей.

Развитие передаточных механизмов машинных устройств идет по следующим направлениям:

1. Электрификация передаточных механизмов. Применение синхронного электрического вала,

следящих систем электропривода, упрощающих и заменяющих механические передачи, электромагнитных муфт сцепления и регулирования развивается еще медленно и не соответствует современным возможностям электротехники.

Некоторое развитие электрификация передаточных механизмов получила в станкостроении и на металлургических прокатных станах. Высоко электрифицированы передаточные механизмы уникального токарного станка модели 1683 с высотой центров 2 м и расстоянием между центрами около 16 м, предназначенного для обработки деталей весом до 200 т. Электрическая система подачи суппортов упростила кинематику станка и исключила ходовые валы, длина которых составила бы около 30 ... 35 м. Применяются электромагнитные муфты на копировальных станках.

В конструкциях механизмов прокатных станов применяются синхронный вал и электрические муфты сцепления. В электрификации передаточных механизмов скрыты широкие возможности усовершенствования машинных устройств и автоматизации их работы, поэтому направлению развития передаточных механизмов необходимо уделять большое внимание.

2. Органическое сращивание двигателей и исполнительных органов рабочих машин является наиболее последовательным, длительно и широко осуществляемым направлением развития передаточных механизмов. Оно осуществляется путем создания и внедрения одиночного, индивидуального и безредукторного приводов и встройки двигателей непосредственно в исполнительные органы рабочей машины.

Наиболее характерными примерами развития в этом направлении передаточных механизмов являются безредукторный и малоредукторный электроприводы мощных вскрышных экскаваторов Ново-Краматорского машиностроительного завода с емкостью ковша 15 и 30 м<sup>3</sup>, с номинальной мощностью двигателей 1 и 2 Мвт, безредукторный главный электропривод новой комплексной дизель-электрической буровой установки Уралмашзавода им. Орджоникидзе типа 11ДЭ с номинальной мощностью двигателя 720 квт, безредукторный электропривод шахтных подъемных машин с номинальной мощностью двигателей до 4 Мвт, безредукторный электропривод манипуляторов блюмингов с номинальной мощностью двигателей 300 ... 500 квт, индивидуальный электропривод валков блюмингов 1000 реверсивных, непрерывных и дрессировочных холоднокатанных станов и др.

Крупнейшим шагом вперед в органическом сращивании двигателей и исполнительных органов рабочих машин явилось бы создание достаточно эффективного и надежного электродвигателя поступательно-возвратного движения. Появление новых изоляционных материалов с высокой теплостойкостью, новых электротехнических сталь с высокой магнитной проводимостью и развитие средств автоматизации позволяют считать, что в настоящее время эта задача могла бы быть более успешно решена, чем ранее.

3. Важное значение для развития передаточных механизмов и всего машинного устройства в целом имеет развитие теории выбора двигателей и передаточного числа редукторов для механизмов повторно-кратковременного режима работы. Разработкой этого важного раздела теории электропривода в настоящее время занято несколько кафедр электропривода и организаций, специализированных в области электропривода.

В своем развитии теория выбора двигателя и передаточного числа редуктора для механизмов повторно-кратковременного режима работы прошла несколько этапов. Вначале разрабатывались вопросы выбора оптимального передаточного числа редуктора для выбранного электродвигателя. Затем стали рассматриваться вопросы выбора наивыгоднейшего электропривода: оптимального передаточного числа редуктора при наиболее подходящем двигателе.

В настоящее время работы ведутся также в направлении разработки вопросов выбора наивыгоднейшего электропривода при наивыгоднейшем, но не математически оптимальном передаточном числе редуктора и наивыгоднейшем двигателе, который может быть создан при современном состоянии техники электромашиностроения.

Разработка теории выбора наивыгоднейшего электропривода для механизмов повторно-кратковременного режима работы имеет важное значение для сокращения периодов пуска, остановки и увеличения производительности машинных устройств; увеличения надежности работы машинного устройства при уменьшении в электроприводе запасенной кинематической энергии и уменьшения первоначальной стоимости электропривода и машинного устройства в целом. Развитие этого раздела теории электропривода в последние годы продвинуло применение безредукторного привода для ряда новых машин.

Развитие систем автоматического управления и средств автоматизации взаимосвязаны. Всякий разрыв в конструировании средств автоматизации для электроприводов и систем автоматического управления ведет к замедлению развития и систем автоматического управления и средств автоматизации, а также к снижению их качественных показателей. Так, например, если контакторы конструируются без учета требований, которые предъявляет к ним современный электропривод, то качество и контакторов и систем управления окажется сниженным.

Развитие систем управления и средств автоматизации связано и с развитием электрических преобразователей, двигателей и передаточных механизмов. Так, например, развитие электромашинной автоматики явилось следствием применения и развития системы генератор—двигатель, а развитие управляемых ртутных выпрямителей потребовало развития нового вида автоматики, основанной на магнитных усилителях. Значительно взаимодействие систем управления, средств автоматизации и технологий производственного процесса. Система управления блюмингом разработана с полным учетом особенностей технологии

прокатки слитков на блюминге. Вместе с тем режимы прокатки слитков контролируются и определяются системой управления и средствами автоматизации. Технология прокатки слитков на блюминге с автоматизированной системой управления отличается от технологии прокатки слитка на неавтоматизированном блюминге.

Развитие средств автоматизации электропривода прошло несколько этапов, каждый из которых характеризуется преимущественным развитием какого-либо определенного вида средств автоматики.

В дореволюционной России преимущественно применялась электрическая аппаратура ручного управления, хотя в некоторых случаях находила применение и релейно-контакторная автоматика, импортированная в Россию из США (вращающиеся распределители доменных печей), а также из Германии и Японии (крупные металлорежущие станки). Наиболее распространенным видами автоматически действующих аппаратов, применяемых в электроприводе, в то время были плавкие предохранители и универсальные автоматические выключатели, применявшиеся для защиты двигателей от перегрузок.

В первое десятилетие после Великой Отечественной войны наряду с расширявшимся применением релейно-контакторной автоматики широкое применение получила электромашинная автоматика. В 1956 г. в СССР было изготовлено около 30 тыс. электромашинных усилителей мощностью от 0,3 квт и выше.

Значение релейно-контакторной автоматики в оснащении народного хозяйства СССР современным автоматизированным электроприводом можно представить по количественному росту производства магнитных станций, которое в 1956 г. достигло 38 970 шт., что в 8,34 раза превысило уровень производства их в 1940 г.

В настоящее время большое значение получает магнитная автоматика, основанная на применении в системах управления магнитных усилителей и дросселей насыщения.

Наряду с наиболее массовыми средствами автоматизации в системах электропривода широкое применение находят электроника (электронные лампы, фотоэлементы), полупроводники и др.

Релейно-контакторная автоматика продолжает оставаться основным средством автоматизации промышленности. Это положение она сохранит во всяком случае на протяжении ближайшего десятилетия. Несмотря на то, что выпуск релейно-контакторной аппаратуры за последние годы резко возрос, существующий уровень производства ее недостаточен и не обеспечивает быстро растущих потребностей народного хозяйства.

Широкое развитие автоматики потребовало создания бесконтактных аппаратов, датчиков положения исполнительных органов рабочих машин и обрабатываемых предметов.

В настоящее время находят применение электромагнитные и индуктивные датчики для бесконтактного контроля положения предмета, обладающего ферромагнитными свойствами; индуктивно-механические датчики для контроля пред-

мета, не обладающего ферромагнитными свойствами; несколько типов фотоэлектрических датчиков для контроля положения светящихся и нагретых предметов.

Важным новым направлением развития электрических средств автоматизации являются фотодатчики с вращающимся лучом для слежения за линией чертежа, кромкой свариваемого предмета, а также для измерения неэлектрических величин, с возможностью использования результатов измерения для автоматизации производственного процесса.

Применение счетно-решающих устройств для управления машинными устройствами будет осуществляться путем освоения счетно-решающей техники в современном электроприводе, через посредство которого счетно-решающие устройства будут воздействовать на технологию производственного процесса.

В связи с большой сложностью установления математических соотношений, характеризующих многие современные технологические процессы, перспективным является применение таких запоминающих устройств, которые будут задавать автоматизированным системам механизмов предварительно записанную программу работы.

Запись программ будет производиться во время ручного управления механизмами наиболее квалифицированными рабочими-операторами, в наибольшей мере освоившими ручное управление и обеспечивающими наибольшую производительность агрегатов.

**Развитие отраслевого электропривода. Система загрузки доменной печи.** Современная полностью автоматизированная система загрузки доменной печи с многодвигательным приводом была впервые разработана и изготовлена в СССР в 1932 г. для загрузочной системы со скрапами емкостью 5,5  $m^3$  и обеспечивала загрузку доменных печей производительностью до 1 тыс. т чугуна в сутки. Последовательное развитие электроприводов и системы комплектной автоматики наряду с развитием механизмов системы загрузки увеличило производительность загрузочной системы в настоящее время до 3 тыс. т чугуна в сутки.

При этом емкость скрапов возросла до 10  $m^3$ , а электрооборудованность загрузочной системы выше чем в 2,5 раза. Количество автоматических функций загрузочной системы возросло выше чем в 10 раз. Проектируется загрузочная система для домен с полезным объемом 2 тыс.  $m^3$ , производительностью 4 тыс. т чугуна в сутки.

**Электропривод реверсивных горячепрокатных станов.** Первый комплектный главный электропривод блюминга мощностью 3 400 л. с. был изготовлен в России в 1913 г. Рижским заводом немецкой фирмы АЕГ и в 1927—1928 гг. введен в действие на блюминге 1100 завода им. Петровского в Днепропетровске. Электропривод имел электромашинную систему ручного управления.

В 1931 г. завод «Электросила» изготовил главный электропривод блюминга мощностью 7 тыс. л. с., ХЭМЗ для этого привода изготовил релейно-контакторную систему автоматизирован-

ного ручного управления. Проектная производительность блюминга была 1 млн. т слитков в год.

В 1936 г. на блюминге 1150 Макеевского металлургического завода им. Кирова была испытана система автоматического управления.

В 1936 г. был введен в действие слябинг 1150 завода «Запорожсталь» им. Орджоникидзе, первый в Советском Союзе главный электропривод реверсивного горячепрокатного стана с индивидуальным приводом валков.

В 1949 г. была разработана и введена в действие система электромашинного управления главным приводом на блюмингах 950 завода им. Дзержинского и 1150 Новотагильского металлургического завода.

В 1954 г. на заводе им. Ворошилова был введен в действие типовой блюминг 1150, изготовленный Уралмашзаводом. Проектная производительность блюминга установлена 3 млн. т слитков в год. Главный привод этого блюминга имеет мощность 9 тыс. л. с., с индивидуальным приводом каждого валка. Основные механизмы управляются по системе генератор—двигатель с электромашинной автоматикой. Предусмотрена комплексная автоматизация всего производственного процесса. Установленная мощность двигателей главного и основных механизмов блюминга возросла по сравнению с довоенными блюмингами более чем в 1,5 раза.

В 1953 г. были модернизированы основные электроприводы блюминга 1100 Кузнецкого металлургического комбината. В 1954 г. была введена в действие система комплексной автоматики блюминга, которая в течение 1955—1956 гг. автоматически прокатала свыше 2 млн. т слитков. В 1957 г. на этом блюминге производится модернизация главного привода и манипуляторов. Вместо двигателя мощностью 7 тыс. л. с. устанавливается одноякорный главный прокатный двигатель мощностью 10 000 л. с., изготавливаемый ХЭМЗ, и безредукторный двигатель линеек манипуляторов, изготавливаемый заводом «Электросила» им. Кирова. В результате модернизации этого блюминга установленная мощность двигателей главного и основных механизмов возрастет примерно до 18 Мвт, т. е. в 1,8 раза.

В 1955 г. на Магнитогорском металлургическом комбинате модернизирован блюминг № 3, для чего в рабочей линии была установлена дополнительная клеть. В результате модернизации электрооборуженность блюминга возросла выше чем в 2 раза.

В 1956 г. на Аньшанском металлургическом комбинате был введен в действие изготовленный в СССР блюминг 1150, мощность главного привода которого увеличена до 12 500 л. с. Преобразовательный агрегат приводится во вращение синхронным двигателем мощностью 14 Мвт. Общая электрооборуженность этого блюминга примерно в 3 раза выше, чем электрооборуженность блюмингов, изготавливавшихся в СССР до войны.

Производительность блюмингов в СССР, основанная на росте их электрооборуженности, возросла от 1 млн. т в год в 1936 г. до 3,5...4 млн. т в 1957 г.

**Электропривод непрерывных горячепрокатных станов.** Производительность сортовых и листовых прокатных станов в России в 1913 г. не превышала 35 тыс. т в год. Привод большинства этих станов осуществлялся от паровых машин. Первый непрерывный горячепрокатный стан был введен в действие в Советском Союзе в 1934 г. Питание электродвигателей непрерывных горячепрокатных станов осуществлялось до войны от врачающихся преобразовательных установок. Установленная мощность двигателей главных электроприводов непрерывных горячепрокатных станов в настоящее время превзошла 40 Мвт. Скорость прокатки горячей полосы за последние 20 лет возросла с 8 до 12 м/сек, а сортовых и проволочных до 30 м/сек. Нереверсивные прокатные двигатели, изготавливаемые в Советском Союзе, имеют производение мощности (в киловаттах) на максимальную скорость (в об/мин) и на кратность регулирования, доходящее до  $3,8 \cdot 10^6$ . Питание двигателей осуществляется от управляемых ртутных выпрямителей. Производительность непрерывных листовых горячепрокатных станов достигла 2 млн. т в год.

Суммарная мощность ионных электроприводов, установленных на нереверсивных и непрерывных прокатных станах, достигла 120 Мвт.

**Электропривод холоднопрокатных станов.** Первые непрерывные и реверсивные холоднопрокатные полосовые станы были введены в действие в СССР в 1937 г. на заводе «Запорожсталь» им. Орджоникидзе.

Установленная мощность двигателей на трехклетьевом непрерывном холоднопрокатном стане этого завода составляла 3 750 квт при скорости прокатки около 3 м/сек. В 1956 г. введен в действие непрерывный пятиклетьевой холоднопрокатный стан цеха жести Магнитогорского металлургического комбината. Установленная мощность двигателей на этом стане равна 16,6 Мвт, а скорость прокатки 22,5 м/сек. Соответственно возросла и производительность холоднопрокатных станов. Проектируется непрерывный холоднопрокатный стан со скоростью прокатки 35 м/сек с суммарной мощностью двигателей около 35 Мвт.

Таким образом, электовооруженность непрерывных холоднопрокатных станов за последние 20 лет возросла в 4,5 ... 9 раз.

Скорости прокатки на реверсивных холоднопрокатных станах возросли в 2,5 ... 3 раза, а мощности двигателей главного привода в 2 ... 2,5 раза.

**Электропривод рудничных подъемных машин.** До Великой Октябрьской социалистической революции средняя глубина шахт Донбасса составляла 250 м, глубокими считались шахты 400 м, самой глубокой была шахта 700 м. Средняя грузоподъемность составляла 4 ... 5 т; средняя производительность шахт была около 150 тыс. т и максимальная 500 тыс. т угля в год. Только две подъемные машины имели электропривод.

Первая отечественная подъемная машина была установлена на шахте им. Орджоникидзе треста «Макеевуголь». Мощность электропривода была 700 квт.

В настоящее время глубина подъема достигает 1 200 м, скорость подъема доходит до 16 м/сек, грузоподъемность до 25 т, мощность электропривода до 4 Мвт. При мощности до 1 Мвт обычно применяется асинхронный электропривод, при большей мощности — электропривод постоянного тока, причем обычно безредукторный. Для преобразования переменного тока в постоянный обычно применяются электромашинные преобразователи. Однако на шахте «Саксагань» треста «Дзержинскруд» Криворожского рудного бассейна вводится в действие мощная подъемная машина с безредукторным электроприводом мощностью 3 800 квт с ионным преобразователем. Грузовые подъемные установки проектируются с полностью автоматическим управлением, людские — с дистанционным автоматизированным управлением.

**Электропривод одноковшовых экскаваторов и драглайнов.** До войны в серийном производстве был освоен лишь один электрический экскаватор типа СЭЗ, с ковшом емкостью 3 м<sup>3</sup>. В настоящее время в Советском Союзе изготавливаются все виды электрических и дизель-электрических одноковшовых экскаваторов с емкостью ковша от 0,5 до 20 м<sup>3</sup>.

Емкость ковша одноковшовых экскаваторов доходит до 15 м<sup>3</sup>, а емкость драглайнов — до 20 м<sup>3</sup>. Длина стрелы драглайнов доходит до 75 м. Проектируются электрический драглайн с емкостью ковша 25 м<sup>3</sup> и длиной стрелы 100 м и экскаватор с емкостью ковша 30 м<sup>3</sup>. Суммарная мощность электромашин, устанавливаемых на наиболее мощных изготавливаемых драглайнах, составляет 7 Мвт. На проектируемом сверхмощном драглайне она вдвое больше.

На изготавливаемых в настоящее время экскаваторах и драглайнах средней и большой производительности применяется электропривод постоянного тока по системе генератор—двигатель. Значительное распространение в системах управления экскаваторами и драглайнами получили электромашинные и магнитные усилители. Продолжительность цикла драглайнов большой производительности при повороте на 130° составляет 55 сек, а достигнутая годовая производительность драглайна с ковшом емкостью 14 м<sup>3</sup> составляет 4,5 млн. м<sup>3</sup>.

**Электропривод бумагоделательных, полиграфических, текстильных и кабельных машин.** Многодвигательный широко регулируемый электропривод бумагоделательных и полиграфических машин изготавливается суммарной мощностью около 1 Мвт. Ширина изготавляемой бумаги доходит до 5,5 м, а скорость — до 10 м/сек. Скорость полиграфических машин доходит до 10 м/сек, а скорость продольно-резательных станков — до 15 м/сек, причем во всех случаях поддерживается с точностью не менее 0,2%. Наименьшая толщина изготавливаемых бумаг 0,005 мм. Обычно применяется электропривод постоянного тока, однако опытная ротационная машина изготавливается также с широко регулируемым электроприводом переменного тока. Регулируемый электропривод переменного тока изготавливается для текстильных,

а также для кабельных машин. В последнем случае наибольшая скорость работы составляет около 4 м/сек и регулируется в диапазоне 1 : 60.

**Электропривод лифтов.** Грузоподъемность пассажирских лифтов доходит до 1 500 кг, а скорость — до 3,5 м/сек (для подъема на телевизионную антенну проектируется лифт со скоростью 5 м/сек), количество пассажирских лифтов в одной группе доходит до шести, количество групп в одном блоке здания — до трех, а общее количество лифтов в одном здании иногда превышает 100. Электропривод постоянного тока, безредукторный. Системы управления предусматривают регистрацию всех приказов и вызовов и их выполнение в автоматически устанавливающейся последовательности, обеспечивающей наименьшее среднее время ожидания обслуживания.

**Современное состояние развития электропривода. Электропривод — силовая основа механизации производства.** Электропривод является силовой основой механизации производства вследствие многочисленности его преимуществ перед другими видами приводов. Изготавляемые в настоящее время электродвигатели практически способны работать в любых условиях окружающей среды: в странах с умеренным, холодным и тропическим климатом, во взрывоопасной и химически активной среде, в заполненной водой скважине на глубине нескольких километров под землей и на высоте десятков и сотен километров над землей.

Электродвигатель может получить конструктивную форму, наиболее соответствующую условиям его применения. Примером может служить серия двигателей мощностью от 10 до 50 квт, изготавляемых ХЭМЗ для привода насосов, погруженных в скважину. Двигатель мощностью 35 квт из этой серии имеет форму цилиндра диаметром 123 мм и длиной 5,5 м.

Практически беспредельными являются возможности как сосредоточения мощности в одном двигателе, так и дробления ее между многими двигателями. Созданная за 40 лет Советской власти электротехническая промышленность способна изготавливать электромашины в диапазоне мощностей от одной стотысячной доли киловатта до ста тысяч и более киловатт, т. е. в диапазоне  $10^{-5} \dots 10^5$  квт.

Еще Маркс указал, что одним из наиболее важных факторов во всех отраслях индустрии является непрерывность производства. Непрерывность производства достигается разделением производственного процесса между отдельными машинами и обеспечением необходимой согласованной работы этих машин.

Согласование работы отдельных звеньев непрерывного технологического цикла означает необходимость включения и отключения, изменения скорости и направления вращения машин и их частей. Наиболее совершенным образом эти задачи выполняют двигатели с их высокой управляемостью.

Было время, когда все механизмы листопрокатного стана приводились в действие одной паровой машиной. Современный непрерывный комплексно электрифицированный и механизированный

листопрокатный стан имеет около 2 тыс. электродвигателей, общая мощность которых вместе с мощностью электрических преобразователей, необходимых для управления двигателями, составляет около 80 Мвт. Уже до Великой Отечественной войны мощность электрических машин, установленных в цехе блюминга, составляла около 20 Мвт. В настоящее время эта мощность достигла 60 Мвт. Общий вес электрооборудования современного горячепрокатного стана достиг 2 500 т, а его стоимость для некоторых прокатных станов приблизилась к стоимости механической части стана.

Появление и развитие одиночного, индивидуального многодвигательного и безредукторного электроприводов позволили резко упростить передаточные механизмы машинных устройств и органически слить двигатели непосредственно с исполнительными органами рабочих машин. Если рассмотреть, как происходило за последние десятилетия развитие блюмингов, непрерывных, горячепрокатных и холоднопрокатных станов, шахтных подъемных машин, экскаваторов, бумагоделательных и полиграфических машин, металлообрабатывающих станков и других машин и механизмов, то можно установить, что определяющим направление этого развития было развитие электропривода.

В 1913 г. коэффициент электрификации промышленности (отношение мощности электродвигателей, применяемых в промышленности, к мощности всех видов двигателей) составлял около 40%. В настоящее время этот коэффициент близок к 100%, что и определило достигнутый уровень механизации промышленности.

В некоторых отраслях народного хозяйства механизация развивалась на основе механического привода. К таким отраслям относятся прежде всего транспорт и сельское хозяйство. Однако технические преимущества электропривода привели к тому, что и в этих отраслях электропривод начинает занимать присущее ему место.

Значительно продвинулась вперед электрификация транспорта. Основу для нее создает развитие производства специального транспортного электрооборудования. Рост производства этого электрооборудования показан в табл. 2.

Таблица 2

Транспортные машины	Количество комплектов электрооборудования			
	1940 г.	1950 г.	1955 г.	1960 г. (план)
Магистральные электровозы .	9	102	194	550
Вагоны для метрополитенов .	2	63	46	95
Мотор-вагонные секции для пригородных поездов .	92	89	95	130
Троллейбусы . . . . .	92	430	600	700
Трамвайные электродвигатели . . . . .	620	1 799	1 579	2 300

Данные этой таблицы показывают, что в текущем пятилетии в нашей стране будут созданы предпосылки для широкого развития электрификации и на транспорте. Еще более ярко об этом

Таблица 3

	СССР					США	Англия	ФРГ	Франция
	1940 г.	1950 г.	1955 г.	1956 г.	1960 г.				
Протяженность электрифицированных железных дорог, тыс. км . .	1,9	3,0	5,5	6,325	13,5	4,9	1,5	1,9	4,4

говорит табл. 3, в которой проведена протяженность электрифицированных железных дорог в СССР и наиболее развитых в промышленном отношении капиталистических странах.

Недостаточное применение электропривода в сельском хозяйстве не должно рассматриваться как признак его недостаточной универсальности. Есть все основания полагать, что следующие пятилетия будут пятилетиями глубокой электрификации и сельского хозяйства.

**Электропривод — техническая основа автоматизации механизированного производства.** Электропривод является технической основой автоматизации механизированного производства вследствие органически присущего ему свойства высокой управляемости. Даже так называемые естественные рабочие характеристики электроприводов во многих случаях дают возможность применить электропривод с такой зависимостью скорости от нагрузки, которая наиболее близко соответствует требованиям технологии производственного процесса. Еще большие возможности в этом отношении дают так называемые искусственные характеристики. Значительная часть разновидностей электродвигателей допускает широкое, плавное и экономичное регулирование скорости. В частности, двигатели постоянного тока допускают регулирование скорости в диапазоне 1 : 1 000. Даже обычный асинхронный двигатель, при пренебрежении потерями электроэнергии, при помощи дросселей насыщения допускает регулирование 1 : 60 и более.

Электродвигатели всех типов допускают быстрый пуск и реверс. Современные мощные одноякорные двигатели постоянного тока, развивая максимальную мощность до 25 Мвт и имея вес якоря до 75 т, способны реверсироваться в диапазоне  $\pm 50$  об/мин менее чем за 0,5 сек. Практически неограниченным является допустимое число включений некоторых двигателей. Так, например, электропривод линеек манипуляторов блюминга включается свыше 2 500 раз в час, или около 20 млн. раз в год, а за период амортизации (25 лет) выдерживает около полумиллиарда включений. Главный электропривод блюминга за тот же период выдерживает около 100 млн. включений, сопровождающихся перегрузками, эквивалентными внезапному приложению врачающего момента, равного нескольким сотням тонн-метров.

Развитие двигателей, предназначенных для повторно-кратковременной работы, характеризуется непрерывным улучшением их динамических свойств, т. е. увеличением отношения максимального врачающего момента к маховому моменту

якоря. Вместе с улучшением динамических свойств двигателей постоянного тока растет мощность тех из них, которые допускают пуск при непосредственном подключении якоря к сети постоянного тока. Так, на кантователе манипуляторов блюминга завода «Азовсталь» работает двигатель постоянного тока мощностью 100 л. с., подключаемый непосредственно к сети постоянного тока 220 в. При этом время пуска его составляет около 0,25 сек.

Быстро действие и высокая управляемость дают возможность точно согласовать работу многих двигателей, совместно механизирующих непрерывный технологический процесс, и обеспечить его высокую скорость. Так, средствами электропривода в настоящее время достигнута скорость прокатки проволоки, составляющая 30... 40 м/сек, или почти 150 км/ч, и ставится задача доведения этой скорости до 60 м/сек. Скорость холодной прокатки полосовой стали средствами электропривода доведена до 35 м/сек, а скорость выработки бумаги — до 10 м/сек. Однако указанные выше скорости далеко не предельны. Усовершенствование технологических процессов и исполнительных органов рабочих машин, управляемое развитием и усовершенствованием электропривода, способно обеспечить дальнейший рост скоростей как указанных выше непрерывных технологических процессов, так и не упомянутых непрерывных процессов, а также тех производственных процессов, технология которых в настоящее время еще не имеет непрерывного характера.

Соотношение и взаимодействие факторов технического прогресса четко определено Директивами XX съезда КПСС: «Осуществить в широких масштабах мероприятия по повышению технического уровня производства во всех отраслях народного хозяйства на основе электрификации, комплексной механизации и автоматизации, внедрения новейшего высокопроизводительного оборудования и передовой технологии, широкой замены и модернизации оборудования». В этой директиве на первое место поставлена электрификация, на основе которой развивается комплексная механизация. Комплексная механизация имеет тем более завершенный характер, чем глубже внедрена электрификация, чем выше электрооруженность технологического процесса, чем глубже внедрен и усовершенствован электропривод. Комплексная автоматизация во многих отраслях производства становится возможной только после проведения комплексной механизации, которая, в свою очередь, возможна только на основе электрификации.

[24. 8. 1957]



# Электротехнические и конструктивные проблемы сооружения крупных циклических ускорителей

Ф. К. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, М. А. ГАШЕВ, Е. Г. КОМАР, И. Ф. МАЛЫШЕВ, Н. А. МОНОСЗОН,  
А. М. СТОЛОВ, Н. С. СТРЕЛЬЦОВ

**Общие сведения.** Изучение ядерных сил, установление законов взаимодействия ядерных частиц и структуры атомного ядра — важнейшие задачи современной науки. Их решение имеет не только теоретическое, но и огромное прикладное значение и, в частности, открывает доступ к практическим неограниченным энергетическим ресурсам атомов вещества.

За последние годы в Советском Союзе достигнут значительный прогресс в использовании атомной энергии. По существу создается новая отрасль техники — атомная техника, которая для человечества будет иметь большее значение, чем в свое время имело промышленное применение пара.

Одним из основных и наиболее эффективных средств исследования ядерных сил, а также структуры элементарных частиц и открытия новых частиц являются ускорители, при помощи которых могут быть получены частицы с энергией в миллионы и миллиарды электронвольт. Максимальная энергия протонов, полученная в ускорителе, составляет в настоящее время 10 Гэв (СССР).

Современный ускоритель представляет собой сложную установку, включающую источник заряженных частиц-ионов или электронов; вакуумный объем, в котором осуществляется ускорение; ускоряющую систему; систему, направляющую частицы по определенным траекториям, и др. В зависимости от методов ускорения ускорители можно разделить на ускорители с однократным ускорением, линейные резонансные ускорители и циклические ускорители. Наибольшие энергии достигнуты в настоящее время при помощи циклических ускорителей, представляющих собой установки, в которых частицы движутся по замкнутым или спиральным орбитам, совершая большое количество циклов ускорения. Это позволяет ограничить линейные размеры ускорителей и многократно использовать одни и те же ускоряющие промежутки. Направление частиц по криволинейным орбитам осуществляется за счет взаимодействия движущихся частиц с магнитным полем.

Создание современных циклических ускорителей требует решения сложных физических, электротехнических, радиотехнических и других проблем.

Большой вклад в развитие этих установок внесен советскими учеными, инженерами и работниками отечественной промышленности.

Принцип действия и основные особенности различных типов циклических ускорителей не трудно установить на основании элементарного рассмотрения уравнения движения частиц в магнитном поле.

Движение заряженной частицы в магнитном поле может быть охарактеризовано в цилиндри-

ческой системе координат  $(\rho, \Theta, y)$  следующими уравнениями (в системе СГСМ):

$$\frac{dm\rho}{dt} = m\rho\dot{\theta}^2 - e\Theta\rho H_y; \quad (1)$$

$$\frac{dm\dot{\rho}^2\Theta}{dt} = Q_\theta. \quad (2)$$

$$\frac{dm\dot{y}}{dt} = e\rho\Theta H_y. \quad (3)$$

Здесь  $m$  — масса частицы, зависящая от скорости  $v$  ( $m = m_0$  при  $v = 0$ );

$e$  — заряд частицы;

$H$  — напряженность поля;

$Q_\theta$  — момент внешних относительно начала координат сил, действующих на частицы в плоскости  $\rho, \theta$ .

Из уравнений (1), (2) и (3) легко получаются известные выражения, определяющие радиус, частоту обращения ( $M_{2\pi}$ ) и энергию частицы при постоянном значении напряженности магнитного поля на орбите<sup>1</sup>:

$$f = 1,43 \cdot 10^4 e_0 \frac{H}{E} = \frac{300}{L} \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E^2}}; \quad (4)$$

$$E^2 = E_0^2 + (300 H \rho e_0)^2. \quad (5)$$

Здесь  $E = E_0 + W$  — полная энергия частицы, Мэв;

$E_0$  — энергия покоя, Мэв;

$W$  — кинетическая энергия, Мэв;

$L$  — длина орбиты, м;

$e_0$  — отношение заряда частицы к заряду электрона;

$\rho$  — радиус, м;

$H$  — напряженность поля, вб/м<sup>2</sup>.

Уравнения (4) и (5) указывают, что в однородном магнитном поле возможно резонансное ускорение частиц электрическим полем постоянной частоты, близкой к частоте обращения  $f$  (пока  $W \ll E_0$ ). По мере увеличения энергии радиус обращения частицы растет. Ускорители, построенные на таком принципе, называются циклотронами.

Условия устойчивости движения частиц в магнитном поле налагают ограничения на характер распределения магнитного поля в ускорителе.

Из уравнений (1) и (3) нетрудно получить в линейном приближении следующие уравнения для радиальных  $x$  и вертикальных  $y$  отклонений

<sup>1</sup> В уравнениях (4) и (5) масса заменена ее эквивалентной энергией.

от невозмущенной круговой траектории с радиусом  $\rho_0$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2x}{d\theta^2} + (1-n)x &= 0; \\ \frac{d^2y}{d\theta^2} + ny &= 0; \\ n &= -\frac{\partial H}{\partial \rho} \frac{\rho_0}{H_0}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Отсюда непосредственно видно, что значения показателя спада магнитного поля  $n < 1$  обеспечивают устойчивость движения в горизонтальной плоскости (горизонтальную фокусировку), значение  $n > 0$  — устойчивость движения в вертикальной плоскости (вертикальную фокусировку). Таким образом, для обеспечения устойчивости напряженность магнитного поля в циклотроне должна убывать с возрастанием радиуса.

Увеличение массы частицы с ростом энергии, вызванное релятивистским эффектом, а также убывание поля с радиусом (4) приводят к уменьшению частоты обращения частицы в циклотроне по мере ускорения. Это в связи с нарушением условий резонанса ограничивает максимальную энергию, которую можно получить в циклотроне, определенными пределами.

Предельная энергия ( $W_{\max c}$ ), вычисленная для идеальных условий однородного поля и идеальной стабильности во времени частоты ускоряющего напряжения и магнитного поля при нулевой интенсивности частиц,

$$W_{\max c} = 2,1 \sqrt{e_0 M U}. \quad (7)$$

Здесь  $U$  — максимальное ускоряющее напряжение, кв:

$M$  — отношение массы ускоряемой частицы к массе протона.

Учет спада поля приводит к уменьшению величины  $W_{\max c}$ . Коэффициент уменьшения равняется 0,55 ... 0,65. Для получения приемлемой интенсивности ускоряющее напряжение обычно выбирается в 2 ... 3 раза больше его значения, определенного для нулевой интенсивности. Циклотроны обычно сооружаются для получения энергией дейtronов до 10 ... 25 Мэв.

На рис. 1 представлен схематический чертеж циклотрона. Циклотрон включает в себя электромагнит с цилиндрическим или коническими полюсами; вакуумную камеру, помещенную между этими полюсами; высокочастотную систему, питающую дуанты камеры и создающую ускоряющее электрическое напряжение в щели между дуантами; вакуумные насосы; систему стабилизации магнитного поля, поддерживающую постоянство магнитного поля с большой точностью, и другое оборудование.

Предел повышения энергии, устанавливаемый эффектом увеличения массы с возрастанием энергии, удалось преодолеть, использовав принцип автофазировки. Принцип автофазировки был

открыт в 1944 г. В. И. Векслером (СССР). Несколько позже, независимо от В. И. Векслера, этот же принцип сформулировал Мак-Миллан (США).

Принцип автофазировки состоит в том, что при изменениях во времени напряженности магнитного поля или частоты ускоряющего напряжения имеет место эффект, стремящийся автоматически поддержать резонанс между частотой обращения частицы, зависящей от ее энергии и напряженности поля, и частотой ускоряющего напряжения. На этом принципе построены самые крупные современные ускорители.

Ускорители, подобные циклотрону, со спиральными орбитами частиц, постоянным во времени магнитным полем и модулируемой частотой ускоряющего напряжения называются фазotronами или синхроциклотронами.

Крупнейший в мире ускоритель этого типа с энергией протонов на 680 Мэв сооружен ипущен в 1949 г. в Объединенном институте ядерных исследований в г. Дубне. Его основные данные: энергия протонов — 680 Мэв; диаметр полюсов — 6 000 мм; поле в центре камеры — 16 600 эр; частота ускоряющего напряжения — 26,5 ... 13,6 Мгц; вес электромагнита — около 7 000 т. Принципиальных ограничений для увеличения энергии частиц, получаемой в фазотронах, не существует. Однако имеется практический предел энергии фазotronов, связанный с резким возрастанием затрат и технических трудностей. Этот предел, по-видимому, равен примерно 1 Гэв.

Затраты на сооружение крупных циклических ускорителей могут быть значительно уменьшены, если ускорение производить при неизменном радиусе орбиты. Уравнения (4) и (5) указывают на такую возможность.

Для обеспечения ускорения при постоянном радиусе орбиты необходимо выполнить кольцевой электромагнит с кольцевой вакуумной камерой между полюсами, инжектировать в начале рабочего цикла частицы, предварительно ускоренные в начальном ускорителе, и дальнейшее ускорение осуществлять путем одновременного изменения во времени напряженности поля и соответствующего, согласно уравнению (4), изменения частоты ускоряющего напряжения. Механизм автофазировки будет обеспечивать при этом необходимый темп нарастания энергии. Резонансные ускорители, построенные по этому принципу, называются синхрофазotronами.

На рис. 2 и 3 приведены фотографии действующего синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований. Основные его параметры: энергия протонов — 10 Гэв; радиус равновесной орбиты — 28 м; внутренняя высота камеры — 400 мм; ширина камеры — 2 000 мм; максимальная напряженность поля — 13 000 эр; пиковая мощность возбуждения электромагнита — 140 Мвт; вес электромагнита — около 36 000 т.

Ускорение частиц в кольцевой области может быть осуществлено не только за счет резонансного использования высокочастотного ускоряющего напряжения, но также и за счет многократного

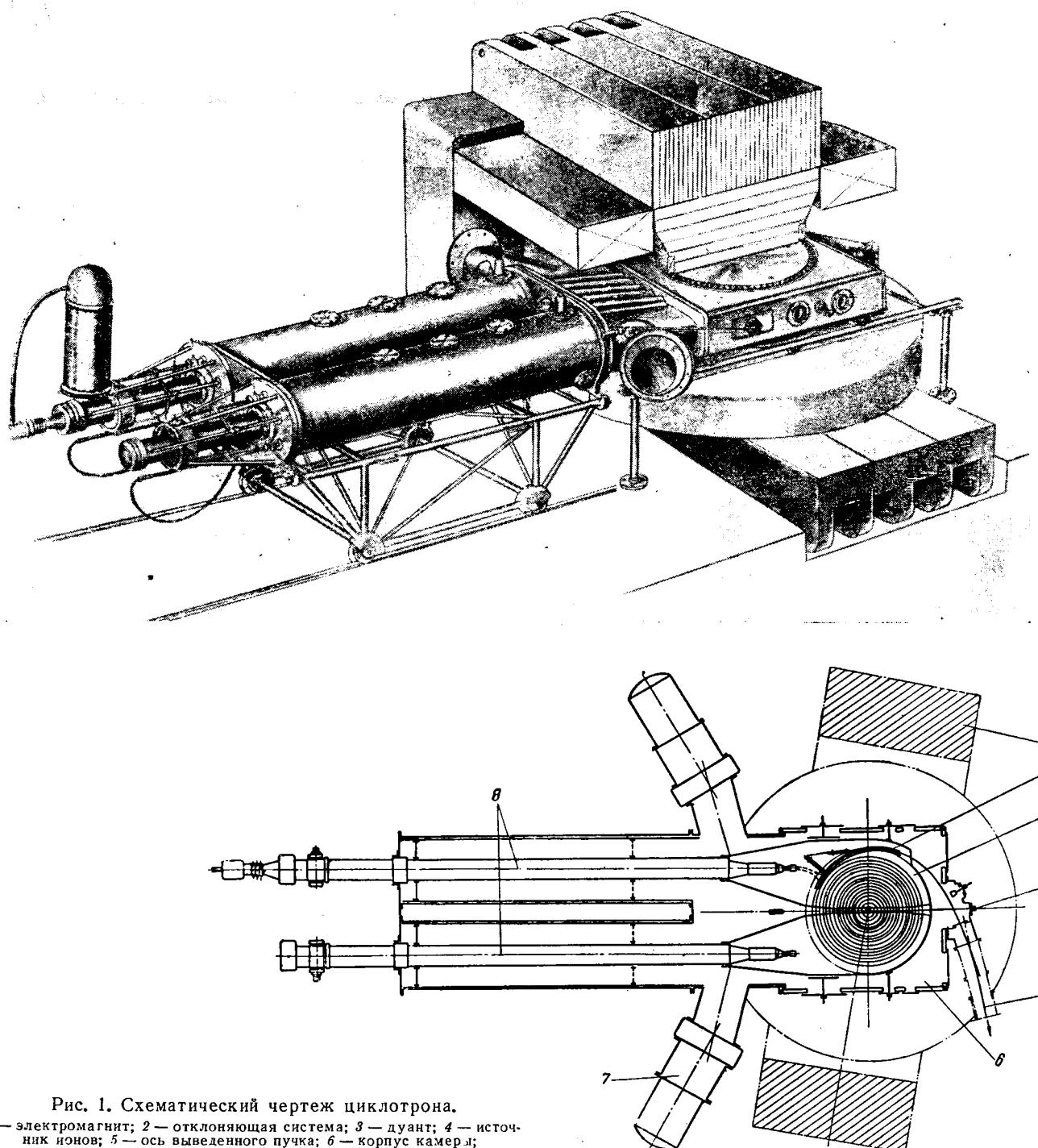


Рис. 1. Схематический чертеж циклотрона.

1 — электромагнит; 2 — отклоняющая система; 3 — дуант; 4 — источник ионов; 5 — ось выведенного пучка; 6 — корпус камеры; 7 — вакуумный насос; 8 — резонансные линии.

использования вихревого электрического поля, создаваемого магнитным потоком, пронизывающим орбиту.

Ускорители с вихревым ускоряющим полем и постоянным радиусом орбиты называются бета-тронами. Они применяются для ускорения электронов до энергий порядка сотни Мэв. Для получения больших энергий используется резонансное ускорение. Ускоряющая система может быть выполнена для работы на постоянной частоте, так как, начиная с нескольких мегаэлектронвольт, скорость электрона практически достигает скорости света и остается неизменной. Такие ускори-

тели с постоянным радиусом равновесной орбиты и постоянной частотой ускоряющего напряжения называются синхротронами.

Экономические параметры кольцевых ускорителей в значительной степени определяются размерами кольцевой области магнитного поля, в котором осуществляется ускорение частиц. Важнейшим экономическим показателем является вес электромагнита, от которого зависит его стоимость и запасенная магнитная энергия, от которой в свою очередь зависит мощность питающего устройства. Зависимости веса электромагнита  $G$  и запасенной магнитной энергии  $A$  от параметров

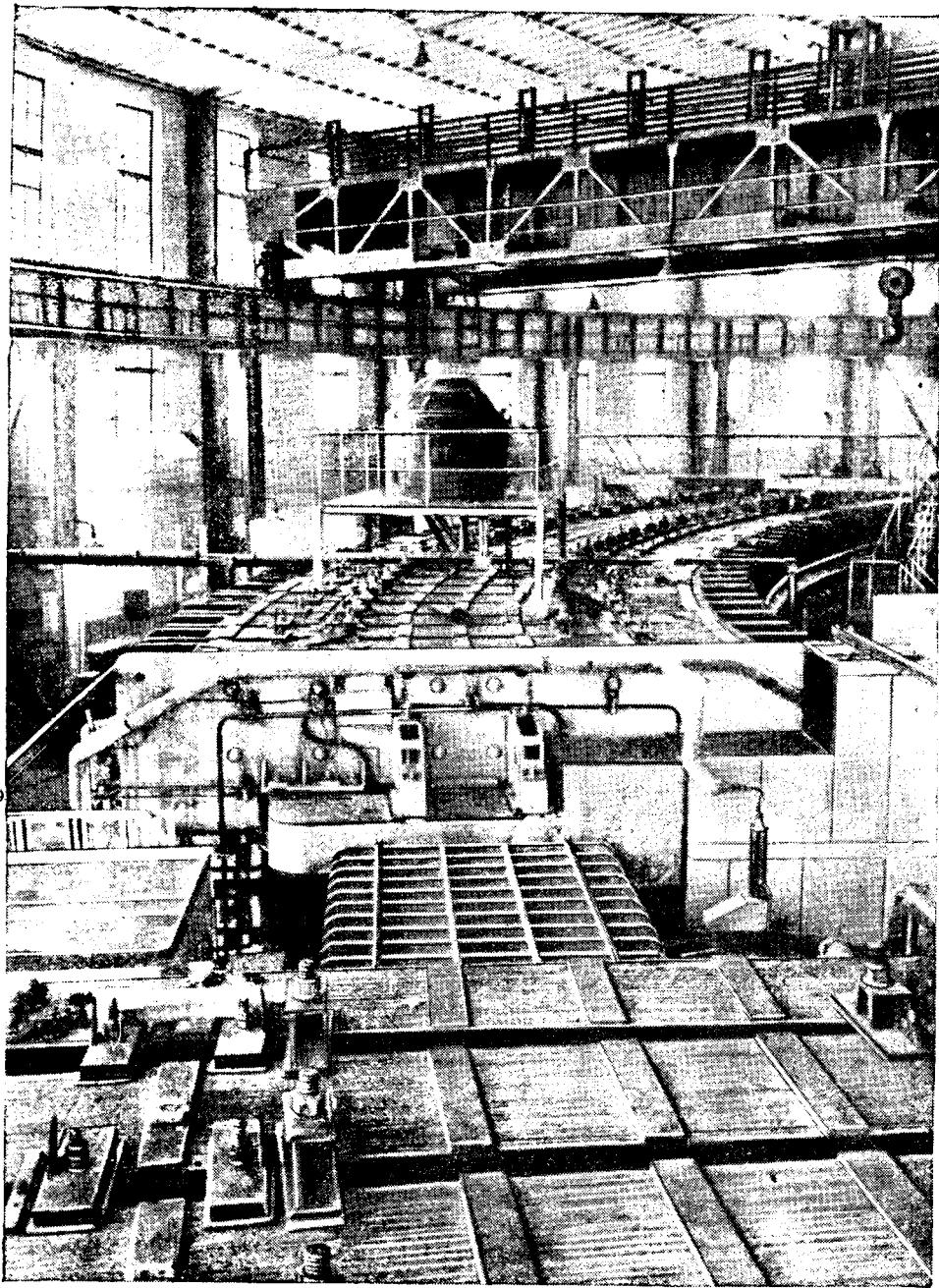


Рис. 2. Синхрофазотрон на 10 Гэв (вид сверху).

ускорителя определяются следующими приближенными соотношениями:

$$G = k_1 R^{1+\mu_1+\mu_2} \left[ \frac{b}{R} \left( 1 + \lambda \frac{\delta}{b} \right) H_m \right]^{\mu_1} \left( \frac{\delta}{R} \right)^{\mu_2}; \quad (8)$$

$$A = k_2 R^3 \frac{b}{R} \frac{\delta}{R} \left( 1 + \lambda \frac{\delta}{b} \right) H_m^2, \quad (9)$$

где  $R$  — радиус равновесной орбиты;

$b$  — ширина полюса;

$\delta$  — зазор между полюсами;

$H_m$  — напряженность поля в конце ускорения;

$\mu_1 \approx 1,4 \dots 1,8$ ;

$$\mu_2 \approx 0,1 \dots 0,3;$$

$$\lambda = 0,5 \dots 1,0;$$

$k_1$ ,  $k_2$  — коэффициенты, зависящие от конструкции и размеров установки.

Относительные размеры ширины полюсов  $\frac{b}{R}$  и зазора  $\frac{\delta}{R}$  могут быть уменьшены за счет увеличения точности инжекции, слежения частоты ускоряющего напряжения за магнитным полем, соблюдения необходимых законов распределения напряженности поля в азимутальном и радиальном направлениях и т. д.

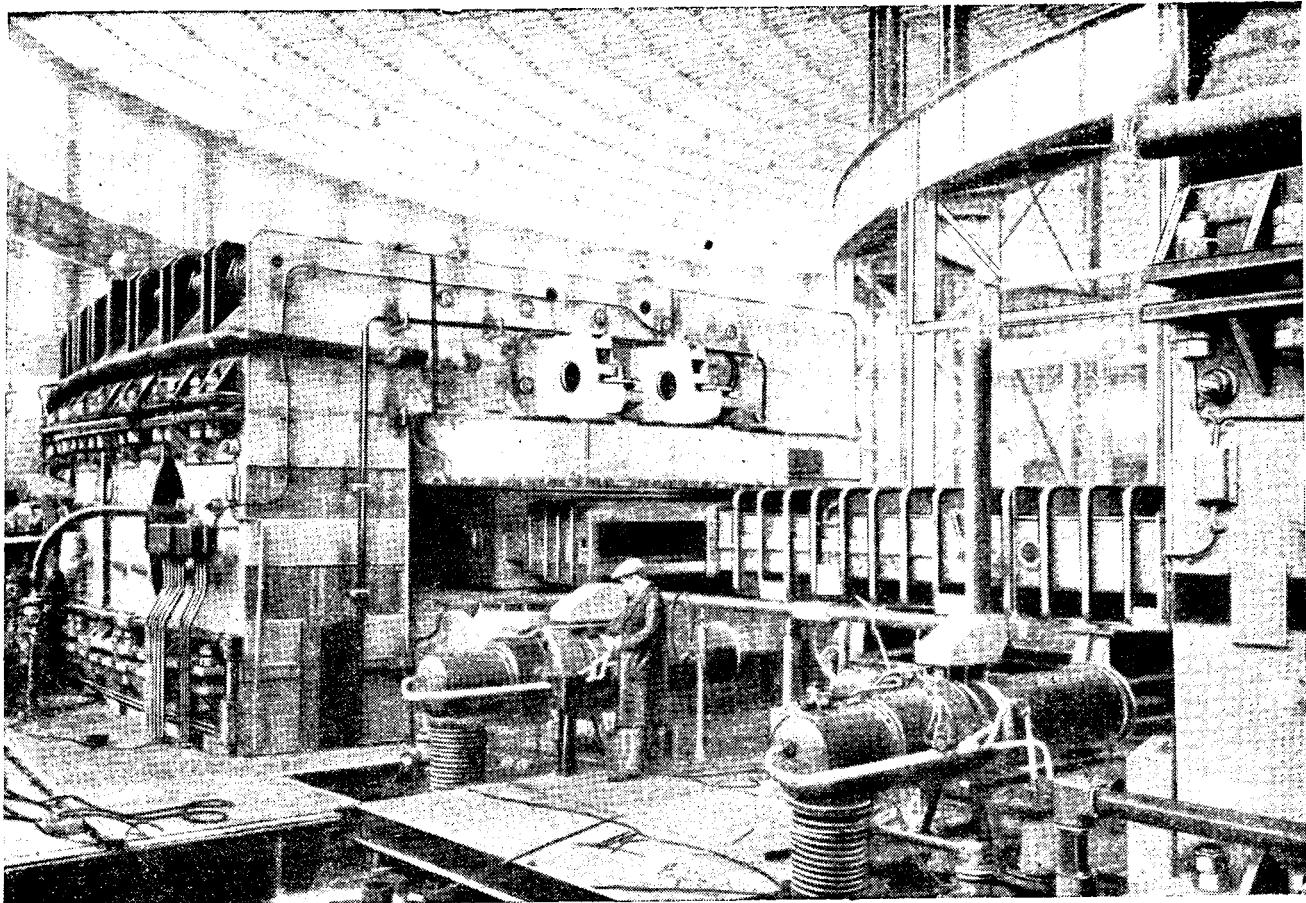


Рис. 3. Синхрофазотрон на 10 Гэв (прямолинейный участок).

Эти размеры для крупнейших выполненных синхрофазотронов представлены в следующей таблице:

Наименование ускорителя	Максимальная энергия, Гэв	$\frac{b}{R}$ , %	$\frac{\delta}{R}$ , %
Космotron (США) . . . .	2,9	10	2,7
Беватрон (США) . . . .	6,2	11	2,2
Синхрофазотрон Объединенного института ядерных исследований (СССР)	10	7,1	1,4

Как показывает опыт работы этих ускорителей, относительные размеры кольцевой области могут быть сокращены, однако это не может существенно облегчить проблему сооружения ускорителей на еще большие энергии.

Существенным шагом вперед в области создания ускорителей на большие энергии явилось опубликованное в 1952 г. предложение Ливенгтона, Куранта и Снайдера о применении жесткой фокусировки. Сущность предложения состоит в увеличении эффекта магнитной фокусировки за счет разбивки кольцевого ускорителя в азимутальном направлении на ряд секторов, в которых последовательно осуществляется сильная фокуси-

ровка в горизонтальной плоскости при сильной вертикальной дефокусировке ( $n \ll 0$ ) и сильная фокусировка в вертикальной плоскости при сильной горизонтальной дефокусировке ( $n \gg 0$ ). При этом система уравнений (6), описывающая свободные колебания, преобразуется в систему с периодическими коэффициентами. Исследование ее показывает, что применение попеременной фокусировки при соблюдении определенных условий может привести к сильной фокусировке как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях.

Применение ускорителей с сильной фокусировкой позволяет существенно уменьшить вес и мощность оборудования и соорудить циклические ускорители на энергию в несколько десятков гигаэлектронвольт. В настоящее время в Советском Союзе ведутся работы по пуску экспериментального синхрофазотрона с жесткой фокусировкой на 200 Мэв протонов, сооружается синхрофазотрон с жесткой фокусировкой на 7 Гэв и проектируется синхрофазотрон с жесткой фокусировкой на 50 ... 60 Гэв.

Применение жесткой фокусировки приводит к увеличению необходимых точностей осуществления магнитного поля вследствие усиления влияния различных резонансных явлений, предъявляет специфические требования к высокочастотной ускоряющей системе и т. д.

Для характеристики ускорителей с жесткой фокусировкой приведем некоторые данные проекта ускорителя на 50...60 Гэв: энергия протонов — 50...60 Гэв; напряженность магнитного поля — 10 000...12 000 эр; радиус кривизны основных блоков электромагнита — 166,1 м; высота вакуумной камеры — 120 мм; ширина вакуумной камеры — 200 мм; вес электромагнита — около 22 000 т; пиковая мощность питания — 100 Мвт; допуск на колебания поля по азимуту — 0,25%; допуск на ошибку в установке отдельных блоков электромагнита в радиальном направлении —  $\pm 1$  мм; допуск на ошибку в установке блоков по высоте  $\pm 0,5$  мм.

Наряду с получением больших энергий весьма актуальным является вопрос о получении достаточных интенсивностей.

Увеличение интенсивности означает сокращение времени физических экспериментов и улучшение использования в целом дорогостоящих ускорительных установок. Проблема увеличения интенсивности является особенно острой для ускорителей на большую энергию, так как переход от циклотронов к крупным синхрофазотронам, характеризуемый повышением энергий в тысячи раз, сопровождается естественным значительным уменьшением интенсивности. Изменение интенсивности в зависимости от энергий по данным некоторых действующих циклических ускорителей представлено на рис. 4. Из рисунка видно, что бетатрон, обеспечивающий ускорение частиц до энергии, в 300 раз большей, чем циклотрон Вашингтонского университета, имеет в 20 000 раз меньшую интенсивность.

Известное увеличение интенсивности может быть достигнуто за счет рационального проектирования ускорительных установок. Необходимо соблюдать соответствие между параметрами отдельных элементов оборудования. В частности, для синхрофазотронов особо существенное значение имеет создание мощных инжекторов и эффек-

тивных методов инжекции. Система инжекции должна обеспечить доведение токов инжекции по крайней мере до пределов, ограничиваемых действием объемного заряда в циклическом ускорителе. Частота рабочих циклов должна быть доведена до предельных экономически и технически рациональных величин.

Наряду с рациональным проектированием ускорительных установок необходимо обратить особое внимание на создание новых типов ускорителей с повышенной интенсивностью. В этом направлении высказан целый ряд предложений, в том числе советскими учеными.

**Электромагниты.** К магнитному полю циклических ускорителей предъявляются весьма высокие требования. Для того, чтобы сформулировать эти требования, недостаточно рассмотреть устойчивость движения в линейном приближении. В циклическом ускорителе частицы многократно проходят одни и те же области магнитного поля, поэтому необходимо особое внимание обратить на влияние магнитных возмущений на движение частиц, так как эти возмущения могут иметь резонансный характер. В связи с этим условие  $0 < n < 1$  для полей с радиальной симметрией или аналогичное, но более сложное, условие для полей с азимутальной вариацией является далеко недостаточным.

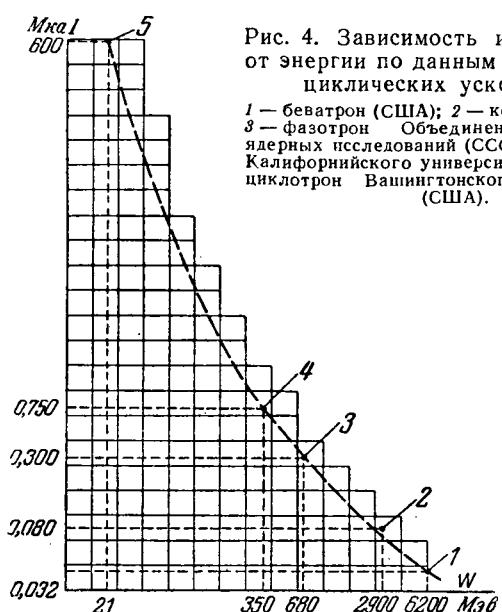
Возможность резонансных явлений приводит к дополнительным ограничениям значений показателей спада. Кроме того, должны быть строго ограничены возможные отклонения действительного магнитного поля от расчетного, вызывающие отклонения действительных траекторий частиц от идеальных.

Для создания магнитного поля циклических ускорителей могут быть применены электромагниты с ферромагнитными материалами или системы проводников с током без ферромагнитных материалов. Создание магнитных полей без ферромагнитных материалов, как правило, неэкономично и находит применение лишь в отдельных редких случаях. Подавляющее большинство электромагнитов-ускорителей выполняется с магнитопроводами из ферромагнитных материалов. Это ограничивает напряженности магнитного поля, создаваемые в ускорительных камерах, 10...20 тыс. эр в зависимости от типов ускорителей.

Высокие требования, предъявляемые к магнитному полю, значительные веса и высокая стоимость электромагнитов требуют особой тщательности разработки этого оборудования. Создание достаточно простых и точных методов расчета электромагнитов и их магнитных полей имеет первостепенное значение. Однако точные и простые решения могут быть найдены лишь в простейших случаях и без учета насыщения, поэтому при проектировании широко применяются приближенные методы расчета и моделирование.

Электромагниты циклотронов и фазотронов обычно выполняются по конструктивной схеме, изображенной на рис. 5. Так как циклотроны и фазотроны работают при постоянном во времени потоке, то магнитопровод выполняется либо из массивного железа, либо по технологическим

Рис. 4. Зависимость интенсивности от энергии по данным выполненных циклических ускорителей.  
1 — бетатрон (США); 2 — космotron (США);  
3 — фазотрон Объединенного института ядерных исследований (СССР); 4 — фазотрон Калифорнийского университета (США); 5 — циклотрон Вашингтонского университета (США).



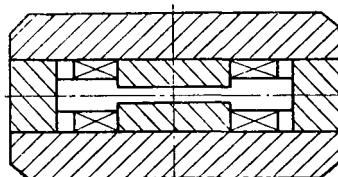


Рис. 5. Конструктивная схема Ш-образного электромагнита.

соображениям набирается из сваренных между собой листов стали.

Электромагниты синхрофазотронов с мягкой фокусировкой выполняются по конструктивной схеме рис. 5 или рис. 6, но без нейтрального полюса. Второй вариант менее экономичен, но обеспечивает лучший доступ к камере. Насыщение в этом варианте вызывает большие искажения магнитного поля.

Магнитопроводы синхрофазотронов с жесткой фокусировкой выполняются по конструктивной схеме рис. 7 с нейтральным полюсом или без него.

Выбор электромагнитных загрузок и материалов электромагнитов должен производиться с большой тщательностью. Необходимость уменьшения веса требует высоких удельных загрузок, но это приводит к росту потерь энергии на питание электромагнитов и значительному увеличению влияния неоднородности магнитных характеристик стали, недостаточно плотной спрессовки отдельных элементов магнитопровода и т. д.

В циклотронах и фазotronах индукции в магнитопроводах доходят до 17...21 тыс. Гс.

У синхрофазотронов и синхротронов, в особенности с жесткой фокусировкой, где влияние азимутальных магнитных возмущений велико, целесообразно устанавливать меньшие загрузки магнитопроводов. Для магнитных систем циклотронов и фазotronов может быть использована обычная торговая малоуглеродистая сталь. Полюсные наконечники и крышки камеры в ряде случаев имеет смысл изготавливать из материала с повышенными магнитными свойствами.

Для электромагнитов синхротронов и синхрофазотронов необходимо применять магнитные материалы с достаточно высокими магнитными свойствами; особое значение имеет однородность материала в отношении магнитных свойств. В частности, весьма существенным является низкое значение и малые колебания коэрцитивной силы. Удовлетворительными магнитными характеристиками обладает отожженная по специальной технологии слаболегированная кремнистая сталь.

Толщина листов стали синхрофазотронов зависит от частоты импульсов и технологии изготовления и обычно выбирается в пределах 0,5...10 мм. Обмотки электромагнитов могут быть выполнены из меди или из алюминия.

Охлаждение обмоток целесообразно производить воздухом или водой. Водяное охлаждение является более экономичным, но при нем особое

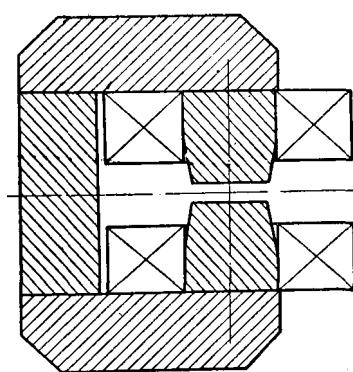


Рис. 6. Конструктивная схема С-образного электромагнита

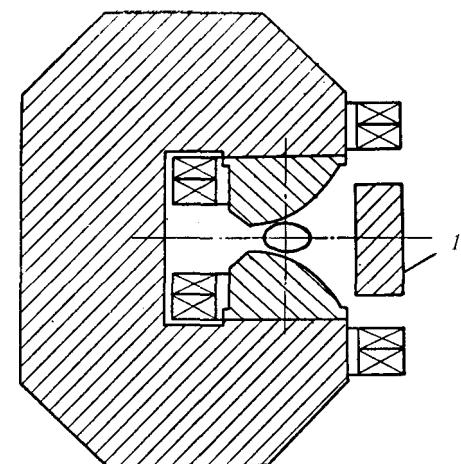


Рис. 7. Конструктивная схема электромагнита с жесткой фокусировкой и нейтральным полюсом.  
1 — нейтральный полюс.

внимание должно быть обращено на надежностьстыкования отдельных кусков труб, из которых изготавливается обмотка. Применение алюминия позволяет значительно сократить число стыков внутри обмотки, так как алюминиевые трубы достаточно больших сечений могут быть изготовлены длиною в несколько сот метров.

Принципиальное значение имеет введение в конструкцию электромагнитов элементов, позволяющих скорректировать магнитное поле и тем самым компенсировать неточности расчета и обработки, а также неоднородность свойств материала.

В фазотронах и циклотронах необходимый небольшой спад магнитного поля создается за счет конической формы стальных крышек камеры, являющихся одновременно полюсными наконечниками электромагнита. Для увеличения области с малым спадом поля и компенсации влияния краевого эффекта, приводящего к резкому спаданию напряженности поля на краю камеры, на крышках внутри камеры около краев устанавливаются кольцевые шиммы. Размер и формы шимм зависят от величины напряженности поля в камере и окончательно определяются экспериментальным путем. Для тонкой регулировки спада поля в центральной части служат дисковые шиммы, вставляемые в зазор между крышкой камеры и полюсом электромагнита.

Еще большее значение имеет уменьшение краевого эффекта у кольцевых ускорителей вследствие больших относительных размеров высоты зазора по отношению к радиальному размеру камеры.

Учитывая, что поперечные размеры электромагнитов синхротронов и синхрофазотронов обычно значительно меньше радиусов кривизны орбит ускоряемых частиц, расчет профилей полюсов и магнитных полей этих ускорителей может быть сведен к плоской задаче. Это упрощает решение и позволяет создать достаточно надежные методы расчета.

Для корректировки поля кольцевых ускорите-

лей целесообразно воспользоваться обмотками, расположеными на полюсах электромагнитов, питаемых от специальных источников тока. Эти обмотки позволяют создать независимое регулирование наиболее существенных параметров магнитного поля.

Резонансный характер возмущений магнитного поля позволяет ограничить количество корректирующих цепей небольшим числом.

**Питание электромагнитов ускорителей.** Питание электромагнитов ускорителей с постоянным во времени магнитным полем (циклотронов и фазотронов) не представляет серьезных технических трудностей, так как требуемые мощности являются относительно небольшими, а к режимам работы систем питания постоянного тока не предъявляется никаких специальных требований, кроме поддержания высокой степени стабильности тока или поля электромагнита.

Своеобразие систем питания электромагнитов постоянного тока касается, в основном, их схем защиты и связано с большим запасом электромагнитной энергии нагрузки.

Наличие большого запаса электромагнитной энергии нагрузки делает недопустимым разрыв цепи главного тока и приводит к возникновению опасности разноса питающих агрегатов при отключении приводных двигателей.

Создание систем питания электромагнитов ускорителей с изменяющимся во времени магнитным полем (синхротронов и синхрофазотронов) является значительно более сложной задачей. Принципы их построения определяются, в первую очередь, запасом электромагнитной энергии электромагнита.

Запас электромагнитной энергии магнитного поля крупных синхрофазотронов характеризуется следующими данными: космotron —  $12 \cdot 10^6$  дж; беватрон  $83 \cdot 10^6$  дж; синхрофазотрон Объединенного института ядерных исследований —  $148 \cdot 10^6$  дж.

Источники тока промышленной частоты не могут быть использованы для питания ускорителей этого типа, так как требуемые при этом реактивные мощности должны иметь величины порядка десятков миллионов киловольтампер. Для питания таких ускорителей приходится применять источники тока с частотой, равной долям герца, хотя это, как указывалось выше, существенно снижает интенсивность работы ускорителя.

Для электронных ускорителей (синхротронов) на энергии порядка  $10^8 \dots 10^9$  эв и электронных ускорителей с жесткой фокусировкой с энергией в несколько миллиардов электронвольт, у которых запас электромагнитной энергии электромагнитов относительно невелик, могут быть применены источники питания промышленной или близкой к ней частоты. В качестве источников питания такого типа могут быть использованы синхронные компенсаторы или статические конденсаторы.

Непосредственное включение синхронного компенсатора параллельно с питающей сетью обычно

не применяется из-за необходимости широкого регулирования напряжения питания электромагнита при изменениях режима работы ускорителя. В конденсаторном варианте системы питания батарея статических конденсаторов образует с обмоткой возбуждения электромагнита колебательный контур, возбуждаемый на резонансной частоте синхронным генератором сравнительно небольшой мощности порядка нескольких сотен или тысяч киловатт. Необходимая точность поддержания резонанса обеспечивается стабилизацией скорости вращения питающего генератора или системой обратной связи, изменяющей частоту питания в функции реактивной составляющей тока генератора.

Требуемая при описанных системах питания реактивная мощность может быть значительно снижена за счет дополнительного подмагничивания электромагнита постоянным током.

Для питания ускорительных установок с большими запасами электромагнитной энергии требуются системы, обеспечивающие аккумулирование и рекуперацию необходимой энергии. Энергия может накапливаться как в установках с вращающимися маховыми массами, так и в конденсаторных установках. Применению конденсаторного накопления энергии препятствует высокая стоимость и громоздкость конденсаторных батарей. Поэтому во всех существующих и проектируемых системах питания крупных синхрофазотронов для накопления энергии используются вращающиеся маховые массы. В этих системах наиболее сложной технической задачей является преобразование энергии вращающихся масс в энергию магнитного поля. Такое преобразование может быть осуществлено при помощи специальных генераторов постоянного тока или синхронных машин с ионными преобразователями.

При импульсном питании, при котором мощность достигает многих десятков тысяч киловатт, использование машин постоянного тока затруднено ввиду относительно малых предельных мощностей генераторов постоянного тока (5 000 ... 7 500 квт) и трудностей параллельной работы большого количества таких машин. Наибольшее распространение получило применение синхронных генераторов с ионными преобразователями.

В системах питания с синхронными генераторами и ионными преобразователями для обеспечения рабочей части ускорительного цикла, соответствующей нарастанию поля, ионные преобразователи включаются системой сеточного управления на обмотку возбуждения электромагнита. Под влиянием примерно постоянного напряжения преобразователей происходит нарастание тока электромагнита по начальной части экспоненциальной кривой. При этом преобразователи работают в выпрямительном режиме, а синхронная машина в режиме генератора. В момент, когда поле электромагнита достигает максимального значения, система управления переводит преобразователи в инверторный режим, напряжение на обмотке возбуждения электромагнита реверси-

руется, что обеспечивает форсированное гашение поля электромагнита. При этом синхронная машина работает в режиме двигателя, и энергия магнитного поля за вычетом потерь возвращается маховыми массами агрегата.

Одним из основных при разработке систем питания крупных ускорителей является вопрос сложения мощностей.

В системе питания синхрофазotronа Объединенного института ядерных исследований использованы параллельно работающие мостовые многофазные схемы преобразования, обеспечивающие высокое использование четырех питающих синхронных машин, и применены средства ограничения токов аварийных режимов, что особенно важно для установок столь больших мощностей.

В НИИЭФА была предложена система сложения мощностей, в которой электрическая схема питания представляет собой кольцо, составленное из периодически повторяющихся элементов — источник питания и элемент обмотки электромагнита.

Такая схема, обеспечивая последовательное соединение источников питания, не приводит к повышению напряжения обмотки электромагнита и источников питания относительно земли, так как максимальное напряжение относительно земли в этом случае равно не сумме напряжений, а напряжению одного элемента.

В кольцевой схеме питания становится технически возможным использование как ионных преобразователей, так и генераторов постоянного тока в качестве преобразователей энергии. Здесь, однако, следует учитывать, что по условиям обеспечения нормальной коммутации время подъема и реверса напряжения машины постоянного тока должно быть гораздо большим, чем в схемах с ионными преобразователями, и во многих случаях близким к длительности рабочей части ускорительного цикла. Это ухудшает использование ускорителя и увеличивает потери в обмотке возбуждения электромагнита. Вопрос о целесообразности применения в описанной схеме машин постоянного тока или ионных преобразователей должен решаться на основании технико-экономических расчетов и соображений.

Одной из серьезных задач при осуществлении систем питания с ионными преобразователями является создание вентилей. В системе питания синхрофазotronа мощностью 10 Гэв использовались разработанные в ВЭИ имени Ленина запаянные игнитроны со средним током 100 а, максимальным током 800 а и обратным напряжением 15 кв. Для дальнейшего развития работ очень важно разработать вентили на большие мощности с целью уменьшения их числа в системе.

Для работы ускорителя имеет значение ограничение амплитуд высших гармоник напряжения электромагнита в диапазоне частот, близких к резонансным частотам колебаний ускоряемых частиц.

Применение для снижения пульсаций выпрямленного напряжения нормальных фильтров требует весьма громоздкого и дорогостоящего оборудования. В связи с этим, в НИИЭФА было разработано устройство подавления пульсаций, основанное на применении системы обратной связи с ламповыми усилителями звуковой частоты.

Импульсный режим работы, а также требования, предъявляемые к системе питания ускорителей в отношении строгой повторяемости кривой нарастания поля, приводят к необходимости использования систем быстродействующего ионного возбуждения генераторов.

Серьезной проблемой является разработка систем защиты электромагнита и оборудования системы питания, обеспечивающих надежную эксплуатацию установки. Трудности создания защит обусловлены как характером нагрузки, обладающей большим запасом электромагнитной энергии, так и своеобразием аварийных режимов и нарушений работы ионных преобразователей — обратными зажиганиями, опрокидываниями инверторов, прорывов, пропусков зажигания вентилей в условиях параллельной работы большого количества вентилей и преобразователей большой мощности.

Для решения этой задачи были созданы специальные быстродействующие автоматы обратного и прямого тока на высокие напряжения, разработаны методы селективной индикации аварийных режимов, созданы системы защиты, анализирующие характер аварии и в зависимости от этого осуществляющие необходимые воздействия.

**Вакуумные камеры.** Назначение камер и их большой объем, достигающий десятков и сотен кубических метров, требуют сложных конструкций с большим количеством деталей и уплотнений. Обеспечение высокого вакуума ( $10^{-5} \dots 10^{-6}$  мм рт. ст.) в столь трудных условиях привело к развитию новой отрасли вакуумной техники, созданию высокопроизводительных вакуумных насосов, вымораживающих ловушек, шиберов, различных типов уплотнений и других элементов.

В вакуумных камерах размещаются электроны с ускоряющими промежутками, на которых напряжение высокой частоты в отдельных случаях достигает 400 кв. В связи с этим особое значение приобретают вопросы электрической прочности при высокой частоте в условиях вакуума и магнитного поля.

Размещение источников ионов, мишней, пробников, шлюзов и других элементов камеры при ограниченном пространстве представляет также весьма большие конструктивные трудности.

При больших интенсивностях материалы, из которых изготовлены элементы камеры, сильно активируются и часто в течение длительного времени к ним нельзя прикасаться. Дальнейшее увеличение интенсивности циклотронов и фазотронов может привести к полной невозможности оперировать с камерой в течение длительного времени. Поэтому при проектировании камеры конструк-

тивные материалы должны выбираться с большой тщательностью.

В циклотронах и фазotronах вакуумная камера является одновременно составной частью резонансного контура.

В фазotronах одним из наиболее сложных элементов является так называемый вариатор частоты — вращающийся или вибрирующий конденсатор переменной емкости, включенный в резонансный контур. В фазotronах на энергии в 600 Мэв и более геометрические размеры камеры оказываются соизмеримыми с длиной волны, и вариатор частоты приходится устанавливать в непосредственной близости к рабочему зазору, что ведет к необходимости магнитной экранировки; необходимо также обеспечить, чтобы собственные частоты объемных и поперечных колебаний в полости камеры, являющиеся паразитными, были за пределами рабочих частот.

Камера синхрофазотрона в отличие от камер циклотрона и фазотрона размещается в изменяющемся во времени магнитном поле и должна быть изготовлена таким образом, чтобы вихревые токи, возникающие в деталях камеры, не вносили искажений в распределение магнитного поля. Она выполняется либо из изоляционного материала (фарфор, стекло), либо из множества металлических элементов, изолированных друг от друга.

**Инжекторы.** Задача создания совершенной системы инжекции занимает важное место в современной ускорительной технике. Эта задача имеет особое значение для кольцевых ускорителей.

Необходимость уменьшения размеров ускорительной камеры и электромагнита требует повышения энергии и монохроматичности инжектируемого пучка частиц, а увеличение интенсив-

ности циклических ускорителей — соответствующего увеличения интенсивности инжектора и доведения токов инжекции по крайней мере до пределов, ограничиваемых действием объемного заряда внутри циклических ускорителей.

При энергиях инжекции порядка десятков мегаэлектронвольт в качестве инжекторов обычно применяются линейные ускорители.

В интервале энергии до 4 ... 5 Мэв для создания инжекторов частиц может быть использован метод однократного ускорения. Для этой цели применяются электростатические генераторы, импульсные трансформаторы и конденсаторно-вентильные каскадные генераторы, работающие по схеме многократного умножения напряжения. Создание источников постоянного напряжения на 4 ... 5 млн. в при относительно небольших габаритах стало возможным на основе применения газовой изоляции с повышенным давлением и использованием газов с высокой электрической прочностью. В НИИЭФА разработана серия электростатических генераторов в сжатом газе на напряжение в 1,5 ... 5 млн. в, которые могут применяться в качестве инжекторов для крупных циклических ускорителей.

В качестве мощных источников ускоренных частиц целесообразно применять каскадные генераторы и импульсные трансформаторы, допускающие получение достаточно больших токов. Важнейшими вопросами создания импульсных трансформаторов являются формирование необходимой формы стабилизованных импульсов и вопросы рационального построения изоляции. Можно считать, что эти задачи для напряжения до 1 млн. в успешно решены отечественной техникой и существует реальная перспектива дальнейшего повышения напряжения импульсных трансформаторов.

[2.9.1957]



## Вопросы проектирования турбогенераторов с форсированным охлаждением

Инж. Н. П. ИВАНОВ

Главный конструктор завода „Электросила“, Ленинград

В ближайшее пятилетие турбогенераторостроение в Советском Союзе должно подняться на новую, более высокую, ступень. Как и всегда эти коренные усовершенствования в турбогенераторостроении вызваны к жизни необходимостью дальнейшего роста мощности в одной единице. Сокращение количества агрегатов на электростанции в 2—3 раза за счет повышения мощности каждого генератора позволит резко снизить капитальные затраты и эксплуатационные расходы и даст возможность еще более ускорить наращивание мощностей в энергосистемах.

Заводом «Электросила» предпринята разработка не только отдельных сверхмощных машин,

но одновременно проектируется серия турбогенераторов с форсированным водородным охлаждением на мощности до 200 Мвт. Выбор конструкции, технологий и основных эксплуатационных параметров машин новой серии является весьма ответственным. Учитывая, что объем выпуска турбогенераторов достигнет больших размеров, а изготовление их осуществляется на многих заводах, целесообразно стандартизировать конструкцию и технологию производства турбогенераторов.

Применение форсированного охлаждения роторов турбогенераторов газом обеспечивает повышение использования активных материалов

в 1,6 раза, а при одновременном охлаждении статора жидкостью — в два раза по сравнению с турбогенератором мощностью 150 Мвт, имеющим обычное водородное охлаждение. Если же учесть, что новая конструкция турбогенераторов облегчается в основном за счет уменьшения расхода дорогостоящих материалов и что сокращение длины турбогенератора и его веса вызовет сокращение затрат на строительные сооружения, то ясно, что создаются большие возможности по увеличению выпуска турбогенераторов и удешевлению строительства электростанций.

При проектировании машин новой серии возникает ряд вопросов, касающихся конструктивного оформления, геометрии основных размеров машин, технологии их производства и эксплуатации [Л. 1 и 2]. Эти вопросы еще не настолько подготовлены, чтобы возможно было предложить законченные решения. Однако необходимо искать пути для их исследования, имея в виду выявление перспективы развития турбогенераторостроения на новом этапе. В статье главным образом затронуты вопросы проектирования турбогенераторов с форсированным охлаждением, что необходимо для изучения и рассмотрения вопросов строительства электростанций с использованием новых типов оборудования.

За время развития турбогенераторостроения «предельная» мощность турбогенераторов и степень использования материалов непрерывно возрастают. В 1946 г. был изготовлен первый в Советском Союзе турбогенератор с водородным охлаждением, а в 1952 г. — турбогенератор мощностью 150 Мвт. С его выпуском была закончена освоением серия ТВ2, которая включает в себя четыре типа турбогенераторов с водородным охлаждением (таблица). Конструкция турбогенераторов этой серии характеризуется следующими основными данными: генераторы имеют радиальную многоструйную систему охлаждения; охлаждение ротора осуществляется через поверхность бочки ротора; изоляция статорной обмотки — непрерыв-

ная компаундированная, на асфальтовых лаках; изоляция роторной обмотки — мikanит и стеклотекстолит; активная сталь — трансформаторная, горячекатаная, с потерями 1,45 вт/кг<sup>2</sup>, изолированная лаковым покрытием; поковки бандажей и нажимные кольца выполняются из немагнитного материала.

Дальнейшее увеличение мощности турбогенераторов не могло идти путем простого увеличения их размеров, так как уже турбогенератор мощностью 150 Мвт имеет предельные вес и габариты: вес статора равен примерно 210 т при негабаритности для транспорта четвертой степени, роторная поковка, изготовленная из высококачественной стали, весит около 60 т.

В США были сделаны попытки увеличения мощности турбогенератора путем применения алюминиевой обмотки с целью некоторой разгрузки ротора от механических напряжений. Однако эти попытки были оставлены, поскольку потребовалось увеличение размеров поковок и увеличение их веса, при этом также снижалась надежность работы ротора.

Как показали научно-исследовательские работы последних лет, наиболее эффективным средством повышения мощности турбогенераторов является непосредственное охлаждение меди обмоток водородом при давлении газа 2...3 ати или же непосредственное охлаждение проводников жидкостью. Непосредственное охлаждение проводников обмоток водородом может повысить мощность турбогенератора в 1,5...2 раза при сохранении основных размеров машины. При применении жидкостного охлаждения мощность турбогенератора могла бы быть увеличена в еще большей степени.

Конструкции роторов турбогенераторов с непосредственным охлаждением проводников обмоток, проектируемые в настоящее время в ряде стран, в том числе и в СССР, отличаются большим разнообразием, но во всех случаях выяв-

Сравнительные данные турбогенераторов серий ТВ2 и ТВФ  
(вариант расчета)

Тип турбо-генератора	Мощ-ность, Мвт	Напря-жение, кв	Cos φ	О. к. з.	Вес ста-тора, т	Вес рото-ра, т	Полная длина ро-тора, м	Диаметр ротора, м	Критические скорости вращения, об/мин	Вес меди, кг/квт	Вес стали, кг/квт	Общий вес, кг/квт	К. п. д.
ТВ2-30-2	30	6,3	0,8	0,51	66	17	7,7	814	887/2600	0,124	0,714	2,42	98,3
ТВФ-30-2	30	6,3	0,8	0,50	38	12	6,6	750	2000/5400	0,10	0,50	1,73	98,3
ТВ2-60-2	60	10,5	0,8	0,51	99	31	8,5	990	1320/3900	0,109	0,635	2,04	98,56
ТВФ-60-2	60	6,3	0,8	0,50	72	18	7,4	920	1600/4700	0,090	0,47	1,47	98,5
ТВ2-100-2	100	13,8	0,85	0,61	160	43	10,5	1 000	1100/3740	0,11	0,765	2,18	98,78
ТВФ-100-2	100	10,5	0,85	0,526	103	32	8,4	1 000	1470/4220	0,0395	0,416	1,43	98,76
ТВ2-150-2	150	18,0	0,9	0,734	222	59	11,7	1 075	960/3380	0,106	0,73	2,16	98,9
ТВФ-150-2	150	10,5	0,85	0,56	180	42	9,5	1 075	1200/3800	0,030	0,45	1,42	98,85
ТВФ-200-2	200	11,0	0,85	0,586	256	51	11,1	1 075	1100/3560	0,077	0,466	1,37	98,82

ляется общее стремление получить наибольшую мощность ротора как путем повышения эффективности охлаждения, так и путем размещения наибольшего количества меди, не считаясь при этом со сложностью конструкции и трудоемкостью изготовления. Разнообразие конструкций определяется не только разными формами поперечного сечения паза, но также и различным распределением потоков газа по длине машины. Применяются одноструйная осевая, двухструйная осевая и многоструйная системы охлаждения ротора.

Наиболее эффективной является многоструйная система вентиляции, обеспечивающая равномерное охлаждение по длине ротора без применения высоконапорных вентиляторов. В этом случае охлаждение роторной обмотки осуществляется газом, поступающим из зазора генератора. Необходимая скорость газа в коротких каналах обмотки ротора обеспечивается специальными заборниками, размещенными на поверхности бочки ротора. Такая система была применена фирмой Дженирал Электрик и дала хорошие результаты. Однако конструктивное оформление этой системы вентиляции может вызвать снижение надежности машины и создать технологические трудности при ее изготовлении. В частности, конструкция фирмы Дженирал Электрик предусматривает глубокое сверление зубцов ротора для подачи и выпуска охлаждающего газа, в связи с чем нарушается целостность пазовой изоляции ротора.

Конструкция ротора завода «Электросила» имеет следующие особенности. Холодный газ через отсеки статора поступает в зазор и далее в ротор. После охлаждения пазовой части катушек ротора газ выходит в зазор через винтовые канавки по боковым сторонам катушек в тех местах, где отсеки статора работают на выход газа. Охлаждение лобовых частей осуществляется газом, циркулирующим по каналам внутри прозодников.

Необходимая скорость газа в лобовых частях обеспечивается главными вентиляторами и вентилирующим действием лобовых частей обмотки ротора. Испытания ротора этой конструкции в турбогенераторе, имевшем мощность статора 30 Мвт, дали результаты, показавшие, что по ротору мощность турбогенератора могла бы быть увеличена в 2—3 раза при среднем перегреве обмотки ротора около 90°С [Л. 3].

Результаты соответствующего пересчета для генератора мощностью 150 Мвт показывают, что в новом исполнении мощность ротора может быть увеличена со 166 до 470 Мва. Такой пересчет производится в соответствии с действующими нормами загрузки турбороторов при неизменном значении статической перегружаемости машины.

Необходимо отметить, что опытный ротор мощностью 30 Мвт имел прямоугольные пазы. Выполнение же пазов трапецидального сечения позволяет увеличить количество меди обмотки примерно на 25%. Это мероприятие даст возможность увеличить мощность ротора турбогенератора

на 150 Мвт еще на 12%, т. е. довести ее до 500 Мва.

Указанные значения мощностей получены в предположении среднего перегрева обмотки ротора 90°С. При этом максимальная температура перегрева обмотки ротора в некоторых точках может достигнуть  $\frac{90}{0,90} = 100^{\circ}\text{C}$  \*, что при температуре холодного газа 40°С соответствует максимальной местной температуре нагрева 140°С.

В роторах с непосредственным охлаждением меди мikanитовая изоляция обмотки заменяется стеклотекстолитовой, которая имеет более высокую механическую прочность, необходимую в данном случае для предохранения изоляции от выветривания. Вместе с тем эта изоляция более чувствительна к повышению температуры, поэтому пределы ее нагрева следует ограничить температурой 130°С, допускаемой для изоляции класса В. Таким образом, допустимый средний перегрев обмотки ротора должен быть снижен до 80°С; соответственно несколько снизится мощность турбогенератора по ротору.

Исследования температурных полей и напряжений сжатия меди обмотки ротора 150 Мвт с обычным водородным охлаждением показали, что максимально возможные напряжения сжатия в меди равны приблизительно 1500 кг/см<sup>2</sup>. Для мягкой электролитической меди такие напряжения велики, однако, находясь под действием сжимающих напряжений, медь со временем упрочняется. Опыт эксплуатации турбогенераторов мощностью 100 и 150 Мвт показал, что остаточных деформаций роторных обмоток не наблюдается, несмотря на наличие относительно высоких напряжений в меди. Постоянный же режим работы генераторов и редкие остановки их благоприятно сказываются на стабильности размеров обмотки в лобовых частях, где отражаются накапливающиеся деформации меди в пазу.

При максимальной температуре обмотки ротора 130°С и средней температуре стали ротора 75°С напряжения сжатия меди в роторе турбогенератора с форсированным охлаждением также будут приблизительно равны 1500 кг/см<sup>2</sup>. Имея, однако, в виду необходимость повышения надежности работы турбогенераторов при всех возможных режимах эксплуатации, следует считать целесообразным для роторных обмоток применять легированную упрочненную медь. В роторах с форсированным охлаждением перепады температур в бочке ротора значительно снижаются вследствие того, что тепло отводится непосредственно от меди обмотки почти без участия стали ротора. Это обстоятельство ограничивает возникновение добавочных растягивающих напряжений в бочке ротора, а при несимметричном распределении перепадов температур — и тепловую разбалансировку ротора.

Поскольку высота столба меди обмотки ротора с форсированным охлаждением не больше,

\* Коэффициент неравномерности 0,90 определен экспериментально.

чем в наиболее крупных машинах обычной конструкции, нет оснований опасаться нарушения изоляции вследствие высоких давлений, тем более, что мikanитовая изоляция, применяемая в нормальных машинах в качестве витковой и корпусной изоляции, в роторах с форсированным охлаждением заменяется стеклотекстолитовой, имеющей большую механическую прочность. Местные нагрузки на лобовые части, обусловленные центробежными силами, несколько повышаются, поскольку проводники обмотки имеют коробчатое сечение. Однако повышенная прочность легированной меди с избытком компенсирует некоторое увеличение нагрузок.

Повышение мощности статора не может быть осуществлено за счет существенного увеличения магнитных нагрузок. Единственным возможным способом является увеличение плотности тока и линейной токовой нагрузки статора. В соответствии с этим необходимо улучшить охлаждение обмоток статора, что может быть достигнуто либо снижением номинального напряжения, либо применением непосредственного охлаждения проводников обмотки статора.

В машинах мощностью до 200 Мвт имеется возможность увеличения линейной токовой нагрузки статора путем повышения теплопроводности изоляции и увеличения коэффициента заполнения паза, достигаемого при снижении номинального напряжения. При этом плотность тока и термическую устойчивость обмотки статора удается сохранить такими же, как и в существующих машинах.

Сравнительные данные для генераторов нормального исполнения и генераторов с форсированным охлаждением, у которых непосредственное охлаждение проводников имеет только обмотка ротора (серия ТВФ), приведены в таблице.

Приведенные данные показывают, что увеличение номинального напряжения статора при возрастании мощности генераторов нормального исполнения не вызывает снижения уровня использования генератора, так как он определяется ротором. При форсированном охлаждении ротора уровень использования статора зависит от величины напряжения, а расход материалов и стоимость турбогенератора на 1 ква с увеличением напряжения возрастают.

Влияние величины напряжения обмотки статора на уровень использования активных материалов характеризуется следующими данными мощностей генераторов с обычным водородным охлаждением статора, имеющих одинаковые габариты.

Напряжение, кв . . .	6,3	11,0	13,8	18,0
Мощность, Мвт . . .	230	200	170	140

Повышение напряжения статора для генераторов мощностью 200 Мвт, а также увеличение мощности генераторов сверх 200 Мвт вызывают необходимость применения непосредственного охлаждения также и для статорных обмоток. Здесь не может быть такого разнообразия вариантов охлаждения, как это имеет место

для роторов, что объясняется тем, что статорная обмотка может иметь только одностороннюю аксиальную систему охлаждения.

Большие перекосы температур, которые получаются при непосредственном охлаждении обмотки статора газом, а также большие потери мощности на вентиляцию заставляют сделать вывод о целесообразности применения жидкостного охлаждения статорных обмоток.

Фирма Дженирал Электрик в 1956 г. построила турбогенератор мощностью 260 Мвт при номинальном напряжении 18 кв с масляным охлаждением статорной обмотки, а фирма Метро-Виккерс — опытный турбогенератор мощностью 37,5 Мвт на напряжение 11,8 кв с водяным охлаждением статорной обмотки. Испытания этих машин показали, что по нагреву обмотки статора имеют большие запасы при незначительных затратах, связанных с их охлаждением. Очень важно, что при жидкостном охлаждении статорных обмоток может быть применена нормальная, уже освоенная изоляция, в частности непрерывная компаундированная изоляция на асфальтовых лаках.

В настоящее время для проверки конструкции и уточнения технологии производства изготавливается опытный статор с жидкостным охлаждением мощностью 37,5 Мвт при номинальном напряжении 6 кв. Предельная мощность генератора с жидкостным охлаждением не будет в столь сильной степени зависеть от величины номинального напряжения, как это имеет место для машин без непосредственного охлаждения обмотки статора, однако и здесь повышение напряжения статора вызывает удорожание генератора и некоторое снижение надежности его работы.

Таким образом, для турбогенераторов мощностью 300 Мвт и выше по условиям нагрева обязательно применение непосредственного охлаждения статорной обмотки. Для турбогенераторов мощностью 100 Мвт и ниже применение непосредственного охлаждения статора представляется нецелесообразным. Непосредственное охлаждение обмоток статоров турбогенераторов мощностью 200 Мвт может быть оправдано лишь при одновременном существенном уменьшении габаритов генераторов.

Вопрос об уровне номинального напряжения статорной обмотки при непосредственном охлаждении должен быть решен в зависимости от степени использования турбогенератора, его стоимости и возможной конструкции распределительного устройства.

При жидкостном охлаждении статорной обмотки и при охлаждении ротора с забором охлаждающего газа из зазора общая компоновка системы вентиляции сохраняется такой же, как и для турбогенераторов серии ТВ2. Она остается симметричной, не требующей вентиляторов высокого давления. Жидкостное охлаждение статора может внести некоторые поправки в отношении количества газа, пропускаемого через радиальные статорные каналы. В соответствии с этим целесообразно пересмотреть вопрос о ширине и количестве радиальных каналов в статоре. Требует

своего разрешения вопрос о типе вентиляторов для осуществления циркуляции газа в машине.

Оевые вентиляторы имеют более высокий к. п. д., однако при этом не обеспечивается равномерное распределение газа по зазору: крайние отсеки получают максимальное количество охлаждающего газа. При применении центробежных вентиляторов, которые дают направление струи газа к периферии статора, обеспечивается более равномерное распределение газа в зазоре. При этом желательно, чтобы диаметр вентилятора не превышал диаметра бандажных колец.

Общая компоновка системы охлаждения тур-

богенератора определяется тем, что в системе уплотнения является уплотнение вала. Оно выполняется двух основных видов: торцовое и цилиндрическое. Оба эти типа уплотнений применяются заводом «Электросила». Наилучшие результаты были получены с торцевым типом уплотнения [Л. 3]. Для турбогенераторов с повышенным давлением газа в корпусе машины завод «Электросила» ориентируется на применение торцовых уплотнений. В то же время не прекращаются работы по усовершенствованию цилиндрических уплотнений, для которых основные трудности заключаются в сохранении стабильного по величине масляного зазора при всех режимах работы турбогенератора.

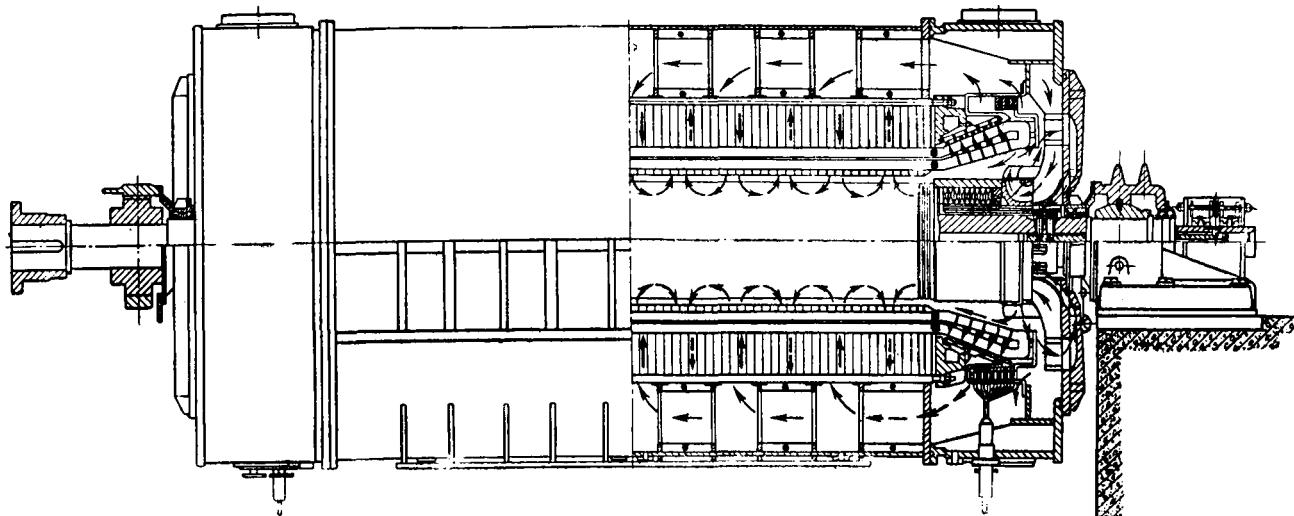


Рис. 1. Система охлаждения турбогенератора 200 Мвт.

— холодный газ; - - горячий газ.

богенератора мощностью 200 Мвт с обычным охлаждением обмотки статора и непосредственным водородным охлаждением обмотки ротора показана на рис. 1. Газоохладители расположены в зоне лобовых частей, что дало возможность выполнить корпус статора съемными концевыми камерами, в которых монтируются газоохладители. Такая компоновка дает преимущества для транспортировки, поскольку габариты средней части статора и его вес значительно уменьшаются.

Остается неизученным вопрос о потерях мощности на вентиляцию. Отсутствие специальных высоконапорных вентиляторов снижает эти потери, однако наличие заборников на поверхности ротора несколько увеличивает потери на трение и закручивание газа в зазоре. Необходимо выполнить соответствующие экспериментальные работы для более точного определения расхода мощности на вентиляцию.

Герметичность системы охлаждения определяется газоплотностью корпуса статора, его разъемных деталей, уплотнения вала при выходе его из щитов, а также газоплотностью аппаратуры автоматики питания генератора водородом. Герметичность корпуса статора обеспечивается при соответствующей технологии изготовления, а также достигается пооперационными проверками в процессе сборки. Наиболее важным элемен-

том в системе уплотнения является уплотнение вала. Оно выполняется двух основных видов: торцовое и цилиндрическое. Оба эти типа уплотнений применяются заводом «Электросила». Наилучшие результаты были получены с торцевым типом уплотнения [Л. 3]. Для турбогенераторов с повышенным давлением газа в корпусе машины завод «Электросила» ориентируется на применение торцовых уплотнений. В то же время не прекращаются работы по усовершенствованию цилиндрических уплотнений, для которых основные трудности заключаются в сохранении стабильного по величине масляного зазора при всех режимах работы турбогенератора.

Генераторы с форсированным охлаждением имеют меньшие габариты, чем генераторы той же мощности с обычным охлаждением. При снижении габаритов может быть уменьшен как диаметр ротора, так и его длина. Для сокращения расхода конструктивных материалов и снижения отношения полного веса генератора к весу активного материала целесообразно уменьшать диаметр машины. С другой стороны, уменьшение длины машины приводит к сокращению размеров фундамента и уменьшению площади машинного зала, что существенно снижает затраты на строительство электростанций.

В турбогенераторах с форсированным охлаждением потери мощности на возбуждение относительно возрастают и оказывают большое влияние на к. п. д. машины. Поскольку относительная величина потерь на возбуждение обратно пропорциональна диаметру ротора, то для турбогенераторов с форсированным охлаждением по сравнению с турбогенераторами нормального исполнения целесообразно уменьшать отношение длины ротора к его диаметру, т. е. сокращать активную длину машины, несмотря на некоторый проигрыш в общем весе машины. Эти соображения не относятся к машине предельной мощности, для которой диаметр ротора выбирается, исходя из возможных механических нагрузок.

На рис. 2 указаны статические прогибы роторов и критические скорости турбогенераторов серий ТВФ. Из этих данных видно, что у турбогенераторов с форсированным охлаждением вследствие сокращения активной длины роторов повышается уровень критических скоростей.

Для разработки методов снижения 100-периодной вибрации сердечника статора был изготовлен в натуральную величину макет, на котором производились исследования сердечников, имевших как различную конструкцию, так и различную технологию сборки. В результате этих исследований было разработано и опробовано эластичное крепление сердечника статора к корпусу, которое будет применено в турбогенераторе мощностью 200 Мвт. Снижение уровня вибраций показано на резонансных кривых (рис. 3), снятых на макете.

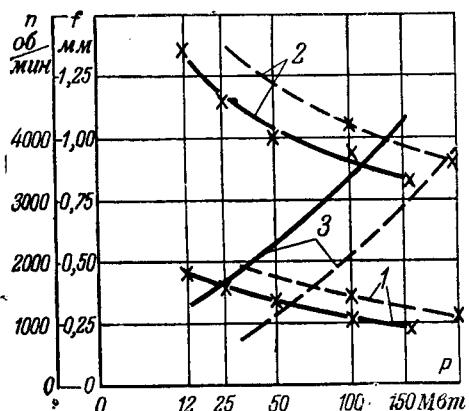


Рис. 2. Статические прогибы и критические скорости роторов.

— обычное охлаждение ротора; — — — форсированное охлаждение ротора; 1 — первая критическая скорость; 2 — вторая критическая скорость; 3 — прогиб ротора.

В связи с увеличением тока возбуждения, который может достигать 3 ка, возникает необходимость применения новых быстродействующих систем возбуждения. Заводом «Электросила» разрабатываются две новые схемы возбуждения. Первая — это система независимого возбуждения с машинами переменного тока повышенной частоты и сухими выпрямителями. Эта система возбуждения была опробована на опытном генераторе 30 Мвт и дала удовлетворительные результаты.

Вторая система возбуждения предусматривает установку мотор-генератора с асинхронным двигателем и маховиком.

Внедрение турбогенераторов с форсированным охлаждением потребовало применения ряда специальных профилей из различных сплавов. Применение непосредственного охлаждения статорных обмоток газом вызывает необходимость изготовления тонкостенных квадратных трубок из немагнитной стали. При жидкостном охлаждении статорных обмоток необходимо применять тонкие прямоугольные медные трубы. Для повышения предела текучести меди и большей ее температурной стойкости в роторных обмотках с повышен-

ными механическими напряжениями в меди требуется применение медных проводников с добавкой серебра. Вместе с тем, имея в виду дальнейший рост мощностей турбогенераторов, в ближайшем будущем потребуются улучшение механических свойств роторных поковок примерно на 10% и увеличение их веса на 30...40%. Особенно остро стоит вопрос о повышении качества материала бандажных колец и в первую очередь их пластических свойств. В настоящее время бандажные поковки для крупных генераторов изготавливаются из двух частей, что обуславливает дополнительный расход металла на обработку и сопряжение этих половин, а также вызывает осложнения в эксплуатации.

Турбогенераторы с форсированным охлаждением имеют повышенную реактивность и значительно большую (до 2 раз) нагрузку статорных обмоток по сравнению с турбогенераторами, имеющими обычное водородное охлаждение, что обуславливает повышение нагрева торцевых частей статора. Уменьшение геометрических размеров машины и главным образом размеров ротора отражается как на регулировании турбины, так и на допустимости тех ненормальных режимов, которые в настоящее время разрешаются в эксплуатации. В связи с этим становится необходимым изучение поведения таких турбогенераторов в системе и разработка для них новых правил эксплуатации.

При непосредственном охлаждении обмоток могут возникнуть значительные неравномерности нагрева в различных точках обмоток, и если руководствоваться существующими методами измерения перегревов обмоток, в частности методом сопротивления, то перегревы в наиболее нагретых точках не будут обнаружены. Поэтому необходимо уточнить методы измерений, позволяющие выявлять местные максимальные перегревы обмоток.

По действующим в настоящее время нормам к. п. д. определяется при условной температуре обмоток 75° С. Однако температура обмоток ма-

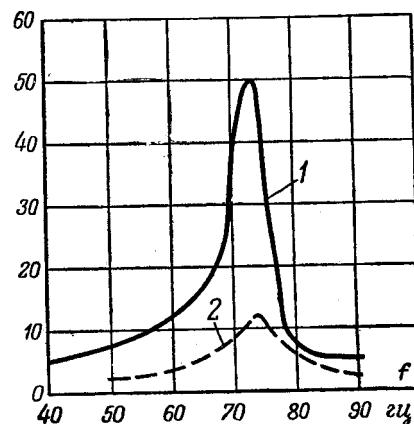


Рис. 3. Зависимость радиальной вибрации корпуса статора от частоты вращения магнитного поля.

1 — при обычном закреплении сердечника; 2 — при упругом закреплении сердечника.

# Развитие электроэнергетики Румынской Народной Республики

Инж. НИКОЛАЙ ГЕОРГИУ,

Заместитель Министра тяжелой промышленности,  
руководитель Электроэнергетического департамента РНР

После освобождения нашей родины при помощи доблестной Советской Армии 23 августа 1944 г. перед румынским народом встал ряд тяжелых и неотложных задач. Надо было восстановить разрушенные во время войны промышленность и транспорт, осуществить аграрную реформу и ликвидировать экономический хаос. Быстрейшее решение этих задач требовало максимального сплочения трудящихся нашей страны, напряжения их сил. Несмотря на это, уже в 1945 г. Национальная конференция Румынской Коммунистической партии в числе других неотложных проблем выдвинула проблему электрификации страны.

Под руководством Румынской Рабочей партии рабочий класс приступил к напряженной работе по восстановлению, а затем развитию народного хозяйства.

После национализации в 1948 г. промышленных предприятий, транспортных средств и банков развитие промышленности нашей страны шло невиданными в прошлом темпами.

В годы первой пятилетки (1951—1955 гг.) коренным образом была изменена структура промышленности нашей страны. К концу пятилетки производство средств производства почти в 4 раза, а производство предметов широкого потребления в 3 раза превысили уровень 1948 г. Были созданы не существовавшие ранее в нашей стране отрасли промышленного производства, а именно: производство горного и нефтяного оборудования, тракторов и сельскохозяйственных машин, электротехнических изделий и энергетического оборудования, автотранспортных средств, трамваев и троллейбусов, различных видов химических изделий и т. п.

шин с форсированным охлаждением, особенно при применении жидкостного охлаждения, может резко отличаться от температуры обмоток существующих машин. Поэтому сохранение условной рабочей температуры 75°С для определения к. п. д. может дать неправильную картину потерь в турбогенераторах. В связи с этим при подсчете к. п. д. необходимо учитывать реальные температуры, получаемые при испытаниях.

Существующими нормами допустимая мощность генератора определяется из условия перегрева обмоток относительно температуры холодного воздуха или газа. При замкнутом охлажде-

ния создана энергетическая база, в которой нуждалась и еще нуждается наша промышленность. В настоящее время установленная мощность электростанций РНР превышает в 2 раза уровень 1945 г., а годовая выработка электроэнергии в 5 раз.

Во второй пятилетке (1956—1960 гг.), на электростанциях будет установлена мощность свыше 600 Мвт. В 1960 г. предусмотрено выработать свыше 7 млрд. квт·ч электроэнергии.

Чтобы возможно было оценить прогресс, достигнутый в электроэнергетике РНР, остановимся кратко на том наследстве, которое получила Народная Румыния от буржуазно-помещичьего строя.

В 1938 г. мощность, установленная на всех электростанциях страны, составляла 500 Мвт, причем менее половины этой мощности приходилось на долю коммунальных электростанций. Годовая выработка электроэнергии в 1938 г. составляла лишь 1 148 млн. квт·ч. Среднегодовой прирост потребления электроэнергии в то время не превышал 7%. Для сравнения укажем, что в годы первой пятилетки среднегодовой прирост потребления электроэнергии составил 15,5%. В период, предшествовавший второй мировой войне, годовое число часов использования мощности, установленной на электростанциях коммунального назначения, колебалось в пределах 1 534 ... 2 160, а на электростанциях промышленного назначения — в пределах 1 590 ... 2 340. Для сравнения отметим, что за годы второй пятилетки годовое число часов использования мощности, установленной на электростанциях, превысит 4 000.

Несмотря на то, что в годы второй мировой войны в связи с ростом военного производства

ний генераторов, особенно при жидкостном охлаждении, мощность генераторов должна определяться по перегреву обмоток относительно температуры охлаждающего агента, поступающего извне.

## Литература

1. Форсированное охлаждение турбогенераторов водородом. Сборник переводов статей. Госэнергоиздат, 1956.
2. Н. П. Иванов. Развитие турбогенераторостроения. ВЭП, № 2, 1956.
3. В. В. Титов и З. Б. Коган. Ротор турбогенератора с непосредственным охлаждением проводников обмотки. Электричество, № 6, 1957.

[16.7. 1957]



установленная на электростанциях мощность выросла до 720 Мвт (1944 г.), годовая выработка электроэнергии за эти годы понизилась до 1 100 млн. квт·ч. В первые пять лет после войны мощность, установленная на электростанциях коммунального и промышленного назначения, не подверглась существенному изменению, а годовая выработка электроэнергии превысила 2 млрд. квт·ч (1949 г.).

Быстрое развитие промышленных предприятий после их национализации в 1948 г. привело к увеличению потребления электроэнергии для нужд производства. В 1950 г. коммунальные электростанции в часы максимальной нагрузки работали без резерва, а в некоторых районах страны приходилось ограничивать потребление электроэнергии. В то время менее 30% электростанций по установленной мощности были объединены в энергосистемы.

В 1950 г. из общей годовой выработки электроэнергии 73% получено на станциях с паровыми турбинами, 19% — на станциях с двигателями внутреннего сгорания и 8% — на гидроэлектростанциях.

Число часов использования средней установленной мощности в 1950 г. не превосходило 2 850. Удельный расход топлива на электростанциях с паровыми турбинами составлял 0,740 кг условного топлива на один выработанный киловатт-час.

План электрификации страны, принятый Пленумом Центрального Комитета Румынской Рабочей партии 26 октября 1950 г., открыл новые перспективы в области электрификации страны, развития электроэнергетики, подъема технического уровня эксплуатации энергетических установок, улучшения их технико-экономических показателей, создания многочисленных новых кадров, работающих в этой области народного хозяйства.

За годы первой пятилетки установленная мощность электростанций повысилась на 540 Мвт и достигла 1 300 Мвт, а располагаемая мощность удвоилась. Таким образом, электроэнергетика опередила все остальные отрасли промышленности. Годовая выработка электроэнергии в 1955 г. составила 4 350 млн. квт·ч. За пятилетие годовое потребление электроэнергии удвоилось и в 4 раза превзошло потребление 1938 г.

За пятилетие развились и укрепились проектные и строительно-монтажные организации электроэнергетического ведомства, благодаря чему они в состоянии осуществлять более быстрыми темпами крупные и тяжелые работы по сооружению гидро- и теплоэлектростанций, подстанций и линий электропередачи.

За годы пятилетки электротехническая промышленность РНР превратилась в мощную отрасль тяжелой промышленности, обеспечивающую промышленные предприятия необходимым оборудованием. Годовое производство электротехнической промышленности с 1950 г. по 1955 г. возросло в 4 раза.

В настоящее время электротехническая промышленность РНР выпускает силовые трансфор-

маторы мощностью до 20 Мва и напряжением до 110 кв, синхронные компенсаторы и мощные электродвигатели высокого напряжения.

В течение первой пятилетки введено в эксплуатацию 20 новых электростанций, главные из которых (Овидиу, Комэнешть, Сынджорджиу де Пэдуре, Парошень) укомплектованы оборудованием за счет поставок из Советского Союза. Перечисленные электростанции могут быть быстро расширены путем установки дополнительных турбоагрегатов и котлов.

Из числа новых электростанций, пущенных за 6 лет (1951—1956 гг.), четыре теплоэлектростанции будут иметь окончательную мощность от 120 до 250 Мвт; на них установлены турбогенераторы мощностью от 20 до 50 Мвт. На рис. 1 показана одна из таких теплоэлектростанций — Дойчешть.

За годы первой пятилетки были сооружены и введены в эксплуатацию гидроэлектростанции Мороень и Саду, оборудование которых полностью поставлено советской промышленностью.

В первом пятилетии достигнут существенный прогресс в области развития электрических сетей, особенно напряжением 110 кв. Количество линий электропередачи напряжением 110 кв, сооруженных за пятилетие, в 7 раз превышает число линий этого напряжения, существовавших в 1950 г.

Недавно была введена в эксплуатацию линия 110 кв, связывающая Ардял с Олтенией и проходящая через Карпатские горы на высоте свыше 1 300 м над уровнем моря, а также высоковольтная линия, пересекающая юг Молдовы до Галаца.

В настоящее время общая протяженность электросетей превышает 15 тыс. км, из которых свыше 30% сооружены за период 1950—1956 гг.

После национализации для электрических сетей приняты следующие номинальные напряжения: 0,38; 0,22; 0,5; 3; 6; 10; 35; 110; 220 кв. Кроме того, допускаются напряжения 60, 25 и 15 кв, так как некоторые промышленные районы уже к тому времени имели сравнительно развитые сети этих напряжений.

Напряжения 5 и 6 кв (особенно последнее) применяются для городских распределительных сетей и сетей крупных промышленных предприятий. В настоящее время изучается возможность перевода кабельной сети столицы РНР с 5 на 10 кв.

Напряжение 15 кв оказалось наиболее подходящим для сельской электрификации и для средних по величине населенных пунктов. На это напряжение, имеющее большие преимущества перед напряжением 10 кв, налажено производство электрической аппаратуры.

В области сооружения линий электропередачи в 1952 г. были приняты новые, более целесообразные и приспособленные к климатическим условиям нашей страны решения, осуществление которых позволило снизить стоимость 1 км линии. В последние годы имеется тенденция к увеличению сечения проводов, а также к увеличению пролетов с целью сокращения количества опор и изоляторов.

С 1952 г. получили широкое применение на линиях низкого и высокого напряжения до 110 кв

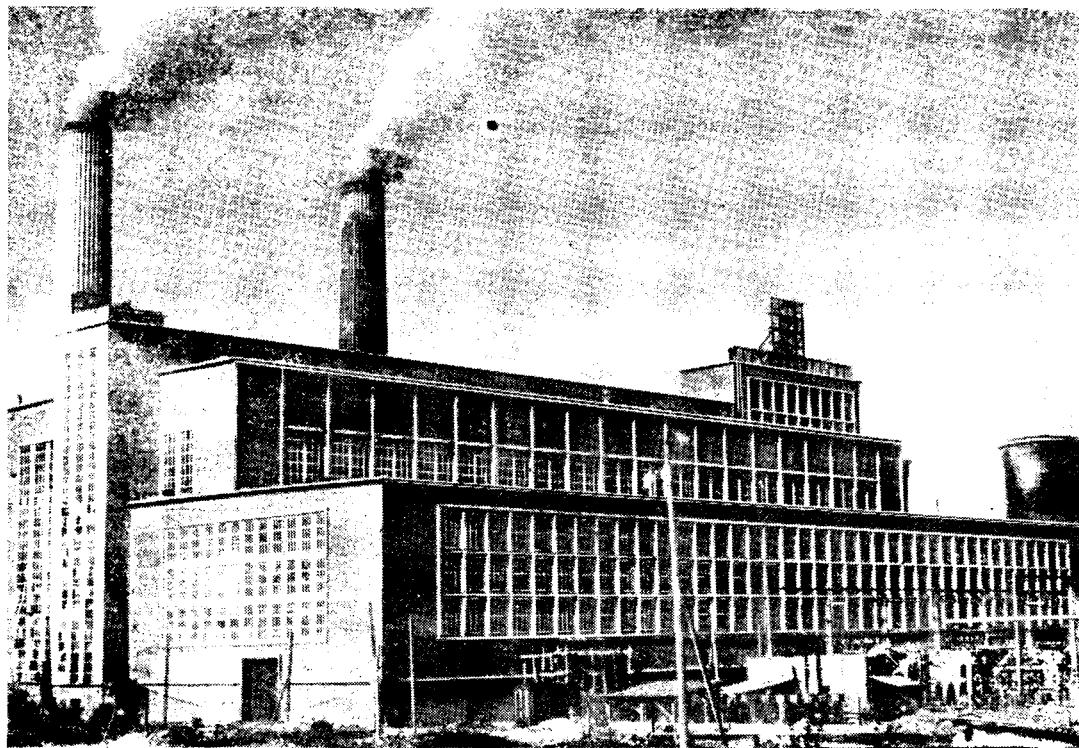


Рис. 1. Теплоэлектроцентраль Дойчешть.

включительно центрифугированные железобетонные опоры (рис. 2 и 3). Изготавляются эти опоры на заводе сборных железобетонных изделий электроэнергетического ведомства. Центрифугирующие машины, установленные на заводе, изготовлены в РНР.

Благодаря большим преимуществам центрифугированного бетона его начали применять также для изготовления порталов открытых подстанций (рис. 4). Эти порталы собираются из отдельных элементов опор, связанных хомутами и траперсами, выполнеными также из центрифугированного бетона. Подстанции, выполненные на центрифугированных бетонных опорах, имеют вполне приятный вид. Начиная с 1956 г., порталы этого типа применялись преимущественно на подстанциях 35/6 и 110/35/6 кв.

Были приняты также новые решения в отношении проектирования трансформаторных подстанций напряжением 110 и 55 кв, направленные главным образом на снижение их стоимости. Наряду с широким применением сборных бетонных изделий ведется интенсивная работа по составлению типовых проектов подстанций всех типов вплоть до трансформаторных пунктов (ТП). При сооружении электрических сетей — как воздушных, так и кабельных — широко применяется механизация, которая к настоящему времени достигла современного уровня.

Широкое развитие сетей 110 кв в первом пятилетии позволило объединить ряд крупных тепло- и гидроэлектростанций на параллельную работу и сделать существенный шаг в направлении создания единой национальной энергосистемы, которая

в настоящее время охватывает Мунтению, Центральный и Юго-Восточной Ардял. Теперь почти 70% электростанций РНР (по установленной мощности) работают на общую сеть.

Раздельно с национальной энергосистемой работает энергосистема Молдова, основными электростанциями которой являются ТЭЦ Борзешть и ТЭЦ Комэнешть. Однако в будущем году и она будет связана с национальной энергосистемой линией 110 кв.

К концу второй пятилетки в энергосистеме Молдова будет пущена гидроэлектростанция Биказ имени В. И. Ленина мощностью 210 Мвт, на строительстве которой ежегодно работает 5 тыс. трудящихся нашей страны. Она является основной гидроэлектростанцией, предусмотренной десятилетним планом электрификации. Общая строительная высота ее плотины равна 127 м, а емкость водохранилища, которое образуется после сооружения плотины, — 1,2 млрд. м<sup>3</sup>. Вода к зданию гидроэлектростанции будет подводиться по туннелю длиной около 5 км, внутренним диаметром 7 м. ГЭС Биказ имени В. И. Ленина будет вырабатывать ежегодно свыше 450 млн. квт·ч.

В результате роста энергетической базы в годы первой пятилетки и в 1956 г. степень энерго вооруженности труда в промышленности РНР повысилась с 1 480 квт·ч на одного рабочего в 1948 г. до более чем 3 тыс. квт·ч в 1956 г.

Благодаря широкому строительству сетей население некоторых заброшенных и отсталых в период буржуазно-помещичьего строя районы Молдовы и Олтении получило возможность пользоваться

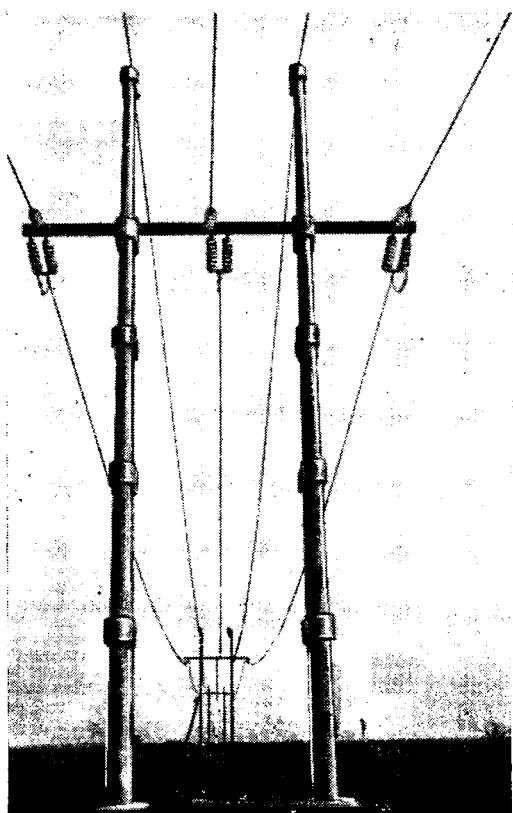
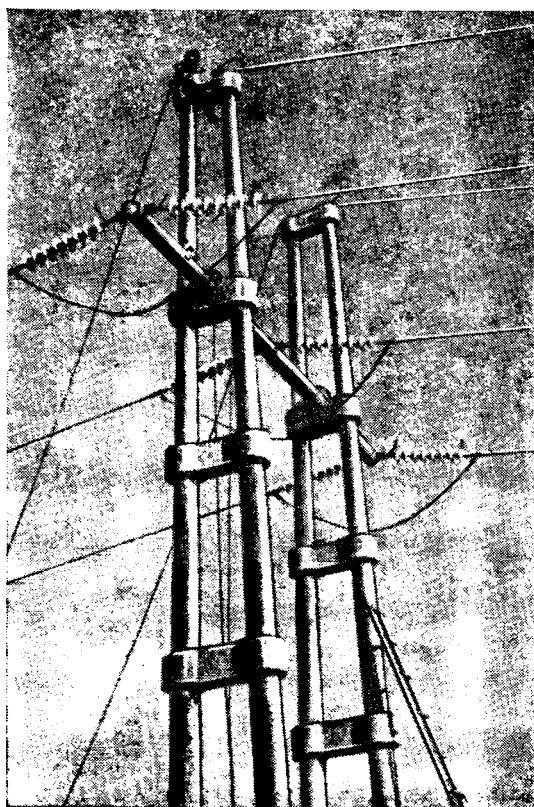


Рис. 2. Центрифугированные бетонные опоры линии электропередачи 110 кв.

ваться всеми благами, какие дает человеку электроэнергия.

В годы первой пятилетки значительный прогресс был достигнут в области сельской электрификации.

В предвоенный период было электрифицировано лишь небольшое количество сел, расположенных в основном вблизи нескольких крупных городов или промышленных центров. Подавляющее же большинство сел страны не получало электроэнергии. До 1944 г. не более 5% населения страны имело возможность пользоваться электроэнергией.

К концу 1955 г. число электрифицированных сел достигло 1 500 против 450, электрифицированных до 1949 г. За 6 лет (1951—1956 гг.) было электрифицировано сел вдвое больше, чем за последние 60 лет существования буржуазно-помещичьей Румынии (1884—1944 гг.).

Сельская электрификация осуществлялась в первую очередь путем присоединения к существующим районным сетям. Таким образом, было электрифицировано примерно 70% общего количества электрифицированных сел.

Районные сети, обслуживающие сельскую электрификацию, работают в основном на напряжении 15 кв. Некоторые новые линии для целей сельской электрификации сооружаются на напряжении 35 кв.

Для сельской электрификации до 1955 г. использовалась исключительно трехфазная систе-

ма. В 1955 г. была испытана и начала внедряться система два провода — земля.

В районах, удаленных от существующих электрических сетей, для электрификации сел сооружаются небольшие гидроэлектростанции сельско-

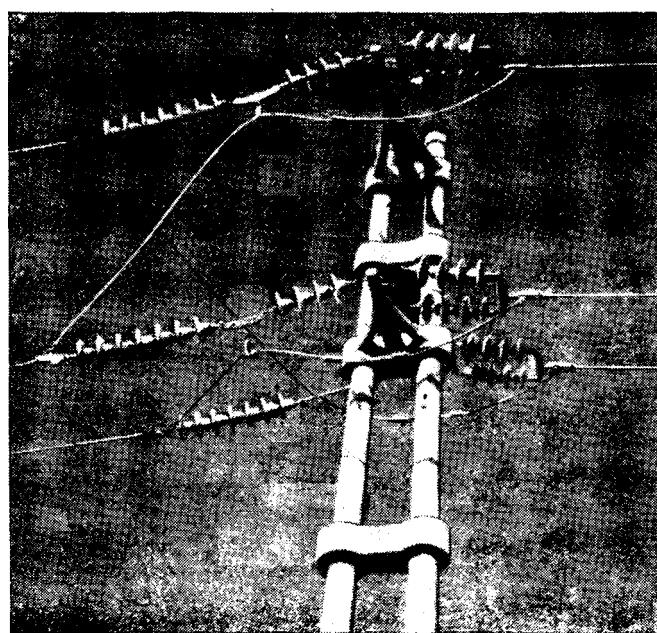


Рис. 3. Центрифугированная анкерная бетонная опора линии 110 кв с транспозицией фаз.

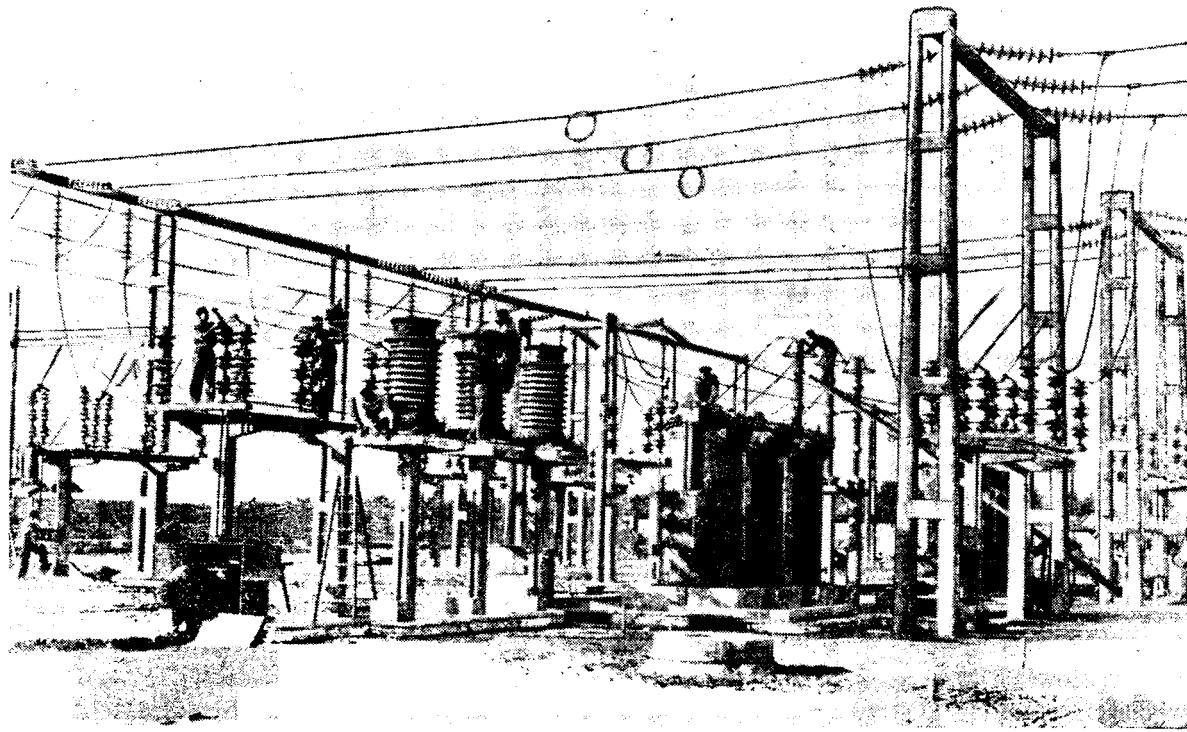


Рис. 4. Открытая подстанция 110/35/6 кв на бетонных центрифугированных порталах.

го типа и теплоэлектроцентрали на местном топливе. На сельских ГЭС применяются пропеллерные турбины, турбины Фрэнсиса или Банки, изготовленные местными мастерскими или промышленностью. Сельские ТЭЦ в качестве топлива используют отходы лесной промышленности, газ метан и пр.

Результатом развития сельской электрификации явился рост потребления электроэнергии в сельских местностях. Сельские жители используют электроэнергию не только для осветительных нужд, радиоприемников и электробытовых приборов, но и в сельскохозяйственном производстве. Электромолотьба начала применяться в довольно широком масштабе еще с 1949 г. С тех пор число электрифицированных токов из года в год увеличивалось. Кроме этого, получили распространение электрифицированные насосные для орошения овощных культур, осушения и пр. Электрифицированы многие МТС, совхозы и колхозы, потребляющие ежегодно значительное количество электроэнергии.

За последние годы много сделано для повышения технического уровня эксплуатации энергетических установок.

В начале первой пятилетки технический уровень электростанций и подстанций был таким же, что и в 1940 г. Параметры применяемого на электростанциях пара были низкими (давление 12 ... 14 ата и температура 300 ... 350° С), и только на небольшом числе электростанций применялся пар давлением 30 ата и температурой 375 ... 400° С.

В период 1952—1956 гг. были введены в эксплуатацию электростанции с более высокими параметрами пара, с регенеративным подогревом питательной воды и с современными установками для очистки добавочной воды. В 1954—1955 гг. были установлены и введены в эксплуатацию котлы ИПРОМ и турбоагрегаты отечественного производства (Решница).

К концу первой пятилетки были пущены первые агрегаты высоких параметров. На ТЭЦ Сынджорджиу де Пэдуре, Парошень и Борзешть установлены и введены в эксплуатацию агрегаты, использующие пар давлением 110 ата и температурой 500° С с регенеративным подогревом воды до 215° С и имеющие современные установки водоподготовки и питания котлов. Эти установки представляют значительное достижение нашей энергетической техники. В установках, которые будут входить в строй во втором пятилетии, предполагается использовать пар давлением 140 ата и температурой 550 ... 650° С.

На теплоэлектроцентралях, работающих на низкокачественных углях, было применено скижание угольной пыли, что позволило использовать уголь низкой теплотворной способности (1 900—2 500 ккал/кг).

С 1953 г. была введена Инструкция по технической эксплуатации энергетических установок, которая также сыграла свою роль в повышении технического уровня их эксплуатации.

В результате проведения капитальных ремонтов на более высоком техническом уровне значительно повысилась располагаемая мощность элек-

тростанций. В ближайшее время она будет лишь на 6% меньше общей установленной мощности электростанций.

Особенно большие успехи были достигнуты по снижению удельного расхода топлива и расхода энергии на собственные нужды электростанций. В этом, в частности, большую роль сыграло улучшение распределения нагрузки между станциями, объединенными в энергосистемы, а на электростанциях — между турбоагрегатами.

В результате повысились экономические показатели работы электростанций. В 1955 г. себестоимость электроэнергии была снижена на 20,5% по сравнению с себестоимостью, достигнутой в 1950 г.

В деле более оптимального распределения нагрузки между электростанциями решающую роль сыграло введенное в 1952 г. диспетчерское управление. В настоящее время действуют два районных диспетчерских пункта, управляющие системами Ардял—Мунтения и Молдова. С 1955 г. начала действовать национальная диспетчерская служба, находящаяся в электроэнергетическом ведомстве.

Диспетчеры производят ежедневное распределение нагрузки и составляют программу выработки и обмена энергией в зависимости от требований энергосистем. В 1956—1957 гг. районные диспетчерские пункты и национальная диспетчерская служба сделали очень много для повышения экономических показателей работы станций и сетей.

В 1956 г. было введено высокочастотное телемерение с применением приборов отечественного производства. В настоящее время телемерения (трех величин) осуществлены на гидроэлектростанции, регулирующей частоту в национальной объединенной энергосистеме. Недавно были выполнены работы по телеуправлению двух трансформаторных подстанций, питающих столицу. В ближайшие годы предусматривается более широкое применение телемеханизации и автоматизации с целью повышения надежности работы и снижения числа обслуживающего персонала.

В связи с ростом энергосистем была создана организация по исследованию и определению режимов их работы. В составе этой организации имеются бригады, состоящие из специалистов.

Конечно, еще многое предстоит сделать для улучшения работы энергосистем, для усовершенствования управления ими. В частности, национальный диспетчер должен и будет располагать моделью сети переменного тока, на которой он сможет проводить исследования, необходимые для налаживания надежной экономичной работы.

В результате проведения ряда организационно-технических мероприятий за последние 4...5 лет достигнут существенный прогресс в деле борьбы с аварийностью на электростанциях и в сетях. Однако число аварий все еще велико, и борьба с ними должна продолжаться.

Начиная с 1953 г., проводятся работы по повышению устойчивости работы систем путем улучшения релейной защиты, введения форсирования возбуждения и т. п.

В 1954 г. начато применение наиболее простых приборов быстродействующего повторного включения в высоковольтных разветвленных сетях, а в 1955 и 1956 гг. на основе приобретенного опыта на главных линиях 60 и 110 кв начало применяться пофазное управление с быстродействующим повторным включением. В текущем году пофазное автоматическое повторное включение внедрено на одноцепных линиях с двусторонним питанием, внедрено также автоматическое повторное включение с контролем синхронизма, отсутствия напряжения, наличия тока и т. д., а также трехфазное автоматическое повторное включение на двухцепных или закольцованных линиях.

С введением автоматического повторного включения значительно уменьшилось число аварий на линиях и уменьшились перебои в электроснабжении потребителей.

В результате введения форсирования возбуждения генераторов явления колебаний и резких изменений напряжения в системах стали исключительно редкими.

В 1955 и 1956 гг. на ряде старых установок и в сетях 110 кв были введены резервная, попечная дифференциальная и дистанционная защиты. Защита подавляющего большинства мощных генераторов находится на современном уровне. Усовершенствование и модернизация защитных устройств были запроектированы и осуществлены специалистами проектных учреждений и энергетических предприятий.

Выключатели старых типов и выключатели с недостаточной мощностью отключения заменяются современными воздушными и маломасляными выключателями.

В 1956 г. впервые на новых электростанциях появилось автоматическое включение резерва и начало распространяться и на старые электростанции.

Автоматическая синхронизация генераторов в широком масштабе начала применяться с 1955 г. Большим успехом был перевод в 1956 г. на автоматическую синхронизацию такой крупной станции, как ТЭЦ Сынджорджиу де Пэдуре.

Автоматическая частотная разгрузка (АЧР) впервые была осуществлена в годы первой пятилетки в системе Мунтения, а в 1956 и 1957 гг. она была распространена и на главные объекты других систем.

Работа генераторов электростанций в компенсаторном режиме применяется во всех случаях, когда первичный двигатель временно не может быть использован или выведен из строя. В настоящее время исследуется работа генераторов в асинхронном режиме в случае потери возбуждения, а также их работа в несимметричном режиме.

В текущем году на линиях электропередачи в гололедных районах стали применяться различные методы борьбы с гололедом, особенно путем электрического обогрева. Вопрос об электрическом обогреве защитных тросов еще не нашел правильного разрешения. Еще не удалось также наладить изготовление аппаратов, сигнализирующих об опасных гололедных отложениях.

Начиная с 1955 г., отечественная электротехническая промышленность выпускает трубчатые разрядники на все напряжения, применение которых способствовало значительному уменьшению числа перебоев в работе воздушных линий из-за атмосферных перенапряжений.

В тепломеханической части электростанций в отношении регенеративного подогрева питательной воды, введения промывки паровых турбин под нагрузкой, автоматического регулирования процессов сжигания и питания котлов водой, периодического контроля плотности конденсаторов турбин и т. д. также имеются значительные достижения.

Инструктаж технического, эксплуатационного и ремонтного персонала производится в последние годы систематически и особенно тщательно.

Несмотря на усилия, направленные на подъем технического уровня эксплуатации, в этой области остается осуществить еще многое. Поэтому проектируется создание центральной организации, единственной задачей которой будут: рационализация эксплуатации электростанций и сетей, внедрение централизованных измерений, управления и автоматики, а также и выпуск теплотехнических контрольно-измерительных приборов, которые до настоящего времени импортируются.

Задачи, стоящие перед энергетиками Румынской Народной Республики во втором пятилетии, намечены в Директивах II съезда Румынской Рабочей партии по второму пятилетнему плану развития народного хозяйства.

Во втором пятилетии особые усилия будут прилагаться к сооружению сетей, особенно напряжением 110 и 35 кв. За пятилетие будет введено в действие примерно 3 200 км линий этих напряжений, т. е. ежегодно строится свыше 600 км линий, из которых 60% приходится на линии 110 кв. В третьей пятилетке предполагается начать строительство линий напряжением 220 кв.

Чтобы увеличить в третьей пятилетке долю гидроэлектростанций в общей мощности энергетических установок страны, в настоящее время проводятся изыскания с целью комплексного использования гидроресурсов страны для орошения, сухоходства и производства электроэнергии.

Следует отметить, что запасы гидроэнергетических ресурсов в нашей стране, которые технически возможно использовать, оцениваются в 7 800 Мвт с годовой выработкой 37 млрд. квт·ч. Согласно проведенным до сих пор исследованиям 5 800 Мвт могут быть использованы экономически целесообразно с годовой выработкой в 28 млрд. квт·ч.

Вопросы о выборе наиболее экономичных электростанций, себестоимость энергии которых

будет ниже 0,10 лей/квт·ч и удельные капитальные вложения в которые менее 8 тыс. лей/квт, а также об определении очередей строительства и, следовательно, последовательности капиталовложений являются вопросами первостепенной важности, которые должны быть разрешены в ближайшие годы.

Важным для народного хозяйства является вопрос о наиболее целесообразном комплексном энергохимическом использовании всех сортов топлива и осуществлении промышленной и городской теплофикации. В настоящее время ставится вопрос о сооружении нескольких теплоэлектроцентралей в столице, в нефтяном районе Мунтения и в районе Центрального Ардяля.

Во втором пятилетии будет продолжаться объединение электростанций в энергетическую систему, с тем чтобы в 1960 г. этим объединением было охвачено 80...85% установленной мощности электростанций.

Особое внимание уделяется экономии всех видов энергии, а также повышению доли расплагаемых мощностей. С этой целью будет расширено применение на тепловых электростанциях пара высоких параметров, с тем чтобы в 1960 г. 40...45% электростанций по установленной мощности работали на высоких параметрах пара. В течение второй пятилетки удельный расход топлива на электростанциях будет снижен более чем на 14% против удельного расхода в 1955 г.

Будет продолжаться усиленная деятельность в направлении снижения собственного технологического потребления электроэнергии на станциях и в сетях, а также снижения потребления тепла и электроэнергии в промышленности и повышения коэффициента мощности. Предусматривается, что в 1960 г. средний для всей страны коэффициент мощности должен быть выше 0,75.

С целью повышения технического уровня эксплуатации электростанций и сетей и развития передовой техники предпринимаются значительные усилия по улучшению технической профессиональной подготовки эксплуатационного персонала.

Задачи, стоящие перед энергетиками, недавно были обсуждены в специальной секции II съезда Общества инженеров и техников РНР.

Приведенные в настоящей статье данные позволяют оценить те усилия, которые прилагаются рабочие, инженеры и техники для ликвидации отсталости энергетики нашей страны, унаследованной народно-демократическим строем от помещичье-буржуазного строя, и создания солидной и надежной базы для дальнейшего развития народного хозяйства РНР на основе электрификации.

[25. 7. 1957]



*Братский привет трудящимся Румынской Народной Республики, строящим социализм!*

# К 40-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции

Инж. НОРБЕРТ ВАСС,  
ответственный редактор журнала „Deutsche Elektrotechnik“  
Германской Демократической Республика

В Советском Союзе создано первое социалистическое общество, которое, следуя указаниям великого Ленина, превратило за 40 лет отсталую царскую аграрную страну в индустриальную великую державу, производящую в 100 раз больше электроэнергии, чем до революции.

Так осуществились мечты Ленина, потому что они были не только мечтами — они были воплощены под руководством Ленина в реальные планы; над их осуществлением работали лучшие ученые, для которых эта работа была делом чести, и этому делу они отдавали все свои силы. Сейчас решены все проблемы, связанные с получением электроэнергии порядка 200 млрд квт·ч, с доведением мощности электростанций до 43 Гвт и с созданием электропередачи 400 кв.

В государственной электрической сети СССР работает первая в мире атомная электростанция и несколько других атомных станций начнут работать в текущем пятилетии. Для исследовательских работ в мирных целях советские ученые имеют в своем распоряжении в физических лабораториях института в Дубне (Московская область) величайший в мире ускоритель частиц.

Сказанного достаточно, чтобы понять, каких огромнейших успехов для всего человечества достигли советская наука и техника за 40 лет в стране, где нет империалистического господства, кризисов, капиталистической конкуренции, где общество создало для всех своих членов человеческие условия жизни.

Ученые всего мира устремляют свой взор на Москву. Кто сегодня игнорирует достижения советской науки и техники, тот отстает, а кто признает, изучает и использует их в своей работе, тот выполняет свой долг и служит, таким образом, своему народу. Распространяя этот принцип среди немецких ученых и техников, внушил его правильность, — это одна из главных задач журнала «Deutsche Elektrotechnik». Как электротехнический журнал на немецком языке он имеет своей целью знакомить немецких инженеров в Германии и за границей с работами советских инженеров-электротехников.

Советский Союз систематически оказывает немецкому народу бескорыстную помощь. Когда советские войска разгромили гитлеровских фашистов, советское командование помогло немецкому народу восстановить промышленность, оказалось морально-политическую поддержку при передаче заводов в руки народа и помогло в организационно-техническом отношении при восстановлении управления ими.

До 1945 г. на территории ГДР электротехническая промышленность была развита очень слабо. После окончания войны это небольшое количество заводов было сильно разрушено и только в небольшой мере было в состоянии работать. На заводах не было конструкторских чертежей, ма-

шин, подходящего сырья и т. д. Таким образом, сначала надо было создать условия для выпуска продукции и только затем можно было думать об ассортименте и улучшении качества продукции.

Одним из первых электротехнических заводов, который начал производство аппаратов и приборов, был электроаппаратный завод им. И. В. Сталина в Берлине—Трептове. Он был передан в полное управление ГДР в числе других предприятий в 1954 г.

После окончания периода восстановления электропромышленности и расширения ее ассортимента продукции в первой пятилетке начался процесс улучшения технологии и модернизации конструкций. Первостепенными стали вопросы качества и экономии. В этот период журнал «Deutsche Elektrotechnik» оказывал большую помощь работникам электропромышленности, публикуя сведения о советских методах и достижениях.

Чтобы выполнить повышенные требования, вызванные техническим ростом промышленности и развивающимся экспортом, на наших предприятиях были созданы новые конструкции в соответствии с современными передовыми способами производства, с соблюдением унификации продукции согласно нормам и стандартам. Вместо меди стали часто применять алюминий.

Механически прочные новые алюминиево-изопреновые лакированные провода, изоляция которых способствовала увеличению коэффициента заполнения паза и, кроме того, лучшему тепловыводу в обмотке, вполне себя оправдали и сейчас безотказно работают в более чем 750 тыс. электродвигателей и трансформаторов.

Для аппаратов и машин, направляемых в тропические страны, а также для электродвигателей, работающих в тяжелых условиях, были разработаны новые электроизоляционные материалы на основе органических веществ и слюдяной бумаги.

Эта новая слюдяная бумага, изготовленная химическим путем из слюды, полученной из отходов, превосходит по своим электрическим и механическим свойствам марку «Samica».

Используя высококачественные материалы, получаемые из СССР, немецким предприятиям удалось достичь успеха как в области трансформаторостроения, так и в области высоковольтного аппаратостроения. На заводе трансформаторов им. Карла Либкнехта в Берлине был построен воздушный выключатель на 4 000 Мвт. Этот же завод выпускает сейчас передвижные трансформаторы мощностью в 125 Мвт; причем их мощность будет в дальнейшем увеличиваться после использования результатов опытов с текстур-железом (холоднокатаная сталь с малыми потерями).

Электровозы, выпускаемые в ГДР для шахт и для перевозки шлака, грузоподъемностью в

100 т (а скоро будут 150 т), комбинированные электровозы для пассажирского и грузового сообщения, электровозы постоянного тока 3 000 в для экспрессов пользуются заслуженным успехом в СССР и особенно в Народной Польше.

При помощи автоматов для электрической сварки типа Traktor TS-17M, конструктивные данные для создания которого были получены от СССР, стало возможным улучшить технологию всего машиностроения в целом.

Особенных успехов достигла кабельная промышленность ГДР в производстве маслонаполненного кабеля для высоких напряжений. Кабельный завод «Oberspree» выпускает кабели на 380 кв из алюминиевого полого проводника с перечным сечением в 400  $\text{мм}^2$  для передачи мощности в 200 Мвт.

Для кабельных вводов керамической промышленностью выпускаются изоляторы высотой в 4 м, отожженные из одного целого куска.

Таким образом, современная немецкая электротехника достигла значительных успехов при помощи Советского Союза. Добавим еще, что на трансформаторном и рентгеновском заводах в Дрездене был сделан контрольный прибор для изотопов, который заряжается кобальтом-60, поставляемым Советским Союзом. При помощи Советского Союза начато строительство атомного реактора для исследовательских целей. Строительство первой атомной электростанции мощностью в 75 Мвт начнется в будущем году.

В 1945 г. в Советской зоне электростанции имели мощность 5 000 Мвт. Значительная часть электростанций работает уже по 20—40 лет. Потребление электроэнергии на душу населения составляло: в 1945 г. — 550 квт·ч, в 1955 г. — 1 599 квт·ч (ФРГ производит на душу населения 1 515 квт·ч).

В 1960 г. электростанции будут производить 41,5 млрд. квт·ч электроэнергии, что составляет примерно 3 000 квт·ч на душу населения.

В первой пятилетке мы прошли бурный путь развития, особенно в области электротехники, — путь, какой не сможет быть пройден капиталистическими странами. В 1952 г. мы построили первый турбоагрегат мощностью 10 Мвт, в 1953 г. — 12,5 Мвт. Сейчас мы строим турбогенераторы мощностью 100 Мвт и конструируем новые уже на 200 Мвт.

Значительные успехи электротехников были достигнуты благодаря усилиям и помощи всего народа и благодаря великодушной поддержке народов Советского Союза.

Эти успехи и достижения создали основу для решения еще больших проблем; это на деле доказывает немецкому народу, что путь ГДР — правильный; это подтверждают и достижения советских электротехников. Мир будет социалистическим.

Наша благодарность Советскому Союзу за его помощь в нашем продвижении к социализму обязывает нас принимать посильное участие в развитии промышленности и техники в СССР. ЦК СЕПГ призвал рабочих, инженеров, ученых досрочно выполнить экспортные заказы СССР в честь 40-й годовщины Великой Октябрьской социалистической революции.

На этот призыв откликнулись многие электротехники, взяв на себя многочисленные обязательства. На экономической конференции работников распределительных устройств и электромоторов обязались досрочно выпустить электрооборудование для литьевого крана, изготавливаемого заводом им. Эрнста Тельмана в Магдебурге для завода им. Кирова в Ленинграде. Такие же обязательства приняты рядом других электротехнических предприятий ГДР.

Во время пребывания в ГДР в августе этого года советских государственных деятелей был положительно разрешен также вопрос о расширенном обмене информацией по вопросам науки и техники, что ускорит хозяйственное развитие обеих стран. Будет оказываться взаимное содействие при расширении новых конструкторских работ. В связи с этим перед нашими специальными научно-техническими журналами возникают новые ответственные задачи, и мы рады, что в текущем году на заседании редакций журналов «Электричество» и «Deutsche Elektrotechnik» в Москве уже были созданы основы для улучшения взаимной информации в области электротехники. Мы надеемся, что в течение следующих лет мы будем быстрее информировать читателей «Deutsche Elektrotechnik» об успехах советской электротехники и что читатели журнала «Электричество» будут также своевременно извещаться о новых достижениях немецких инженеров и ученых. Вместе мы быстрее решим все проблемы, которые ставят перед нами атомный век и век автоматизации электротехники.

Немецкие инженеры будут горды возможностью участвовать в развитии человеческого общества, для которого Великая Октябрьская социалистическая революция открыла новую эру.

[9. 8. 1957]



*Пусть крепнет дружба между германским и советским народами на благо мира в Европе!*

# Тепловая электростанция большой мощности

Инж. Л. И. ДВОСКИН и инж. А. Б. КРИКУНЧИК

Теплоэлектропроект

Типовой проект тепловой конденсационной электростанции мощностью 1 200 Мвт с агрегатами по 200 Мвт разработан Теплоэлектропроектом в связи с тем, что в шестой пятилетке сооружается более десяти таких электростанций.

Ниже приводятся общие соображения, положенные в основу указанного типового проекта, и описание решений его электрической части.

Проектные разработки и практика нашего энергостроительства показали, что установка крупных агрегатов и сооружение мощных тепловых электростанций дают большие преимущества. Переход в пятой пятилетке к сооружению на Урале, в Донбассе и Сибири районных тепловых электростанций с агрегатами по 100 Мвт позволил обеспечить быстрое наращивание мощностей и значительную экономию средств.

Затраты на установленный киловатт тепловых электростанций с агрегатами по 100 Мвт почти вдвое меньше затрат при агрегатах по 25 Мвт. Увеличение мощности агрегата до 200 Мвт при мощности станции 1 200 Мвт снижает эти затраты на 30 ... 35% по сравнению со станцией с тремя или четырьмя агрегатами по 100 Мвт. Увеличение мощности станции выше 1 200 Мвт при агрегатах по 200 Мвт мало изменяет затраты на установленный киловатт. Однако положение изменяется, если перейти к более крупным агрегатам. Выполненный проект станции с четырьмя двухвальными агрегатами по 600 Мвт показал, что стоимость установленного киловатта на такой станции снижается еще на 20 ... 25% по сравнению со станциями с агрегатами по 200 Мвт.

Рост энергосистем и создание межсистемных связей способствуют применению крупных агрегатов и переходу к строительству тепловых электростанций большой мощности.

Тепловые электростанции с агрегатами мощностью по 200 Мвт и выше требуют развития электрических сетей и применения для них более высоких напряжений. При сооружении тепловых электростанций мощностью 1 000 Мвт и выше не всегда удается удовлетвориться сетями напряжением 110 и 220 кв, в ряде случаев приходится применять сети напряжением 400 или 500 кв.

Стремление к увеличению к. п. д. крупных тепловых электростанций приводит к необходимости повышения давления пара и его температуры. Пар давлением 140, 170, 230 и 300 ат дает наибольший эффект только при агрегатах достаточно большой мощности.

Внедрение промежуточного перегрева пара дает значительную экономию в расходе топлива и приводит к блочному принципу сооружения тепловых электростанций, т. е. к жесткой связи между одним или двумя котлами и турбогенератором без каких-либо поперечных связей по питательной воде и пару. Наиболее экономичное решение получается при блоке один котел — турбина. Блок два котла — турбина является переходным решением на время, пока промышленность не освоит производство более крупных котлов.

Применение блочного принципа позволяет резко снизить капитальные затраты на установленный киловатт, а также при расширении станции устанавливать на новых блоках более совершенное оборудование, с более высокими параметрами пара.

Вместе с тем применение блочного принципа требует повышения надежности работы котельных агрегатов по крайней мере до уровня, достигнутого турбоагрегатами.

В 1954 г. на станциях Министерства электростанций турбинные установки находились в ремонте 6,4% времени, а котельные агрегаты 9,5%. Из этих данных следует, насколько важно при применении блочного принципа повысить надежность работы котельных агрегатов.

Применение блочных агрегатов большой мощности требует наличия в энергосистемах соответствующих резервов мощности и создания сетей достаточной пропускной способности.

Увеличение мощности агрегата и всей электростанции позволяет существенно уменьшить количество эксплуатационного персонала. Если для электростанции мощностью 50 Мвт количество персонала составляет около 6 чел. на 1 Мвт установленной мощности, то для электростанций мощностью 100 Мвт это число равно 4,5, 400 Мвт — 2,5, 1 000 Мвт — 1 и, наконец, 2 500 Мвт — 0,7 чел/Мвт.

Таким образом, сооружение мощных тепловых электростанций с крупными агрегатами обеспечивает резкое уменьшение капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

**Параметры основного оборудования.** На станции устанавливаются шесть агрегатов по блочной схеме.

Тепловые электростанции с агрегатами по 200 Мвт проектируются на высокие и сверхвысокие параметры пара. При высоких параметрах пара 140 ата, 570°С и промежуточном перегреве до 570°С — устанавливаются котлы паропроизводительностью 660 т/ч. Параметры пара у турбин соответственно 130 ата, 565 и 565°С. При сверхвысоких параметрах пара — 230 ата, 610°С и промежуточном перегреве до 570°С — устанавливаются котлы паропроизводительностью 620 т/ч. Параметры пара у турбин соответственно 220 ата, 600 и 565°С.

Приготовление пыли для котлов производится индивидуальными шаровыми мельницами в случае антрацитовых углей и шахтными мельницами — в случае мягких углей с большим выходом летучих.

На станциях будут устанавливаться генераторы мощностью 235 Мвт со скоростью вращения 3 000 об/мин, коэффициентом мощности 0,85, номинальными напряжениями 15,75 и 11 кв. Генераторы напряжением 15,75 кв будут изготавливаться Харьковским заводом тепловозного электрооборудования, а напряжением 11 кв — Ленинградским заводом «Электросила» им. Кирова.

**Главная схема электрических соединений.** При проектировании электрической части особое внимание уделялось обеспечению высокой надежности всех элементов электростанции, поскольку каждое отключение агрегата мощностью в 200 Мвт будет вызывать напряженное состояние в районе электростанции, а иногда и во всей энергосистеме. Необходимо было также в решениях по электрической части обеспечить минимальные капитальные затраты и эксплуатационные расходы, чего можно было достигнуть только при большой компактности всей электростанции в целом.

В поисках новых решений наряду с использованием опыта строительства и эксплуатации тепловых электростанций в СССР был принят во внимание опыт проектирования, строительства и эксплуатации зарубежных мощных тепловых электростанций.

Известно, что главная схема электрических соединений электростанций не может быть типизирована, поскольку местные условия — напряжения сетей потребителей, число и направление линий, отходящих от электростанции, и пр. — практически всегда различны. Однако для того, чтобы выявить габариты площадки электростанции и различные связи главного корпуса электростанции с распределительными устройствами повышенных напряжений, было рассмотрено несколько вариантов главной схемы электрических соединений — от наиболее простых до наиболее сложных.

В прежних проектах электростанций с агрегатами в 100, 150 и 200 Мвт, которые соединялись в блоки с повышательными трансформаторами, предусматривались выключатели на ответвлениях к трансформаторам собственного расхода, а при трехобмоточных повышательных трансформаторах — и в цепи генератора.

Согласно расчетам ударный ток короткого замыкания на ответвлении к трансформатору собственного расхода при агрегатах в 200 Мвт и генераторном напряжении 15 кв достигает величины

порядка 330 ка. Номинальный ток генератора около 9 ка. Применение обычных схем с выключателями на ответвлении к трансформатору собственного расхода потребовало бы от электропромышленности создания новых аппаратов, конструирование которых сопряжено со значительными трудностями. Кроме того, и это главное, наличие коммутационной аппаратуры на ответвлении к трансформатору собственного расхода удлиняет трассы и усложняет конструкции соединительных токопроводов и тем самым приводит к снижению надежности работы блока. На основании сказанного, а также опыта проектирования электростанций такого типа за рубежом решено не устанавливать ни выключателей, ни разъединителей на ответвлении к трансформатору собственного расхода.

В основной цепи генератора выключатели должны устанавливаться только в случае соединения генератора в блок с трехобмоточным трансформатором или в случае присоединения двух генераторов к одной трансформаторной группе. Последнее может быть целесообразно при напряжении сети 400 или 500 кв.

Для исключения возможности междуфазных коротких замыканий соединение генераторов с повышающими трансформаторами осуществляется при помощи закрытых однофазных токопроводов. В тех же целях трансформаторы напряжения выполняются только для включения их первичных обмоток между фазой и землей при помощи штепсельных контактов. К настоящему времени с Харьковским заводом тепловозного электрооборудования полностью согласована возможность присоединения упомянутых закрытых токопроводов непосредственно к выводам из генератора.

В качестве возможных схем электрических соединений на повышенном напряжении электростанции были рассмотрены: 1) схема с присоединением всех блоков генератор—трансформатор к сборным шинам соответствующих напряжений (рис. 1); 2) схема с присоединением каждого блока

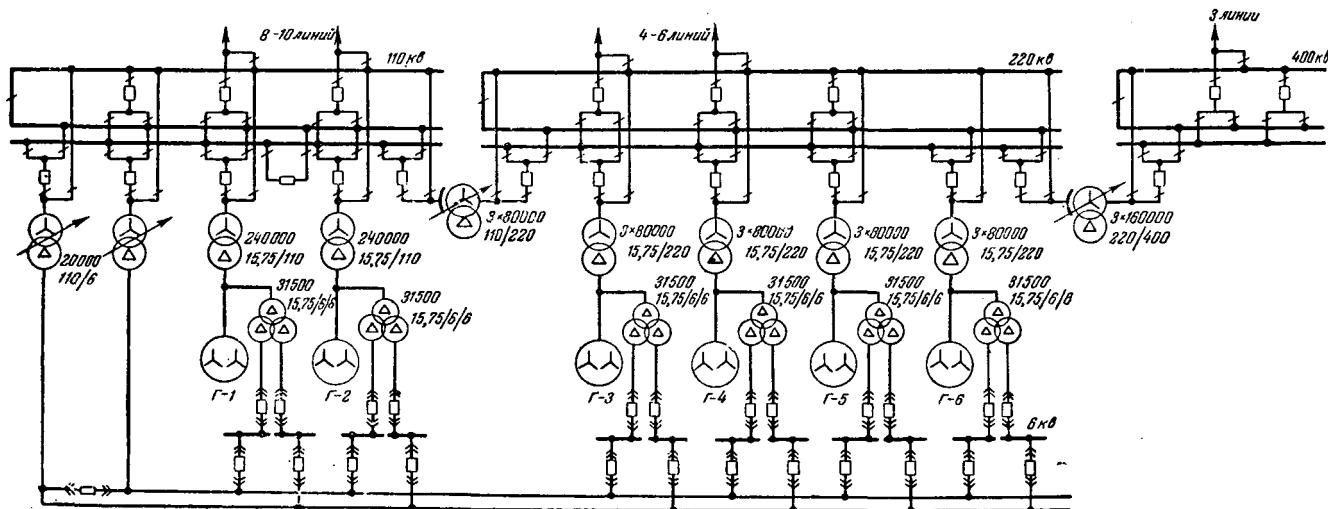


Рис. 1. Схема электрических соединений районной тепловой электростанции мощностью 1200 Мвт. Вариант с распределительными устройствами повышенных напряжений непосредственно на электростанции.

ка генератор—трансформатор посредством линии к ближайшей районной подстанции соответствующего напряжения. Надо полагать, что на практике встретятся случаи, когда одни блоки генератор—трансформатор электростанции будут присоединяться к шинам собственных распределительных устройств повышенных напряжений, а другие блоки той же электростанции — к шинам соответствующих напряжений ближайших районных подстанций.

При схеме, представленной на рис. 1, повышающие трансформаторы присоединяются к двум основным и третьей обходной системам шин распределительных устройств повышенных напряжений при помощи одного выключателя и размыкания разъединителей.

В распределительном устройстве 220 кв устанавливается обходной выключатель, используемый также и в качестве шиносоединительного. При однорядной установке всех выключателей обходная система шин и обходной выключатель могут быть использованы для производства ремонта любого из выключателей распределительного устройства без перерыва в работе отдельных цепей.

На стороне 400 кв предусматривается схема треугольника с возможностью перехода с ростом мощности электростанции и увеличением числа линий и трансформаторов к такой же схеме, как и на напряжении 220 кв.

При втором варианте схемы соединений, когда блоки генератор—трансформатор при помощи линий присоединяются к шинам районных подстанций, в цепях блоков на стороне повышенного напряжения устанавливаются только выключатели и ремонтные разъединители.

Трансформаторы, устанавливаемые в блоках, могут быть либо трехфазными, либо однофазными, соединенными в группы. Предпочтение следует отдать трехфазным трансформаторам.

При всех вариантах главной схемы питание собственного расхода осуществляется от понижающих трансформаторов, присоединяемых к ответвлениям от основной цепи генераторного напряжения. Резервируются эти трансформаторы двумя трансформаторами 110/6 кв.

При втором варианте главной схемы резервные трансформаторы собственного расхода присоединяются двумя отдельными линиями 110 кв к ближайшей районной подстанции этого напряжения.

**Схема соединений собственного расхода.** Для привода механизмов собственного расхода в большинстве случаев устанавливаются электродвигатели трехфазного переменного тока.

Мощность электродвигателей механизмов котлоагрегата 500 ... 1 600 квт, а двигателей для привода питательных насосов — 5 000 квт. Ввиду такой большой мощности электродвигателей для собственного расхода принято (в качестве основного) напряжение 6 кв. Выбор этого напряжения произведен на основании технико-экономического исследования, при котором рассматривалось также напряжение 3 кв.

Для питательных насосов принятые синхронные

двигатели<sup>1</sup>, а для остальных механизмов — асинхронные.

Регулирование производительности и напора питательных насосов предполагается выполнить при помощи гидравлических муфт. Регулирование производительности механизмов котлоагрегата предполагается осуществить путем установки двухскоростных электродвигателей, а также при помощи поворотных лопаток направляющих аппаратов в газовом потоке.

Электродвигатели мощностью меньше 200 квт питаются на напряжении переменного тока 380 в. Для питателей топлива, требующих регулирования скорости вращения в пределах 450 ... 1 450 об/мин, принятые двигатели постоянного тока 220 в, которые питаются от сети переменного тока через германевые выпрямители<sup>2</sup>.

Ввиду необходимости обеспечить работу резервных масляных насосов турбогенераторов при аварийном исчезновении переменного тока для них принятые электродвигатели постоянного тока с питанием от аккумуляторных батарей блоков напряжением 220 в. Для сети рабочего освещения электростанции принято напряжение 380/220 в (нейтраль заземлена).

В результате технико-экономических сопоставлений различных вариантов питания собственного расхода оказалось, что наиболее целесообразным является вариант с одним трехобмоточным трансформатором 15/6/6 кв, мощностью 31,5 Мвт на каждый блок. От каждого такого трансформатора питаются две секции, к которым и присоединены все двигатели собственного расхода блока. Учитывая, что каждый котел имеет по три питательных насоса, по два дымососа, по два вентилятора и т. д., две секции 6 кв на каждый блок обеспечивают высокую степень надежности электроснабжения собственных нужд блока.

Установка на каждый блок только одного трансформатора собственного расхода упрощает трассу и конструкцию закрытых токоподводов к этому трансформатору и токопроводов всего блока (рис. 2).

Кроме варианта питания всего собственного расхода от блочных секций, был рассмотрен также вариант, при котором на первых четырех блоках, кроме основных секций, имеются еще две общестанционные секции.

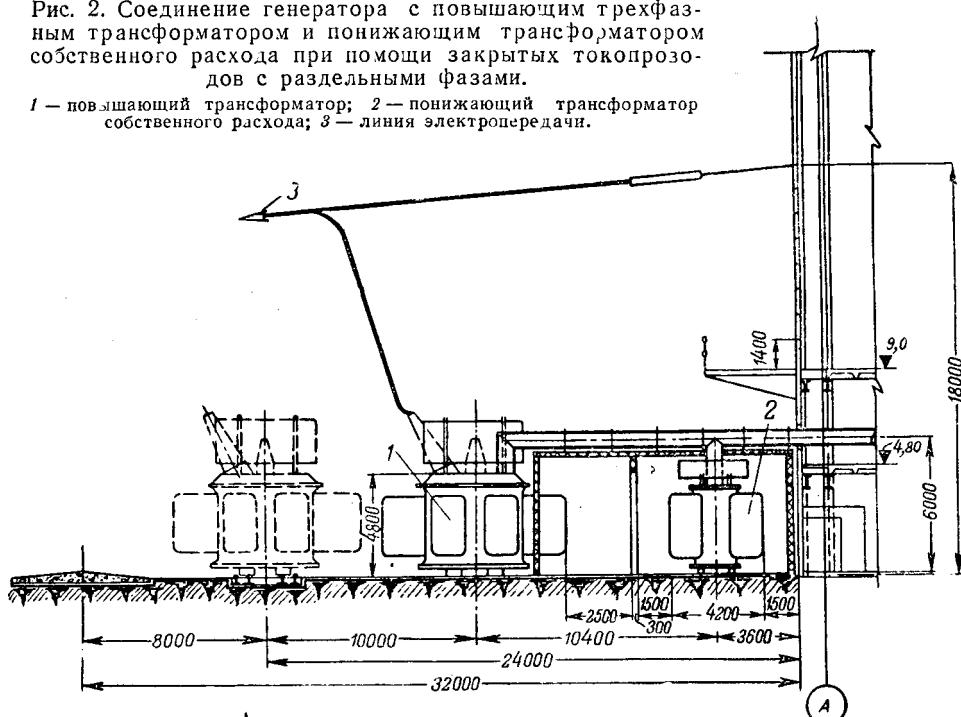
Это рассмотрение показало, что при выделении общестанционных нужд на отдельные секции высвобождается некоторая мощность трансформатора собственного расхода. Однако величина высвобождаемой мощности такова, что снизить единичную мощность трансформатора собственного расхода с 31,5 до 20 Мвт не представляется возможным. Поэтому была принята схема с пита-

<sup>1</sup> Синхронные двигатели принятые, в частности, потому, что изготовление асинхронных двигателей на 3 000 об/мин такой мощности наталкивается на очень серьезные конструктивные трудности.

<sup>2</sup> Для питателей топлива возможно также применение электродвигателей трехфазного тока с регулированием числа оборотов питателей при помощи механических вариаторов.

Рис. 2. Соединение генератора с повышающим трехфазным трансформатором и понижающим трансформатором собственного расхода при помощи закрытых токопроводов с раздельными фазами.

1 — повышающий трансформатор; 2 — понижающий трансформатор собственного расхода; 3 — линия электропередачи.



нием собственного расхода только от блочных секций.

Схема собственного расхода предусматривает возможность использования любого из двух резервных трансформаторов для питания любого из шести блоков.

Схема собственного расхода 380 в построена по тому же принципу, что и схема собственного расхода 6 кв. Каждый блок питается от двух секций и двух трансформаторов 6/0,4 кв.

Для питания цепей управления, сигнализации, аварийного освещения и электродвигателей ре-

зервных масляных насосов турбогенераторов для каждого двух блоков устанавливается отдельная аккумуляторная батарея. Все батареи станции связываются между собой переключателями, которые позволяют выводить в ремонт любую из них. Для заряда и подзаряда аккумуляторных батарей устанавливаются германевые выпрямители.

**Компоновка электротехнических устройств в главном корпусе станции.** Распределительное устройство 6 кв собственного расхода размещается внутри машинного отделения вдоль его фасадной стены на отметке 0,0 (рис. 3). Над этим распределительным устройством на отметке 5,0 размещаются щиты 380 в вместе с питаю-

щими их сухими трансформаторами мощностью 560 и 750 ква. На той же отметке размещаются блочные аккумуляторные батареи, а также панели защиты и регулирования блоков генератор—трансформатор.

Под отметкой 9,0 проходят закрытые токопроводы от генераторов к повысительным трансформаторам.

В бункерно-деаэраторной этажерке на отметке 9,0 размещаются блочные щиты управления и помещения для щитов переменного и постоянного

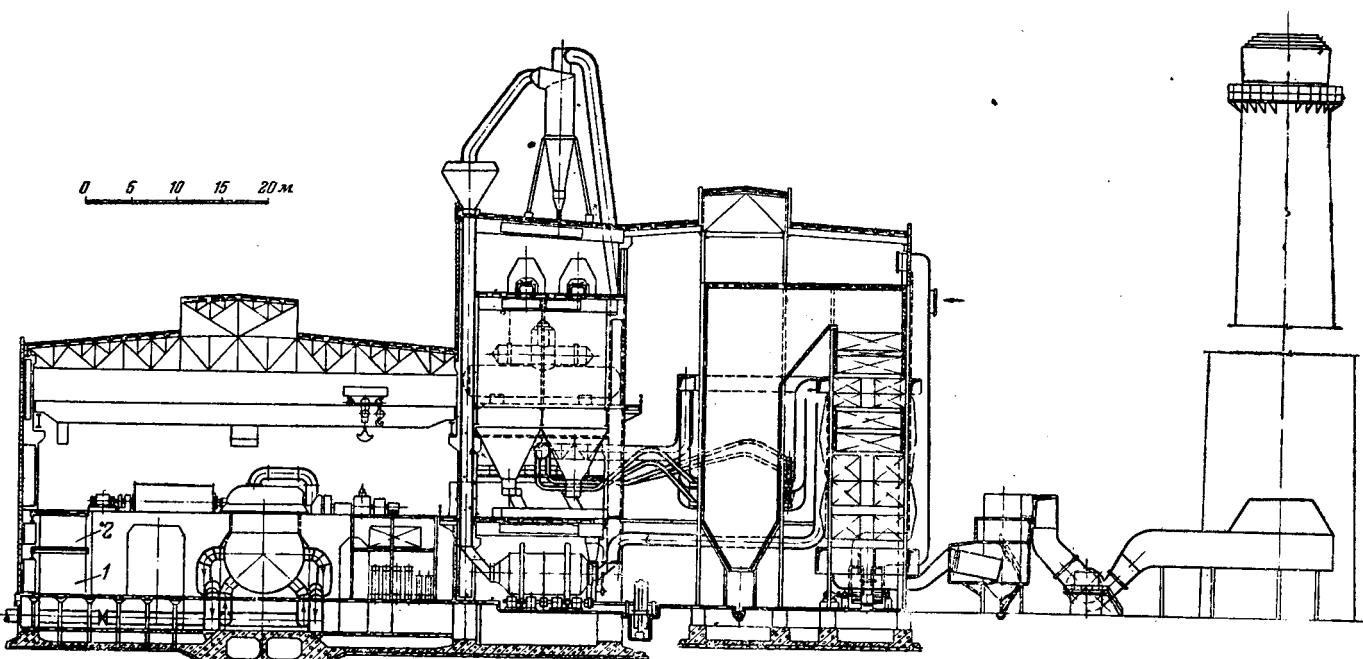


Рис. 3. Поперечный разрез по главному зданию электростанции.

1 — помещение распределительного устройства 6 кв; 2 — помещение распределительного устройства 380 в.

тока, питатели пыли и германиевые выпрямители, через которые пытаются двигатели питателей. Трансформаторы, питающие щиты переменного тока, находятся рядом со щитами.

Для прокладки кабелей используется подвал, предусмотренный в машинном зале. Для прокладки кабелей в котельной сооружаются специальные туннели.

Для ревизии повышающих трансформаторов используются ремонтная площадка и кран машинного зала. Такое решение позволяет не сооружать отдельной трансформаторной башни и тем самым существенно сократить затраты.

На рис. 4 приведен план расположения трансформаторов у фасадной стены машинного зала. На чертеже условно показано применение для разных блоков различных трансформаторов — трехфазных и однофазных.

Общими для всех рассматриваемых вариантов является установка трансформаторов собственно-го расхода в непосредственной близости от стены машинного зала и установка повышающих транс-форматоров таким образом, чтобы их ось находи-лась на расстоянии примерно 14 м от стены ма-шинного зала.

Вопрос о том, где разместить распределительные устройства повышенного напряжения (на территории электростанции или в некотором отдалении от нее), должен рассматриваться в каждом конкретном случае с учетом всех местных особенностей: рельефа местности, направления отходящих линий различного напряжения, грунтовых условий и т. п.

Очевидно, площадка, занимаемая электростанцией, будет иметь наименьшие габариты, если будет принята схема блоков генератор—трансформатор—линия. В том же случае, когда применение такой схемы окажется по местным условиям недопустимым или нецелесообразным, и распределительные устройства повышенных напряжений придется сооружать непосредственно возле электростанции, должны быть рассмотрены два варианта размещения этих устройств: 1) между главным корпусом и прудом-охладителем; 2) в стороне от главного корпуса. Подсчеты показали, что расположение распределительных устройств в стороне от главного корпуса позволяет приблизить последний к берегу пруда-охладителя примерно на 250 м, что представляет весьма заметную величину, особенно при значительном наклоне рельефа местности к пруду-охладителю.

Управление основным оборудованием блоков предполагается осуществлять с блочных постов управления. Оборудование двух блоков управляется с одного блочного поста.

Блочные посты управления размещаются в дезаэраторной этажерке на отметке 9,0 между котельным и турбинным агрегатами. Из помещений постов имеются выходы непосредственно в котельное и машинное отделения.

Под помещением блочных постов размещается кабельный полуэтаж.

На блочные щиты выносится аппаратура, обеспечивающая возможность синхронизации тур-

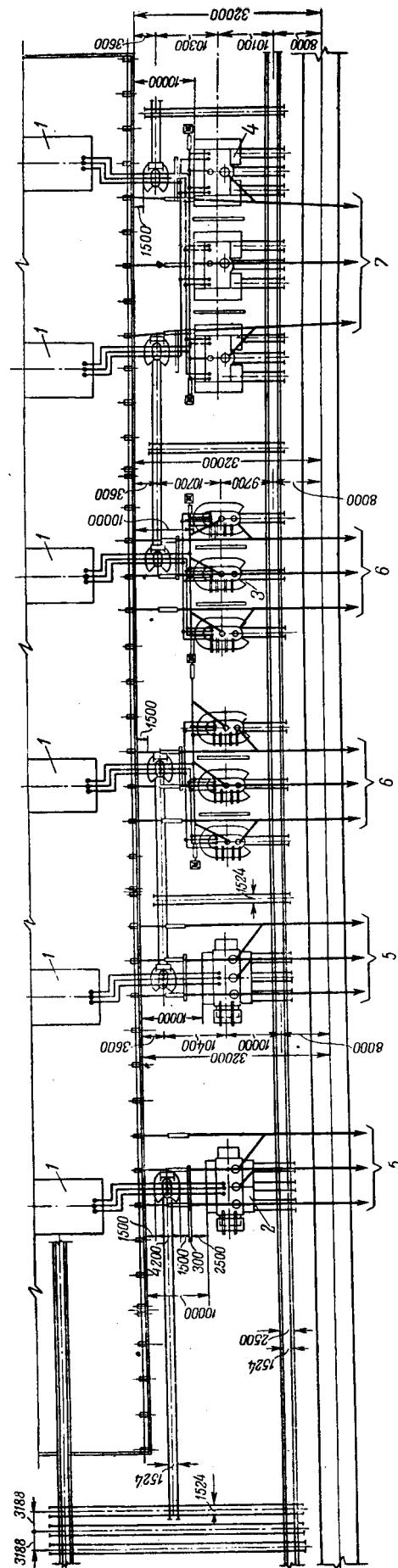


Рис. 4. Расположение трансформаторов возле стены машинного отделения.

богенератора блока при его включении на параллельную работу с другими блоками или с системой, а также счетчики и регистрирующие приборы генераторов и др. На блочных щитах выполняются сигнализация положения, звуковая аварийная и предупреждающая сигнализация в объеме, обеспечивающем оповещение дежурного персонала о состоянии и изменениях положения оборудования.

**Задачи промышленности в связи с сооружением тепловых электростанций большой мощности.** Сооружение тепловых электростанций большой мощности с агрегатами по 200 Мвт и выше и применение при их сооружении принципа блоков один котел—турбогенератор выдвигает перед промышленностью серьезные задачи по освоению новых, более совершенных видов оборудования.

С 1953 г. на Черепетской ГРЭС успешно работают турбогенераторы с водородным охлаждением мощностью 150 Мвт при напряжении 18 кв. Эти генераторы вращаются турбинами с давлением пара 170 ат, температурой перегрева 570° С и промежуточным перегревом. Кроме того, в наших энергосистемах работает более 40 турбогенераторов с водородным охлаждением мощностью по 100 Мвт. Это позволяет нашей промышленности в короткие сроки освоить производство оборудования для тепловых электростанций шестой пятилетки с агрегатами 200 и 300 Мвт и приступить к проектированию оборудования для блоков мощностью до 600 Мвт, намеченных к установке на электростанциях в дальнейшем.

В текущем году будет изготовлен первый турбогенератор мощностью 200 Мвт со скоростью вращения 3 000 об/мин. Медь обмотки ротора этого генератора непосредственно охлаждается водородом. В 1958 г. будет изготовлен турбогенератор такой же мощности и с такой же скоростью вращения, у которого непосредственное охлаждение водородом будет иметь также и обмотка статора. В настоящее время проектируется турбогенератор мощностью 300 Мвт со скоростью вращения 3 000 об/мин, который должен быть изготовлен в 1959 г. Разрабатываются две конструкции этого генератора: 1) с непосредственным охлаждением меди статора водородом; 2) с жидкостным охлаждением обмотки статора. Из первых образцов крупных турбогенераторов, имеющих разные конструкции, промышленность должна выбрать наиболее экономичные и надежные в эксплуатации.

Турбогенераторы мощностью 200 Мвт будут иметь возбуждение, основанное на новых принципах. Один из турбогенераторов выполняется с ионным самовозбуждением, а другой — с высокочастотным генератором возбуждения, сидящим на валу основного генератора. В последней системе преобразование переменного тока в постоянный будет осуществляться при помощи германевых выпрямителей. Обе новые системы возбуждения обеспечивают высокий предел ударного возбуждения и большую скорость реагирования возбуждения. В качестве резервного возбудителя применяется генератор постоянного тока со скоп-

ростью вращения 1 000 об/мин с асинхронным двигателем и маховиком. В качестве автоматических регуляторов возбуждения используются в одних случаях магнитные усилители, а в других — электронные регуляторы. На основе опыта изготовления и эксплуатации из новых систем возбуждения должны быть выбраны для широкого применения наиболее рациональные.

Освоение промышленностью мощных трансформаторов расширяет возможности по созданию рациональных схем электрических соединений тепловых электростанций. Настоятельной задачей промышленности является освоение крупных трехфазных трансформаторов на напряжение 110, 150 и 220 кв, а возможно и на 400(500) кв, с единичной мощностью в 120, 180, 240, 300 и 360 Мва.

Применение трехфазных трансформаторов даст значительный экономический эффект как в отношении стоимости, так и в отношении потерь, увеличит производственные возможности промышленности и резко сократит размеры площадок, необходимых для установки трансформаторов.

Высокая надежность трансформаторов позволяет уверенно переходить к трехфазным трансформаторам самых больших мощностей. При этом необходимо обеспечить их транспортабельность и возможность включения в работу с минимальным объемом монтажных работ и без дополнительной сушки на месте установки.

Промышленность должна также освоить трансформаторы больших мощностей с встроенным регулированием напряжения под нагрузкой. У автотрансформаторов это регулирование должно осуществляться на выводе среднего напряжения.

Укрупнение мощностей агрегатов и станций, рост энергосистем приводят к увеличению токов короткого замыкания и, следовательно, к необходимости создания высоковольтных аппаратов на большие номинальные токи и на большую отключающую способность. Уже сейчас нужны высоковольтные аппараты на номинальные токи до 2 ка и отключающую способность до 6...10 Гва для напряжений 110 и 150 кв, до 15 Гва для напряжения 220 кв и до 25 Гва для напряжения 500 кв. При напряжениях 110...500 кв ограничение токов короткого замыкания секционными или линейными реакторами нерационально, так как приводит к удорожанию установок. Развитие высоковольтного аппаростроения показывает полную техническую возможность и экономическую целесообразность изготовления высоковольтных аппаратов на указанные выше и даже большие номинальные токи и мощности отключения.

Как уже указывалось выше, в связи с сооружением крупных тепловых электростанций будут находить все большее распространение электропередачи напряжением 400 и 500 кв. Это потребует увеличения производства оборудования для таких передач, а следовательно, соответствующего расширения производственных возможностей электропромышленности.

Особо серьезной задачей является создание

коммутационных аппаратов генераторного напряжения. Промышленность должна освоить выключатели для напряжений 10 и 20 кв на номинальные токи 8, 10 и 12 ка и соответствующие отключающие способности. На эти же номинальные токи должны изготавляться разъединители, трансформаторы тока и проходные изоляторы.

Опыт эксплуатации генераторов мощностью 100 и 150 Мвт показывает, что их связь с повышающими трансформаторами может наиболее рационально осуществляться только при помощи комплектных закрытых токопроводов при исполнении их с изолированными фазами. Промышленность должна освоить изготовление таких токопроводов на номинальные токи 6; 8; 10 и 12 ка.

Очень важным является уменьшение площади территории для размещения открытых распределительных устройств высокого напряжения крупных тепловых электростанций. Этого можно достигнуть только в том случае, если промышленность создаст новые конструкции разъединителей и выключателей, обеспечивающих возможность компоновки распределительных устройств на относительно малой площади.

Для собственного расхода агрегатов мощностью 200 Мвт и выше промышленность должна освоить комплектные распределительные устройства с цепями на номинальные токи 2 и 3 ка и на ударный ток короткого замыкания примерно 100 ка. Ввиду того, что эти комплектные распределительные устройства будут встраиваться в главное здание станции, они должны быть компактными.

Большое влияние на экономичность и надежность работы мощных тепловых электростанций оказывают вспомогательные механизмы. Необходимо значительно повысить к. п. д. насосов, вентиляторов, дымососов, создать более совершенные мельницы для помола угля, обеспечить возможность наиболее экономичными способами регулировать напор и производительность механизмов собственного расхода. Это требует от промышленности создания двухскоростных электродвигателей соответствующей мощности, изготовления для питательных и циркуляционных насосов гидромуфт, создания гидромуфт и электромагнитных муфт для других механизмов.

Электропромышленность должна дать для котельных мощных тепловых электростанций электродвигатели такого исполнения, чтобы они обеспечивали надежную работу в условиях относительно высоких температур и запыленности помещений. Для дымососов и дутьевых вентиляторов должны быть созданы электродвигатели открытой установки. В некоторых случаях такие же двигатели потребуются и для циркуляционных насосов.

Для питателей топлива должен быть создан экономичный электропривод, регулируемый в широких пределах и приспособленный к условиям автоматического регулирования процесса горения. Более совершенные и надежные приводы, изготавляемые и поставляемые со всей аппаратурой управления и защиты, должны быть созданы для задвижек и колонок автоматического регулирования.

По-иному решаются вопросы управления мощными тепловыми электростанциями, построенные по блочному принципу. Принятый до настоящего времени принцип централизации управления всем электрооборудованием электростанции, включая оборудование собственного расхода, не пригоден для блочных электростанций, так как нарушает принцип блочности. Более рациональным является совмещение на блочных щитах управления сигнализации, управления, защиты и автоматики тепловой и электрической частей каждого блока. Применение таких щитов, обычно выполняемых общими на два блока, позволяет уменьшить численность персонала и отказаться в отдельных случаях от сооружения главного щита управления, перенеся управление отходящими линиями на первый блочный щит станции.

Что касается релейной защиты, то ее наиболее рационально располагать вблизи соответствующих распределительных устройств: защиту отходящих линий на территории открытых распределительных устройств, защиту генераторов, трансформаторов и оборудования собственного расхода вблизи соответствующего оборудования. Независимые источники электроэнергии для целей защиты, автоматики, управления и аварийных нужд (освещение, электродвигатели небольшой мощности) располагаются также децентрализованно, по блочным щитам.

Связь с диспетчерской службой энергосистемы может осуществляться через дежурного первого блочного щита. На блочные щиты управления должно выноситься минимальное количество измерительных приборов, приборов управления и сигнализации. Комплексные блочные щиты управления должны изготавливаться на промышленных предприятиях.

Осуществление новых принципов управления мощными электростанциями требует всесторонней автоматизации тепловых процессов и вспомогательных устройств, комплексного решения вопросов управления электрической и тепловой частями станции, перестройки нашей практики проектирования, а также предъявляет новые серьезные требования к квалификации и подготовке эксплуатационного персонала.

[30. 8. 1957]



# Применение напряжения 500 кв вместо 400 кв

Доктор техн. наук, проф. И. А. СЫРОМЯТНИКОВ

Государственный научно-технический комитет Совета Министров СССР

Опыт проектирования электропередач Куйбышевская ГЭС — Москва, Куйбышевская ГЭС — Урал и Сталинградская ГЭС — Москва показал, что передача мощности порядка 500...800 Мвт на цепь на расстояние около 1 тыс. км и более требует применения дорогостоящих мероприятий по обеспечению устойчивости параллельной работы.

Для таких электропередач более рациональным является применение напряжения порядка 500 кв. При этом при обеспечении постоянства напряжений регуляторами возбуждения пропускная способность электропередачи повышается примерно на 40% по сравнению с передачей на напряжении 400 кв.

Весьма существенным обстоятельством является то, что имеется полная возможность лишь с небольшими изменениями использовать существующее оборудование 400 кв при напряжении 500 кв. Известно, что испытательное напряжение промышленной частоты для оборудования 400 кв было определено, исходя из величины  $3U_{\text{газ}}$ . В то же время для напряжений 400...500 кв вполне целесообразно принять испытательное напряжение равным  $2,5 U_{\text{газ}}$ , поскольку уровень коммутационных перенапряжений составляет больше  $3U_{\text{газ}}$  и его все равно необходимо ограничивать при помощи специальных мероприятий до  $2...2,2 U_{\text{газ}}$ .

За границей, например в Швеции, уровень испытательного напряжения для электропередачи 380 кв снижается против первоначально принятого и предполагается существующие электропередачи перевести на напряжение 500 кв. Этот вопрос обсуждался также на последней конференции по большим сетям в Париже в 1956 г.

Следует учесть также и то обстоятельство, что снижение испытательного напряжения при сохранении номинального напряжения 400 кв даст весьма небольшую экономию, поскольку стоимость изоляции для таких передач относительно невелика. Кроме того, для сооружаемых в настоящее время электропередач Куйбышевская ГЭС — Урал и Сталинградская ГЭС — Москва имеются запасы по изоляции, которые практически могут быть использованы только при переходе на напряжение 500 кв.

По поручению Технического управления ГПИ «Теплоэлектропроект» произвел технико-экономическое сравнение двух вариантов передачи энергии при напряжениях 400 и 500 кв. Эти расчеты показали, что применение напряжения 500 кв вместо 400 кв при прочих равных условиях не только повышает пропускную способность электропередачи примерно на 40%, но и позволяет осуществить передачу в Москву от Куйбышевской ГЭС и Сталинградской ГЭС мощности по 1 500 Мвт от каждой при более простой схеме электропередачи.

При передаче от Куйбышевской ГЭС в Москву мощностей 1 350, 1 600 и 1 900 Мвт потери энергии в электропередаче при напряжении 400 кв составляют соответственно 384; 529 и 737 млн.

квт·ч в год, а при напряжении 500 кв, несмотря на увеличение потерь на корону, уменьшаются до 346; 448 и 595 млн. квт·ч в год, т. е. соответственно на 10, 15,5 и 19,3%. Передача указанной мощности при напряжении 400 кв может быть осуществлена при применении продольной компенсации мощностью 486; 715 и 1 140 Мва, а при напряжении 500 кв при сниженной мощности продольной компенсации до величины 0; 289 и 486 Мва.

При передаче от Сталинградской ГЭС в направлении на Москву мощности 1 200, 1 500 и 1 800 Мвт с отборами на Балашовской, Липецкой и Рязанской подстанциях потери энергии в электропередаче при напряжении 400 кв составят соответственно 294; 442 и 622 млн. квт·ч в год, а при напряжении 500 кв — 315; 420 и 547 млн. квт·ч в год. Для обеспечения такой пропускной способности при помощи продольной компенсации мощность последней при напряжении 400 кв должна быть 231; 630 и 939 Мва, причем в последнем случае, т. е. при передаче 1 800 Мвт, необходима установка еще шести синхронных компенсаторов, тогда как при напряжении 500 кв мероприятия по увеличению пропускной способности требуются только при передаче мощности более 1 500 Мвт. В частности, в электропередаче Сталинградская ГЭС — Москва применение напряжения 500 кв позволит отказаться от установки продольной компенсации и по крайней мере от четырех синхронных компенсаторов.

При передаче мощности менее 1 200 Мвт напряжение электропередачи может быть снижено с 500 до ~450 кв при помощи регулировочных автотрансформаторов и снижения напряжения на генераторах гидростанций, в результате чего потери на корону в минимальных режимах будут снижены и тем самым уменьшатся общие потери и повысится экономичность электропередачи также и при пониженных нагрузках.

Применение напряжения 500 кв дает возможность в случае надобности еще более повысить пропускную способность этих электропередач при помощи известных мероприятий, как, например, установки синхронных компенсаторов на промежуточных подстанциях, поперечной или продольной компенсации. В этом отношении напряжение 500 кв при упомянутых расстояниях и мощностях передачи, несомненно, является более перспективным по сравнению с напряжением 400 кв.

При переводе уже построенных и строящихся линий электропередачи возможно использование существующего оборудования и изоляции линий при условии ограничения внутренних перенапряжений величиной не выше  $2,5 U_{\text{газ}}$  путем установки вентильных разрядников с соответствующими характеристиками и выключателей с шунтирующими сопротивлениями, там где это необходимо.

При сниженном уровне внутренних перенапряжений до  $2,5 U_{\text{газ}}$  при мощностях выше 1 300 Мвт на две цепи применение напряжения 500 кв имеет экономические преимущества и при-

водит к уменьшению капитальных затрат на 3...5% и эксплуатационных расходов на 4...9% для линий электропередачи типа Куйбышевская ГЭС—Москва и Сталинградская ГЭС—Москва.

Необходимо также отметить, что связь энергосистем Центра с энергосистемами Урала на напряжении 400 кв является весьма слабой и пропускная способность линии Куйбышевская ГЭС—Урал составляет менее 10% мощности наименьшей из энергосистем.

Применение напряжения 500 кв на электропередаче Куйбышевская ГЭС—Урал повысит ее пропускную способность также примерно на 40%, что обеспечит более надежную параллельную работу энергосистем Центра с энергосистемами Урала и улучшит условия их взаимного резервирования.

Напряжение 500 кв для других линий электропередачи в Европейской и Азиатской частях СССР такой же мощности, как Куйбышевская и Сталинградская, будет также более целесообразным, чем 400 кв.

Проведенные в марте 1957 г. испытания по работе линии 400 кв при напряжении 500 кв дали хорошие результаты.

В связи с изложенным выше Министерством электростанций принято решение о перепроектировании линий электропередачи Сталинградская ГЭС—Москва, Куйбышевская ГЭС—Урал и других на напряжение 500 кв.

За расчетный уровень изоляции принято напряжение, равное  $2,5 U_{\text{газ}}$ , т. е. напряжение 700 кв промышленной частоты.

Ограничение внутренних перенапряжений до величины  $2,5 U_{\text{газ}}$  должно быть обеспечено за счет установки разрядников нового типа. Для перестраховки могут быть установлены искровые промежутки, предотвращающие от воздействия на оборудование перенапряжений, превышающих допустимые.

Естественно, что решение о применении напряжения 500 кв для новых электропередач затрагивает и электропередачу Куйбышевская ГЭС—Москва, которую также желательно перевести на напряжение 500 кв. При рассмотрении этого вопроса в связи с необходимостью передачи в паводок 1957 г. мощности, превышающей запроектированную, были внесены предложения, позволяющие осуществить переход на 500 кв в два этапа, приняв на первом этапе напряжение 500 кв в Москве и 430...440 кв на Куйбышевской ГЭС. Это могло дать возможность, согласно расчетам инж. Д. И. Азарева, передать повышенную мощность без продольной компенсации, практически с теми же запасами устойчивости в нормальном и аварийном режиме, какие электропередачи имеют при работе с напряжением 420 кв. Напряжение 430...440 кв на Куйбышевской ГЭС может быть получено за счет повышения напряжения на генераторах. Для трансформации напряжения 500 кв на 110 кв было предложено установленные в Москве трансфор-

маторы 400/115 кв пересоединить по автотрансформаторной схеме, что обеспечивает коэффициент трансформации автотрансформатора 525/115/11 кв.

Вопрос о порядке перевода электропередачи Куйбышевская ГЭС—Москва 400 кв на напряжение 500 кв был подробно рассмотрен на совместном совещании эксплуатационных работников и работников проектных организаций и электропромышленности и приняты следующие решения.

Напряжение 500 кв является номинальным. Максимальным, длительно допускаемым в условиях эксплуатации является напряжение 525 кв.

У существующих воздушных выключателей 400 кв необходимо добавить восьмую гасительную камеру. Конденсаторы связи и трансформаторы напряжения должны быть усилены путем добавления одного элемента, пятого у конденсаторов и четвертого у трансформаторов напряжения. Вентильные разрядники необходимо заменить на новые, выполненные с магнитным дутьем.

Как уже указывалось выше, трансформаторы на подстанции 400 кв в Москве пересоединяются по автотрансформаторной схеме, в результате коэффициент трансформации будет 525/115/11 кв. Для новых подстанций поставляются автотрансформаторы в таком исполнении, что они могут работать при трансформаторном соединении на 400 кв и при автотрансформаторном—при 500 кв.

У автотрансформаторов обмотки, изготовленные ранее на 400 кв, должны быть заменены на новые с некоторым уменьшением их мощности.

Наиболее трудоемкой и сложной работой является модернизация повысительной подстанции Куйбышевской ГЭС. Были рассмотрены три варианта:

1. Установка автотрансформаторов 400/500 кв в линиях электропередачи на Москву и Урал. При этом капитальные затраты составят 30 млн. руб. и увеличение годовых потерь на 3,5 млн. руб.

2. Установка в нейтралях повысительных трансформаторов Куйбышевской ГЭС специальных бустеров влечет за собой капитальные затраты 34 млн. руб. и увеличение потерь на 1 млн. руб.

3. Замена обмоток 400 кв на 500 кв с использованием всех имеющихся повысительных трансформаторов требует капитальных затрат 19 млн. руб. без увеличения потерь.

Таким образом, третий вариант является наиболее экономичным.

Установленные реакторы 400 кв должны быть снабжены специальными подпорными устройствами.

Остальное оборудование 400 кв при переводе на 500 кв остается без изменений.

Таким образом, переход от напряжения 400 кв на напряжение 500 кв является оправданным как с технической, так и с экономической точек зрения не только для новых, но и для уже построенных электропередач.



# Испытания статической устойчивости одноцепной электропередачи 400 кв

Кандидат техн. наук С. А. СОВАЛОВ

Москва

Для правильной эксплуатации электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва и обеспечения наиболее полного использования энергии Куйбышевской ГЭС осенью 1956 г. потребовалось более точно определить пропускную способность одной цепи электропередачи 400 кв. В связи с этим было предложено провести опыты по определению предела статической устойчивости одной цепи электропередачи с тем, чтобы, установив минимально необходимый по условиям надежности запас статической устойчивости, полностью использовать пропускную способность электропередачи.

Испытания были проведены объединенным диспетчерским управлением Центра совместно с Куйбышевской ГЭС, Мосэнерго и Куйбышевэнерго при участии ЦНИЭЛ и ОРГРЭС Министерства электростанций по программе, утвержденной МЭС.

**Испытания.** Схема электропередачи перед испытаниями характеризовалась следующим.

На Куйбышевской ГЭС в работе находилось шесть генераторов (рис. 1); располагаемая мощность генератора по напору составляла около 90 Мвт (номинальная мощность — 105 Мвт). Мощность Куйбышевской ГЭС передавалась через две трансформаторные группы 13,8/420 кв, мощностью по 370,5 Мва и одну цепь электропередачи 400 кв в сеть 110 и 220 кв приемной энергосистемы (Московской) и частично через трансформаторную группу 13,8/121 кв, мощностью 247 Мва — в сеть 110 кв местной энергосистемы (Куйбышевской). Генераторы гидроэлектростанции работали с регуляторами возбуждения (компаундирование и корректоры напряжения). Были включены два шунтирующих реактора по 150 Мвар: один на Куйбышевской ГЭС, другой на переключательном пункте 2.

На понизительной подстанции 400 кв были включены две трансформаторные группы 410/115/13,8 кв мощностью по 270 Мва с регулирующими трансформаторами. Связь с сетью 110 кв приемной энергосистемы осуществлялась по шести линиям 110 кв и с сетью 220 кв — че-

рез две трансформаторные группы 115/220 кв с регулирующими трансформаторами по двум линиям 220 кв. Были включены два синхронных компенсатора, работающих без регуляторов возбуждения.

В период, предшествовавший испытаниям (до ввода в действие генератора 6), электропередача работала с нагрузкой до 430 Мвт. В целях повышения устойчивости и экономичности напряжение на ее концах поддерживалось повышенным до 420 кв. Уровень напряжения на шинах приемной энергосистемы — 107 ... 109 кв; на шинах местной энергосистемы — 118 ... 120 кв.

Непосредственно перед проведением первого опыта Куйбышевская ГЭС выключателем с была отделена от местной энергосистемы, и все шесть генераторов с нагрузкой порядка 400 Мвт работали на цепь 400 кв.

Перед опытом для предотвращения опасного снижения частоты при нарушении устойчивости или отключении электропередачи в приемной (объединенной) энергосистеме был создан вращающийся резерв мощности, равный примерно 750 Мвт, в том числе 450 Мвт на гидроэлектростанциях.

Оперативный персонал энергосистем был предупрежден о возможности значительных качаний в энергосистемах. Персоналу электростанций были даны указания о немедленном подъеме нагрузки при снижении частоты.

В исходном режиме на гидрогенераторах Куйбышевской ГЭС была установлена нагрузка 428 Мвт. Распределение нагрузки между агрегатами в начале опыта не могло быть вполне равномерным, так как генератор 3 из-за затруднений с регулированием его нагрузки был загружен почти до полной располагаемой мощности уже в исходном режиме, а генератор 2, присоединенный к той же обмотке 13,8 кв трансформаторной группы, что и генератор 3, загружался полностью в последнюю очередь, чтобы ограничить длительность перегрузки обмотки.

Данные исходного режима электропередачи приведены в табл. 1, где даны показания основ-

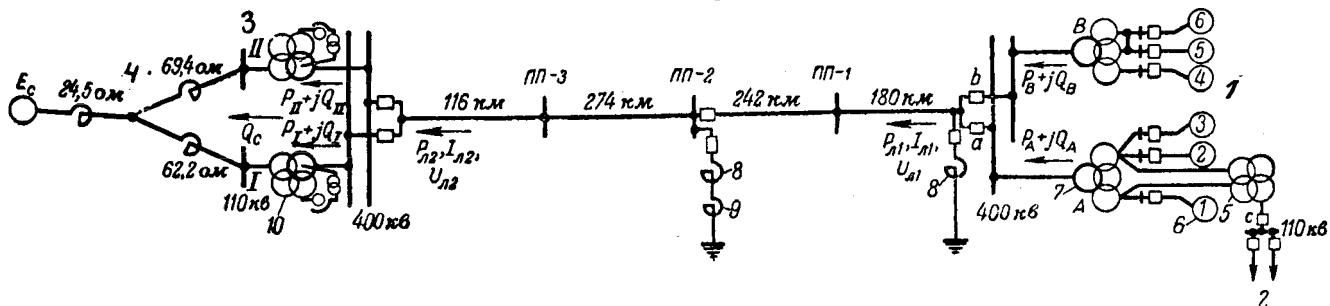


Рис. 1. Схема электропередачи.

1 — Куйбышевская ГЭС; 2 — местная энергосистема; 3 — Ногинская подстанция; 4 — приемная энергосистема; 5 — трансформаторная группа 242/121/13,8 кв, 247 Мва,  $x_T = 0,079$ ; 6 — гидрогенераторы 123,5 Мва, 13,8 кв,  $r_d = 0,505$ ,  $x'_d = 0,19$ ; 7 — трансформаторные группы 420/13,8 кв, 370,5 Мва,  $x_T = 0,128$ ; 8 — шунтирующие реакторы

150 Мва, 400 кв; 9 — заземляющий реактор  $I_H = 224 \alpha$ ,  $U_H = 6,65 \dots 5,46$  кв; 10 — трансформаторная группа 410/115/11 кв, 270 Мва,  $x_T = 0,124$ , установленный коэффициент трансформации 435/115; ПП — переключательные пункты. Линия выполнена проводом ЗХАСО-480.

Таблица 1

Показания приборов на Куйбышевской ГЭС и Ногинской понизительной подстанции  
(мощность в Мвт и Мвар, ток в а, напряжение в кв)

Время суток	Режимы	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$\Sigma P_{1-6}$	$\Sigma Q_{1-6}$	$U_1$	$U_2 = U_3$	$U_4$	$U_5 = U_6$	$P_A + P_B$	$P_{LI}$	$U_{LI}$	$I_{LI}$	$P_1 + P_{II}$	$U_{LI}$
Опыт I																			
14 ч 45 мин	1 — исходный	70	60	77	70	70	81	428	140	14,2	14,55	14,4	14,45	420	430	420	590	—	—
14 ч 52 мин	2	80	60	76	80	80	81	457	169	14,3	14,55	14,3	14,45	450	450	421	620	420	418
14 ч 55 мин	3	80	60	78	78	90	91	473	174	14,3	14,55	14,3	14,45	468	463	419	640	440	418
15 ч 00 мин	4	83	60	78	80	90	90	478	176	14,3	14,55	14,3	14,45	473	465	419	650	450	418
15 ч 05 мин	5	88	60	76	90	90	90	495	183	14,3	14,55	14,3	14,45	483	480	419	665	460	418
15 ч 14 мин	6	88	80	76	89	92	90	515	211	14,3	14,55	14,2	14,45	500	500	418	700	475	405
15 ч 22 мин	7	88	90	83	92	92	92	537	230	14,3	14,5	14,1	14,4	520	520	413	725	490	400
15 ч 32 мин	8 — снижение напряжения	88	90	84	92	92	92	538	277	13,6	13,8	13,5	14,0	520	520	395	775	490	380
15 ч 50 мин	9 — нарушение устойчивости																		
Опыт II																			
17 ч 05 мин	1 — исходный	80	76	83	93	90	91	513	163	14,2	14,2	14,2	14,2	430	430	420	610	—	—
17 ч 07 мин	2 — после наброса мощности	76	80	83	91	90	90	510	209	14,2	14,2	14,3	14,3	500	500	413*	670*	—	—

\* По осциллографу.

ных приборов Куйбышевской ГЭС и Ногинской понизительной подстанции.

Утяжеление режима и подведение электропередачи к пределу статической устойчивости осуществлялись путем подъема активной нагрузки генераторов ГЭС. При этом персоналу станции и приемных энергосистем было запрещено регулировать напряжение; режим напряжения и распределение реактивных мощностей регулировались только автоматическими регуляторами возбуждения.

На каждой ступени утяжеления режима электропередачи записывались показания основных приборов (табл. 1) и для контроля кратковременно пускались осциллографы. При испытаниях осциллографировались следующие величины: мощность, напряжение и ток в начале линии 400 кв; напряжение и ток в конце линии; напряжения и токи статоров и роторов генераторов 2 и 5, напряжение на шинах 110 кв понизительной подстанции и др.

Активная нагрузка гидроэлектростанции была поднята ступенями от исходной до полной располагаемой мощности — 537 Мвт (табл. 1), что не вызвало нарушения устойчивости электропередачи.

В соответствии с программой дальнейшее утяжеление режима электропередачи осуществлялось снижением напряжения генераторов путем воздействия на уставки регуляторов возбуждения. Предусматривалось снижение напряжения тремя ступенями на 0,9 кв с записью режима на каждой ступени.

После записи режима 7 была дана команда снизить напряжение генераторов на 3...5%. При регулировании режима у персонала возникли затруднения, связанные с перераспределением реактивной мощности между генераторами («текучесть» режима вблизи предела статической устойчивости).

Когда новый режим был установлен, напряжение оказалось сниженным на 4% (режим 8, табл. 1).

Была дана команда снизить напряжение еще на одну ступень. Персонал приступил к регулированию режима, напряжение на шинах 400 кв снизилось примерно до 390 кв. При дальнейшем снижении без заметных предшествующих качаний произошло нарушение синхронизма, активная мощность электростанции резко снизилась и возник асинхронный режим.

Второй опыт имел целью проверить устойчивость при внезапном набросе на электропередачу мощности, передававшейся в местную энергосистему.

Перед опытом была собрана схема параллельной работы гидроэлектростанции на электропередачу 400 кв и на местную энергосистему (включены выключатели  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ). Нагрузка электростанции была установлена 513 Мвт; в местную энергосистему передавалось 70 Мвт. В местной энергосистеме был создан вращающийся резерв, превышавший мощность, получаемую от гидроэлектростанции. Наброс мощности был осуществлен отключением выключателя  $c$ . После наброса по приборам были замечены относительно небольшие и быстро затухающие колебания; запас устойчи-

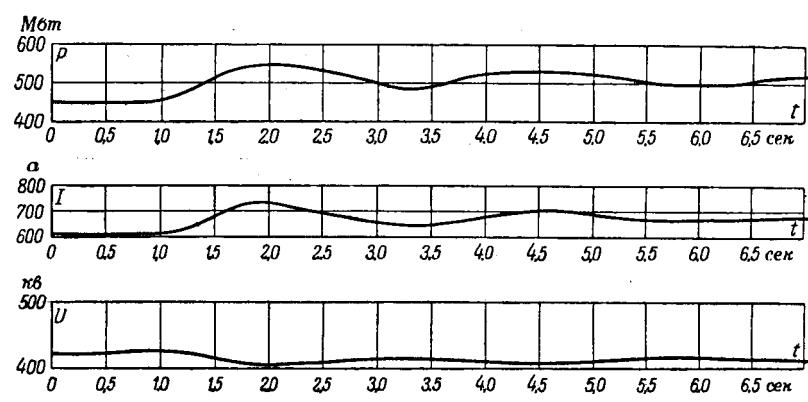


Рис. 2. Результаты обработки осциллографа второго опыта (отправной конец линии).

ности оказался достаточным для сохранения синхронизма.

На рис. 2 показаны результаты обработки осцилограммы<sup>1</sup> опыта II (табл. 1). Характер динамического перехода, большая длительность первого цикла качаний указывают на близость к пределу динамической устойчивости. Расчетная проверка показала, что увеличение толчка нагрузки на 10...15 Мвт (при той же начальной нагрузке цепи 400 кв) привело бы к нарушению синхронизма.

**Расчетная схема электропередачи и расчеты режимов.** Для анализа режимов электропередачи была составлена расчетная схема электропередачи для условий, в которых проходили испытания.

Приемная энергосистема была замещена приведенными к шинам 110 кв понизительной подстанции тремя соединенными в звезду реактивными сопротивлениями, определенными на расчетном столе по токам короткого замыкания на этих шинах. Сверхпереходные и переходные токи короткого замыкания от системы близки по величине, и приведенные реактивные сопротивления системы  $x_d'$  и  $x_d''$  практически одинаковы.

Для проверки и анализа режимов электропередачи были проведены расчеты всех ступеней ухудшения режима. По активной и реактивной мощности генераторов были определены напряжения, токи и мощности в начале и конце линии 400 кв. Кроме того, для каждого режима определялись э. д. с. генераторов, эквивалентная э. д. с. системы (за приведенным реактивным сопротивлением системы), углы в каждом из элементов и суммарный угол передачи.

В табл. 2 приведены расчетные данные. Сопоставление их с показаниями приборов (табл. 1) показывает, что результаты расчета и данные опыта сходятся с достаточной точностью; расхождения не превышают 2...3%. В табл. 2 приведены также расчетные значения углов передачи и эквивалентной э. д. с. системы.

Заслуживает быть отмеченным, что даже в условиях, когда персонал энергосистемы не вмешивался в регулирование напряжения, э. д. с. за приведенным реактивным сопротивлением на первых ступенях ухудшения режима не оставалась неизменной, а заметно возрастала при утяжелении режима (табл. 2). Это объясняется, по-види-

мому, влиянием изменения нагрузок в зависимости от напряжения и действием регуляторов возбуждения генераторов приемной энергосистемы.

На последних ступенях увеличения мощности и угла передачи, а также при снижении напряжения генераторов э. д. с. за приведенным реактивным напряжением системы оставалась практически неизменной.

**Статические характеристики электропередачи.** На рис. 3 приведены статические характеристики электропередачи — зависимости активной мощности генераторов от суммарного угла электропередачи. Для построения характеристик расчетная схема электропередачи приведена к упрощенной эквивалентной схеме (рис. 4), что позволило исследовать режимы от правового конца передачи, пользуясь простейшей схемой работы генератора через реактивное и активное сопротивления на шины неизменного напряжения.

Кривая 1 рис. 3 представляет зависимость активной мощности от угла передачи при  $E_d' = \text{const}$ . Как видно из этой кривой, рассматриваемая электропередача при отсутствии регуляторов возбуждения имела бы предел мощности, равный 486 Мвт (при угле передачи  $-86^\circ$ ); запас к мощности, передаваемой в исходном режиме, без учета регуляторов возбуждения составил бы только 13,5%.

Кривая 2 рис. 3 дает зависимость активной мощности от угла при  $E_d' = \text{const}$ . Максимум этой кривой — 532 Мвт при  $\delta = 95,5^\circ$  (т. е. в зоне «искусственной» устойчивости), как принято считать, характеризует предел мощности при регуляторах обычного типа. По действовавшим до сих пор нормативам устойчивости электропередачи необходимый запас устойчивости (относительно предела при  $E_d' = \text{const}$ ) равен 10%.

Кривые 3 и 4 рис. 3 представляют зависимости активной мощности при изменении угла электропередачи с учетом действия регуляторов возбуждения, поддерживающих при утяжелении режима неизменное напряжение на зажимах генераторов. Кривые эти расположены значительно выше кривой 1, в чем проявляется влияние регуляторов

<sup>1</sup> В обработке осцилограмм и расчетах принимали участие Л. Н. Гайлит, Е. П. Палецкий, Э. В. Турский, А. Г. Хлебников.

Таблица 2

Режимы	$P_A + P_B$	$Q_A + Q_B$	$U_{II}$	$I_{II}$	$P_I + P_{II}$	$Q_I + Q_{II}$	$U_{II2}$	$Q_c$	Генераторы						Повысительные трансформаторы		Линия 400 кв		Повысительные трансформаторы		Суммарный угол передачи				
															A		B								
									1	2	3	4	5	6	генератор 1	генераторы 2 и 3	генератор 4	генераторы 5 и 6	генератор 1	генераторы 2 и 3	генератор 4	генераторы 5 и 6	Линия 400 кв	Повысительные трансформаторы	Эквивалентное сопротивление системы
1	423	55	425	505	405	77	420	17	9,5	7,7	9,7	9,0	9,1	10,1	4,9	7,1	3,9	4,2	31,2	5,7	7,6	57,4	61,3	59,3	417
2	452	79	425	625	452	58	417	-9	10,5	7,7	9,6	10,4	10,2	9,9	5,1	7,1	4,5	4,5	34,1	6,2	8,1	62,8	65,1	64,0	419
3	468	81	424	650	445	28	419	-29	10,4	7,7	9,4	10,0	11,6	10,6	5,1	7,0	4,5	5,0	35,3	6,3	8,1	64,2	66,3	65,3	426
4	473	82	424	655	450	32	420	-40	10,7	7,7	9,4	10,3	11,6	10,6	5,3	7,0	4,6	5,0	35,7	6,4	8,2	65,0	66,9	66,0	429
5	490	83	423	680	466	14	423	-60	11,3	7,7	9,5	11,4	11,6	10,7	5,4	7,1	5,2	5,0	37,0	6,5	8,3	66,6	68,5	67,6	435
6	509	107	420	705	483	0	415	-78	11,2	10,0	9,5	11,5	11,5	10,3	5,8	8,5	5,1	5,1	39,3	6,8	8,7	70,2	73,3	72,7	435
7	531	137	416	735	500	-32	408	-117	11,1	11,2	10,2	11,7	11,5	10,6	6,0	9,0	5,4	5,2	42,9	7,3	9,1	75,1	79,5	77,3	435
8	532	160	397	775	499	-78	391	-167	11,9	12,4	11,6	12,8	11,8	10,7	6,6	10,0	6,0	5,6	48,0	7,7	9,3	81,3	87,4	84,4	435

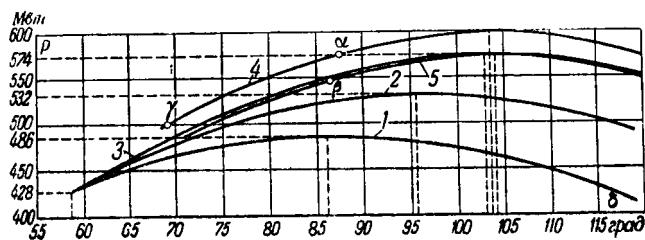


Рис. 3. Статические характеристики электропередачи.  
 1 —  $P = f(\delta)$  при  $E_d = 492$  кв и  $U_g = 468$  кв;  
 2 —  $P = f(\delta)$  при  $E'_d = 456$  кв и  $U_g = 468$  кв;  
 3 —  $P = f(\delta)$  при  $U = 438$  кв и  $U_g = 468$  кв;  
 4 —  $P = f(\delta)$  при  $U = 438$  кв и  $U_g = 488$  кв;  
 5 —  $P = f(\delta)$  при  $U = 420$  кв и  $U_g = 488$  кв.

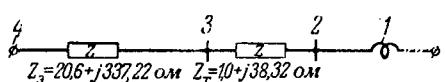


Рис. 4. Эквивалентная расчетная схема электропередачи.  
 1 — генераторы Куйбышевской ГЭС; 2 — шины 13,8 кв ГЭС; 3 — шины 400 кв ГЭС; 4 — приемная система ( $U_g = 1,122E_{cist} < -0,9^\circ$ ).

возбуждения. Первая из них построена в предположении, что эквивалентная э. д. с. приемной системы поддерживается равной значению этой э. д. с. в исходном режиме. При построении кривой 4 э. д. с. системы принята равной ее значению в режимах, близких к предельному..

Кривая 5 построена для условий режима 8, т. е. при снижении напряжения генераторов на 4%.

На рис. 5 показаны зависимости синхронизирующих мощностей  $S_{Ed}$ ,  $SE'_d$  и  $S_v$  от угла  $\delta$  при постоянстве соответственно  $E_d$ ,  $E'_d$  и  $U$  для режима 8 (кривая 5 рис. 3).

Точки  $\alpha$  и  $\beta$  на кривых 4 и 5 рис. 3 показывают пределы «естественной» устойчивости с учетом влияния регуляторов возбуждения, астатически регулирующих напряжение генераторов. Эти пределы равны 574 Мвт при напряжении генераторов, равном исходному, и 548 Мвт при сниженном напряжении. Точка  $\gamma$  на кривой 4 рис. 3, соответствующая пределу 500 Мвт, показывает допустимую мощность при 15-процентном запасе по отношению к пределу «естественной» устойчивости (запас, рекомендованный Техническим управлением МЭС для передач обычного типа).

Максимум кривой 4 (~600 Мвт) показывает, какой предел статической устойчивости может быть получен для рассматриваемой электропередачи за счет регуляторов «сильного» действия, поддерживающих напряжение генераторов неизменным при увеличении передаваемой активной мощности и обеспечивающих устойчивую работу в зоне, определяемой условием  $S_u > 0$ .

Для сравнения укажем, что при поддержании в начале линии 400 кв и на шинах 110 кв понизительной подстанции неизменного напряжения максимум передаваемой мощности составил бы 720 Мвт. Этот максимум характеризует возможность дополнительного повышения предела устойчивости за счет применения на синхронных ком-

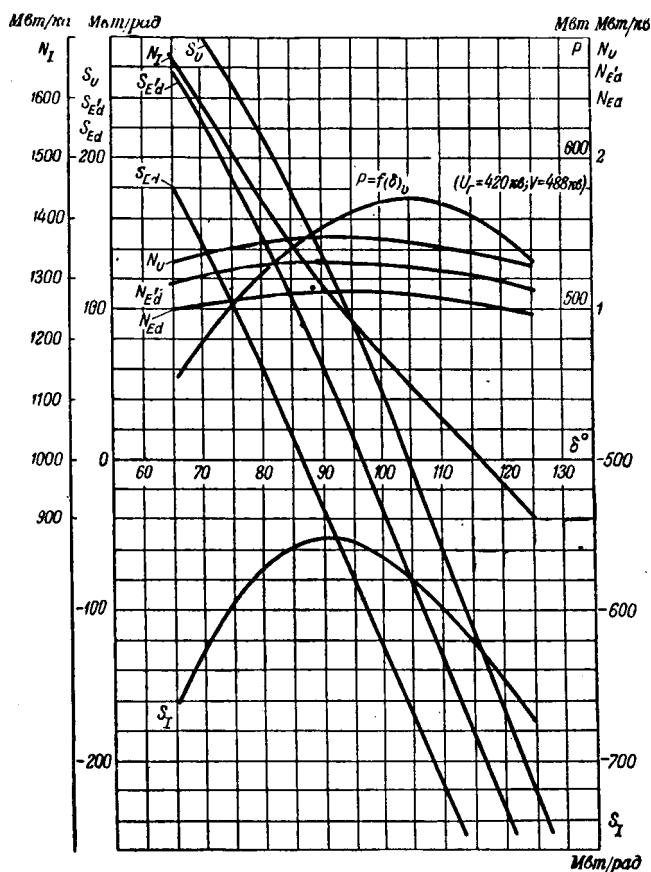


Рис. 5.

пенсаторах понизительной подстанции регуляторов возбуждения, поддерживающих неизменным напряжение на шинах 110 кв и устраняющих влияние реактивности приемной энергосистемы.

Для рассматриваемой одноцепной электропередачи предел мощности при постоянстве напряжений на концах линии (определенный по точной схеме замещения линии) составляет 840 Мвт при напряжении 420 кв и 920 Мвт при повышении напряжения до 440 кв.

**Определение предела устойчивости.** Для исследования статической устойчивости электропередачи и анализа влияния регуляторов возбуждения использована следующая система уравнений малых колебаний [Л. 2, 4, 7, 8]:

$$\left. \begin{aligned} (M p^2 + D) \Delta \delta &= -\Delta P; \\ \Delta P &= S_{Ed} \Delta \delta + N_{Ed} \Delta E_d = \\ &= S'_{Ed} \Delta \delta + N_{E'_d} \Delta E'_d = \\ &= S_u \Delta \delta + N_u \Delta U = \\ &= S_I \Delta \delta + N_I \Delta I; \\ T_{d0} p \Delta E'_d &= \Delta E_{de} - \Delta E_d; \\ \Delta E_{de} &= A(p) \Delta I + B(p) \Delta U, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $M$  — постоянная механической инерции;

$D$  — демпферный коэффициент;

$P$  — электрическая мощность генератора;

$S_{E_d}$ ,  $S_{E_d'}$ ,  $S_U$ ,  $S_I$  — синхронизирующие мощности

$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)$  при постоянстве соответственно: продольных составляющих э. д. с. за синхронным и переходным реактивными сопротивлениями ( $E_d$  и  $E_d'$ ), напряжения ( $U$ ) и тока статора генератора ( $I$ );

$N_{E_d}$ ,  $E_{E_d'}$ ,  $N_U$ ,  $N_I$  — частные производные элек-  
трической мощности по  $E_d$ ,  $E_d'$ ,  $U$ ,  $I$   
(при постоянстве угла  $\delta$ );

$T_{d0}$  — постоянная времени обмотки возбужде-  
ния генератора при разомкнутой цепи  
статора;

$E_{de}$  — напряжение возбуждения, приведенное  
к цепи статора.

Операторные коэффициенты  $A(p)$  и  $B(p)$  за-  
висят от параметров схемы регулирования воз-  
буждения и в рассматриваемом случае могут  
быть определены из следующей системы урав-  
нений (рис. 6):

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_s - \Delta U_{ss} &= r_u (\Delta i_{ss} - \Delta i_A); \\ \Delta U_{ss} &= (L_{ss} p + r_{ss}) \Delta i_{ss} + M p \Delta i_U; \\ \Delta U_s &= \alpha_1 \Delta i_{ss} + \alpha_2 \Delta i_U; \\ \Delta i_A &= k_i \Delta I; \\ \Delta i_U &= -\frac{k_U}{T_U p + 1} \Delta U; \\ \Delta E_{de} &= k_{ad} \Delta U_s. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При составлении этих уравнений приняты  
обычные допущения [Л.3]: сопротивление цепи  
якоря возбудителя равно нулю, запаздывание  
компаундирования отсутствует, ток выхода кор-  
ректора зависит только от напряжения генера-

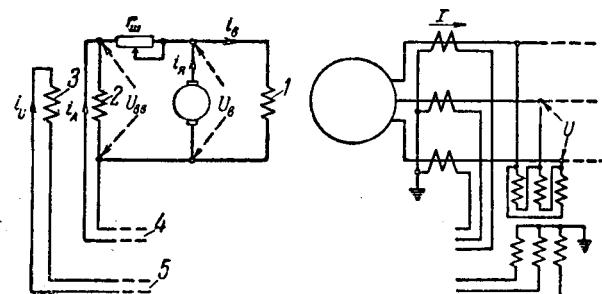


Рис. 6. Схема регулирования возбуждения.

1 — обмотка возбуждения гидрогенератора ( $r_g$ ,  $L_g$ ); 2 — основная обмотка возбуждения возбудителя ( $r_{ss}$ ,  $L_{ss}$ ); 3 — дополнительная обмотка возбуждения возбудителя; 4 — от устройства компаундирования; 5 — от корректора.

тора, и корректор замещается звеном первого порядка. Коэффициент связи между основной и дополнительной обмотками возбудителя принят равным единице.

Определяя из уравнений (2)  $E_{de}$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} A(p) &= k_{ad} \frac{r_u}{r_e} \frac{1}{T_e p + 1} \alpha_1 k_i; \\ B(p) &= -k_{ad} \frac{r_u + r_{ss}}{r_e} \frac{1}{(T_e p + 1)(T_U p + 1)} \alpha_2 k_U; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$T_e = \frac{L_{ss}}{r_e}; \quad r_e = r_u + r_{ss} - \alpha_1.$$

Характеристическое уравнение рассматриваемой системы уравнений малых колебаний имеет пятый порядок:

$$a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0. \quad (4)$$

Коэффициенты уравнения\*:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= M T'_d T_e T_U; \\ a_1 &= M (T'_d T_e + T'_d T_U + T_e T_U) + \Delta T'_d T_e T_U; \\ a_2 &= M (T'_d + T_e + T_U) + \Delta (T'_d T_e + T'_d T_U + T_e T_U) + T'_d T_e T_U S_{E_d'} - a_1 M T_U; \\ a_3 &= M + \Delta (T'_d + T_e + T_U) + T'_d (T_e + T_U) S_{E_d'} + T_e T_U S_{E_d'} - a_1 (M + \Delta T_U) + a_U M; \\ a_4 &= \Delta + T'_d S_{E_d'} + (T_e + T_U) S_{E_d'} - a_1 (\Delta + T_U S_I) + a_U \Delta; \\ a_5 &= S_{E_d} - a_I S_I + a_U S_U, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где

$$a_I = \frac{N_{E_d}}{N_I} k_{ad} \frac{r_u}{r_e} \alpha_1 k_i; \quad a_U = \frac{N_{E_d}}{N_U} k_{ad} \frac{r_u + r_{ss}}{r_e} \alpha_2 k_U;$$

$$T'_d = T_{d0} \frac{N_{E_d}}{N_{E_d'}}.$$

\* В частном случае при  $x_d = x_q$  характеристическое уравнение совпадает с полученным Л. В. Цукерником [Л. 8].

Параметры системы возбуждения генераторов 1 и 2 отличались от параметров системы возбуждения генераторов 3...6. В расчетах — при замещении генераторов одним эквивалентным — эти параметры варьировались в пределах имеющихся отклонений.

Анализ показал, что на изменение режима и статическую устойчивость электропередачи существенное влияние оказали следующие особенности системы возбуждения.

Статизм регулирования относительно мал и равен примерно 1,5 %. Возбудители всех генераторов работали в линейной части характеристики (коэффициент жесткой положительной обратной связи определялся в основном остаточным возбуждением и был порядка 0,94 ... 0,97).

Возбудители генераторов 3—6, предназначенные для постоянной работы при напряжении 800 в в схеме с вольтодобавочными агрегатами, временно работали без вольтодобавочных агрегатов при напряжении около 400 в. Постоянные времени обмоток возбуждения возбудителей весьма значительны и при отсутствии внешних сопротивлений равны 2,6 сек для генераторов 1 и 2 и 4,45 сек — для генераторов 3 ... 6.

Коэффициенты  $k_u$  при наладке были установлены практически одинаковыми для всех шести генераторов. Значение этого коэффициента для генераторов 1 и 2 близко к предельному, при котором обеспечивается устойчивое регулирование напряжения генератора, отключенного от сети. При имеющихся параметрах системы возбуждения и настройке регулятора величина предела статической устойчивости в большей мере определялась влиянием корректора, чем влиянием компаундирования.

Расчеты устойчивости проведены для режимов, определяемых условием поддержания неизменным номинального напряжения генераторов (кривая 5 рис. 3).

Анализ знака вещественной части корней характеристического уравнения, произведенный при помощи критериев Гурвица для параметров, соответствующих данным генераторов 3 ... 6, привел к следующим результатам: постоянный член характеристического уравнения  $a_5$  становится отрицательным при угле передачи 100 ... 105°; знак предпоследнего определителя Гурвица изменяется, т. е. наступает нарушение устойчивости типа «самораскачивания» при угле порядка 80°. При этом расчетное значение предела статической устойчивости равно примерно 530 Мвт. Параметры системы возбуждения генераторов 1 и 2 менее благоприятны, чем параметры системы возбуждения генераторов 3 ... 6, что несколько снижает расчетный предел устойчивости.

В режиме, имевшем место до нарушения устойчивости (режим 8, табл. 1 и 2), средний угол передачи достиг 84°. Нарушение устойчивости произошло при мощности 538 Мвт только после дополнительного снижения напряжения на 2 ... 3 % и соответствующего увеличения угла передачи до угла, близкого к 90°. С учетом снижения напряжения расчетный предел уменьшается до 515 ... 520 Мвт. Таким образом, расчетное значение предела статической устойчивости на 20 ... 25 Мвт ниже значения, полученного из опыта.

При оценке расчетных данных следует иметь в виду, что точность расчета ограничивается рядом факторов: неизбежными упрощениями при переходе к эквивалентной схеме, некоторыми различиями в параметрах системы возбуждения и настройке регуляторов возбуждения генераторов, заменой приемной энергосистемы шинами неиз-

менного напряжения за эквивалентным реактивным сопротивлением, пренебрежением статизмом регуляторов возбуждения при ухудшении режима и неучетом влияния насыщения генераторов.

Так как последний фактор является наиболее существенным, дополнительно было рассмотрено влияние насыщения генераторов на предел статической устойчивости. В расчетах учитывалось изменение  $x_{ad}$  и связанных с этой величиной характеристик и параметров рассматриваемой системы.

Учет насыщения не изменяет зависимости мощности от угла при постоянстве напряжения генераторов. Насыщение оказывает существенное влияние на величину синхронизирующей мощности  $S_{E_d}$  и несколько меньшее — на  $S_{E'_d}$ ; эти синхронизирующие мощности становятся равным нулю при больших углах (точки  $S_{E_d} = 0$  и  $S_{E'_d} = 0$  на характеристике  $P = f(\delta)$  при  $U = \text{const}$  приближаются к точке, для которой  $S_u = 0$ ). Значения  $k_u$  и  $k$ , резко уменьшаются.

Изменение знака последнего члена характеристического уравнения наступает при угле, равном примерно 102 ... 104°, а «самораскачивание» — при угле 92 ... 94°, т. е. точка, в которой  $a_5 = 0$  и точка «самораскачивания» сближаются (соответствующие пределы мощности отличаются на 1 ... 1,5 %).

Учет влияния насыщения дает увеличение предела статической устойчивости до 530 ... 545 Мвт, т. е. приводит к величине, близкой к полученной из опыта. Влияние насыщения было бы еще более существенным, если бы предел статической устойчивости был достигнут без предварительного снижения напряжения.

**Заключение.** Произведенные испытания позволили установить предел передаваемой мощности по условиям статической устойчивости для дальней электропередачи 400 кв.

Регуляторы возбуждения пропорционального типа поддерживали практически неизменными напряжение генераторов при увеличении передаваемой мощности и, несмотря на неблагоприятные параметры системы возбуждения, обеспечили устойчивую работу при углах порядка 90°.

Расчеты статической устойчивости, выполненные по методу малых колебаний, дали результаты, близкие к данным опыта.

В соответствии с результатами проведенных испытаний Техническим управлением МЭС предельно допустимая нагрузка цели 400 кв при работе генераторов с компаундированием и корректорами возбуждения установлена равной 500 Мвт.

Проведенные испытания являются первым этапом намеченной Техническим управлением МЭС серии испытаний по устойчивости электропередачи 400 кв при работе генераторов Куйбышевской ГЭС с обычными регуляторами возбуждения и с регуляторами «сильного» действия. В настоящее время эти испытания продолжаются;

полученные предварительные результаты позволяют рассчитывать на существенное повышение предела статической устойчивости за счет применения регуляторов «сильного» действия.

Автор выражает благодарность Л. В. Цукернику и П. И. Зубкову за ценные замечания.

### Литература

1. В. А. Веников и Л. А. Жуков. Переходные процессы в электрических системах. Госэнергоиздат, 1953.

2. В. Н. Горушкин и П. И. Зубков. Повышение устойчивости синхронного генератора регулированием возбуждения по скольжению и ускорению ротора. Известия Академии наук СССР (Отделение технических наук), № 9, 1953.

3. В. Л. Иносов и Л. В. Цукерник. Компенсирование и электромагнитный корректор напряжения

синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1954.

4. С. А. Лебедев. Исследование искусственной устойчивости. Труды ВЭИ, вып. 40, 1940.

5. И. М. Маркович и С. А. Совалов. Экспериментальное исследование статической устойчивости. Электричество, № 6, 1953.

6. И. М. Маркович и С. А. Совалов. Экспериментальное исследование ресинхронизации генераторов. Электричество, № 6, 1955.

7. Л. В. Цукерник. Дифференциальные уравнения возмущенного движения сложной энергосистемы для анализа ее статической устойчивости. Известия Академии наук СССР (Отделение технических наук), № 3, 1956.

8. Л. В. Цукерник. Статическая устойчивость электропередачи при сложной системе автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов. Сборник трудов института электротехники Академии наук УССР, Киев, 1952.

[26. 6. 1957]



## Асинхронные режимы, несинхронные включения и ресинхронизация генераторов Куйбышевской ГЭС

*Кандидат техн. наук. Л. Г. МАМИКОНЯНЦ, кандидат техн. наук С. А. СОВАЛОВ,  
кандидат техн. наук А. А. ХАЧАТУРОВ*

*Москва*

Вопросы включения генераторов Куйбышевской ГЭС на параллельную работу с Центральной энергосистемой в нормальных условиях и в особенности вопросы быстрого восстановления нормального режима при аварийных нарушениях устойчивости или отключении электропередачи 400 кв имеют ряд особенностей и являются весьма актуальными.

Эти особенности обусловлены большой протяженностью линии 400 кв и соответственно значительной ее емкостью и индуктивностью; односторонние включения или разрывы электропередачи сопровождаются набросами реактивной мощности и повышением напряжения на линии 400 кв, в энергосистеме или на гидростанции; при асинхронных режимах влияние дальней передачи проявляется в существенном снижении асинхронного момента генераторов, что ухудшает условия синхронизации.

Быстрое восстановление нормального режима передачи после ее отключения или после нарушения устойчивости является особо важным в связи с тем, что мощность, передаваемая по линиям 400 кв Куйбышевская ГЭС — Москва, составляет значительную часть мощности приемной системы, и отключение электропередачи приводит к понижению частоты в энергосистеме, что может вызвать необходимость отключения части потребителей.

Предварительная проработка вопросов включения электропередачи Куйбышевская ГЭС —

Москва в нормальных и аварийных условиях и восстановления нормального режима при нарушении синхронизма производилась ЦНИЭЛ МЭС, ОДУ Центра, МЭИ Мосэнерго и проектными организациями (ТЭП, ГИДЭП). Основные рекомендации, полученные на основании этих работ, были опубликованы ранее [Л. 1].

В 1956 г. после включения линии передачи Куйбышевская ГЭС — Москва ОДУ Центра совместно с ЦНИЭЛ МЭС и Куйбышевской ГЭС и при участии ОРГРЭС, ВЭИ, Мосэнерго и Управления эксплуатации сетей 400 кв были произведены опыты по проверке условий включения электропередачи в особых и аварийных условиях, опыты по проверке возможности ресинхронизации генераторов и ряд других опытов, связанных с кратковременными асинхронными режимами генераторов. В статье рассматриваются основные результаты проведенных опытов.

**Включение электропередачи в нормальных условиях.** При включении со стороны приемной энергосистемы (рис. 1) цепи 400 кв с двумя шунтирующими реакторами по 150 Мвар (на Куйбышевской ГЭС и на втором переключательном пункте) повышение напряжения на разомкнутом конце линии у Куйбышевской ГЭС может быть ограничено допустимыми пределами за счет использования регулирующих трансформаторов групп 400 кв, а при необходимости и за счет снижения уровня напряжения на шинах 110 кв понизительных подстанций 400 кв.

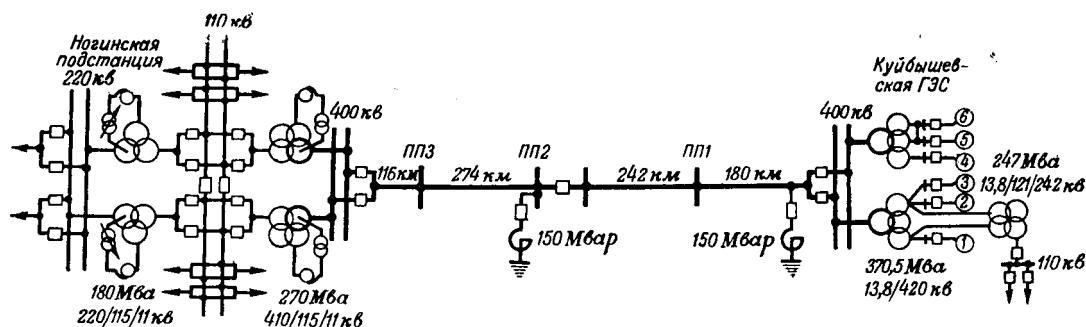


Рис. 1. Схема электропередачи

При наличии только одного шунтирующего реактора или при отсутствии шунтирующих реакторов нормальное включение со стороны приемной энергосистемы неосуществимо. В этих случаях можно включить цепь 400 кв со стороны Куйбышевской ГЭС на невозбужденные генераторы, соблюдая условия отсутствия самовозбуждения, после чего включить передачу со стороны приемной энергосистемы и при появлении напряжения на шинах станции возбудить генераторы, осуществив тем самым их самосинхронизацию.

По условиям отсутствия самовозбуждения<sup>1</sup> включение всей цепи 400 кв со стороны Куйбышевской ГЭС может быть осуществлено на шесть генераторов — при отсутствии шунтирующих реакторов и на четыре или три генератора — при наличии одного шунтирующего реактора соответственно на Куйбышевской ГЭС или на втором переключательном пункте. Условия самовозбуждения отсутствуют также при включении без шунтирующего реактора участка цепи от Куйбышевской ГЭС до второго переключательного пункта при работе двух генераторов. В этом случае, если участок цепи от понизительной подстанции до второго переключательного пункта предварительно поставлен под напряжение от приемной энергосистемы, то может быть осуществлена самосинхронизация двух генераторов Куйбышевской ГЭС с подачей напряжения от второго переключательного пункта.

В целях предварительной проверки возможности включения невозбужденных генераторов на линию и осуществления самосинхронизации при подаче напряжения с удаленного пункта был произведен специальный опыт. На Южной цепи линии 400 кв были включены оба шунтирующих реактора. В исходном режиме участок линии до второго переключательного пункта находился под напряжением со стороны приемной энергосистемы. На Куйбышевской ГЭС два параллельно работавших генератора, имевших нормальное число оборотов, были включены в невозбужденном состоянии на цепь 400 кв, разомкнутую на втором

переключательном пункте. У каждого генератора обмотка ротора была замкнута на возбудитель, автомат гашения поля возбудителя и форсировка возбуждения были отключены, электромагнитный корректор напряжения имел уставку 12,4 кв (при номинале 13,8 кв). Подача напряжения на генераторы была осуществлена включением выключателя на втором переключательном пункте. Для наблюдения за поведением невозбужденных генераторов включение возбуждения на генераторах было намеренно задержано на 60 сек.

После включения линии оба генератора вошли в синхронизм без асинхронного хода и работали спокойно. После включения возбуждения нарушения синхронизма не произошло, т. е. в данном случае машины вошли в синхронизм с правильной полярностью. Отметим, что в условиях опыта генераторы были включены на сопротивление  $x_c \approx 2,8(x_d + x_T)$ , т. е. самовозбуждение исключалось.

Были проведены также опыты включения генераторов на цепь 400 кв, когда входное сопротивление цепи лишь незначительно превышало сумму синхронного реактивного сопротивления генератора и реактивного сопротивления повысительного трансформатора, т. е. в условиях, близких к условиям самовозбуждения.

Два генератора были включены на цепь 400 кв с двумя шунтирующими реакторами, разомкнутую на приемном конце. При этом, по данным расчета, при нормальной частоте  $x_d + x_T = 430 \text{ ом}$ , а  $x_c = 560 \text{ ом}$ , т. е. самовозбуждения генераторов не должно быть, однако при повышении частоты до 52,5 гц создаются условия самовозбуждения.

В начале опыта частота генераторов была установлена равной 49,5 гц и далее постепенно увеличивалась до 50 гц. При этом получены результаты, приведенные в табл. 1.

Самовозбуждения, т. е. самопроизвольного нарастания напряжения, не было, но, как видно из таблицы, установившиеся напряжение и ток резко возрастали по мере увеличения частоты, и при 50 гц дальнейшее испытание пришлось прекратить из-за перегрузки генераторов.

Такие же опыты были проведены при включении одного генератора, частота которого изменялась в пределах от 43,2 до 45,4 гц (частота самовозбуждения порядка 48 гц). Результаты были аналогичными.

Таблица 1

Частота, гц	49,5	49,6	49,7	49,75	49,8	49,9	49,97	50
Ток статора одного из генераторов, а . . . . .	4 860	5 050	5 260	5 500	5 700	5 760	5 880	5 980
Напряжение генератора, кв	7,6	7,9	8,15	8,43	8,76	8,84	9,05	9,1

Эти опыты выявили практическую недопустимость работы генераторов вблизи зоны самовозбуждения из-за их перегрузки, хотя собственно самовозбуждения еще не происходит.

**Асинхронный режим гидрогенераторов.** Гидрогенераторы Куйбышевской ГЭС при переходе в асинхронный режим развивают сравнительно небольшой асинхронный момент. На рис. 2 приведены кривые зависимости среднего асинхронного момента от скольжения при различном числе работающих машин. Если генераторы до выпадения из синхронизма несли значительную нагрузку, то изменение скорости после выпадения их из синхронизма будет определяться главным образом моментом турбин, так как электромагнитный момент, как видно из приведенных кривых, очень мал. Поэтому изменение скорости генераторов в асинхронном режиме будет мало отличаться от изменения скорости при отключении генератора от сети с той же предшествующей нагрузкой. Так, при опытах на электродинамической модели МЭИ было получено, что при шести генераторах на цепь асинхронный момент снижает полное время уменьшения скорости до номинального значения только с 17...18 сек до 14...15 сек [Л. 2]. При малой загрузке агрегатов и особенно при малом их числе влияние асинхронного момента будет относительно более существенным, при этом ограничивается повышение

скорости и сокращается время возврата к синхронной скорости.

Если генераторы работают в асинхронном режиме с возбуждением, то появляется дополнительная тормозящая составляющая момента, определяемая потерями в линии от токов, индуцированных потоком возбуждения генераторов. Эти потери могут быть довольно значительными, превышая мощность, обусловленную средним асинхронным моментом. Так, по данным расчета при номинальном возбуждении шести генераторов, работающих в асинхронном режиме на одну цепь 400 кв с двумя реакторами, эти потери составляют примерно 30 Мвт, в то время как мощность, обусловленная асинхронным моментом, будет порядка 15 Мвт или даже меньше. Наличие возбуждения таким образом приводит к некоторому дополнительному уменьшению максимального скольжения генераторов и сокращает время, необходимое для снижения скорости до номинального значения.

Однако асинхронный ход возбужденных генераторов приводит к появлению значительных значкопеременных составляющих активной и реактивной мощностей. Максимальное значение составляющей активной мощности, имеющей тот же порядок, что и предел передаваемой мощности, существенно зависит от степени форсирования возбуждения и увеличения скорости вращения генератора. При уменьшении числа генераторов, включенных на цепь, например с шести до трех, эквивалентное сопротивление генераторов остается существенно меньшим, чем внешнее сопротивление, а результатирующее переходное сопротивление увеличивается только на 21%, и, следовательно, амплитуда колебаний мощности уменьшается сравнительно мало.

В целях уменьшения вредного влияния колебаний активной и реактивной мощности на режим приемной энергосистемы можно отключать возбуждение генераторов при выходе их из синхронизма, восстанавливая его при достижении генераторами скорости, близкой к синхронной. Как показывает опыт, при этом генераторы спокойнее входят в синхронизм [Л. 2].

Отрицательное влияние на приемную энергосистему при асинхронном ходе возбужденных или невозбужденных генераторов оказывает также потребление генераторами значительной средней реактивной мощности. В табл. 2 приведены значения средней реактивной мощности в долях полной мощности одного генератора, потребляемой из сети 110 кв приемной энергосистемы при асинхронном режиме генераторов Куйбышевской ГЭС в предположении неизменности напряжения приемной сети.

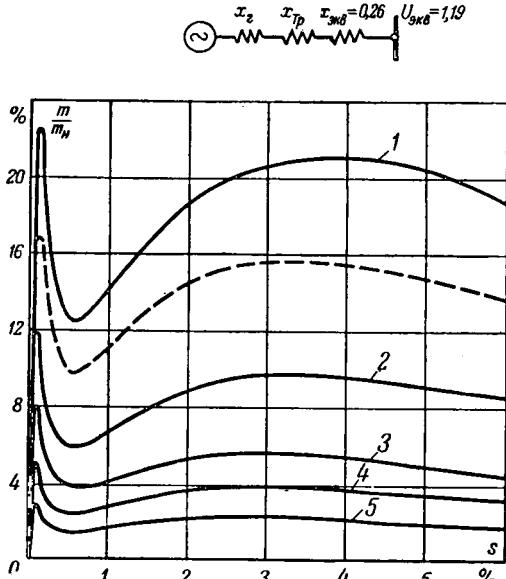


Рис. 2. Средний асинхронный момент гидрогенераторов Куйбышевской ГЭС при работе одной цепи без продольной компенсации с двумя включенными реакторами.  
1 — один генератор; 2 — два генератора; 3 — три генератора; 4 — четыре генератора; 5 — шесть генераторов; — — — два генератора при наличии на линии продольной компенсации (28%).

Таблица 2

Число цепей	Число реакторов	число генераторов				
		2	3	6	9	12
Одна цепь	Без реакторов	0,3	0,95	1,7	—	—
	Два реактора	1,3	1,8	2,43	—	—
Две цепи без продольной компенсации	Без реакторов	--	-0,52	1,87	2,97	3,37
	Два реактора на цепь	—	1,7	3,75	4,34	4,8
Две цепи с продольной компенсацией (42%)	Без реакторов	—	0,228	3,89	5,67	6,66
	Два реактора на цепь	—	3,39	6,15	7,6	8,45

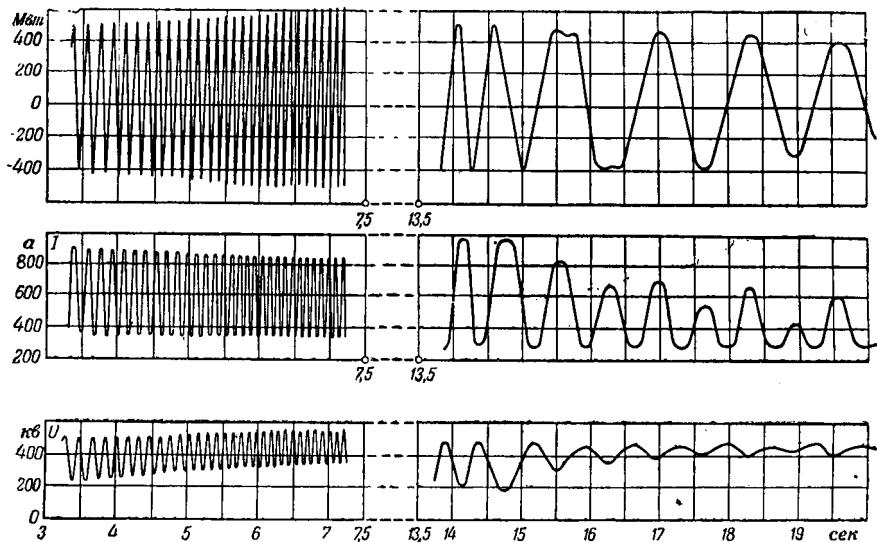


Рис. 3. Результаты обработки осциллографов мощности, тока и напряжения в начале линии при асинхронном режиме трех генераторов.

Как видно из этой таблицы, потребляемая реактивная мощность при большом числе генераторов весьма значительна (в особенности при включенной продольной компенсации). Вызванное этим понижение напряжения в приемной энергосистеме может быть ограничено допустимыми пределами только при работе на приемных подстанциях достаточного количества синхронных компенсаторов, снабженных быстродействующим регулированием возбуждения.

Уменьшение потребления из сети реактивной мощности может быть достигнуто отключением на время асинхронного режима части генераторов с последующим их обратным включением после ресинхронизации оставшихся в работе генераторов. Это мероприятие целесообразно также для облегчения условий ресинхронизации.

Примером, характеризующим асинхронный режим генераторов Куйбышевской ГЭС, является

выпадение из синхронизма шести генераторов во время опыта по определению предела статической устойчивости при работе одной цепи с двумя шунтирующими реакторами [Л. З]. Приблизительно через 2 сек после нарушения устойчивости были отключены три генератора.

На рис. 3 показано изменение мощности, напряжения и тока в начале линии при асинхронном режиме и при восстановлении синхронизма. Осциллографическая запись, в результате обработки которой получены кривые на рис. 3, начата приблизительно через 3 сек после нарушения синхронизма.

На рис. 4 приведены результаты обработки осциллографов напряжения и тока конца линии. На осциллографах виден асинхронный ход шести и трех генераторов, момент ресинхронизации и несколько циклов последующих синхронных качаний.

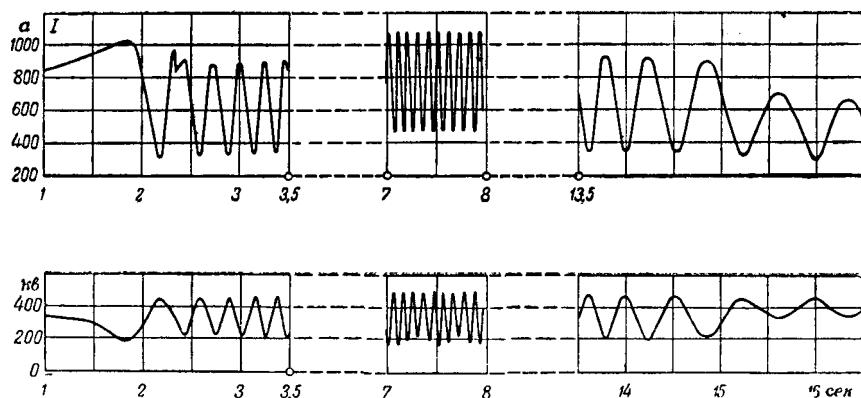


Рис. 4. Результаты обработки осциллографом напряжения и тока в конце линии при асинхронном режиме генераторов.

В течение 7 ... 8 сек после начала асинхронного хода скольжение возрастало и достигло максимального значения порядка 20 %. Далее в течение 7 ... 8 сек скольжение снижалось, а на 16-й сек. после нарушения синхронизма произошла ресинхронизация (в генераторном режиме). После этого наблюдались быстро затухающие синхронные качания. Момент прохождения скольжения через нулевое значение виден на кривой активной мощности по седлообразному изменению кривой мощности вблизи максимального значения. Общее число циклов асинхронного хода было равно 81.

По мере того, как увеличивалось скольжение двигателей, колебания активной мощности в начале линии возрастили и при максимальном скольжении достигли +630 Мвт (генераторный режим) и -520 Мвт (режим двигателя). В течение этой части процесса ток в начале линии уменьшался; при максимальном скольжении колебания тока были в пределах 840 ... 340 а. Среднее значение напряжения возрастило с увеличением скольжения, а отклонения от среднего значения уменьшались; при максимальном скольжении напряжение колебалось в пределах 550 ... 350 кв. Максимальное значение тока в конце линии после нарушения синхронизма составило 1 020 а.

При отключении от линии трех генераторов Куйбышевской ГЭС ток в линии уменьшился только на 14 ... 15 %. Столь небольшое изменение тока обусловливается тем, что реактивное сопротивление генераторов и трансформаторов составляет относительно малую часть суммарного реактивного сопротивления электропередачи. С увеличением скольжения ток в конце линии возрастал, и при максимальном скольжении его колебания составили 1 080 ... 470 а.

При нарушении синхронизма напряжение в конце линии снизилось до 190 кв. Колебания напряжения возрастили по мере увеличения скольжения. При снижении скольжения колебания активной мощности уменьшались, среднее значение напряжения по концам линии снижалось, ток в начале линии возрастал, а в конце — уменьшался.

После ресинхронизации синхронные колебания быстро затухали, при этом средние значения

активной мощности и напряжений по концам линий увеличивались, а средние значения токов уменьшались.

Напряжение на шинах 110 кв понизительной подстанции при максимальном скольжении колебалось в пределах 80 ... 130 кв. Колебания были замечены во всей энергосистеме, но никаких нарушений в работе энергосистемы не было. Следует отметить, что в данном опыте на понизительной подстанции были включены только два синхронных компенсатора, работавших без регуляторов возбуждения, что увеличивало влия-

ние асинхронного режима на энергосистему, а перед опытом были приняты меры по увеличению резерва в приемной энергосистеме и по разгрузке межсистемных связей, что облегчало режим работы энергосистемы.

Отметим, что полученные опытные данные в отношении изменения скорости генераторов довольно близко совпадают с предварительными данными Ленинградского металлического завода, согласно которым максимальное повышение скорости при полной нагрузке составляет 18 ... 20 %, а время снижения скорости до установившегося режима — порядка 20 сек.

Результаты проведенных расчетов и их сравнение с экспериментальными данными показали, что определение токов и напряжений в асинхронном режиме с достаточной для практики точностью может производиться методом наложения двух составляющих. Первая составляющая, имеющая частоту системы, определяется действием э. д. с. системы в схеме, в которой генераторы при больших скольжениях замещены сверхпереходными реактивными сопротивлениями, а при относительно малых скольжениях — переходными реактивными сопротивлениями. Вторая составляющая, имеющая частоту генераторов, определяется действием в этой схеме э. д. с. генераторов; при ее определении необходимо учитывать насыщение генераторов (в особенности при форсировании возбуждения) и изменение входного сопротивления электропередачи в соответствии с изменением частоты генераторов.

Расчеты также показали, что при работе генераторов на дальнюю передачу нет необходимости в учете составляющих тока, имеющих частоту  $(1+2s)\omega_0$ , обусловленных несимметрией ротора; при расчетах ротор машины может считаться симметричным в электрическом и магнитном отношениях, что существенно облегчает расчеты.

**Ресинхронизация генераторов, перешедших в асинхронный режим.** Одним из наиболее сложных и недостаточно еще разработанных вопросов быстрой ликвидации аварийного состояния при выпадении машин из синхронизма является вопрос об условиях ресинхронизации синхронных машин. Этот вопрос является очень актуальным именно для случая дальних линий передачи, где условия ресинхронизации осложняются малыми

значениями асинхронных моментов генераторов из-за больших внешних сопротивлений.

Задачей проводимых в этом направлении исследований является разработка как методов расчета процесса, так и мероприятий по обеспечению ресинхронизации. В настоящее время можно говорить лишь о некоторых предварительных рекомендациях, полученных главным образом экспериментальным путем и на основании анализа качественной картины условий ресинхронизации. Экспериментальное исследование в этом направлении проводилось на электродинамической модели МЭИ, на модели дальней передачи на Карамышевской ГЭС и на самой электропередаче Куйбышевская ГЭС — Москва.

Результаты этих работ, а также большой опыт применения самосинхронизации генераторов показывают, что одним из простейших и надежных критериев успешной ресинхронизации является уменьшение момента турбины до значения, меньшего, чем асинхронный момент генераторов в зоне скольжений порядка  $\pm (3 \dots 5)\%$ . Этот критерий, по-видимому, в ряде случаев дает значительный запас, однако выполнить его при асинхронном ходе большого числа генераторов, работающих на дальнюю электропередачу, трудно, ибо при этом асинхронный момент очень мал.

Испытания, проведенные совместно ЦНИЭЛ и МЭИ на электродинамической модели [Л. 2], а также испытания, проведенные ЦНИЭЛ на модели дальней передачи на Карамышевской ГЭС, показали, что ресинхронизация одновременно 12 машин на две цепи без специального воздействия на первичный двигатель, т. е. при нормальных условиях регулирования, происходит успешно далеко не всегда. В большой степени успешность ресинхронизации зависит от случайных факторов: от угла, при котором впервые достигается нулевое скольжение, от точности работы

регулятора, от скорости набора нагрузки под воздействием регулятора и т. п.

Специальным воздействием на регулятор первичного двигателя, обеспечивающим открытие направляющего аппарата турбины, равным открытию при холостом ходе, удается обеспечить надежную ресинхронизацию. Это мероприятие было проверено и осуществлено на модели линии на Карамышевской ГЭС.

На рис. 5 приведена осциллограмма неуспешной ресинхронизации при обычной работе системы регулирования. На осциллограмме видны большие качания после вхождения в синхронизм, которые привели к повторному выходу из синхронизма.

На рис. 6 приведена осциллограмма успешной ресинхронизации, когда направляющий аппарат турбины удерживался в положении, соответствующем холостому ходу, а автомат гашения поля на некоторое время отключался. Как видно из осциллограммы, качания, имевшие место после вхождения в синхронизм, были значительно меньшими, чем в предыдущем случае. Эти качания быстро затухли при наборе нагрузки агрегата. Возможность практического осуществления такого мероприятия на агрегатах Куйбышевской ГЭС, однако, еще не проверена.

Простым мероприятием, как указано выше, является отключение части генераторов, приводящее к увеличению среднего тормозящего момента гидрогенераторов. Если выход из синхронизма произошел из-за нарушения статической устойчивости вследствие перегрузки электропередачи, то отключение части генераторов является необходимым условием успешной ресинхронизации без вмешательства в работу регуляторов скорости. В частности, опыты, проведенные на электропередаче Куйбышевская ГЭС — Москва, а также имеющийся опыт эксплуатации показывают, что при сохранении в работе трех-четырех ге-

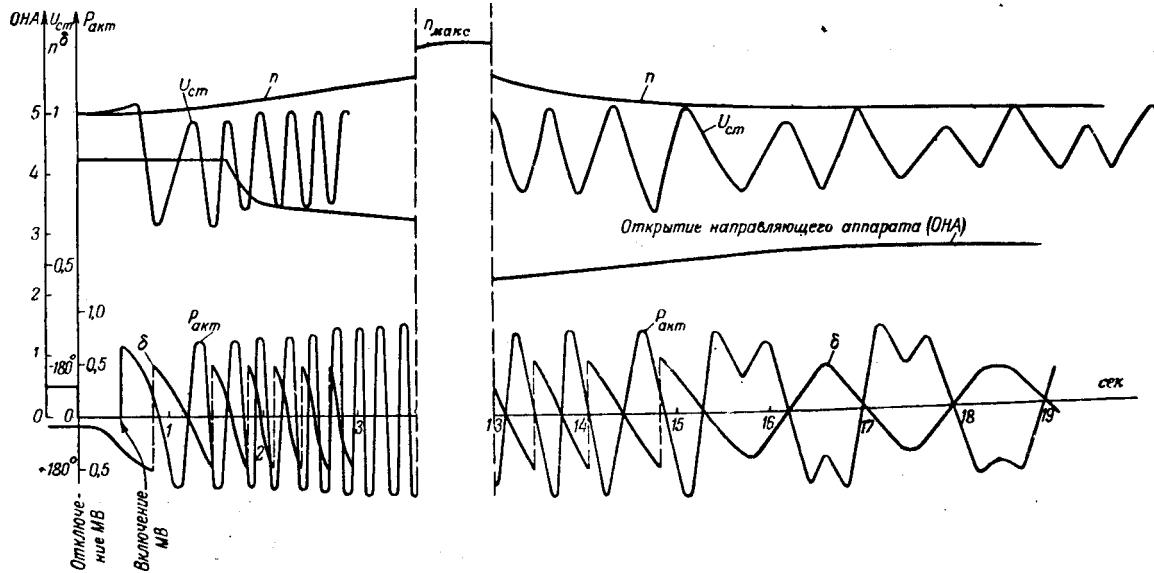


Рис. 5. Осциллограмма опыта АПВ без контроля синхронизма гидрогенератора 1 700 ква модели дальней передачи, работающего при  $\frac{x_{\theta n}}{x_d} = 5,35$  в условиях нормальной работы системы регулирования скорости и возбуждения.

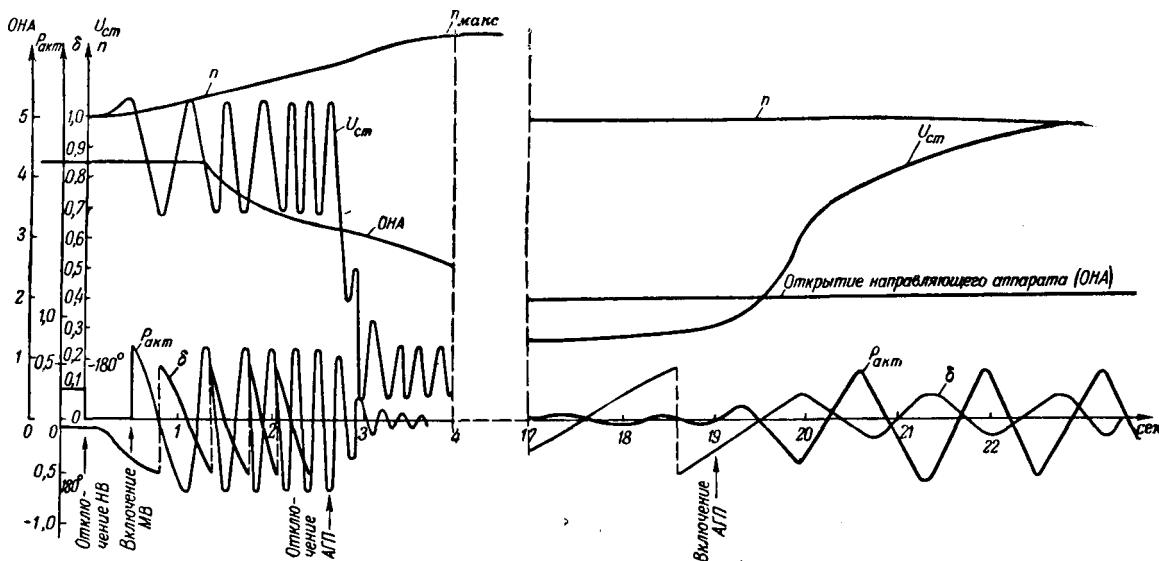


Рис. 6. Осциллографмма опыта АПВ без контроля синхронизма с воздействием на АГП и систему регулирования скорости гидрогенератора модели (при условиях рис. 5).

нераторов, как правило, обеспечивается успешная ресинхронизация без вмешательства в работу регуляторов турбин. Это простейшее мероприятие может быть рекомендовано для практического использования, тем более, что оно желательно и для уменьшения отрицательного влияния асинхронного режима на приемную энергосистему.

Работы по ресинхронизации целесообразно продолжать в направлении анализа и практической проверки возможности обеспечить успешную ресинхронизацию как специальным регулированием первичных двигателей, так и при помощи регуляторов возбуждения.

**Несинхронные включения электропередачи и несинхронные АПВ.** Быстрое восстановление параллельной работы после отключения электропередачи может быть обеспечено путем повторного несинхронного включения. На электропередаче Куйбышевская ГЭС — Москва были проведены испытания по несинхронному включению, имевшие целью проверить возможность восстановления параллельной работы при различных режимах.

Генераторы были снабжены устройством компаундирования с электромагнитным корректором, а также имели релейное форсирование возбуждения.

Первые опыты по несинхронному включению проводились вскоре после включения в эксплуатацию линии передачи при работе на Куйбышевской ГЭС двух генераторов. В период проведения этих опытов из-за низкого напора воды максимальная мощность каждого генератора при полном открытии направляющих аппаратов турбины составляла около 30 Мвт. Опыты проводились в статическом режиме при различных начальных углах и скольжениях.

Предварительный расчет кратностей токов, возникающих в генераторах при включении с наиболее неблагоприятными углами, равными  $180^\circ$ , показал, что максимальное значение тока составляет  $2,9 I_n$ , что ниже допустимого предела, установленного Техническим управлением МЭС.

Всего было проведено шесть опытов несинхронного включения. Из них в двух случаях генераторы, работавшие вхолостую при номинальных оборотах, были включены в сеть, когда угол был близок к  $180^\circ$ . В остальных случаях несинхронные включения осуществлялись при разности частот между Куйбышевской ГЭС и приемной энергосистемой до 1 гц.

Проведенные испытания показали, что при несинхронных включениях с разностью частот до 1 гц, когда частота генераторов ниже частоты сети приемной энергосистемы, генераторы после включения снижают свою скорость вращения и переходят в асинхронный режим (рис. 7, а). Максимальное снижение скорости вращения составляет примерно 5%. В дальнейшем под действием регулятора скорости турбины скорость вращения агрегатов увеличивается и при подходе к синхронной скорости генераторы входят в синхронизм. Длительность всего цикла с момента несинхронного включения до момента втягивания в синхронизм составляет около 20 сек.

При несинхронном включении с разностью частот порядка 1 гц, но когда частота генераторов выше частоты сети, синхронизм после включения восстанавливается сразу без единого цикла асинхронного хода (рис. 7, б).

Снижение скорости вращения генераторов при несинхронных включениях с отрицательной разностью частот объясняется набросом на генераторы активной мощности, обусловленной потерями в линии, что приводит к торможению генераторов. При возникающем далее асинхронном режиме происходит форсирование возбуждения, что приводит к увеличению тока в генераторах и в линии, а следовательно, к дальнейшему увеличению потерь активной мощности. Расчеты показывают, что средняя величина потерь мощности за один цикл асинхронного хода в условиях опыта была порядка 20 Мвт. Так как средний асинхронный момент генераторов составляет небольшую величину, он не может противодействовать

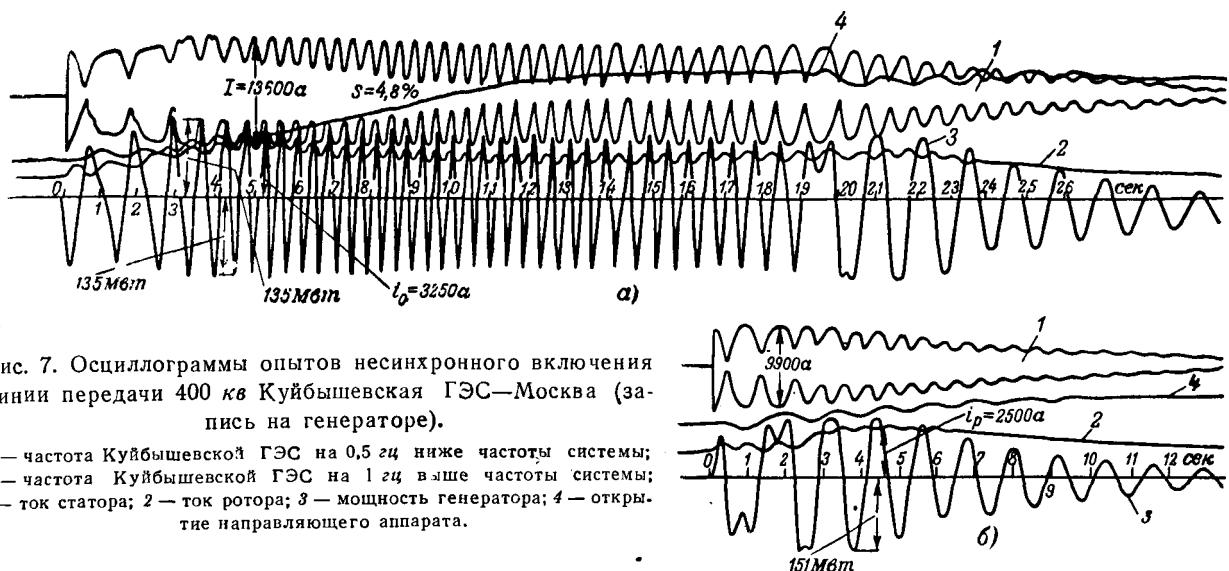


Рис. 7. Осциллографмы опытов несинхронного включения линии передачи 400 кв Куйбышевская ГЭС—Москва (запись на генераторе).

а — частота Куйбышевской ГЭС на 0,5 гц ниже частоты системы; б — частота Куйбышевской ГЭС на 1 гц выше частоты системы; 1 — ток статора; 2 — ток ротора; 3 — мощность генератора; 4 — открытие направляющего аппарата.

торможению генераторов, и скорость вращения генераторов уменьшается до тех пор, пока не начинает сказываться действие регуляторов скорости турбин.

Быстрое вхождение генераторов в синхронизм при включении с частотой генераторов на 1 гц больше частоты сети объясняется также тем, что наброс активной мощности снижает скорость вращения генераторов до синхронной. В данном случае наброс мощности способствует втягиванию генераторов в синхронизм.

В соответствии с результатами этих опытов несинхронное включение успешно используется в эксплуатации для быстрейшего восстановления нормального режима после аварийного отключения цепи 400 кв. При имевших место в эксплуатации несинхронных включениях частота генераторов (включались два-три генератора) была несколько выше (до 0,5 гц), чем частота приемной энергосистемы, и ресинхронизация была успешной и быстрой.

Следующую группу опытов составляют опыты по несинхронному автоматическому повторному включению с циклом порядка 0,3 ... 0,4 сек.

В опытах, проведенных вскоре после пуска электропередачи, при работе двух генераторов, имевших максимальную по условиям напора мощность 30 Мвт, АПВ осуществлялось на понизительной подстанции. Полное время цикла АПВ составило 0,38 сек, и синхронизм после включения восстанавливался сразу.

Три последующих опыта<sup>2</sup> проводились при работе на Куйбышевской ГЭС трех и четырех генераторов, имевших нагрузку 50 ... 90 Мвт каждый. АПВ в этих опытах при длительности цикла 0,32 сек осуществлялось на Куйбышевской ГЭС.

Первый из этих опытов был проведен при работе трех генераторов с суммарной активной нагрузкой 265 Мвт. Длительность цикла АПВ со-

ставляла 0,32 сек. При повторном включении генераторов возник асинхронный режим, близкий по характеру к режиму, наблюдавшемуся при ресинхронизации трех генераторов после нарушения статической устойчивости.

Второй опыт проведен при работе четырех генераторов с суммарной активной нагрузкой 280 Мвт (250 ... 260 Мвт на приемном конце). Как и в предыдущем случае, возник асинхронный режим, который через 17 сек закончился восстановлением синхронизма (рис. 8,а).

В третьем опыте суммарная нагрузка четырех генераторов была установлена равной 200 Мвт (170 ... 180 Мвт на приемном конце). В этом случае произошло немедленное восстановление синхронизма — без асинхронного хода генераторов (рис. 8,б).

Расчеты для случая работы четырех генераторов дали следующую зависимость предельной длительности паузы АПВ, при которой обеспечивается немедленное восстановление синхронизма, от активной мощности электростанций в предшествующем режиме.

Суммарная нагрузка четырех генераторов, Мвт	Предельная длительность цикла, сек
120	0,68
160	0,52
200	0,43
240	0,32
280	0,26
320	0,195

Таким образом, результаты расчета показывают, что длительности цикла АПВ 0,32 сек, имевшей место при испытаниях, соответствует предельная нагрузка генераторов 240 Мвт, а при работе генераторов с большей нагрузкой применение АПВ не обеспечивает немедленного восстановления синхронизма, что согласуется с данными опыта.

<sup>2</sup> Испытания проводились по инициативе Н. В. Черноворова (ОДУ Центра).

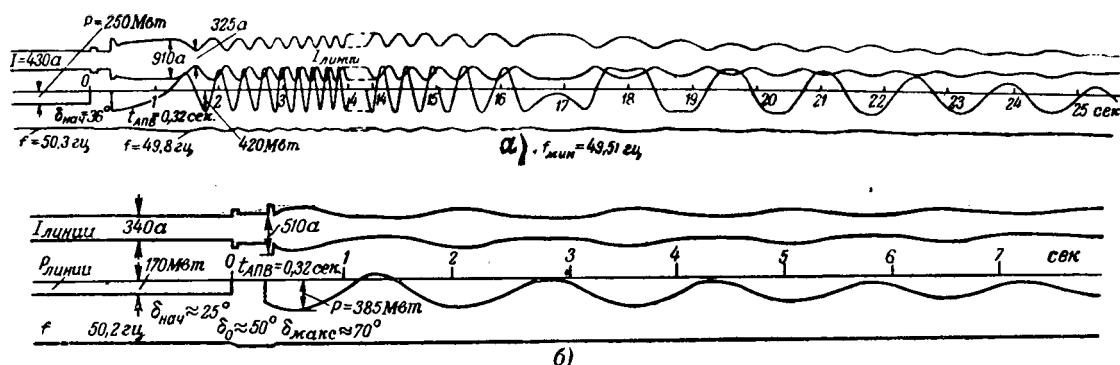


Рис. 8. Осциллограммы опытов несинхронного АПВ линии передачи 400 кв Куйбышевская ГЭС—Москва (запись на приемном конце).

a — четыре генератора при  $P = 250 \text{ Мвт}$ ; б — четыре генератора при  $P = 200 \text{ Мвт}$ .

Такой режим, как уже установлено опытами, не представляет опасности для приемной энергосистемы при работе одной цепи. Вопрос же о несинхронных включениях и допустимости последующих асинхронных режимов при наличии двух цепей требует дальнейшего изучения. Если эти режимы окажутся недопустимыми, то потребуются разработка и использование специальных мероприятий, предотвращающих их возникновение (например, применение устройств электрического или механического торможения) и ограничивающих отрицательное влияние асинхронного режима на систему, если он все же возникает (снятие возбуждения и т. п.).

**Заключение.** Проведенные испытания на линии передачи Куйбышевская ГЭС — Москва и первый период ее эксплуатации в основном подтвердили правильность намеченных при предварительных исследованиях и проектной разработке мероприятий по включению генераторов на параллельную работу и кратковременному использованию асинхронных режимов для быстрой ликвидации аварий, связанных с нарушениями устойчивости или отключением передачи.

На основании изложенного могут быть сделаны следующие выводы.

1. В нормальных условиях, при наличии шунтирующих реакторов (два реактора по 150 Мвар каждый на цепь), передачу следует ставить под напряжение от приемной энергосистемы, после чего включать генераторы Куйбышевской ГЭС на параллельную работу. При отсутствии шунтирующих реакторов или при недостаточном их количестве передача может быть введена в работу в следующем порядке: невозбужденные вращающиеся генераторы включаются на линию передачи (число генераторов должно быть таким, чтобы исключалась возможность самовозбуждения); линия электропередачи ставится под напряжение со стороны Москвы; при появлении напряжения на шинах 400 кв Куйбышевской ГЭС на генераторы подается возбуждение и осуществляется, таким образом, самосинхронизация генераторов.

2. Для ликвидации аварийных режимов, вызванных выпадением из синхронизма генераторов

Куйбышевской ГЭС по отношению к приемной энергосистеме, может применяться ресинхронизация без отключения электропередачи. При этом для уменьшения отрицательного влияния асинхронного хода генераторов на режим приемной энергосистемы возбуждение генераторов может быть снято при возникновении асинхронного хода и вновь включено при приближении скорости генераторов к синхронной. В целях облегчения условий ресинхронизации и упрощения схемы автоматики следует, во всяком случае до особой проработки вопроса, отключать при нарушениях синхронизма часть генераторов, сохраняя для ресинхронизации три-четыре генератора на цепь.

3. Для ликвидации аварийных режимов, вызванных отключением электропередачи, может быть использовано АПВ без контроля синхронизма. Так как после такого включения может возникнуть асинхронный режим, эти устройства должны применяться в сочетании с устройствами, облегчающими ресинхронизацию.

Высказанные соображения относятся не только к линии передачи Куйбышевская ГЭС — Москва, но должны также учитываться при проектировании других подобных передач. Работы в области исследования асинхронных режимов дальних передач и способов их ликвидации должны проводиться и в дальнейшем. При этом основное внимание должно быть обращено на разработку инженерных методов расчета и оценки допустимости влияния асинхронных режимов на энергосистему.

#### Литература

1. Л. Г. Мамиконянц. Включение на параллельную работу гидрогенераторов, связанных с линией 400 кв. Труды ЦНИЭЛ, вып. II, Госэнергоиздат, 1954.
2. А. В. Иванов-Смоленский, Л. Г. Мамиконянц, В. Н. Недельку и А. С. Степунина. Экспериментальное исследование режимов автоматического повторного включения с самосинхронизацией генераторов, работающих на дальние линии электропередачи. Труды ЦНИЭЛ, вып. IV, Госэнергоиздат, 1956.
3. С. А. Соловьев. Испытание статической устойчивости одноцепной электропередачи 400 кв. Электричество, № 11, 1957.

[8.8. 1957]



# Исследование внутренних перенапряжений и условий работы выключателей на электропередаче 400 кв Куйбышевская ГЭС—Москва

А. А. АКОПЯН

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Для проведения дальнейших работ по проектированию дальних электропередач напряжением 400 ... 500 кв исключительно важное значение имеют исследования внутренних перенапряжений и работы выключателей в различных нормальных и аварийных режимах. Такие исследования были произведены на одной цепи электропередачи 400 кв Куйбышевская ГЭС — Москва<sup>1</sup> (рис. 1).

В статье рассматриваются режимы, наиболее важные с точки зрения перенапряжений и работы выключателей. К ним относятся:

- 1) отключение холостого трансформатора;
- 2) отключение шунтирующего реактора;
- 3) включение отдельных участков линии;
- 4) отключение холостой линии от трансформатора;
- 5) отключение холостого участка линии от остальной линии;
- 6) отключение линии, нагруженной шунтирующим реактором.

Основные испытания проводились на трех участках передачи — от Восточной подстанции до первого переключательного пункта ПП1, общая длина которых составляет 635 км. Источником питания служила одна трансформаторная группа Восточной подстанции 410/115/11 кв, 3 × 90 Мвт. Каждое испытание состояло из ряда последовательных коммутаций выключателями Восточной подстанции и второго переключательного пункта ПП2, осуществлявшихся по заданной программе автоматически, с интервалами между последовательными коммутациями от 0,02 до 0,1 сек. Число трехфазных коммутаций в одном опыте достигало пяти — шести. В программу были включены и пофазные коммутации<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> В проведении испытаний принимали участие В. А. Астапов, В. И. Чернышев, Н. С. Громов, Я. В. Родионов, А. Н. Комаров, И. П. Щеглов и др.

<sup>2</sup> Аппаратура автоматического управления опытом разработана под руководством Н. М. Чернышева.

Использованные во время испытаний выключатели 110 кв В1 и 400 кв В3, В4 и В5 — воздушные, изготовлены завода «Электроаппарат», с рабочим давлением воздуха в баках 16 ... 20 ати. Выключатель 110 кв типа ВВН-112 имеет две гасительные камеры без делительных сопротивлений, а также внешний отъединитель. Его номинальный ток 2 ка, мощность отключения 4 Гва. Длительность бесконтактной паузы гасительных камер составляет 0,18 ... 0,24 сек. Выключатель 400 кв типа ВВН-400 имеет семь гасительных камер и внешний отъединитель. Для деления напряжения между гасительными камерами каждая из них шунтирована сопротивлением 90 ком. После гашения дуги в камерах ток в делительном сопротивлении (порядка 1 а, при напряжении на выключателе 700 ка) разрывается ножом отъединителя путем свободного растягивания дуги. При разомкнутом состоянии отъединителя минимальное расстояние между его контактами составляет 3,1 м. Номинальный ток выключателя 2 ка, мощность отключения 10 Гва, длительность бесконтактной паузы гасительных камер 0,25 ... 0,38 сек.

**Аппараты защиты от перенапряжений и измерительная аппаратура.** Простые защитные промежутки, установленные на линии у Восточной подстанции и у второго переключательного пункта, имели расстояние между электродами 1700 м. Пробивное напряжение вентильных разрядников 400 кв типа РВУ-400, установленных у трансформатора и шунтирующего реактора, составляет порядка 750 кв при 50 гц и 700 ... 650 кв<sub>макс</sub> при импульсной волне в диапазоне предразрядных времен 2 ... 20 мксек. Пробивное напряжение вентильных разрядников 110 кв, установленных у трансформатора, составляет порядка 230 кв. При испытаниях ни один из защитных аппаратов не сработал, за исключением вентильного разрядника, установленного в одной из фаз 400 кв на Восточной подстанции. Этот разрядник сработал в двух случаях во время повторного зажигания при отключении холостой линии.

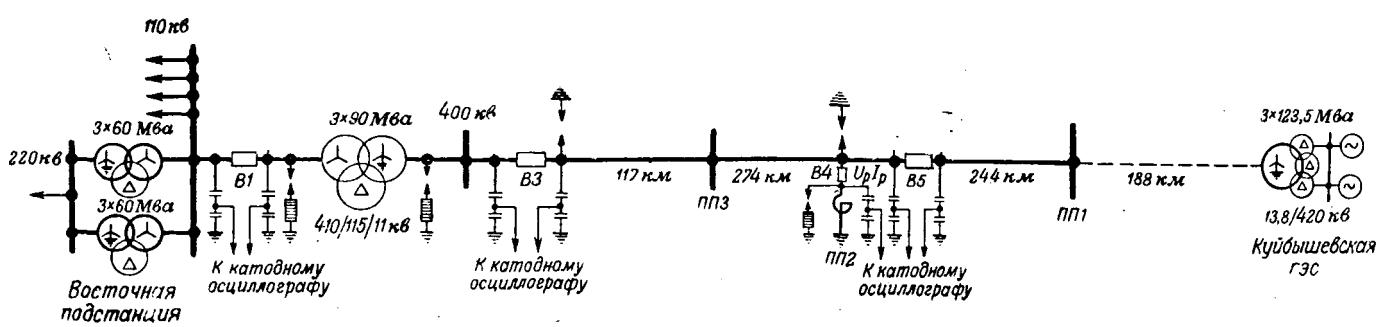


Рис. 1. Принципиальная схема южной цепи электропередачи 400 кв Куйбышевская ГЭС — Москва при испытаниях

ния выключателем ВЗ, что согласуется с импульсным пробивным напряжением разрядника. В обоих случаях разрядник успешно погасил сопровождающий ток, несмотря на сильно завышенное, почти удвоенное, напряжение.

Все представляющие интерес явления осциллографировались на Восточной подстанции и на втором переключательном пункте. Напряжения записывались через емкостные делители напряжения при помощи 6- и 12-лучевых катодных осциллографов с механической разверткой, в которых были применены трехэлектронно-лучевые трубы<sup>3</sup>. Осциллографы имели барабанные и рулонные кассеты, у которых скорость перемещения светочувствительной бумаги составляла соответственно 2 ... 20 м/сек и 0,5 ... 5 м/сек.

Делители напряжения на 400 кв были собраны из шести последовательно соединенных бумажно-масляных конденсаторов емкостью по 1 000 нФ каждый, помещенных в фарфоровые чехлы (от разрядника РВС-30). Конденсаторы имеют выводы, изолированные от фланцев при помощи проходных изоляторов на 3 кв, что практически исключает влияние дождя и загрязнения на коэффициент деления. Делители напряжения либо подвешивались к защитным разрядникам высокочастотных заградительных дросселей, либо устанавливались на фундаменте при помощи трех изоляционных оттяжек.

**Отключение холостого трансформатора.** Отключение трансформатора 400 кв, 3×90 МвА со стороны обмоток 115 кв производилось как при установившемся токе (порядка 50 а), так и при различных значениях тока в неустановившемся режиме, что достигалось регулированием интервала времени между моментами включения и отключения в пределах от 0,15 до 1 сек. Нейтраль обмоток 410 кв была заземлена, а нейтраль обмоток 115 кв либо заземлялась, либо была изолирована. Обмотки 11 кв были соединены в треугольник, но при некоторых опытах они были разомкнуты и заземлены в одной точке. Следует отметить, что состояние нейтрали обмоток 115 кв и схема соединения обмоток 11 кв существенно влияния на величину перенапряжений не имели. Сводные результаты испытаний приведены в табл. 1, где кратность перенапряжения отнесена к номинальному значению фазного напряжения трансформатора, которое для обмоток 115 кв и выключателя ВВН-112 составляет 94 кв<sub>макс</sub>, а для обмоток 410 кв равно 335 кв<sub>макс</sub>.

Обращают на себя внимание весьма низкие значения перенапряжений на трансформаторе и особенно на выключателе. Опыты проводились при несколько пониженном напряжении источника, равном 100 кв вместо номинального напряжения 115 кв, в силу чего могли быть несколько занижены и величины перенапряжений. Однако существенное отличие полученных результатов от обычно наблюдаемых нельзя приписать этой причине, так как величина установившегося тока

Таблица 1  
Кратность перенапряжений при отключении воздушным выключателем ВВН-112 холостого трансформатора 400 кв, 3×90 МвА со стороны обмоток 115 кв

Число отключений	Место измерения	Кратность перенапряжения		
		наибольшая	средняя	наименьшая
131	На выводе обмотки 115 кв	2,0	1,2	1
130	На выводе обмотки 410 кв	2,0	1,2	1
104	На контактах выключателя	1,8	1,1	1

превышает значение тока, который может быть мгновенно отключен воздушным выключателем ВВН-112.

На наш взгляд, умеренные значения перенапряжений обусловлены двумя благоприятными обстоятельствами: во-первых, большой емкостью, присоединенной к трансформатору на стороне 410 кв, складывающейся из собственной емкости обмоток и емкости ошиновки длиной 350 м (общая эквивалентная емкость, отнесенная к одной фазе 115 кв обмотки, составляет порядка 0,1 мкФ), и, во-вторых, большими абсолютными потерями холостого хода трансформатора, равными при номинальном напряжении около 300 квт на фазу (потери в стали). Эти потери оказывают сильное демпфирующее действие, что хорошо видно на осциллограммах, иллюстрирующих отключение холостого трансформатора (рис. 2). Фазы Ж и К отключались на спаде рабочего напряжения после ряда повторных зажиганий дуги и без каких-либо перенапряжений. В этом случае свободная составляющая напряжения вычитается из предшествующего установившегося значения напряжения. На фазе З дуга приобрела устойчивый характер после серии повторных зажиганий в начальной стадии расхождения контактов, а затем погасла на возрастающей части следующей полуволны рабочего напряжения, когда свободная составляющая напряжения суммируется с предшествующим значением рабочего напряжения. После окончательного гашения дуги напряжение на обмотке 115 кв плавно повышается до 130 кв<sub>макс</sub>, а затем спадает апериодически, без

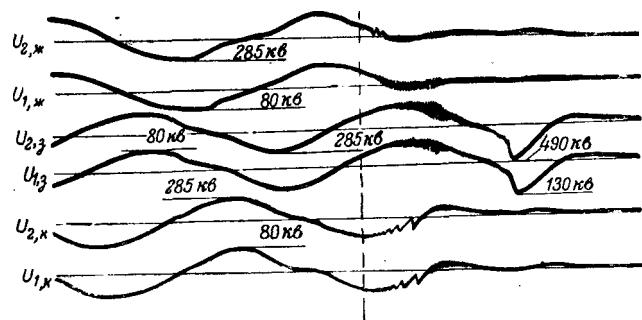


Рис. 2. Отключение холостого трансформатора 400 кв, 3×90 МвА со стороны обмоток 115 кв через 0,16 сек после его включения.

<sup>3</sup> Осциллографы разработаны под руководством А. М. Дубинина; трехэлектронно-лучевые трубы разработаны Г. М. Топчиевым.

характерных для маломощных трансформаторов колебаний. Так как нет колебаний напряжения, то и восстанавливающееся напряжение невелико, что весьма облегчает работу выключателя при отключении холостого трансформатора 400 кв.

Следует отметить, что апериодическая волна достаточно точно трансформируется на сторону 410 кв, где амплитуда достигает 490 кв<sub>макс</sub>, что соответствует номинальному коэффициенту трансформации.

Приблизительную оценку демпфирующего действия активных потерь в трансформаторе можно сделать, представив потери в эквивалентной схеме трансформатора в виде активного сопротивления, шунтирующего индуктивность холостого хода. Такая оценка показывает, что для рассматриваемого случая активные потери в трансформаторе 400 кв снижают возможную величину перенапряжения в 1,5 раза, а колебательный процесс после отключения демпфируют почти полностью.

Несколько опытов было сделано по отключению воздушным выключателем ВВН-400 холостого трансформатора 400 кв со стороны обмоток высшего напряжения. Кратность перенапряжения на трансформаторе и выключателе в этих опытах не превосходила 1,3. Однако эти опыты проводились при напряжении, составлявшем всего 85% от номинального значения. Установившийся ток холостого хода в обмотках 410 кв при этом был равен 15 а<sub>макс</sub>, что, по-видимому, несколько ниже предельного тока, который может быть мгновенно отключен выключателем. Поэтому указанные перенапряжения, возможно, несколько занижены.

**Отключение реактора.** Отключение шунтирующего реактора 400 кв, 3×50 Мвар производилось на втором переключательном пункте при различных напряжениях, в пределах от 0,28 до 1,5-кратного значения номинального напряжения. Этот диапазон напряжений охватывает почти все нормальные и аварийные режимы. Осциллограммы напряжений, снятые при отключении реактора, когда по линии передавалась мощность, равная 50 Мвт, даны на рис. 3.

Пик перенапряжения в 785 кв<sub>макс</sub> на фазе Ж реактора является одним из высших значений перенапряжений, зарегистрированных на реакторе при его отключении. Окончательное отключение этой фазы совершилось через полпериода, при этом пик перенапряжения достиг 550 кв<sub>макс</sub>, а амплитуда обратной полуволны свободных коле-

баний составила 500 кв<sub>макс</sub>, вследствие чего восстанавливющееся напряжение на выключателе возросло до 805 кв<sub>макс</sub>. В силу относительной малости активных потерь в реакторе, составляющих при номинальном напряжении лишь 100 квт, при его отключении явно выражены медленно затухающие колебания с частотой 1200 гц.

Таблица 2

Кратность перенапряжений волях наибольшего номинального фазного напряжения (343 кв<sub>макс</sub>) при отключении воздушным выключателем ВВН-400 шунтирующего реактора 400 кв, 3×50 Мвар

Эквивалентное значение линейного напряжения перед отключением, кв	Число отключений	Место измерения	Кратность перенапряжения		
			наибольшая	средняя	наименьшая
110	5	На реакторе	1,8	1,6	0,9
	4	На контактах выключателя	1,75	1,45	1,05
380—440	7	На реакторе	2,3	1,65	1,25
	7	На контактах выключателя	2,4	2,1	1,6
490—600	23	На реакторе	2,45	1,8	1,5
	23	На контактах выключателя	3,15	2,45	1,8

Сводные результаты по определению кратностей перенапряжений при отключении шунтирующего реактора, установленного на втором переключательном пункте ПП2, приведены в табл. 2. Большинству отключений предшествовал несимметричный установившийся режим, поэтому результаты измерений сгруппированы по значениям фазного напряжения перед отключением (в таблице указаны эквивалентные им значения линейного напряжения). Из таблицы видно, что в широком диапазоне значений напряжения перед отключением максимальная кратность перенапряжения на реакторе не превосходит 2,45. Однако на выключателе, отключающем реактор, максимальная кратность перенапряжения достигает значения 3,15.

**Включение отдельных участков линии 400 кв.** При включении к трансформатору относительно короткой линии переходный процесс, который почти полностью затухает через три-четыре периода рабочей частоты, может быть достаточно точно описан при помощи Т-образной схемы замещения линии, присоединенной к источнику напряжения через индуктивность рассеяния трансформатора 400 кв и питающей сети. Так как включение линии совершается вблизи амплитуды напряжения источника, напряжение на линии может быть выражено уравнением:

$$U = U_{yctm} \left( \cos \omega t - e^{-\frac{R}{2L}t} \cos \frac{t}{\sqrt{LC}} \right),$$

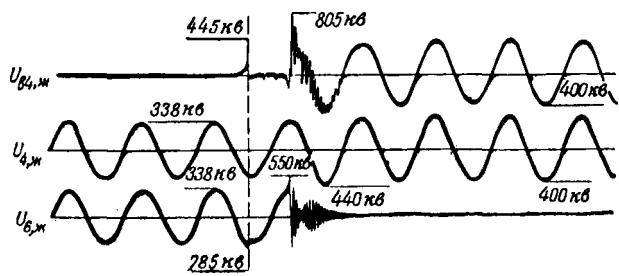


Рис. 3. Отключение шунтирующего реактора на ПП2.

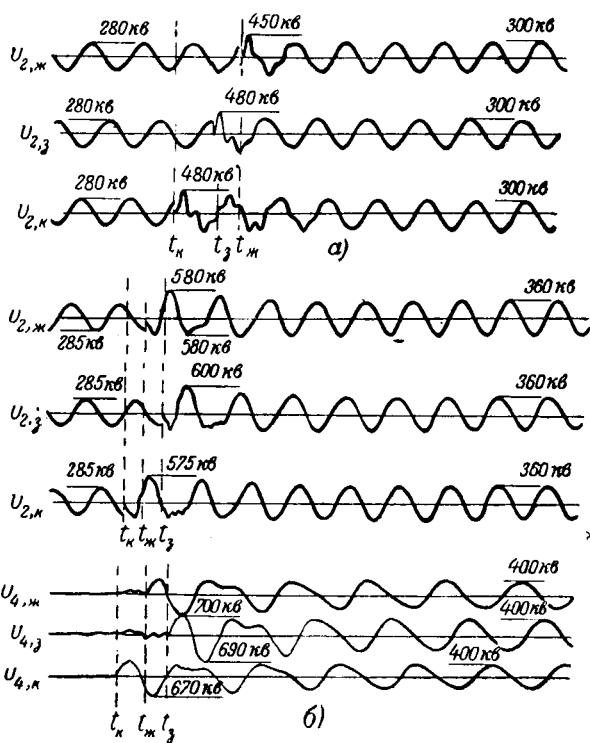


Рис. 4. Включение к трансформатору 400 кв холостой линии.

а — длина линии 117 км; б — длина линии 391 км;  $t_x$ ,  $t_3$ ,  $t_K$  — моменты включения выключателя ВЗ в фазах Ж, З, К.

где  $U_{уст}$  — амплитуда установившегося напряжения после включения.

Для схемы замещения линии длиной 117 км  $C = 1,25 \text{ мкФ}$  и  $L \approx 0,5 \text{ гн}$  (частота свободных колебаний 200 Гц). В этом случае максимум перенапряжения формируется вблизи амплитуды второй полуволны свободных колебаний (через 2,5 мсек после включения), когда их затухание еще незначительно, так как  $\frac{R}{2L} = 30$  и  $e^{-30 \cdot 0,0025} = 0,93$ . Поэтому вполне возможно определить максимум перенапряжений без учета затуханий свободных колебаний. Следовательно, кратность перенапряжения волях установившегося напряжения после включения в данном случае будет:

$$\frac{U_{\max}}{U_{уст}} = \cos \frac{\pi}{4} - \cos \pi = 1,7,$$

что достаточно хорошо согласуется с экспериментом.

Измерения, произведенные при включении линии длиной 117 км, показали, что на фазах З и К, где включение произошло при амплитудном значении напряжения, кратность перенапряжения составляет  $\frac{480}{300} = 1,6$  (рис. 4, а).

Измерения, произведенные при включении участка холостой линии между Восточной подстанцией и вторым переключательным пунктом, имев-

шим длину 391 км, показали, что наибольшая кратность перенапряжения составляет в начале линии  $\frac{600}{360} = 1,67$  и в конце линии  $\frac{700}{400} = 1,75$  (рис. 4, б). При этом были отмечены заметное взаимное влияние фаз друг на друга и влияние бегущих вдоль линии волн. Однако эти факторы существенного значения не имеют, и расчет по Т-образной схеме замещения линии дает достаточное согласие с опытом. В данном случае затуханием свободных колебаний с частотой 100 Гц ( $C = 4,2 \text{ мкФ}$ ,  $L = 0,6 \text{ гн}$ ) пренебречь нельзя, так как максимум перенапряжения формируется на амплитуде второй полуволны установившегося напряжения рабочей частоты, т. е. спустя 10 мсек после включения, когда свободная составляющая затухает до 0,74 от своего начального значения.

Следовательно, расчетное значение кратности перенапряжения в этом случае будет:

$$\frac{U_{\max}}{U_{уст}} = \cos \pi - 0,74 \cos 2\pi = -1,74.$$

При включении к трансформатору линии длиной 391 км, нагруженной на конце реактором с индуктивностью 3,4 гн, приблизительная оценка перенапряжений может быть сделана на основе П-образной схемы замещения линии. В этом случае кратность перенапряжения волях установившегося напряжения после включения хотя и несколько выше (в начале линии 1,75 и на конце линии — 2), но абсолютные значения перенапряжения существенно ниже, так как установившееся значение напряжения при наличии реактора заметно меньше, чем в случае холостой линии.

Включение участка линии между первым и вторым переключательными пунктами (длина 244 км) к шинам второго переключательного пункта, к которым присоединен реактор, иллюстрируется осциллограммами, приведенными на рис. 5. При таком включении процессы существенно отличаются от случая, рассмотренного выше, и по своему характеру напоминают включение линии к источнику при наличии подключенной к шинам источника другой длиной линии. В момент включения напряжение резко падает до половины своего первоначального значения, а затем через 1,7 мсек — время двойного пробега волны вдоль подключаемого участка — напряжение восстанавливается почти с той же крутизной. Переход в новое установившееся состояние совершается с частотой колебаний порядка 30 Гц, что соответствует собственной частоте линии с реактором. Кратность перенапряжения волях установившегося значения напряжения после подключения участка равна 1,4 на втором переключательном пункте и 1,3 — на Восточной подстанции. Сводные данные кратностей перенапряжений для случаев, когда линейное напряжение источника перед включением равно 400 кв, приведены в табл. 3. Кратности даны волях наибольшего рабочего фазного напряжения ( $343 \text{ кв}_{\max}$ ) и волях установившегося фазного напряжения после включения.

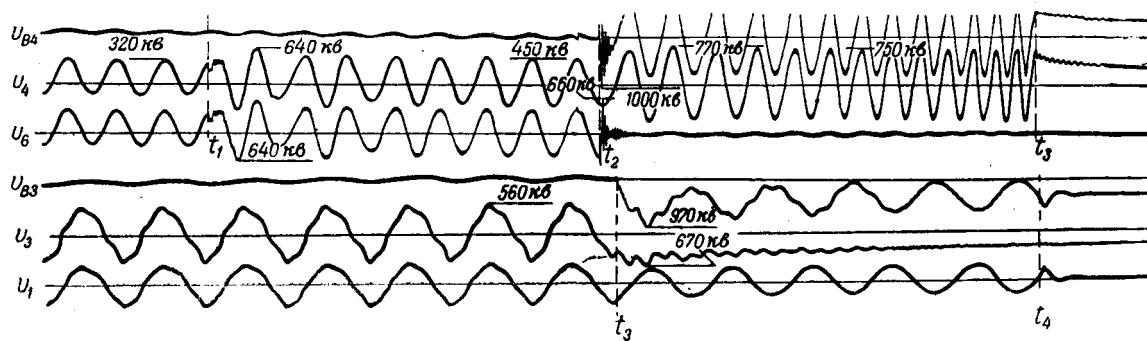


Рис. 5. Напряжения на фазе  $K$  при четырех последовательных коммутациях на втором переключательном пункте и на Восточной подстанции.

$t_1$  — включение выключателем  $B5$  участка линии длиной 244 км, имеющей однофазное короткое замыкание на конце фазы 3 (реактор на ПП2 включен);  $t_2$  — отключение реактора 3×50 Мвар выключателем  $B4$ ;  $t_3$  — отключение выключателем  $B3$  холостой линии длиной 635 км, имеющей однофазное короткое замыкание на конце фазы 3;  $t_4$  — отключение холостого трансформатора 400 кв, 3×90 Мвар выключателем  $B1$ .

Таблица 3

Кратности перенапряжений при включении участков линии 400 кв к трансформатору 3×90 Мвар или к линии с шунтирующим реактором 3×50 Мвар

Наименование операций	Кратности перенапряжений			
	в долях наибольшего рабочего фазного напряжения (343 кв <sub>макс</sub> )		в долях фазного напряжения, установившегося после включения	
	на Восточной подстанции	на втором переключательном пункте	на Восточной подстанции	на втором переключательном пункте
Включение линии длиной 117 км к трансформатору . . . . .	1,7	—	1,7	—
Включение линии длиной 391 км к трансформатору . . . . .	2,1	2,4	1,75	1,75
Включение линии длиной 391 км с реактором на конце к трансформатору . . . . .	1,85	2,1	1,75	1,95
Включение линии длиной 244 км к линии длиной 391 км, нагруженной реактором	1,6	1,9	1,3	1,4

**Отключения участков линии 400 кв от трансформатора.** Отключения участков линии производились при значениях линейного напряжения на Восточной подстанции в пределах от 380 до 650 кв, при наличии и отсутствии на конце отключаемой линии однофазного короткого замыкания. В сводных результатах, приведенных в табл. 4, отключения с однофазными короткими замыканиями не выделены, а некоторое повышение напряжения на здоровых фазах, имеющее место в этих случаях, учтено в таблице соответствующей поправкой величины линейного напряжения. Отключения с повторными зажиганиями дуги, имеющими существенное значение с точки зрения перенапряжений, в таблице выделены отдельно.

Все опыты, и в том числе опыты при повторных зажиганиях дуги, прошли успешно, несмотря на довольно высокие значения напряжения перед отключением. На рис. 5 даны осциллограммы напряжений на контактах выключателей  $B3$  и  $B4$ ,

а также напряжений в точках 1, 3, 4 и 6 сети, снятые в одном из опытов с четырьмя последовательными коммутациями.

Перед отключением всей линии напряжение здоровой фазы, достигшее на Восточной подстанции 560 кв<sub>макс</sub>, вследствие насыщения трансформатора содержит явно выраженную пятую гармонику, а на втором переключательном пункте, где напряжение той же фазы достигло 750 кв<sub>макс</sub>, пятая гармоника отсутствует, что согласуется с расчетом. Отключение всей линии совершилось без повторных зажиганий. В процессе выравнивания напряжения на отключенной линии напря-

Таблица 4

Отключение воздушным выключателем ВВН-400 от трансформатора 3×90 Мвар холостых линий 400 кв длиной 117, 391 и 635 км

Длина отключаемой линии, км	Линейное напряжение перед отключением, кв	Отключаемый ток, а	Число отключений	Кратность перенапряжения в долях наибольшего рабочего фазного напряжения (343 кв <sub>макс</sub> )			
				на трансформаторе		на Восточной подстанции	
				без повторных зажиганий	с повторными зажиганиями	в начале линии	на выключателе
117	380	100	22	—	1,3	1,1	1,8
			—	2	2,0	2,0	1,4
	500	130	4	—	1,7	1,9	2,6
			—	2	2,6	2,9	3,0
391	440	390	13	—	1,3	1,3	2,1
			—	2	1,8	2,0	2,5
	500	440	8	—	1,4	1,5	2,3
			—	3	2,3	2,3	2,9
635	650	1100	9	—	1,65	2,3	2,9
			—	1	1,85	2,3	2,3
			—	—	—	—	3,15

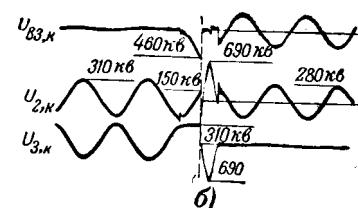
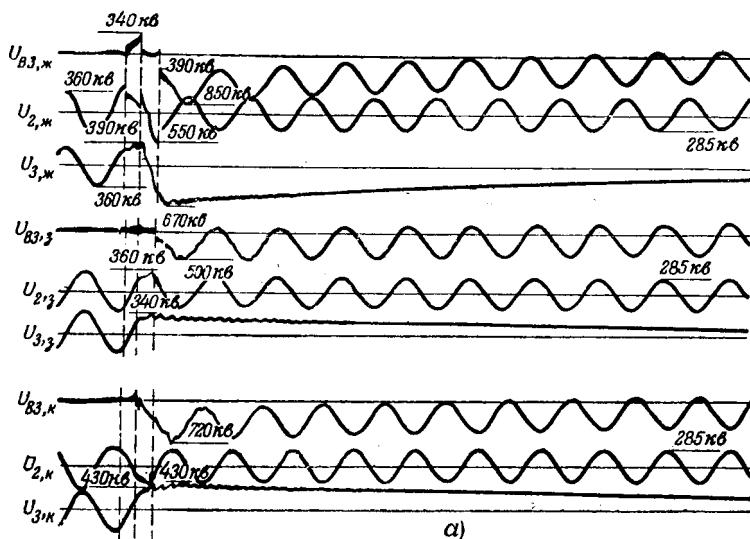


Рис. 6. Отключение от трансформатора 400 кв холостой линии.  
а — длина линии 391 км; б — длина линии 117 км.

жение у Восточной подстанции возросло до 670 кв<sub>макс</sub>, восстанавливающееся же напряжение на выключателе составило 970 кв<sub>макс</sub>.

Следует отметить, что большинство наблюдавшихся во время опытов повторных зажиганий вызывалось частичными перекрытиями гасительных камер выключателя снаружи, по фарфоровым чехлам, загрязненным химическими уносами ближайших предприятий. После очистки фарфора повторные зажигания, как правило, прекратились.

Осциллограммы отключения холостой линии длиной 391 км с повторным зажиганием на фазе Ж даны на рис. 6, а. В данном случае повторное зажигание возникло в относительно благоприятный момент, когда напряжение на трансформаторе еще не изменило своей полярности, а поэтому перенапряжение на нем составляет только 550 кв<sub>макс</sub>. Однако из-за обрыва тока повторного зажигания при первом же переходе через нуль линия осталась заряженной до напряжения 670 кв, что вызвало повышение напряжения на выключателе до 850 кв<sub>макс</sub>.

Осциллограммы рис. 6, б иллюстрируют повторное зажигание дуги при отключении линии длиной 117 км. Ток повторного зажигания обрывался только при втором переходе через нуль, когда заряд на линии отсутствовал, а поэтому на выключателе нет повышенных напряжений. В этом случае более высокое перенапряжение на трансформаторе (690 кв<sub>макс</sub>) обусловлено не только относительно неблагоприятным моментом возникновения повторного зажигания (при обратной полярности рабочего напряжения), но и более короткой длиной отключаемой линии. Из табл. 4 видно, что отключения коротких линий, сопровождающиеся повторными зажиганиями дуги, вызывают большие перенапряжения на трансформаторе, чем при отключении более длинных линий. Такое парадоксальное на первый взгляд заключение вполне согласуется с расчетом и обусловлено тем, что свободные колебания при более короткой длине линии имеют большую частоту, а следовательно, в этом случае имеет место

более раннее формирование максимума перенапряжения при меньшей степени затухания свободных колебаний. Необходимым условием для этого является лишь наличие несопоставимо большей емкости линии по сравнению с суммарной емкостью трансформатора и всей ошиновки подстанции, что практически всегда выполняется. Расчеты показывают, что при постоянном напряжении на линии, равном амплитуде установившегося напряжения перед отключением, в случае, когда ток повторного зажигания обрывается при первом или втором переходе через нуль, наибольшая кратность перенапряжения в долях установившегося значения перед отключением составляет 2,8 при отключении холостой линии длиной 117 км и 2,2 — при отключении холостой линии длиной 391 км. Эти результаты согласуются с опытными данными.

**Отключение участка линии 400 кв от остальной линии.** Отключение участков линии от остальной линии по характеру процесса напоминает отключение линии от источника напряжения при наличии другой подключенной линии, и поэтому оно не связано с появлением существенных перенапряжений по отношению к земле. Однако такие отключения в аварийных режимах, например при несимметричном коротком замыкании на отключаемом участке или с предварительным отключением шунтирующего реактора, являются весьма тяжелыми для выключателя, который должен производить отключение в условиях сильно повышенного напряжения на здоровых фазах.

На рис. 7 приведены осциллографмы, полученные при отключении от линии 400 кв участка линии длиной 244 км, расположенного между первым и вторым переключательными пунктами. В конце этого участка линии имелось короткое замыкание на фазе З. Напряжения на здоровых фазах были равны 455 и 465 кв<sub>макс</sub>, что приблизительно соответствует линейному напряжению 560 кв.

При отключении линии на фазе Ж возникло повторное зажигание, что существенно облегчило работу воздушного выключателя. На выключателе фазы К, отключившейся без повторных зажиганий, восстанавливающееся напряжение достигло порядка 950 кв<sub>макс</sub>. В этом опыте запи-

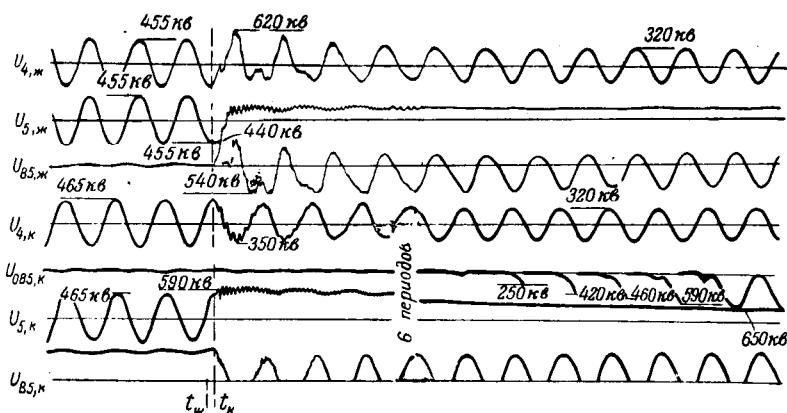


Рис. 7. Отключение от шин  $P\pi 2$  холостого участка линии длиной 244 км, имеющего на конце однофазное короткое замыкание на фазе З (реактор на  $P\pi 2$  включен).

$t_{ж}$ ,  $t_k$  — моменты отключения выключателя  $B5$  в фазах  $Ж$  и  $K$ .

сывалось также напряжение на отъединителях выключателя. На отъединителе в фазе  $K$  (кричевая  $U_{oB5,k}$ ) первое гашение тока, проходившего через делительное сопротивление, произошло спустя 12 периодов после обрыва тока в камерах выключателя, а окончательное гашение дуги совершилось после четырех повторных зажиганий, при которых напряжение зажигания прогрессивно росло с 280 кв<sub>макс</sub> до 550 кв<sub>макс</sub>. Этот опыт интересен еще тем, что отъединитель в данном случае погасил униполярный пульсирующий ток.

Ряд опытов по отключению холостых линий был произведен в несколько более утяжеленных условиях — с предварительным отключением шунтирующего реактора, но без наличия однофазного короткого замыкания на отключаемом участке. В этих случаях гасительные камеры выключателя работали успешно, однако в некоторых опытах, когда вслед за отключением участка линии между переключательными пунктами производилось отключение линии на Восточной подстанции, отъединитель не отключал ток. В этом случае ток в делительном сопротивлении являлся чисто постоянным, и совершенно очевидно, что простым растягиванием дуги ее нельзя было погасить.

Присоединением к отключаемому участку линии измерительного трансформатора напряжения типа НКФ-400 были полностью исключены случаи отказа отъединителя. Осциллограммы одного из этих опытов даны на рис. 8. Трансформатор напряжения был присоединен к участку линии между Восточной подстанцией и переключательным пунктом  $P\pi 2$ . На фазе  $З$  выключателя  $B5$ , отключившейся без повторных зажиганий, восстановливающееся напряжение достигло 1 050 кв<sub>макс</sub>. После отключения выключателя  $B3$  участок линии между Восточной подстанцией и переключательным пунктом  $P\pi 2$  быстро разрядился. В то же время заряд на участке линии между переключательными пунктами  $P\pi 2$  и  $P\pi 1$  длительно сохраняется, так как на этом участке измерительные трансформаторы напряжения не были присоединены.

Действие трансформаторов напряжения, при-

соединенных к линии, основано на том, что после гашения дуги в камерах выключателя магнитопровод трансформатора под действием постоянного напряжения линии начинает насыщаться тем быстрее, чем выше значение этого напряжения. Ток разряда, весьма малый в начальной стадии, по мере насыщения магнитопровода возрастает до пределов, ограниченных активным сопротивлением и индуктивностью высоковольтной обмотки при полном насыщении трансформатора. В результате этого измерительные трансформаторы типа НКФ-400, высоковольтная обмотка которых имеет сопротивление 10 ком, а индуктивность которых при полном насыщении может быть оценена в 50 гн, оказывают двоякое благоприятное влияние при отключении холостых линий 400 кв. Во-первых, через три—четыре периода рабочей частоты после обрыва тока в камерах выключателя они полностью разряжают линию и тем самым исключают постоянную составляющую тока в делительном сопротивлении выключателя, создавая, таким образом, весьма облегченные условия для работы отъединителя выключателя. Во-вторых, они заметно снижают восстанавливющееся напряжение на выключателе и могут полностью заменить собой шунтирующие сопротивления, необходимые при отключении холостых линий в условиях сильно повышенных напряжений. Таким образом, трансформатор напряжения типа НКФ-400 имеет преимущество перед измерительным трансформатором конденсаторного типа, т. к. одновременно выполняет защитные функции.

Дальнейшее утяжеление условий опыта путем устройства однофазного короткого замыкания на конце отключаемого участка и с предварительным отключением шунтирующего реактора привело к перекрытию фазы  $Ж$  выключателя по поверхности фарфоровых чехлов гасительных камер. Напряжение в момент перекрытия на этой фазе выключателя было 1 400 кв<sub>макс</sub>, что более чем в 4 раза превышает наибольшее фазное рабочее напряжение передачи. Повторение опыта в этих же условиях, но с измерительными трансформаторами напряжения типа НКФ-400, присоединенными к отключаемому участку линии, прошло весьма успешно. Перед отключением напряжения на здоровых фазах были равны 725 и 770 кв<sub>макс</sub>, что соответствует линейному напря-

приятному влиянию при отключении холостых линий 400 кв. Во-первых, через три—четыре периода рабочей частоты после обрыва тока в камерах выключателя они полностью разряжают линию и тем самым исключают постоянную составляющую тока в делительном сопротивлении выключателя, создавая, таким образом, весьма облегченные условия для работы отъединителя выключателя. Во-вторых, они заметно снижают восстанавливющееся напряжение на выключателе и могут полностью заменить собой шунтирующие сопротивления, необходимые при отключении холостых линий в условиях сильно повышенных напряжений. Таким образом, трансформатор напряжения типа НКФ-400 имеет преимущество перед измерительным трансформатором конденсаторного типа, т. к. одновременно выполняет защитные функции.

Дальнейшее утяжеление условий опыта путем устройства однофазного короткого замыкания на конце отключаемого участка и с предварительным отключением шунтирующего реактора привело к перекрытию фазы  $Ж$  выключателя по поверхности фарфоровых чехлов гасительных камер. Напряжение в момент перекрытия на этой фазе выключателя было 1 400 кв<sub>макс</sub>, что более чем в 4 раза превышает наибольшее фазное рабочее напряжение передачи. Повторение опыта в этих же условиях, но с измерительными трансформаторами напряжения типа НКФ-400, присоединенными к отключаемому участку линии, прошло весьма успешно. Перед отключением напряжения на здоровых фазах были равны 725 и 770 кв<sub>макс</sub>, что соответствует линейному напря-

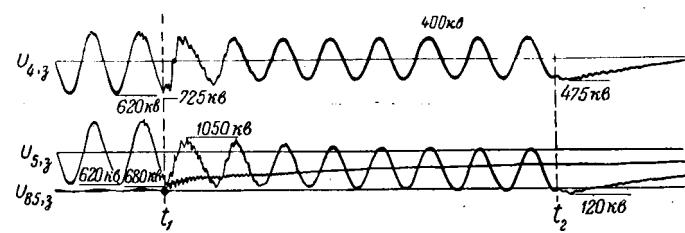


Рис. 8. Отключение от шин  $P\pi 2$  линий длиной 244 км и отключение от шин Восточной подстанции линии длиной 391 км с присоединенным к ней трансформатором напряжения (реактор на  $P\pi 2$  отключен).

$t_1$  — момент отключения выключателя  $B5$ ;  $t_2$  — момент отключения выключателя  $B3$ .

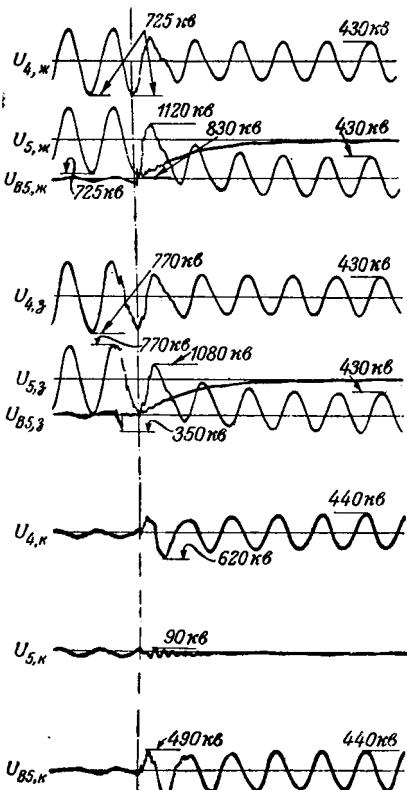


Рис. 9. Отключение от шин  $ПП2$  линии длиной 244 км с присоединенным к ней трансформатором напряжения при однофазном коротком замыкании на фазе  $K$  (реактор на  $ПП2$  отключен).

женнию 890 и 940 кв. При отключении выключателя напряжения на здоровых фазах выключателя повысились до 1120 и 1080 кв<sub>макс</sub> (рис. 9).

**Отключение от трансформатора линии, нагруженной на реактор.** Наличие на отключаемой линии шунтирующего реактора существенно облегчает работу выключателя, так как в этом случае в отличие от чисто холостой линии напряжение на выключателе восстанавливается значительно медленнее. При отключении линии длиной 635 км, нагруженной в конце на реактор  $3 \times 50$  Мвар, на отключенном проводе линии возникают слабо затухающие колебания с частотой 30,5 гц, определяющейся емкостью линии и индуктивностью реактора. Благодаря этим колебаниям максимум перенапряжения на выключателе формируется лишь на третьем полупериоде рабочей частоты, когда электрическая прочность воздуха в гасительных камерах достаточно возрастает.

**Заключение.** 1. Перенапряжения при отключении холостого трансформатора 400 кв имеют умеренную величину не более двухкратного значения фазного рабочего напряжения и униполярную апериодическую форму, что обусловлено благоприятным влиянием активных потерь в стали трансформатора и емкостью трансформатора и шин. Отсутствие колебаний после окончательного обрыва тока существенно снижает пик восстанавливающегося напряжения на выключателе.

2. Отключение шунтирующего реактора сопровождается более высокими перенапряжениями колебательной формы ввиду относительно небольших активных потерь в стали реактора. При установившемся линейном напряжении перед отключением, равном 400 ... 600 кв, кратность перенапряжения в долях наибольшего рабочего фазного напряжения достигает соответственно 2,3 ...

2,5 на реакторе и 2,4 ... 3,2 на выключателе.

3. При подключении к трансформатору 400 кв холостой линии длиной до 400 км кратность перенапряжений на трансформаторе и в конце линии составляет 1,75 в долях установившегося фазного напряжения после включения. При наличии на конце линии шунтирующего реактора (индуктивность 3,4 гн) установившееся напряжение после включения снижается, а абсолютное значение перенапряжения уменьшается примерно на 15%.

4. Отключение от трансформатора холостой линии 400 кв, длиной до 635 км, как правило, совершается успешно. Иногда отключение сопровождается повторными зажиганиями, которые могут вызывать на трансформаторе и на линии более высокие перенапряжения в случае отключения линии меньшей длины. Это объясняется увеличением частоты свободных колебаний с уменьшением длины линии, что приводит к более раннему формированию максимума перенапряжения, когда затухание свободных колебаний пока еще незначительно. Наибольшее перенапряжение, равное 2,6 в долях наибольшего рабочего фазного напряжения, было зарегистрировано на трансформаторе при отключении линии длиной 117 км.

5. Отключение линии, нагруженной шунтирующим реактором, совершается в облегченных для воздушного выключателя условиях, так как вследствие возникновения на отключенной линии слабо затухающих низкочастотных колебаний, обусловленных емкостью линии и индуктивностью шунтирующего реактора, напряжение на выключателе восстанавливается медленно.

6. Воздушный выключатель 400 кв справляется с задачей отключения отдаленных от источника холостых участков линии, если восстанавливающееся напряжение на нем не превышает 3,5-кратного значения от амплитуды наибольшего рабочего фазного напряжения. В ряде случаев, например при отключении участка с несимметричным коротким замыканием и при предварительном отключении шунтирующего реактора, возникают более высокие восстанавливающиеся напряжения, что может вызвать перекрытие по поверхности гасительных камер выключателя.

7. Измерительные трансформаторы напряжения типа НКФ-400, присоединенные к отключаемому участку линий, делают возможным успешное отключение и в этих суровых условиях, даже когда эквивалентное линейное напряжение перед отключением составляет более 900 кв. Приближенный расчет, согласующийся с результатами испытаний, показывает, что при наличии на отключаемой холостой линии 400 кв измерительных трансформаторов напряжения НКФ-400, из расчета по одному комплекту на каждые 200 км длины линии восстанавливающееся напряжение на выключателе снижается на 20 ... 15%, если фазное напряжение перед отключением соответственно равно 600 ... 400 кв<sub>макс</sub>. Само собой разумеется, что для аналогичных защитных целей могут применяться не только измерительные трансформаторы напряжения, но и более простые мало мощные насыщающиеся реакторы.

# Новое в автоматической частотной разгрузке энергосистем

Инж. Е. Д. ЗЕЙЛИДЗОН

Техническое управление Министерства электростанций

Автоматическая частотная разгрузка (АЧР)<sup>1</sup> является одним из важных и необходимых средств автоматизации энергосистем. В результате исследовательских и практических работ, проведенных в СССР многими организациями и энергосистемами под общим руководством Технического управления МЭС, теоретически обоснованы назначение АЧР, условия и возможности ее использования, выработана методика экспериментального и аналитического определения объема, расстановки и выбора характеристик разгрузки.

Благодаря широкому внедрению АЧР в энергосистемах почти полностью прекратились тяжелые аварии из-за глубокого снижения частоты вследствие внезапного возникновения значительного дефицита активной мощности. Отдельные редкие случаи таких аварий имеют место лишь там, где по различным причинам до сих пор отсутствует или неправильно осуществлена автоматическая разгрузка.

Таким образом, опыт эксплуатации энергосистем СССР убедительно подтвердил необходимость и высокую эффективность АЧР.

Вместе с тем условия применения и технические возможности выполнения АЧР не остаются раз навсегда неизменными. Их изменение должно приводить к пересмотру ряда основных, принципиальных положений в области осуществления АЧР, что нашло свое отражение в новой редакции Правил устройства электроустановок. Ниже рассматриваются обоснования соответствующих решений.

Внедрение АЧР проходило отнюдь не гладко. За него приходилось бороться, преодолевая порой очень серьезное сопротивление. Отчасти это объясняется сущностью действия АЧР, внезапно отключающей часть нагрузки энергосистемы, причем в отличие от релейной защиты при отсутствии повреждений. Такое отключение, конечно, связано с ущербом для производственного и бытового электропотребления и не может пройти безболезненно. Необходимость и успешность действия АЧР не всегда очевидны, даже если в результате этого действия предотвращена очень тяжелая авария. Многим кажется неубедительным, что если бы часть потребителей не была быстро и автоматически отключена, то последовало бы такое расстройство работы электростанций, энергорайонов или энергосистемы в целом, при котором оказались бы отключенными на длительный срок все или, во всяком случае, большая часть потребителей.

Именно поэтому совершенно обязательно АЧР в соответствии с их назначением сохранять в ведении энергосистемы, т. е. устанавливать, как правило, на районных подстанциях. Ошибочной является проявляющаяся кое-где на местах тенденция под предлогом лучшей увязки с технологи-

гией, с ответственностью отдельных производственных процессов размещать АЧР у потребителей. Исключением являются только предприятия, имеющие собственные электростанции, где разгрузка может потребоваться для сохранения в работе своей энергоустановки.

Как известно, при аварийном отключении генераторов, электростанций и питающих линий электропередачи нарушается равновесие между выработкой и потреблением электроэнергии и возникает дефицит активной мощности. В течение времени, определяемого величиной возникшего дефицита мощности, общей постоянной времени инерции вращения турбин, генераторов, электродвигателей и приводимых ими механизмов, а также некоторыми другими факторами, частота будет снижаться, причем возможно установление нового состояния равновесия. Соответствующее последнему новое сниженное значение частоты при отсутствии АЧР определяется формулой

$$f_p = f_{nom} - \frac{P_{d,n} - P_s}{2k_n}, \quad (1)$$

где  $f_p$  и  $f_{nom}$  — результирующее и исходное значения частоты;

$P_{d,n}$  — начальный возникший дефицит активной мощности в энергосистеме или районе в процентах от общей мощности;

$P_s$  — вращающийся резерв (включая перегрузочную способность агрегатов), который в результате действия регуляторов может быть мобилизован за время установления новых условий равновесия в процентах от общей мощности;

$k_n$  — коэффициент регулировочного эффекта нагрузки, зависящий от состава потребителей, нагрузка которых уменьшается при снижении частоты (обычно  $k_n = 1\dots 2$ ).

Если дефицит составляет значительную долю от располагаемой генерирующей мощности энергосистемы или района, то уже нельзя ориентироваться на условие равновесия, выраженное в приведенной выше формуле. При частоте порядка 48 ... 48,5 Гц из-за снижения скорости вращения турбин начнется снижение мощности, вырабатываемой генераторами электростанций. При дальнейшем снижении частоты до 45 ... 46,5 Гц оно начнет влиять на снижение производительности механизмов с электроприводом, в первую очередь питательных электронасосов.

Такое расстройство работы собственных нужд, особенно сказывающееся на электростанциях высокого давления, ведет к резкому снижению рас-

<sup>1</sup> Раньше она называлась автоматической аварийной разгрузкой энергосистем по частоте (ААРЧ).

полагаемой мощности, что вызывает возрастание ее дефицита и продолжающееся снижение частоты, т. е. к явлению, которое получило название лавины частоты. Кроме того, уменьшение скорости вращения агрегатов связано квадратичной зависимостью со снижением возбуждения генераторов и даже кубичной при наличии подвозбудителей и, следовательно, может вызвать дефицит реактивной мощности. Уже при снижении частоты до 44 ... 45 гц напряжение может уменьшиться до критического значения, когда возникает так называемая лавина напряжения.

Если будет допущена потеря собственных нужд электростанций, то это означает полное прекращение электроснабжения целого района, причем последующее восстановление нормальной работы может занять несколько часов. Практически в наиболее тяжелых случаях процесс аварийного снижения частоты до значений, когда возникают условия лавины частоты или напряжения, или и той и другой вместе, может иметь длительность в несколько секунд. За такое время возможность вмешательства персонала исключена. Мобилизация вращающегося резерва гидростанций из-за инерционности регулирования гидротурбин и тем более частотный пуск гидроагрегатов занимают больше времени. Реально возможно быстрое уменьшение возникшего дефицита мощности за счет турбогенераторов (вращающийся резерв и перегрузочная способность), за счет тех гидроагрегатов, на которых выполнено внедряемое в последнее время автоматическое ускорение действия регуляторов и действием разгрузки, причем, конечно, автоматическим<sup>2</sup>.

Развитие энергосистем, увеличение их мощности, рост резервов, и усиление связей между электростанциями, естественно, уменьшают вероятность возникновения глубокого снижения частоты. Так, например, в объединенных энергосистемах Юга полное отключение даже наиболее крупной электростанции приводит к снижению частоты всего лишь примерно на 1 гц. То же самое имеет место в объединенных энергосистемах Урала.

За последнее время в связи с этим появились отдельные высказывания о том, что АЧР кое-где уже не нужна, что она является пережитком, сохранившимся от военных и первых послевоенных лет, когда условия работы энергосистем были напряженными. При этом делаются ссылки на то, что в течение длительного времени устройства АЧР не действуют, так как в их действии нет необходимости, и что эти устройства иногда работают ложно. Делаются также ссылки на зару-

<sup>2</sup> Необходимо отметить, что, несмотря на быстротечность этих процессов, особенно лавины напряжения, до их начала иногда проходит не несколько секунд, а десятки секунд и даже минуты, когда еще возможны эффективные действия диспетчерского персонала. Что же касается электростанций, то опытный и приученный к рефлексным и самостоятельным действиям персонал, как правило, всегда может, используя самозапуск двигателей, предотвратить полную остановку станции даже при лавине частоты и напряжения отделением от сети части генераторов с собственными нуждами.

бежный опыт, хотя и за рубежом автоматической разгрузке начали уделять внимание<sup>3</sup>.

Бессспорно, что в крупных объединениях энергосистем общие глубокие снижения частоты становятся более редкими явлениями и, следовательно, все реже становится нужным действие АЧР. Однако из этого не следует, что от нее надо вообще отказаться, так как не исключена возможность возникновения значительных местных дефицитов мощности в отдельных районах этих объединений. Такие факторы, как увеличение единичных мощностей агрегатов, переход на блочные схемы станций, при которых остановка котла вызывает остановку турбогенератора, и особенно сооружение дальних мощных электропередач увеличивают значение АЧР. Таким образом, если на первом этапе применения АЧР (а в небольших энергосистемах и сейчас) основной являлась общесистемная разгрузка, то теперь в крупных энергосистемах выходят на первый план и чаще должны работать местные разгрузки по районам.

Характерно, что в объединенных энергосистемах Центра в связи с вводом Куйбышевской ГЭС и электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва потребовалось увеличить мощность потребителей, присоединенных к АЧР\*. В перспективе возможно также использование автоматической разгрузки (наряду с торможением агрегатов на гидроэлектростанциях) для восстановления синхронизма в случае возникновения асинхронного хода.

Самым существенным в новом порядке АЧР, нашедшем отражение в новой редакции Правил устройства электроустановок, является отказ от привязки очередности отключения ею потребителей к графику аварийных отключений и от вытекающей из этого селективности действия очередей, в которые группируются отдельные устройства АЧР. Именно эти требования особенно усложняли автоматическую разгрузку.

Увеличение числа очередей, конечно, снижает вероятность излишних (по мощности) отключений. Но стремление подбирать для каждой очереди равноценных по ответственности потребителей вело к снижению мощности потребителей, подключаемых на один автомат, к нерациональному увеличению общего количества устанавливаемых автоматов. На некоторых подстанциях устанавливалось даже по нескольку автоматов — разные очереди отключения. Однако применение разных уставок по частоте с целью согласования мощности отключаемых потребителей с фактической величиной возникшего дефицита мощности сохраняется, чтобы не отключать излишних потребителей и не вызвать этим чрезмерного подъема частоты.

Селективное отключение может быть сохранено лишь в тех немногих районах, где возможно

<sup>3</sup> Влияние понижения частоты и напряжения на работу энергосистемы. Серия „Энергетика за рубежом“. Госэнергоиздат, 1956.

\* По отношению к ЕЭС Европейской части СССР это уже является местной разгрузкой.

глубокое снижение частоты и необходимо действие АЧР, например в случае отключения одиночной линии электропередачи.

Чем реже может потребоваться действие АЧР, тем больше оснований идти на ее упрощение, на уменьшение до разумного предела количества автоматов, увеличение мощности потребителей, присоединенных на один автомат, отключение не отдельных присоединений, а трансформаторов и целых подстанций. Это оправдается снижением затрат на установку и эксплуатацию АЧР, уменьшением вероятности ложных действий, облегчением и улучшением обслуживания, включая расчеты и перестройки по мере ввода новых мощностей и изменений в сети. Дополнительным соображением в пользу такого решения являются новые возможности выполнения и расширение области применения частотного АПВ.

Автоматическое включение потребителей, отключенных действием устройств АЧР, при восстановлении частоты появилось позже того, как началось внедрение АЧР \*\*. Вначале оно применялось в небольших энергосистемах, где значительное, но кратковременное снижение частоты оказывалось возможным из-за наброса активной мощности при коротких замыканиях, отключаемых защитами с выдержкой времени, а также в энергосистемах, состоящих преимущественно из гидроэлектростанций, имеющих врачающийся резерв мощности, мобилизация которого из-за инерционности регулирования требует времени до 10 сек, а иногда и более. Однако затем появились<sup>4</sup> и были повсеместно внедрены весьма эффективный автоматический пуск гидроагрегатов и автоматический перевод агрегатов, работающих в режиме синхронного компенсатора, в активный режим при снижении частоты, так называемый частотный пуск. Наконец, теперь все шире внедряется несинхронное автоматическое повторное включение.

Если раньше частотное автоматическое повторное включение (АПВ) выполнялось путем установки дополнительного реле частоты, то теперь и снижение частоты и ее восстановление могут фиксироваться одним реле с автоматически перестраивающейся уставкой<sup>5</sup>.

До сих пор уставка частотного АПВ выбиралась ниже номинальной частоты (49 ... 49,5 гц), поэтому в большинстве случаев, чтобы предотвратить повторное снижение частоты при неполной ликвидации дефицита мощности, частотное АПВ применялось не на всех АЧР. Теперь имеется очень простое и вместе с тем интересное предложение выполнять частотное АПВ также и с уставкой выше номинальной частоты (50,2 ... 50,5 гц)<sup>6</sup>. После восстановления нормального режима работы энергосистемы и обеспечения резерва диспетчер может кратковременным подъ-

емом частоты вызвать срабатывание частотных АПВ с такими уставками, т. е. без телеуправления и без участия персонала включить все присоединения, оставшиеся до того отключенными в результате действия АЧР.

Изложенные условия вместе с уменьшением числа автоматов, безусловно, будут способствовать более широкому применению частотного АПВ. Следует добавить, что указанный выше новый порядок выполнения АЧР позволит иметь в большинстве случаев не более одного автомата на подстанции. Это также снимает затруднение при выполнении частотного АПВ, связанное с одновременным включением нескольких выключателей.

Другим нововведением является допущение на части АЧР выдержки времени до 5 сек, что позволяет отстроить АЧР от ложных действий из-за наброса мощности при коротких замыканиях, а также из-за кратковременных перерывов питания при работе устройств автоматического повторного включения и автоматического включения резерва.

Опыт показал, что после снятия питания напряжение сохраняется в течение 0,5 ... 1,5 сек даже при отсутствии синхронных двигателей и компенсаторов, затухая по амплитуде и частоте. Это явление имеет место за счет накопленной электромагнитной и механической энергии в асинхронных двигателях и приводимых механизмах и может вызывать действие АЧР и необоснованное отключение части присоединений. АЧР может подействовать также при колебательном разряде емкости кабелей на трансформаторы. Введение выдержки времени в несколько секунд позволяет отстроиться от этих ложных действий АЧР и даже частично использовать врачающийся резерв мощности гидроагрегатов<sup>7</sup>.

До сих пор, как правило, придерживались жесткого требования, что все АЧР должны работать без выдержки времени. Фактически же для отстройки от ложных срабатываний реле частоты при снижении напряжения принималось общее время 0,2 ... 0,5 сек. Что такое требование было недостаточно обоснованно, видно из кривых, представленных на рисунке. Очевидно, быстрая разгрузка должна обеспечить предотвращение снижения частоты до критического уровня по условиям возникновения лавины напряжения, а последующий подъем частоты до 48 ... 49 гц может быть обеспечен АЧР с временем действия в несколько секунд. Ведь применяется специальная очередь для предотвращения зависания частоты с временем 15 ... 25 сек.

Нетрудно показать на основе видоизмененной формулы (1), что выдержку времени могут иметь АЧР, отключающие нагрузку, равную конечному

\*\* Электрические станции, № 6, 1952.

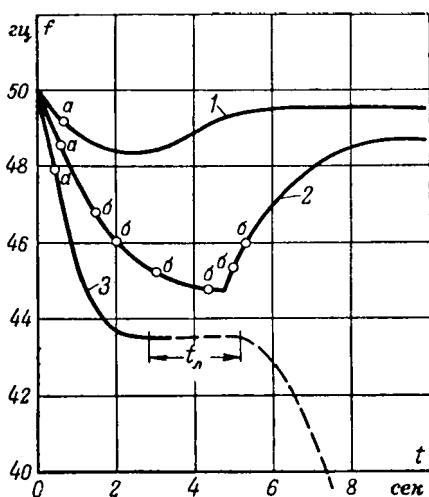
<sup>4</sup> Электрические станции, № 9, 1952.

<sup>5</sup> Электрические станции, № 1, 1957.

<sup>6</sup> Предложения Ю. О. Бринк (Новочеркасский политехнический институт) и В. М. Елфимова (Мосэнерго).

6\*

<sup>7</sup> Принципиально выдержку времени на части АЧР можно было бы увеличить до 15 сек, что позволило бы полностью использовать возможности работающих агрегатов. Что же касается частотного пуска гидроагрегатов, то для его использования потребовалось бы время на АЧР порядка 1... 1,5 мин.



Кривые изменения частоты.

1 — при незначительном дефиците мощности, не полностью покрываемом вращающимся резервом (не требуется АЧР); 2 — при значительном дефиците мощности (требуется АЧР для предотвращения снижения частоты до критической и последующего ее восстановления); 3 — при большом дефиците мощности и отсутствии АЧР (частота снижается до уровня ниже критической, а затем наступает лавина частоты); *a* — точки вступления в работу регулирования турбин; *b* — моменты действия АЧР. Время  $t_d$  показано условно, оно зависит от динамики нарушения баланса активной и реактивной мощности и может составлять десятки секунд и минуты.

дефициту мощности с учетом быстрого действия АЧР:

$$P_{d.k} = P_{d.n} - P_s - P'_{ACh} = 2k_n (f_{nom} - f_{kp}), \quad (2)$$

где  $P_{d.k}$  — конечный дефицит мощности в процентах от общей мощности;

$P'_{ACh}$  — мощность, отключаемая АЧР с выдержкой времени до 0,5 сек;

$f_{kp}$  — критическая частота.

Если принять  $k_n = 1 \dots 2$  и  $f_{kp} = 44$  гц, то  $P_{d.k}$  составит 12 ... 24 % от общей мощности. Следовательно, на некоторой части АЧР вполне можно допустить указанные выше выдержки времени. При этом, если по дефициту мощности требуется больший объем разгрузки, то остальные АЧР должны обязательно иметь время действия не более 0,5 сек.

Коль скоро решено отказаться от требования селективного отключения, то логично стремиться к наибольшей гибкости разгрузки, т. е. к отключению каждый раз возможно точнее именно такой нагрузки, которая соответствует фактически возникшему дефициту мощности. Ввиду этого целесообразно идти на увеличение числа очередей по сравнению с тем, что принималось ранее. В пределе для компактной энергосистемы или района число очередей может быть взято равным числу установленных АЧР. Если, например, имеется 20 АЧР, то, приняв для них различные, хотя бы незначительно отличающиеся друг от друга частоты срабатывания и времена действия и исходя из наиболее вероятного характера снижения частоты, можно во многих случаях (но не во всех) получить более гибкую разгрузку, чем та, которая получается при разбивке АЧР на группы с одинаковыми уставками (по четыре — шесть АЧР в каждой группе).

Прежние установки о том, что объем разгрузки должен составлять 30 ... 50 % общей мощности энергосистемы, теперь теряют свое значение. Сейчас имеется полная возможность выбирать объем разгрузки, соответствующие ему расстановку и минимальное число автоматов в зависимости от схемы и режимов работы энергосистемы или района, вероятности возникновения значительных дефицитов мощности и, следовательно, случаев срабатывания автоматов, а также частотных характеристик, методика экспериментального и аналитического определения которых достаточно разработана ЦНИЭЛ и ОРГРЭС МЭС. С учетом этих же факторов могут быть определены число очередей и их характеристики, причем диапазон частот, при которых автоматы должны действовать, можно брать таким же, как и раньше,— начало разгрузки при частоте 48 ... 47 гц, нижний предел 45 гц (если он не уточняется по конкретным условиям).

Общесистемная разгрузка в крупных энергосистемах теперь, как правило, будет составляться из местных разгрузок по районам. Не исключено, что в некоторых случаях ее объем превысит принятый ранее (30 ... 50 %), но вместе с тем случаи отключения такой мощности устройствами АЧР будут становиться все менее вероятными.

[21. 6. 1957]



*Советские энергетики, строители и монтажники электростанций и электросетей! Быстрее вводите в действие и осваивайте новые энергетические мощности! Дадим стране большие электроэнергии!*

# Из истории электротехники

## Беседа Ленина с Уэллсом об электрификации России

Г. А. МЕНДЕЛЕВИЧ

Институт истории естествознания и техники Академии наук СССР

Известный английский писатель, автор многих научно-фантастических романов Герберт Джордж Уэллс проявлял глубокий интерес к жизни и культуре нашей страны и трижды посещал ее. Первое посещение России Уэллсом относится к началу 1914 г.

После Великой Октябрьской социалистической революции Уэллс приехал в Советскую Россию, чтобы своими глазами увидеть новый социальный порядок. Это было в конце сентября 1920 г., в период хозяйственной разрухи, вызванной блокадой и интервенцией империалистических государств против революционной России и саботажем внутренней контрреволюции.

В этих крайне тяжелых условиях Коммунистическая партия по инициативе товарища Ленина разработала Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО). Ленин ознакомил с этим величественным планом широкие массы трудящихся; он говорил: «Электричество надо пропагандировать<sup>1</sup>. Из интервью с Лениным, помещенного 23 февраля 1920 г. в английской газете «Дейли Экспресс», общественное мнение Запада узнало, что в России разрабатывается план электрификации, которая, как указывал В. И. Ленин: «...на почве советского строя создаст окончательную победу основ коммунизма в нашей стране...

Снятие блокады должно помочь осуществлению плана электрификации<sup>2</sup>.

Главной целью поездки Уэллса в сентябре 1920 г. в Москву было свидание с В. И. Лениным. Английский писатель застал главу Советского государства «сидящим за большим письменным столом, в хорошо освещенной комнате, выходящей окнами на дворцовую площадь»<sup>3</sup>. Живая ленинская улыбка сразу расположила собеседника. С профессиональной наблюдательностью писатель фиксировал в своих записях об этом приеме характерные внешние детали — «Ленин с интересом, не отрываясь, смотрел на меня из-под руки, которую он держал над прищуренным глазом»<sup>4</sup>. В другом месте Уэллс писал,

что Ленин имел привычку приподнимать пальцем веко во время разговора и говорил быстро, без всякой позы, без недомолвок, увлекаясь своим предметом, так, как говорят серьезные ученые. Яркости восприятия ленинской речи способствовало также то обстоятельство, что беседа велась не через переводчика, а непосредственно на английском языке, на котором, по свидетельству Уэллса, Ленин говорил прекрасно.

Основное место в беседе занял вопрос об электрификации. Ленин рассказал о плане строительства гигантских электростанций, которые неизвестно изменят целые области; электроэнергия будет освещать дома, давать воду, вращать станки, двигать поезда, она создаст базу для социалистической промышленности; предусматривалось не только восстановление народного хозяйства, но и увеличение объема промышленной продукции почти вдвое по сравнению с довоенным уровнем. Уэллс не ожидал услышать что-либо подобное. Он считал возможной электрификацию в передовых промышленных странах — Англии и др. «Но вообразить себе ее применение в России можно лишь с помощью очень богатой фантазии. Я лично ничего подобного представить себе не могу»<sup>5</sup>. И хотя фантазии писателя оказалось вполне достаточно, чтобы нарисовать в своих романах увлекательные картины покорения людьми природы, он был настолько озадачен планом промышленно-экономического переустройства России, нарисованным Лениным, что не был в состоянии сразу воспринять все величие этого плана.

Уэллс не смог поверить в тот момент в реальность грандиозных ленинских замыслов. Он счел Ленина «Кремлевским мечтателем», а план ГОЭЛРО утопией.

Свои впечатления от посещения Советской России и встречи с Лениным Г. Уэллс изложил в серии статей, опубликованной американской и английской печатью, а затем в феврале 1921 г. издал ее отдельной книгой, которая вышла в Англии под названием «Россия во мгле».

<sup>1</sup> В. И. Ленин. Соч., 4 изд., т. 35, стр. 399.

<sup>2</sup> В. И. Ленин. Соч., 4 изд., т. 30, стр. 343.

<sup>3</sup> Г. Д. Уэллс. Россия во мгле. Госиздат Украины, 1922, стр. 85.

<sup>4</sup> Wells H. G. Experiment in autobiography, т. II, стр. 804, Лондон. Изд. Голланц, 1934.

<sup>5</sup> Г. Уэллс. Россия во мгле, стр. 89.



Реакционная печать Запада враждебно отнеслась к ряду высказываний Уэллса о Советской России. Эмигрантская газета «Руль» опубликовала ряд статей, направленных против этой книги. Выписка из статьи газеты «Руль» «Уэллс, Горький и Россия» была направлена управляющим делами Совнаркома В. И. Ленину для ознакомления.

В архиве Института марксизма-ленинизма хранится экземпляр английского издания книги «Россия во мгле», на котором сохранились многочисленные ленинские пометки. На стр. 12 отмечены слова о том, что главный факт для западного читателя тот, что в России уничтожен социальный и экономический строй, схожий с существующим на Западе. На стр. 27 подчеркнут абзац, в котором Уэллс признает, что не коммунизм, а европейский империализм втянул Россию в мировую войну. На стр. 75 подчеркнуто утверждение автора, что большевистское правительство — самое бесхитростное в мире. Далее на стр. 89 Владимир Ильич отметил фразу о том, что русские беженцы в Англии с политической точки зрения заслуживают полного презрения. Ленин также отметил те места книги, в которых допущены антимарксистские выпады. Размер настоящей статьи, к сожалению, не позволяет остав-

новиться на всех ленинских пометках, сделанных на 22 страницах книги.

Спустя 14 лет Уэллс воочию убедился в торжестве ленинских идей; он признал ошибочным свой прежний прогноз о невозможности осуществления плана ГОЭЛРО и прямо написал об этом в своих автобиографических заметках. Вновь обращаясь к подробностям незабываемой беседы с Лениным, английский писатель признал:

«Мы встретились и разговаривали, имея каждый свои предвзятые взгляды. Мы говорили главным образом о необходимости заменить мелкое крестьянское хозяйство крупным — это было за 8 лет до первого пятилетнего плана — и об электрификации России, которая в то время существовала лишь в его воображении. Я отнесся к этому скептически потому, что я ничего не знал о колоссальной водной энергии России. «Приезжайте к нам через десять лет», возразил он на мои сомнения»<sup>6</sup>.

В июле 1934 г. Уэллс в третий раз приехал в СССР. Он ознакомился с замечательными достижениями советского народа. Уэллс посетил мавзолей В. И. Ленина, просмотрел фильм «Три песни о Ленине», содержащий документальные

<sup>6</sup> Wells H. G. Experiment in autobiography, т. II, стр. 778.

кадры, изображающие живого Ильича. Писатель решил более подробно изложить свои мысли о Ленине, величие которого с годами становилось Уэллсу все более ясным.

Ниже мы приводим отрывок из воспоминаний о Ленине, написанных Уэллсом в 1934 г.

«Когда я беседовал с Лениным, меня значительно больше занимала тема разговора, чем мы сами. Я забывал, были ли мы великими или малыми, старыми или молодыми. В то время наибольшее впечатление на меня произвело то обстоятельство, что он был небольшого роста и отличался необыкновенной живостью и целеустремленностью. Но теперь, когда я перелистываю свою книгу, написанную 14 лет тому назад, вновь вспоминаю его и сравниваю с другими людьми, которые занимали высокие посты, я начинаю понимать, какой выдающейся исторической личностью он является. Я редко соглашаюсь с общепринятым понятием «великий человек», но если говорить о величии отдельных представителей человечества, то я должен признать, что Ленин был по меньшей мере величайшим человеком. Если в 1912 г. я мог назвать Бальфура<sup>7</sup> без сомнения великим, то я считаю почти своим долгом соизмерить эту вспышку энтузиазма с тем, что я думаю о Ленине. Итак, разрешите мне сказать — это плод долгих размышлений — что при сопоставлении этих двух людей весы не колеблются: Бальфур просто сбрасывается с их чаши. Скромно одетый маленький человек в Кремле превосходил его и теоретически и в практической деятельности. Ленин оставался деятельным до самой смерти, тогда как Бальфур кончил тем, что стал в позу. Когда я видел Ленина, он был уже болен и был вынужден часто отдыхать. Уже в начале 1922 г.

<sup>7</sup> Бальфур, Артур Джемс (1848—1930) — английский государственный деятель, дипломат, один из лидеров консервативной партии.

доктора категорически запретили ему работать; летом он был частично парализован; в начале 1924 г. он умер. Таким образом, период, когда он полностью осуществлял руководство, продолжался немногим менее 5 напряженных лет. Тем не менее, за этот период он внес в русскую действительность целеустремленное, созидательное отношение ко всем трудностям, которое сохранялось и до настоящего времени... Его ум никогда не становился косым и он переключался от революционной деятельности к социальным преобразованиям с удивительной гибкостью. Когда я с ним познакомился в 1920 г., он изучал с энергией юноши возможности «электрификации России». Идеи 5-летнего плана — он представлял его себе как серию последовательно осуществляемых планов — единая энергетическая сеть России, Днепрогэс уже существовали в его воображении. Брожение, вызванное его идеями, продолжалось еще долго после того, как он перестал работать. Может быть и сейчас он продолжает свою грандиозную работу.

Когда я был в Москве в последний раз в июле 1934 г., я посетил его Мавзолей и снова увидел маленького человека. Он показался мне еще меньше. Его лицо было восковым и бледным, а его беспокойные руки неподвижны. Его бородка стала еще ярче. Выражение его лица было величественным, простым и воодушевленным, в нем было что-то детское и вместе с тем мужественное — высшие человеческие качества. И вот он уснул — слишком рано для России. Обстановка в Мавзолее была простой и благородной... В Москве однажды вечером мне показали новый фильм Дзиги Вертоva «Три песни о Ленине». Это прекрасный и трогательный апофеоз Ленина. Это гимн Ленину...»<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Well's H. G. Experiment in autobiography, т. II, стр. 778—780.



# ДИСКУССИИ

## О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ

(Статья Н. М. Мельгунова, Электричество, № 2, 1957)

Кандидат техн. наук В. Т. ЕНИН  
Львовский политехнический институт

За последние годы в Советском Союзе и за границей все чаще ставится на обсуждение вопрос о применении электропередачи постоянного тока, поэтому статью Н. М. Мельгунова следует признать своевременной.

Очевидно, электропередача постоянного тока будет приемлема для народного хозяйства лишь в том случае, если при беспристрастном технико-экономическом сравнении электропередач постоянного и переменного тока преимущество окажется на ее стороне.

По нашему мнению, при технико-экономическом сравнении электропередач следует исходить из следующих основных показателей: капиталовложений на 1 квт, к. п. д. электропередач, стоимостей переданного киловатт-часа, величин передаваемых мощностей, устойчивости электропередач, возможности осуществления промежуточных отборов, количества обслуживающего персонала и его квалификации, простоты и надежности схемы и т. п.

Экономические показатели в основном зависят от напряжений сравниваемых электропередач постоянного и переменного тока. При выборе напряжений следует исходить из современного уровня развития техники в области передачи энергии как постоянным, так и переменным током.

Нельзя согласиться с утверждением Н. М. Мельгунова о том, что уровень изоляции воздушных трехфазных линий 400 кв достаточен для линий постоянного тока с номинальным междуполюсным напряжением более 800 кв и что уровни изоляции основного подстанционного оборудования трехфазной электропередачи 400 кв и передачи постоянного тока 800 кв примерно одинаковы.

Как показывают исследования Научно-исследовательского института постоянного тока, при выборе изоляции линий переменного тока 400 и 650 кв по внутренним перенапряжениям целесообразно исходить из одинакового уровня напряжений, действующих на подстанционное оборудование и линию. На основании решения экспертной комиссии по техническому проекту линий постоянного тока 800 кв Сталинградская ГЭС — Донбасс воздействующее повышенное напряжение при выборе уровня изоляции этой линии и подстанционного оборудования принято равным двойному рабочему напряжению передачи, а мокроразрядное напряжение внешней изоляции 840 кв.

Исследования Научно-исследовательского института постоянного тока и опыт эксплуатации показали, что за счет применения выключателей с шунтирующими сопротивлениями и разрядников, рассчитанных на длительное протекание тока, уровень внутренних перенапряжений для линий переменного тока может быть принято равным 2,5 кв.

Попытаемся определить напряжения сравниваемых линий постоянного и переменного тока.

Согласно методике, разработанной Научно-исследовательским институтом постоянного тока, длина гирлянды линии постоянного тока может быть определена по следующей формуле:

$$l = \frac{U_{mp}}{0,865E},$$

где  $U_{mp}$  — мокроразрядное напряжение;

$E$  — мокроразрядный градиент для изоляторов.

Учитывая, что  $U_{mp} = m 1,05 U_{\phi} = 840$  кв, а  $E$  для изоляторов типа Г-8,5 равно 2,41 кв/см, получим  $l = 402$  см. Число изоляторов типа Г-8,5 в поддерживающей гирлянде линии постоянного тока

$$n = \frac{l}{h} + 2 = 22,$$

где  $h$  — строительная высота изолятора.

Пользуясь методикой Теплоэлектропроекта, разработанной на основании исследований Института постоянного тока, определим фазное напряжение линии переменного тока, если в гирлянде будет 22 изолятора Г-8,5. Так как

$$U_{mp} = (n - 2) Eh = 950 \text{ кв},$$

где  $E = 2,3$  кв/см, а  $n$  — число изоляторов в гирлянде, то фазное напряжение линии переменного тока

$$U_{\phi} = \frac{U_{mp} k}{mk1,05} = 380 \text{ кв},$$

где  $k = 1,16$  — коэффициент, учитывающий различие лабораторных и реальных условий работы изоляции;

$k_1 = 1,1$  — коэффициент, учитывающий 10% разницу между разрядным и выдерживающим напряжением гирлянды;

$m = 2,5$  — кратность коммутационных перенапряжений.

Следовательно, при сопоставлении технико-экономических показателей передач постоянного и переменного тока необходимо для передачи постоянного тока брать напряжение, например  $\pm 400$  кв (800 кв), а для передачи переменного тока 650 кв, а не 400, как это делалось до настоящего времени.

Если учесть это, а также то, что концевые подстанции электропередачи постоянного тока значительно дороже подстанций переменного тока, то применение передач постоянного тока будет экономически выгодно при дальностях порядка 1000 км. Если же учесть еще возможность осуществления дешевых отборов мощности от линий переменного тока, то граница экономической выгодности передач постоянного тока будет проходить еще выше.

При перспективном планировании развития электрических систем будет не совсем правильным делать упор на магистральные (без промежуточных отборов) линии. Даже от электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва уже находящейся в эксплуатации и проходящей в Центральном районе Советского Союза, в ближайшие пять лет придется осуществлять отборы мощности. Что же остается говорить об электропередачах, которые будут пересекать Восточную часть Советского Союза, где бурно развивается промышленность.

Если иметь в виду нормальную загрузку вентиляй преобразовательных подстанций, то нельзя согласиться с утверждением Н. М. Мельгунова о высокой кратковременной перегрузочной способности электропередачи постоянного тока. Как известно, ртутные вентили работают устойчиво лишь при строго номинальных токах, напряжении и температуре. Поэтому в проекте электропередачи постоянного тока Сталинградская ГЭС — Донбасс предусматривается работа вентиляй с постоянным током и напряжением, равным 50% номинального значения. Запас по напряжению, согласно мнению авторов проекта, приводит к максимальной надежности работы преобразовательных подстанций [Л. 1].

Нельзя считать, что проблема устойчивости в случае передачи постоянного тока полностью снимается. В настоящее время мы не можем твердо сказать, что инвертор будет работать устойчиво при всех отклонениях от нормального режима как в самой передаче постоянного тока, так и в приемной энергосистеме, так как нет еще ни автоматических устройств, ни главной схемы инвертора, которые обеспечивали бы высокую степень устойчивости.

Следует согласиться с Н. М. Мельгуновым, что стоимость промежуточных устройств для повышения устойчивости в линии переменного тока высока. Однако линейные реакторы, устанавливаемые на передачах постоянного тока, по мощности и габаритам мало уступают поперечным реакторам, применяемым в линиях переменного тока. Батарея поперечных фильтровых конденсаторов, которая

присоединяется за линейными реакторами, рассчитывается на напряжение постоянного тока относительно земли и переменную составляющую выпрямленного напряжения и имеет суммарную емкость 6...10 мкФ; она, по всей вероятности, по стоимости не уступит конденсаторной установке, применяющейся на линии переменного тока для продольной компенсации.

В отношении простоты обслуживания электропередачи постоянного тока сильно уступают электропередачам переменного тока, требуют значительно большей численности эксплуатационного персонала и имеют более сложную эксплуатационную схему. Например, концевые подстанции электропередачи Сталинградская ГЭС — Донбасс по численности высококвалифицированного персонала могут быть приравнены к мощным неавтоматизированным гидроэлектростанциям. С увеличением мощности передачи численность персонала естественно будет расти.

Применение линии постоянного тока в качестве межсистемной связи следует признать нецелесообразным, так как для осуществления этой функции линией постоянного тока потребуются сложнейшие устройства автоматики и телемеханики. Из-за неполадок в отдельных элементах этих устройств будет нарушаться нормальная работа объединенных систем. Межсистемная связь, выполненная на переменном токе, не имеет этих недостатков.

Из статьи Н. М. Мельгунова следует, что уровень развития техники передачи постоянным током высокого напряжения таков, что время промышленного внедрения этих передач еще не наступило. В настоящее время требуется дальнейшие разработки и исследования, которые вполне могут проводиться на опытной передаче Кашира — Москва. Средства же, сэкономленные в результате отказа от строительства дальних передач постоянного тока, должны быть направлены на электрификацию сельскохозяйственных районов страны.

### Литература

1. В. П. Пименов, А. В. Поссе, А. М. Рейдер, С. С. Рокотян и В. Е. Турский. Электропередача постоянного тока Сталинградская ГЭС — Донбасс. Электрические станции, № 11, 1956.

### Кандидат техн. наук А. А. САКОВИЧ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

При технико-экономическом сравнении передач переменного и постоянного тока следует учитывать не столько достигнутый уровень, сколько возможности развития каждой из систем. Техника передачи энергии постоянным током находится лишь в начальной стадии своего развития и имеет большие возможности для своего усовершенствования и преодоления недостатков.

Опыт сооружения и эксплуатации линий постоянного тока Каширская ГРЭС — Москва подготовил строительство значительно более мощной и протяженной линии Сталинградская ГЭС — Донбасс. Ее проектирование, строительство и эксплуатация будут стимулировать работы по созданию более совершенных методов преобразования тока и более простого и надежного оборудования для будущих мощных сверхдальних передач постоянного тока.

Как известно, основные преимущества передачи энергии постоянным током заключаются в возможности значительного повышения напряжения и увеличения пропускной способности линий, в снижении стоимости линии, выполненной кабелем, в отсутствии необходимости в промежуточных устройствах для повышения устойчивости, в возможности более легко решить проблему создания сверхмощных высоковольтных выключателей, функции которых частично могут быть возложены на ионные вентили преобразовательных подстанций. При постоянном токе повышается надежность передачи, так как при обрыве одного из полюсов передача может работать с половиной мощностью, используя в качестве обратного провода землю.

Вместе с тем электропередача постоянного тока в настоящее время присущ ряд недостатков. Встречаются затруднения в осуществлении промежуточных ответвле-

ний от линий постоянного тока. Оборудование преобразовательных подстанций постоянного тока работает в несравненно более тяжелых электрических режимах и включает в себя новые элементы, отсутствующие в передаче переменного тока.

Из-за большой стоимости оборудования подстанций экономические преимущества передачи постоянного тока начинаютказываться лишь при определенной дальности, когда экономия на линейной части начинает перекрывать перерасход на оборудование подстанций. Для современного состояния техники эта дальность составляет примерно 600...800 км. Поэтому в настоящее время усилия концентрируются на совершенствовании системы концевых преобразовательных подстанций.

Можно отметить ряд факторов, ухудшающих показатели электропередачи постоянного тока.

Главным звеном системы передачи энергии постоянным током являются рентильные преобразователи, в качестве которых в настоящее время применяются исключительно ртутные ионные вентили. Коеффициент полезного действия высоковольтных ртутных вентилей достигает 99,8% и превосходит к. п. д. преобразователей других типов. Однако недостаточное совершенство применяемых в настоящее время ртутных вентилей и сложность требующихся для них вспомогательных устройств вызывают известные затруднения. Имеют ряд недостатков и применяемые в настоящее время силовые преобразовательные схемы.

К недостаткам вентилей и преобразовательных схем следует отнести следующие:

1. Недостаточная мощность и эксплуатационная надежность каждой преобразовательной единицы, что ведет к необходимости устанавливать большое количество единиц, увеличивает стоимость и потери энергии.

2. Современные вентили требуют соблюдения заданного температурного режима и устанавливаются в закрытом помещении. Строительство и отопление больших закрытых помещений обходится очень дорого. Система принудительного охлаждения вентилей с циркулирующей изолирующей жидкостью сложна и служит источником аварий.

3. При существующих преобразовательных схемах в процессе коммутации получаются относительно большие и резкие изменения напряжения на вентилях и другом оборудовании, что приводит к необходимости дополнительных устройств для демпфирования высокочастотных колебаний. Вентили подвергаются тяжелым электрическим режимам в аварийных условиях. Необходима установка мощных синхронных компенсаторов для генерирования реактивной мощности.

4. Питание собственных нужд и управления вентилями подводится на потенциале катода каждого вентиля. Поскольку в преобразовательной схеме вентили находятся под разными потенциалами, требуется большое число изолирующих каскадно включенных трансформаторов. Вспомогательные изолирующие трансформаторы удлиняют схему, снижают надежность и вносят дополнительные емкости, утяжеляющие электрические режимы.

Перечисленные трудности лишь частично преодолены при проектировании передачи Сталинградская ГЭС — Донбасс. В результате больших исследовательских и экспериментальных работ, проведенных во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина, поднята мощность преобразователей до 10 Мвт в единице (вентили ВР-9, 900 а, 130 кв мкс), повышена надежность работы вентилей путем последовательного включения двух вентилей. Однако, несмотря на сравнительно небольшую дальность электропередачи Сталинградская ГЭС — Донбасс, практическая стоимость ее варианта на постоянном токе не превосходит стоимости варианта на переменном токе.

Работы по усовершенствованию вентилей и преобразовательных схем сопряжены с большими трудностями. Дело в том, что высоковольтные ртутные вентили основаны на разнообразных физических явлениях, многие из которых до настоящего времени полностью не изучены. В сложных преобразовательных схемах возникают электрические процессы, которые трудно теоретически анализировать и воспроизвести экспериментально.

В настоящее время главная задача состоит в том, чтобы доработать конструкцию вентилей, предназначен-

ных для передачи Сталинградская ГЭС — Донбасс, и наладить их серийное производство, а также усовершенствовать известные преобразовательные схемы с целью получения приемлемых технических решений для осуществления указанной передачи.

Работы по созданию более совершенных преобразовательных систем пока ведутся в ограниченном масштабе как проблемные перспективные исследования. Однако уже первые результаты этих работ дают основание сделать определенные предположения о путях развития высоковольтной преобразовательной техники и о конкретных методах преодоления указанных выше недостатков.

Совершенствование конструкции вентилей идет по линии создания приборов с повышенной вакуумной плотностью. При этом отпадает постоянно действующая откачка система, которая понижает надежность существующих вентилей, требует дополнительного наблюдения или соответствующей автоматики, а также дополнительного расхода электроэнергии.

Питание всех вспомогательных цепей можно осуществить за счет электроэнергии, получаемой от силовой цепи, через делитель напряжения, который одновременно может играть роль демпфирующего и делительного контура для деления напряжения между последовательно включенными вентилями. От этого же делителя напряжения может питаться генератор сеточных импульсов, управляемый модулированным световым лучом. Такая система позволяет исключить изолирующие трансформаторы. Создание автономной системы охлаждения для каждого агрегата позволит избавиться от системы трубопроводов с изолирующими вставками.

Перспективным является преобразователь, осуществляющий в виде комплектного агрегата, включающего в себя вентиль и все необходимые устройства (блоки вспомогательных цепей и управления, заградительный реактор, демпфирующий контур и др.) и заключенного в общий фарфоровый кожух. Такие агрегаты будут устанавливаться на открытом воздухе, и необходимость в строительстве больших помещений отпадет.

Должны быть созданы преобразовательные схемы, повышающие эффективность использования вентилей, имеющие больший к. п. д. и большую надежность. Главное внимание должно быть удалено ограничению токов и напряжений на вентилях при аварийных режимах, а также уменьшению скачков напряжения при коммутации, что может быть достигнуто соответствующим управлением вентилями и изменением компоновки элементов схемы. Должна быть существенно улучшена система демпфирования высокочастотных колебаний. В настоящем виде эта система требует применения большого числа сопротивлений и емкостей, что влечет за собой большие дополнительные потери энергии.

Для осуществления промежуточного отбора мощности от линии постоянного тока необходимо создать или выключатель постоянного тока, или специальные схемы.

Работа над преобразовательными схемами длительная и кропотливая, ее наиболее целесообразно проводить на моделях. Для этого должна быть проделана серьезная теоретическая работа по установлению принципов моделирования с полным учетом всех параметров.

Таким образом, будущие подстанции передач постоянного тока могут состоять из крупных блоков. Преобразовательные агрегаты будут иметь минимальное количество преобразователей, устанавливаемых на открытом воздухе. Может быть обеспечена вполне надежная работа передачи постоянного тока, и сфера применения ее значительно расширится.

Наряду со сверхдальными передачами постоянного тока будет целесообразно осуществлять и короткие передачи, например через водные преграды (проливы и крупные реки), а также для межсистемных связей. Будет также возможно и целесообразно осуществлять одноцепные линии постоянного тока сравнительно небольшой мощности в удаленные районы.

Уже сейчас появляется необходимость в мощных глубоких высоковольтных вводах в центральные части больших городов. Эта задача гораздо проще может быть осуществлена на постоянном токе, при котором не возникает проблемы создания кабеля для самых высоких напряжений.

Наконец, получит широкое применение перевод су-

ществующих линий трехфазного тока на постоянный ток более высокого напряжения с целью увеличения пропускной способности линий.

Учитывая возможность такого расширения сферы применения передачи постоянного тока, целесообразно дальнейшее усиление работ в данной области, особенно необходима активизация усилий в части разработок схем и создания линейного оборудования, полностью реализующего все преимущества постоянного тока.

В настоящее время есть все предпосылки к разработке перспективного плана развития электрификации Советского Союза на 10...15 лет с учетом той роли, которую может сыграть в создании единой высоковольтной сети усовершенствованная передача постоянного тока.

**Инж. А. Н. ФИЛИМОНОВ**

Ленинград

Отдельные положения статьи Н. М. Мельгунова заслуживают поддержки. К ним относятся: а) рекомендация уровня напряжения  $\pm 600$  кв относительно земли, б) необходимость значительного увеличения единичной мощности и напряжения вентилей, в) перспективность применения кабелей с алюминиевой оболочкой. Хотя это и не новые, но правильные положения. Однако в целом статью нельзя признать объективной. В ней затушевывается крупный недостаток электропередач постоянного тока, заключающийся в том, что в настоящее время от этих электропередач невозможно осуществить промежуточный отбор мощности.

Опыт электрификации Советского Союза показывает, что с ростом индустриализации, с более равномерным распределением промышленности по территории страны количество мощных электростанций и подстанций неуклонно возрастает, а расстояния между ними по сравнению с тем, что имело место 10—15 лет назад, когда складывались представления о роли передач постоянного тока, уменьшаются.

Можно предвидеть, что организация промышленности по экономическим районам приведет к еще более быстрому развитию ныне еще отсталых районов и к дальнейшему увеличению количества энергетических центров.

Линии напряжением 400 кв и выше выполняются со многими промежуточными присоединениями, так как работа промежуточных энергосистем при наличии связей с мощной электропередачей более выгодна, чем изолированная работа. Расстояния между соседними присоединениями обычно не превышают 300...400 км.

Приводимые ниже примеры подтверждают сказанное.

Электропередача 400 кв Куйбышевская ГЭС — Москва вначале была запроектирована как транзитная. Но затем оказалось необходимым соорудить между ее концевыми подстанциями четыре промежуточные подстанции. На электропередаче 500 кв Стalingрадская ГЭС — Москва, которая вначале проектировалась так же, как транзитная, намечается три промежуточные подстанции. На передаче 500 кв Куйбышевская ГЭС — Свердловск предусматриваются четыре промежуточные подстанции. Электропередачи Центральной Сибири, Предуралья, Южного Урала, Украины, Северо-Запада и т. д. также намечается осуществлять с многочисленными промежуточными присоединениями. Аналогичная картина имеет место и за рубежом. С развитием атомных электростанций эта тенденция будет проявляться в еще большей степени.

Не составляют исключения и электропередачи, приведенные в статье Н. М. Мельгунова. Так, на передаче Донбасс — Москва Тяглоэлектропроект нашел целесообразным предусмотреть промежуточную подстанцию в Орле. На электропередаче Экибастуз — Урал тот же Тяглоэлектропроект признал необходимым предусмотреть промежуточные подстанции в Омске и Кургане. На электропередаче Нижнеобская ГЭС (или Воркута) — Урал потребуются промежуточные присоединения для распределения энергии по Уралу и электроснабжения могущих возникнуть по ее трассе потребителей и т. д.

Все эти примеры, основанные на практике крупных проектных организаций Советского Союза, показывают,

что «блочные» передачи длиной 1 500...2 000 км без промежуточных подстанций, на которые ориентируется Н. М. Мельгунов и которые лишают электрическую энергию ее важного преимущества — легкой делимости, недождно устарели и отброшены практикой электрификации как нерациональные. Будущее принадлежит сложным электросетям с многочисленными промежуточными присоединениями, позволяющими осуществить сплошную электрификацию территории, по которой проходит передача.

Для того чтобы передачи постоянного тока нашли широкое применение, настоятельно необходимо создать высоковольтные выключающие устройства постоянного тока, позволяющие осуществлять промежуточные присоединения к ним. Иначе большие затраты на разработку передачи постоянным током не будут оправданы.

Рассмотрим на примере передачи Енисей — Урал возможные показатели таких электропередач.

После полного освоения гидроэнергоресурсов Ангары и Среднего Енисея, а также сооружения ряда крупных теплозаводов в угольных бассейнах Центральной Сибири, на что ориентировано потребуется около 20 лет, установленная мощность станций объединенной энергосистемы Центральной Сибири достигнет 50...55 Гвт, а выработка 320...350 млрд. квт·ч в год. Около 22,5 млрд. квт·ч в год и около 2,6 Гвт представляется возможным передать за Урал и в район Кургана по линии Осиновская ГЭС — Енисейская ГЭС — Итатская ГРЭС — Анжеро-Судженск — Новосибирск — Омск — Курган — Челябинск суммарной длиной 2 570 км. При этом на Енисейской ГЭС целесообразно осуществить связь с Ангаро-Иркутской энергосистемой, в Итате — с Кузбассом, Красноярской и Ангаро-Иркутской системами, в Анжеро-Судженске — с Кузбассом и Томском. В Омске передача будет подпитываться от тепловых электростанций Экибастузского

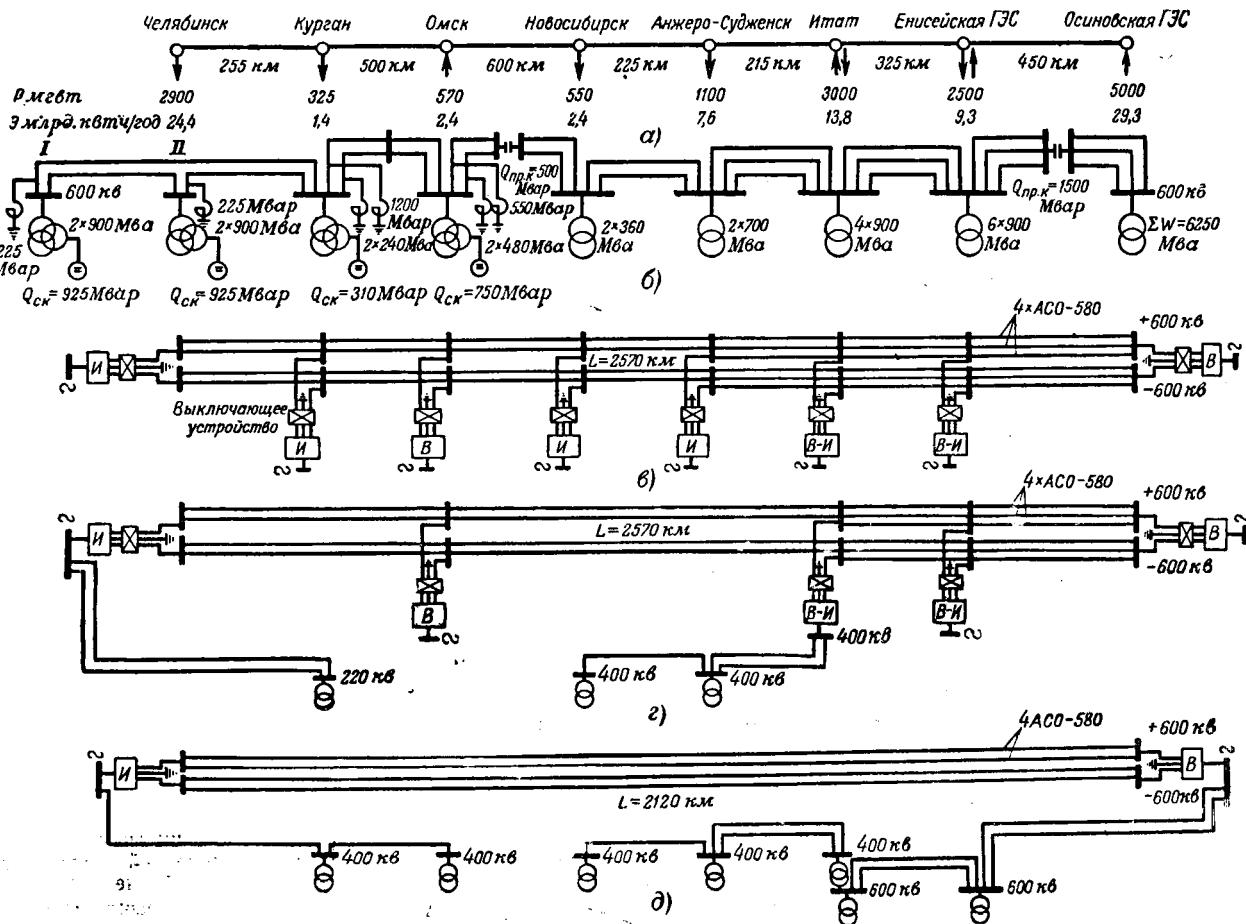
угольного бассейна по специальной электропередаче. Таким образом, эта сеть будет не только передавать энергию из Центральной Сибири на Урал, но и распределять ее между энергосистемами Сибири, передавать на Урал энергию из Экибастуза, т. е. комплексно выполнять ряд функций.

Более короткая северная трасса этой электропередачи неприемлема из-за огромных болот. Намеченная же трасса большей частью проходит в I климатическом районе и весьма благоприятна.

Выявленные ориентировочными энергобалансами максимальные мощности и количества электроэнергии (без учета потерь), которые будут отбираться от электропередачи по пути и вливаться в нее, показаны на рисунке а.

Наиболее перспективными передачами на такие параметры являются трехфазные передачи напряжением 600...700 кв или передачи постоянного тока напряжением между полюсом и землей  $\pm 600$  кв с ответвлениями. Другие типы передач неприемлемы по техническим или экономическим причинам.

На рисунке б изображен вариант трехфазной сети 600 кв, рассчитанный по статической устойчивости с обеспечением устойчивости в послеаварийном режиме. Расчет динамической устойчивости при трехфазном коротком замыкании и  $t_{откл} = 0,12$  сек, проведенный в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ), показал, что требуется увеличение степени продольной компенсации, незначительно удешевляющее передачу. При учете только однофазных коротких замыканий или двухфазных на землю и  $t_{откл} = 0,8$  сек, что для передач такого типа допустимо, динамическая устойчивость, вероятно, будет обеспечена и при показанных на рисунке б устройствах. Не исключено, что переключательные пункты в Барабинске и Петропавловске позже будут развернуты в подстанции.



Принципиальная схема вариантов передачи Енисей-Урал.

а — максимальные мощности и энергии; б — трехфазная передача 600 кв; в — передача постоянного тока  $\pm 600$  кв; г — «смешанная» передача  $\pm 600$  кв; д — «смешанная прямая» передача  $\pm 600$  кв.

В настоящее время возможно только ориентировочное определение экономических показателей электропередач напряжением свыше 400 кв ввиду недостаточности данных о стоимости оборудования. В 1955 г. в ЛПИ и Гидропроекте (Ленинградский филиал) и в 1956 г. в Теплопроекте и Институте постоянного тока были составлены укрупненные показатели стоимости оборудования. Принятые Теплоэлектропроектом и Институтом постоянного тока цены на оборудование для передачи трехфазного тока 600 кв ниже примерно на 30%, а для передачи постоянного тока  $\pm 600$  кв на 35..40%. Результаты расчета по обеим системам укрупненных показателей стоимости приведены в табл. 1 и 2.

Капитальные затраты на всю эту сеть получены с учетом затрат на реконструкцию приемных сетей, та все подстанции и доли затрат на передачу из Экибастузса и составляют 6...8,45 млрд. руб.

Показатели, приведенные в табл. 1, относятся лишь к передаче Енисей—Урал, которая условно выделена из трехфазной сети 600 кв (рисунок б).

Как видно из табл. 1, затраты на передачу Енисей—Урал составляют 3,7...5,3 млрд. руб., и она значительно экономичнее передач от Нижнеобских гидроэлектростанций, а по сравнению с энергоснабжением Урала от собственных тепловых или атомных (по американским дан-

та. Остальные показатели (к. п. д., себестоимость передачи, капитальные затраты на 1 квт и т. д.) варианта постоянного тока также несколько лучше.

Это сравнение показывает, что применение для передачи Енисей—Урал с ответвлениями постоянного тока обещает существенные выгоды; хотя подстанции постоянного тока и дороже, увеличение их числа не ликвидирует экономии, получаемой от самой линии. Таким образом, опасение, что наличие промежуточных подстанций приведет к утрате экономических преимуществ передачи постоянного тока, оказывается неосновательным.

На рисунках г и д показаны схемы «смешанных» сетей, в которых часть подстанций (г) или все, кроме отправной и приемной (д), питаются по линиям переменного тока. В варианте д вторая цепь 600 кв между Осиновской

Таблица 2

Капитальные затраты на сеть Осиновская ГЭС—Челябинск, в млрд. руб., в ценах 1955 г.

Схемы	Варианты	Показатели стоимости по данным	
		ЛПИ и Гидропроекта	ТЭП и НИИПТ
б	Передачи трехфазного тока 600 кв с ответвлениями . . . . .	8,45	6,0
в	Передачи постоянного тока $\pm 600$ кв с ответвлениями . . . . .	7,5	4,6
г	«Смешанный» вариант . . . . .	7,7	4,8
д	«Смешанный» вариант с блочной передачей постоянного тока . . . . .	8,1	5,2

Таблица 1

Показатели	По данным	
	ЛПИ и Гидропроекта	Теплоэлектропроекта
Коэффициент полезного действия по энергии, %	88	88
Исходная стоимость энергии, коп/квт·ч	2,44	2,44
Суммарные капитальные затраты, млрд. руб.	5,3	3,7
Себестоимость энергии на Урале, коп/квт·ч	1,62	1,11
Капитальные затраты на передачу 1 квт, руб.	4,06	3,55
Срок окупаемости по сравнению с тепловыми или атомными электростанциями на Урале, лет . . . . .	2 060	1 450
	18...19	7,5

ным) электростанций окупаются в 18..19 лет (по ценам ЛПИ и Гидропроекта) или в 7,5 лет (по ценам Теплопроекта). При определении показателей учтена экономия в 1 млрд. руб. от уменьшения на 1 Гвт резерва в связи с объединением энергосистем. Средняя себестоимость энергии в Центральной Сибири равна 2,2, а в Омске 5 коп/квт·ч.

Хотя стоимостные показатели и нуждаются в уточнении, результаты расчета указывают на целесообразность тщательного изучения передачи Енисей—Урал. Эти показатели следует сравнить с показателями варианта электроснабжения Урала от Экибастузса и Кушмуруна. Возможно, что оптимальным решением будет комбинация этих вариантов.

На рисунке в изображена сугубо принципиальная схема рассматриваемой сети на постоянном токе  $\pm 600$  кв, выполненной воздушными линиями, так как кабельное выполнение оказалось на 28% дороже. Промежуточные подстанции присоединяются при помощи выключающих устройств постоянного тока, которых требуется по одному на каждую подстанцию. При оценке схемы рисунка в по показателям, полученным на основании данных Гидропроекта, в основу были положены цены проектного задания электропередачи  $\pm 400$  кв Сталинградская ГЭС—Донбасс. Цены на оборудование для трехфазной передачи 600 кв были взяты по данным ЛПИ и Гидропроекта. При этом для осторожности принято, что соотношение цен на оборудование для передач постоянного и переменного тока, имеющее место при 400 кв, сохраняется и при 600 кв, что, по-видимому, приводит к некоторому увеличению стоимости варианта постоянного тока. Как видно из табл. 2, при подсчете по ценам ЛПИ и Гидропроекта вариант постоянного тока с промежуточными подстанциями почти на 1 млрд. руб., или 11%, а при подсчете по ценам Теплопроекта и Института постоянного тока на 1,4 млрд. руб., или на 23%, дешевле трехфазного вариан-

Енисейской гидроэлектростанциями необходима для того, чтобы иметь возможность выдавать в Сибирь мощность Осиновской ГЭС, что позволяет уменьшить резерв мощности в объединенной энергосистеме Урала и Сибири. Как видно из табл. 2, «смешанные» варианты дороже, чем вариант выполнения всей сети на постоянном токе, а надежность электроснабжения при этих вариантах ниже и схема значительно сложнее. Таким образом, оптимальный является передача постоянного тока с ответвлениями при помощи выключающих устройств постоянного тока. Однако выполнение части менее мощных подстанций на переменном токе (вариант г) в некоторых случаях также может дать неплохие результаты.

Исследования показывают, что возможно создание устройств для селективного отключения промежуточных подстанций постоянного тока. В этих устройствах используются свойства константно-токового регулирования и ограничение аварийных сверхтоков, а также естественные колебательные процессы в линии. Выключающие устройства включаются параллельно или последовательно главным вентилям подстанции. Их стоимость весьма невелика. Например, добавление на преобразовательных подстанциях передачи Сталинградская ГЭС—Донбасс автоматического разъединителя между шунтирующими и главными вентилями и применение уже испытанных в длительной эксплуатации регулировочных устройств позволят отключать передачу со стороны постоянного тока без искусственных коротких замыканий. Описание этих устройств может быть дано в отдельной статье.

Н. М. Мельгунов кратко упоминает об указанных возможностях, сопровождая, однако, эти упоминания оговорками о, якобы, нецелесообразности промежуточных подстанций и пытаясь вопреки фактам все же отыскать где-нибудь «блочную» дальнюю передачу без ответвлений. Такие тенденции отвлекают внимание от необходимости разработки отключающих устройств постоянного тока и причиняют серьезный ущерб делу широкого внедрения передач постоянного тока.

Если Научно-исследовательский институт постоянного тока и Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина серьезно займутся разработкой имеющихся предложений и созданием высоковольтных выключающих устройств постоянного тока, то эта задача, несомненно, будет решена, и передачи постоянного тока сыграют важную роль в создании Единой энергетической системы СССР.

# Хроника

## СОВЕЩАНИЕ О КОНСТРУКЦИЯХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АППАРАГРОВ

Секцией промэлектротехники Московского областного управления НТОЭИ совместно с заводами электротехнической промышленности в мае 1957 г. было проведено научно-техническое совещание по состоянию и перспективам развития конструкций низковольтных аппаратов.

Были обсуждены пути развития низковольтного аппаратостроения и вопросы совершенствования каждой серии низковольтных аппаратов на основе опыта эксплуатации отечественной и зарубежной аппаратуры. При этом участники совещания были ознакомлены с основными характеристиками выпускаемых, разрабатываемых и проектируемых аппаратов.

В работе совещания приняли участие 300 чел., представлявших заводы «Электросила», ХЭМЗ, «Динамо», ХЭЛЗ, Чебоксарский, Уфимский, Ульяновский, Курский, Кашинский электроаппаратные, Кузнецкий металлургический комбинат, «Запорожсталь», «Азовсталь», Горьковский автомобильный завод, Московский автомобильный завод им. Лихачева, Челябинский тракторный завод, Ташкентский хлопчатобумажный комбинат и др., а также НИИ электротехнической промышленности, ЦКБ треста «Электропривод», ВЭТ и др.

На совещании было заслушано 33 доклада, в том числе восемь докладов ряда крупных заводов по опыту эксплуатации низковольтных аппаратов.

В докладе инж. П. Г. Чернышева «Состояние и направление развития конструкций низковольтной аппаратуры» было указано, что в течение текущего пятилетия будет разработано и модернизировано около 80 серий низковольтных аппаратов. Основными направлениями развития конструкций низковольтных аппаратов являются: повышение предельной коммутационной способности аппаратов распределительных устройств; повышение износустойчивости аппаратов автоматического управления — механической до 10...15 млн. срабатываний и электрической — до 2...5 млн.; применение малогабаритной, так называемой «слаботочной», аппаратуры для комплектных устройств управления; разработка и расширение выпуска низковольтных комплектных устройств. В докладе отмечена тенденция вытеснения в ряде установок рубильников и предохранителей автоматическими выключателями.

Докладчик подчеркнул, что для дальнейшего успешного развития низковольтного аппаратостроения необходимы, в частности, расширение производственной, научно-исследовательской и лабораторной базы, применение новых материалов, разработка новейших комплектных устройств и блочных конструкций, бесконтактных аппаратов и реле, а также дальнейшая специализация заводов.

В докладе д. т. н., проф. О. Б. Брана и инж. Д. С. Итенберга «Проблема жидкостного охлаждения в электрических аппаратах» было указано, что искусственные способы охлаждения аппаратов целесообразно применять для аппаратов высокочастотных установок (с частотами до 10 000 герц/сек), для аппаратов на очень большие токи, выше 5 000 а и для быстродействующих автоматов. Применение жидкостного охлаждения для выключающих аппаратов позволило в 4...5 раз повысить номинальные токи аппаратов.

В докладе к. т. н. А. А. Тайца «Опыт эксплуатации и применения аппаратуры низкого напряжения» было отмечено, что основными недостатками выпускаемой аппаратуры являются: ее недостаточная разрывная способность, пониженная механическая прочность и виброустойчивость, отсутствие у ряда аппаратов тепловой защиты. В числе требований к электротехнической промышленности было указано на необходимость выпуска установочных автоматов с электромоторным дистанционным приводом и пристройкой для защиты минимального напряжения. Необходима разработка новой серии надежных контакторов металлургического типа с повышенной механической и электрической износустойчивостью, магнитных пускателей во взрывозащищенном и пылевлагонепроницаемом исполнении.

Группа докладов заводов электротехнической промышленности, НИИ электротехнической промышленности

и ЦКБ треста «Электропривод» (инж. И. Н. Штейнберг, инж. В. И. Гусев, инж. И. Я. Жданов, к. т. н. Р. С. Кузнецов, к. т. н. И. Н. Ермолаев, инж. В. А. Дулин, А. С. Лепская, инж. В. А. Ооразцов, инж. А. А. Голдобенков, инж. В. В. Ходнев, инж. Б. И. Каракенцев) была посвящена вопросам разработки новых серий универсально-селективных автоматических выключателей, автоматических выключателей повышенной отключающей способности, новых серий предохранителей типов ПР-2 и НП12, тепловых реле типа ТРП, новых серий износустойчивых контакторов магнитных пускателей, новых конструкций кнопочных пускателей, новых однополюсных автоматических выключателей на ток до 15 а, новой серии рубильников, комплектных устройств управления и защиты электростанций и подстанций.

Группа докладов (инж. Л. А. Родштейн, инж. Л. М. Воронел, А. А. Щепинский, М. Г. Кобленц, инж. В. С. Тулин, Н. Н. Додогорский, И. Н. Коломийцев, Б. Г. Кацарап, инж. В. А. Струнников) была посвящена основным направлениям в развитии конструкций электромагнитных контакторов, новой серии контакторов постоянного и переменного тока, новой серии станций управления двигателями переменного и постоянного тока, а также серии коммандоаппаратов, крановых контроллеров конечных выключателей, тяговых магнитов.

В докладах по опыту эксплуатации низковольтной аппаратуры (инж. В. П. Кочнев, П. Ф. Плаксин, А. А. Филатов, Н. Ф. Пшеничный, М. М. Смирнов, С. Б. Комаров, Е. Н. Жмаев) были подтверждены отмеченные выше основные недостатки изготавляемой аппаратуры: недостаточные механическая прочность и виброустойчивость, недостаточная разрывная способность аппаратуры, отсутствие у ряда аппаратов тепловой защиты, селективных электромагнитных расцепителей, дистанционных приводов, указывалось на завышенные габариты аппаратов. Было также отмечено, что многие из выпускаемых в настоящее время заводами электротехнической промышленности аппаратов низкого напряжения устарели как в конструктивном отношении, так и по своим характеристикам. Вопросам производства комплектных распределительных устройств низкого напряжения не уделяется достаточного внимания.

В последовавших по докладам выступлениях были сформулированы требования к заводам электротехнической промышленности, изготавлиющим низковольтную аппаратуру.

Совещание отметило, что за последние годы было создано много новых типов коммутационной аппаратуры распределительных устройств (автоматических выключателей, плавких предохранителей, КРУ низкого напряжения) и аппаратов управления (контакторов, пускателей, контроллеров, коммандоаппаратов, станций управления и защиты). Однако качество аппаратуры во многих случаях не удовлетворяет требованиям потребителей. Совещание отметило, что для увеличения объема производства низковольтных аппаратов в 1960 г. в 3,5 раза по сравнению с 1955 г. необходимо развитие производственной базы аппаратостроения.

Совещание отметило важность организации выпуска новой серии универсальных автоматов, автоматов с приводами дистанционного включения и отключения на переменном токе 220 в, массового выпуска автоматических воздушных выключателей типов А15 и А20, имеющих усиленную и улучшенную контактную систему, систему гашения дуги. Было указано на необходимость повышения на 30...40% коммутационной отключающей способности автоматов при токах короткого замыкания.

Поставки КРУ должны осуществляться с установочными и селективными автоматами в выдвижном исполнении; щиты и распределительные пункты, а также станции управления должны поставляться строго комплектно.

В решении также отмечена необходимость наладки массового производства предохранителей с наполнением, а также предохранителей без наполнителей, выпуска новой серии рубильников и переключателей. Было призовано необходимым продолжать выпуск контакторов серии КП-500 Чебоксарского завода для нетяжелых режимов работы (до 240 включений в час). Было отмечено, что

контакторы серии КТВ переменного тока работают неудовлетворительно в условиях металлургических режимов. Необходимо скорейшее внедрение разработанной ХЭМЗ новой серии контакторов переменного тока для тяжелых режимов работы. Новые серии контакторов магнитных пускателей, разработанные ХЭЛЗ и НИИ электротехнической промышленности, рекомендуются для внедрения в производство после соответствующих испытаний в условиях эксплуатации.

В решении совещания были сформулированы требования по конструкциям ряда аппаратов и даны рекомендации заводам о замене устаревших конструкций.

На совещании демонстрировались образцы новых серий высококачественной аппаратуры, разработанной заводами электропромышленности и НИИ электротехнической промышленности, а также Московским заводом им. Лихачева.

*Кандидат техн. наук А. А. Тайц  
МОНТОЭП*

## ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ И АВТОТРАНСПОРТА НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ В РИГЕ

В мае—июне 1957 г. Институтом энергетики и электротехники Академии наук Латвийской ССР (ИЭЭ), Рижским электромашиностроительным заводом (РЭЗ), Управлением Латвийской железной дороги и Научно-техническим обществом энергопромышленности Латвийской ССР была проведена конференция по вопросам электроснабжения железнодорожных вагонов и автотранспорта на переменном токе.

В работах конференции приняло участие свыше 100 представителей научно-исследовательских институтов и заводов, а также работники Латвийской железной дороги.

Открывая конференцию д. т. н. К. К. Плауде (Академия наук Латвийской ССР) отметил ход выполнения главнейшей задачи в области электроснабжения транспортных средств, именно, расширения применения переменного тока. Прошла эксплуатационные испытания новая система электроснабжения пассажирских железнодорожных вагонов, разработанная ИЭЭ АН Латвийской ССР в сотрудничестве с заводами РЭЗ, селеновых выпрямителей и с управлением Латвийской железной дороги. Создана и прошла эксплуатационные испытания новая система электроснабжения на переменном токе автобусов, разработанная научно-исследовательским и экспериментальным институтом автомобильного электрооборудования, карбюраторов и приборов в сотрудничестве с Куйбышевским заводом автотракторного электрооборудования и карбюраторов.

В 17 докладах были рассмотрены различные принципы компоновки систем, конструкции генераторов, режимы работы аккумуляторных батарей и методы автоматического регулирования систем электроснабжения.

Общий обзор истории развития систем электроснабжения переменным током транспортных средств был дан в докладе д. т. н., проф. Г. И. Штурмана (ИЭЭ). В связи с возросшим потреблением электроэнергии в новых комфортабельных вагонах (30 квт в вагоне с кондиционированием воздуха) приобрел важное значение вопрос привильной компоновки систем.

К. т. н. Э. А. Якубайтис (ИЭЭ) в докладе «Система электроснабжения пассажирских железнодорожных вагонов выпрямленным переменным током» указал на то, что электрооборудование, выпускаемое промышленностью для вагонных электростанций, имеет устаревшую конструкцию и не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к нему на транспорте.

Докладчик остановился на новой бесконтактной системе электроснабжения пассажирских вагонов выпрямлен-

ным переменным током, удовлетворяющей всем этим требованиям и оправдавшей себя в течение двухлетней эксплуатации.

К. т. н. М. Р. Барский (РЭЗ) остановился на разработанной системе централизованного электроснабжения с дизелем в качестве первичного двигателя и отметил, что подобного рода системы будут экономически целесообразны на поездах, не подвергающихся расформированию в пути следования.

Д. т. н., проф. М. М. Хазен (МТЭИ) указал на возможность применения газовой турбины на централизованной электростанции пассажирского поезда.

Выступившие в прениях по вопросу компоновки системы А. Н. Шпак (МПС), А. А. Косарев (МПС), Э. А. Якубайтис, Г. И. Штурман (ИЭЭ), А. И. Кричко (РЭЗ) и др. отметили положительные качества обсуждавшейся системы и указали на необходимость создания надежного привода от оси колесной пары.

Инж. Ю. А. Купеев (Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильного электрооборудования, карбюраторов и приборов) в докладе «Основные вопросы применения генераторных установок переменного тока на автомобилях и автобусах» указал на то, что новые генераторные установки автобусов ЗИЛ-155 и ЗИЛ-127, разработанные институтом совместно с заводом «КАТЭК», имеют по сравнению с установками постоянного тока вдвое меньший вес и в 5 раз меньший расход меди. Внедрение этих генераторов на грузовых автомобилях может дать народному хозяйству экономию в сумме более 25 млн. руб. в год.

Ряд докладов был посвящен вопросам разработки новых видов генераторов переменного тока для транспортных средств.

К. т. н. В. В. Апсит в докладе «Синхронный генератор с осевым приводом для электроснабжения железнодорожных вагонов» остановился на преимуществах синхронного бесконтактного генератора и указал на его большую эксплуатационную надежность, на малое потребление мощности возбуждения и простоту изготовления.

Инж. В. И. Василевский (КАТЭК) отметил, что до сих пор остается нерешенным ряд вопросов, например разработка оптимальных конструкций синхронных генераторов и методика выбора мощности генератора транспортной установки.

Инж. В. А. Белоус ( завод селеновых выпрямителей) сообщил о новых конструкциях селеновых выпрямителей и проанализировал условия развития применения этих выпрямителей.

На конференции был заслушан ряд сообщений о работах по исследованию характеристик аккумуляторных батарей.

К. т. н. А. Ф. Кроцерис (ИЭЭ) в докладе «Работа аккумуляторных батарей в системах электроснабжения железнодорожных вагонов» предложил метод выбора емкости батарей для железнодорожного транспорта.

К. т. н. М. Р. Барский подчеркнул необходимость проведения работ по обобщению отечественного и зарубежного опыта эксплуатации вагонных батарей, созданию научно обоснованных методов их эксплуатации, выбору их емкости и характеристик заряда. Он предложил новый метод снятия внешних характеристик батарей.

На конференции, кроме того, был заслушан ряд докладов по вопросам автоматического регулирования.

В решении конференции указано, что взаимная связь организаций и координация проводимых работ в области электроснабжения транспортных средств до сего времени были очень слабыми.

Особо конференция отметила неполное удовлетворение промышленностью спроса на селеновые выпрямители.

Инж. В. П. Глухов и инж. Р. К. Шмидт.

Институт энергетики и электротехники Академии наук Латвийской ССР.

# Библиография

**В. Н. СТАСЮК. ЭЛЕКТРОВОЗНЫЙ ТРАНСПОРТ НА ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТКАХ.**

528 стр., ц. 22 руб. 50 коп. Металлургиздат, 1956.

**В. Н. СТАСЮК. ЭЛЕКТРОВОЗНЫЙ РУДНИЧНЫЙ ПОДЗЕМНЫЙ ТРАНСПОРТ.**

591 стр., ц. 19 руб. 60 коп. Металлургиздат, 1957.

Рецензируемые книги посвящены двум важным видам промышленного электротранспорта: электровозному транспорту на открытых разработках и электровозному рудничному подземному транспорту. Книги предназначаются для эксплуатационного инженерно-технического персонала, работников проектных организаций и студентов электромеханической специальности горных вузов.

Несмотря на неизбежность общих вопросов в этих книгах и общность их структуры, каждая из книг имеет свои особенности. Содержанием охвачены: типы, электрическая и механическая часть современных электровозов; тяговая сеть; тяговые подстанции; тяговое хозяйство; расчеты электровозного транспорта; вопросы техники безопасности. Наиболее подробно в обеих книгах разработана часть, посвященная тяговой сети. Описание подвески контактных проводов на постоянных и передвижных опорах представляет собой обобщение многолетней работы автора в области промышленного электротранспорта.

Содержащиеся в данных книгах сведения по основным материалам и аппаратуре, применяемым в тяговых сетях, а также по опорам могут служить справочным материалом при изучении и проектировании элементов тяговых сетей.

Особый интерес представляет описание схем и компоновки передвижных тяговых подстанций, находящих все большее распространение на открытых горных разработках. В этой же части книги приведены описание, схемы и конструкции распределительных постов, введенных автором в схему электроснабжения в тяговой сети современных рудников в послевоенный период и получивших широкое распространение.

Отдельная глава посвящается вопросам механического расчета элементов тяговой сети — проводов и опор. Автором приведены оригинальные методы испытания тяговых двигателей, применяемых в рудничной эксплуатации, и дано описание прибора ВУГИ, предназначенного для быстрого обнаруживания дефектов в обмотках электрических машин.

В расчетной части книги, помимо справочных данных, охарактеризованы особенности расчета тяговой сети при однофазном токе. Заслуживает быть отмеченным наличие в рецензируемых книгах примерного расчета основных элементов электрифицируемого промышленного транспорта.

В последней части обеих книг приводятся основные данные и сведения по технике безопасности.

Книги В. Н. Стасюка являются первой попыткой комплексного рассмотрения всех вопросов, связанных с электрификацией открытых горных разработок и с подземным рудничным транспортом. Как видно из вышеизложенного, попытка автора в значительной степени ему удалась. Однако наряду с отмеченными достоинствами в этих книгах имеются недостатки, и некоторые из них являются крупными. Так, например, в части компоновки материала нельзя согласиться с отнесением автором наиболее важной для эксплуатационного персонала и проектировщиков расчетной части содержания в конец книги; более целесообразно было дать всю расчетную часть сразу после краткой характеристики специфических требований, предъявляемых к рассматриваемому виду электрической тяги. Нельзя, далее, согласиться с почти полным игнорированием в книге зарубежного опыта. Это главным образом относится к книге по открытым разработкам, так как в книге по подземному транспорту приводятся, правда лишь некоторые, сведения по чехословацким и венгерским электровозам.

Вместе с тем существенный интерес представляло бы описание мощных (со сцепным весом, достигающим 130 т) выпрямительных электровозов АЕГ, Сименс-Шуккерт, BBC с различными системами выпрямительных агрегатов, с питанием от контактной сети однофазного переменного тока нормальной частоты при напряжении 6 000 в. Уместно было бы привести и описание зарубежной подвесной

арматуры и устройств контактной сети. Существенный интерес представили бы также сведения о современных тяговых двигателях с температуростойкой кремнийорганической и лакопленочной изоляцией.

При освещении зарубежного опыта целесообразно было бы рассмотреть вопросы организации и эксплуатации широко распространенного в Чехословакии безрельсового транспорта для открытых разработок. Значительный интерес представило бы также освещение наиболее существенных элементов опыта постройки и эксплуатации линий промышленного рудничного транспорта в Китайской Народной Республике, где, как видно из статей автора, имеется много нового и заслуживающего изучения.

К числу крупных недостатков обеих книг следует отнести отсутствие сравнительного анализа отдельных видов механического, электрического, пневматического, вспомогательного и других видов оборудования электрозвозов.

При изложении в обеих книгах материала об электрическом подвижном составе автор ограничился лишь описанием существующих электровозов и не привел сравнительной оценки типов электровозов, крайне важной для проектировщиков и конструкторов. Например, говоря о зубчатой передаче в книге по открытым разработкам, автор не обратил должного внимания на весьма серьезный конструктивный недостаток электровоза IV КП-1, имеющего одностороннюю зубчатую передачу, при которой нарушается параллельность вала якоря и колесной пары, а также ухудшаются условия передачи врачающегося момента. Важный вопрос о троллейвозном транспорте освещен крайне сжато; не указано, что опытные образцы грузовых троллейбусов, используемых на открытых разработках, изготовлены на базе случайного сочетания существующих типов автомобилей и электрооборудования пассажирских троллейбусов. Поэтому в первых образцах электрического подвижного состава троллейвозного транспорта далеко не в полной мере использованы преимущества и тяговые свойства электрического безрельсового транспорта.

В книгах отсутствует сравнительная оценка систем тяги на постоянном и переменном токе; не упомянуто о результатах эксплуатации и о дальнейших перспективах применения высокочастотного рудничного транспорта.

При рассмотрении передвижных тяговых подстанций следовало бы привести подробное описание и чертежи передвижных тяговых подстанций, выпускаемых в настоящее время Перовским заводом МПС, и дать сравнительную характеристику этих подстанций с подстанцией «Сталинград».

В обеих книгах полностью отсутствует освещение опыта эксплуатации электровозного транспорта на передовых предприятиях.

При рассмотрении типов опор контактной сети в книге по открытым разработкам не сообщается о рекомендуемых конструкциях железобетонных опор, использование которых предусматривается постановлением Правительства от 19 августа 1954 г. и производство которых освоено отечественной промышленностью.

В книге по открытым разработкам автор, рассматривая средства грозозащиты (например, на стр. 218), ссылается на устаревшие типы роговых разрядников и ничего не говорит о современных вилитовых, тиритовых и электролитических разрядниках, обеспечивающих более надежную защиту от перенапряжений. Для определения состояния изоляции предусматривается использование устаревшего метода индуктора и вольтметра вместо современного метода электромагнитного или электронного мегомметров. При рассмотрении методов определения износа контактного провода (стр. 309) рекомендуется измерение микрометром и ничего не говорится об измерениях при помощи измерительных скоб с конической калиброванной прорезью, широко применяемых в исследо-

вательской и эксплуатационной практике ЦНИИ МПС и изготавляемых на его опытном заводе.

В книге по подземному транспорту рассматриваются некоторые области применения полупроводниковых выпрямителей, но в книге по открытым разработкам сведения по полупроводниковым выпрямителям отсутствуют вообще, хотя применение таких выпрямителей имеет перспективы и для силового электроснабжения. При изложении вопросов ремонта электрооборудования допущен ряд неудачных или неверных рекомендаций и повторений. Например, для снятия малой шестерни с вала тягового двигателя на стр. 451 рекомендуется удалить не только гайку, но и шпонку, что явно абсурдно. Рекомендуемая на стр. 452 промывка деталей электровоза в бензине нерентабельна и небезопасна. Более уместно было бы, по примеру опыта Московского метрополитена, рекомендовать выварку нетоковедущих элементов механической части электровоза в содовом растворе. На стр. 461 рекомендуется внутренние кольца роликовых подшипников перед насадкой на вал подогревать до 70...80° С, а на стр. 461 дается рекомендация о подогреве тех же колец на 150° С. Обе рекомендации верны для определенных условий, однако автор не указывает, что одна из них относится к подогреву в водном растворе, а другая — к подогреву в масле.

Указанная в § 24 на стр. 545 величина кратности тока короткого замыкания по отношению к максимальному току как  $I_{\text{кор. расч}} \leq I_{\text{макс ря}}$  неверна, так как коэффициент, меньший 1,3, принимать нельзя.

Недостаточны сведения по безнасосным одноанодным запаянным выпрямителям, о которых упоминается лишь в разделе зарядных подстанций в книге по рудничным подземным электровозам, тогда как данные о применении таких выпрямителей в книге по открытым разработкам вообще отсутствуют.

В книгах нет сведений о радиопомехозащитных устройствах, хотя обязательность их применения предусмотрена постановлением Совета Министров СССР.

Наблюдается нестандартность отдельных математических символов и графических изображений.

Указанные серьезные недостатки снижают, конечно, общую оценку выполненного автором труда; новое же издание этих книг с учетом сделанных замечаний, окажется полезным и для инженеров-производственников, и для эксплуатационников, и для проектировщиков.

**Доктор техн. наук, проф. И. С. Ефремов,  
кандидат техн. наук Ю. М. Галонен**

## НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ. Сборник статей под ред. С. М. Гортиńskiego и др. 280 стр., ц. 11 р. 15 к. ЦНИЭЛ. Госэнергоиздат.

Гарьковский П. М. МАЛАЯ МЕХАНИЗАЦИЯ НА РЕМОНТЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ. ИЗ ОПЫТА ЛЕНЭНЕРГО. 30 стр., ц. 90 коп. Госэнергоиздат.

ГИДРОТУРБОВОСТРОЕНИЕ В США. Пер. с англ. под ред. и с примеч. Л. А. Артемова. 24 стр., ц. 1 р. 50 к. ОРГРЭС. Госэнергоиздат.

Глаз А. И. СПРАВОЧНИК МОЛОДОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Под ред. Б. В. Гетлинга. 256 стр., ц. 4 р. 65 к. Трудрезервиздат: ГОСТ 8223-56. ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОЧНЫЕ БЫТОВОГО И ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ. ОБЩИЕ ТЕХН. ТРЕБОВАНИЯ. Срок введения 1. 4. 1957 г. 6 стр., ц. 20 коп. Стандартиздат.

Димитрадзе А. С. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ЛОКОМОТИВОВ. 80 стр., ц. 2 р. 50 к. Машгиз.

Ермолин Н. П., Ваганов А. П. РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. Под ред. Н. П. Ермолина. 114 стр., ц. 4 руб. Госэнергоиздат.

Каден Г. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ В В. Ч. ТЕХНИКЕ И ТЕХНИКЕ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ. Пер. с нем. В. М. Лаврова. 327 стр., ц. 10 р. 75 к. Госэнергоиздат.

Киренский Л. В. ФЕРРОМАГНЕТИЗМ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ. 104 стр., ц. 1 р. 35 к. Учпедгиз.

Кулефеев Г. П. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЧЕХОСЛОВАКИИ. 51 стр., ц. 1 р. 75 к. Сельхозгиз.

ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ (Сборник). Вып. 107. РАЦИОНАЛИЗАТОРСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ. 30 стр., ц. 1 р. 10 к. ОРГРЭС. Госэнергоиздат.

Михтарян С. Г. ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСТРОИТЕЛЬСТВО АНГЛИИ. 40 стр., ц. 2 р. 50 к. Госэнергоиздат.

Никитин Н. А. ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА. 112 стр. ВЗЭИ.

ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. Сборник статей. Пер. с англ. под ред. и с вступл. статьей В. Л. Бонч-Бруевича. 629 стр., ц. 36 р. 25 к. Изд. иностр. лит.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ. Сокр. и переработ. перевод с немец. Л. М. Фингера. 52 стр. ц. 1 р. 75 к. Коммунхозиздат. РСФСР.

СОВРЕМЕННЫЕ СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ. Пер. статей под ред. Г. Л. Вульмана. Вып. 1. 56 стр., ц. 3 р. 45 к. ОРГРЭС. Госэнергоиздат.

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ НОРМАЛЬНОЙ КОЛЕИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ 3 000 в (ТУПЭ-57). 68 стр. Трансжелдориздат.

ТИПОВАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙ В ЭЛЕКТРИЧ. ЧАСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ. Утв. 8. 9. 1956 г. 40 стр., ц. 1 р. 75 к. Техуправление МЭС СССР. Госэнергоиздат.

Чечет Ю. С. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МИКРОМАШИНЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ. Учебное пособие для энергетич. вузов и факультетов. 384 стр., ц. 9 р. 5 к. Госэнергоиздат.

## КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДАМ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Ленинградское областное управление Научно-технического общества машиностроительной промышленности намечает провести во II квартале 1958 г. в Ленинграде Третью научно-производственную конференцию по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. В задачи конференции входят рассмотрение и обобщение научных и производственных достижений в области электрической и ультразвуковой обработки за истекшее трехлетие, освещение некоторых вопросов теории, выбор и рекомендация наиболее рационального оборудования, обсуждение направлений дальнейшего прогресса рассматриваемой области техники, в частности, в связи с перестройкой управления промышленностью.

ЛОТНТО МАШПРОМ просит всех желающих принять участие в работе Третьей конференции, сообщить об этом по адресу: Ленинград, Д-11, Невский пр., 60, НТО, Комитету электрообработки.