

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1955



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

8

Подготовленные для Юбилейного номера журнала материалы значительно превысили объем № 7. В связи с этим редакционная коллегия приняла решение опубликовать часть этих материалов в № 8.

СОДЕРЖАНИЕ

В. А. Веников и А. В. Иванов-Смоленский — Развитие физических моделей электрических систем	1	Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко — Электроискровая обработка металлов	63
М. П. Костенко и И. Д. Урусов — Электродинамические модели гидрогенераторов Куйбышевской гэс	11	А. С. Займовский — Современные достижения в области магнитных материалов	68
В. А. Трапезников — Математическое моделирование динамических систем	20	Е. Г. Шрамков, В. О. Арутюнов, А. М. Туричин, П. В. Новицкий — Некоторые задачи электроизмерительной техники	75
Л. Г. Мамиконянц — Использование асинхронных режимов генераторов для повышения надежности энергоснабжения	27	Г. В. Сербиновский — Производство и потребление электроэнергии за рубежом	79
А. А. Глазунов, Ф. Ф. Воронцов и Л. А. Солдаткина — Рациональное построение сети низкого напряжения больших городов	33	ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Г. Н. Петров и И. С. Наяшков — Электродинамические силы в трансформаторах	39	Метод обнаружения импульсной ионизации	84
Ю. С. Чечет — Электрические микромашины	46	ХРОНИКА	
В. С. Тулин — Современные технические тенденции в горном электроприводе	57	Совещание по электропечным выключателям. Научно-техническое совещание по электрификации железных дорог	86
		РЕФЕРАТИВНЫЕ КАРТОЧКИ	

Развитие физических моделей электрических систем

Доктор техн. наук, проф. В. А. ВЕНИКОВ и кандидат техн. наук, доц. А. В. ИВАНОВ-СМОЛЕНСКИЙ

Московский энергетический институт им. Молотова

Физическое (динамическое) моделирование различных процессов, сохраняющее в модели природу явлений оригинала, является методом исследований, позволяющим на основе эксперимента, проведенного на одном объекте (модели), оценить характер и уточнить математическое описание процессов в другом объекте (оригинале).

Таким образом, физическое моделирование следует рассматривать как одну из составляющих комплекса исследований, включающего в себя эксперимент непосредственно в натуре и на специальных установках, а также аналитическое изучение, в том числе и исследования, проводимые при помощи расчетных моделей (столов) и счетных машин. В соответствии с этим лабораторный эксперимент должен проводиться при разных параметрах и выявлять общие закономерности исследуемого явления, его результаты должны сопоставляться с данными опыта эксплуатации в тех случаях, когда это возможно. Единичный лабораторный опыт на модели без надлежащего его обобщения и проверки не может иметь решающего значения. В настоящее время известен ряд ошибок, вызванных тем, что экспериментирование было поставлено неправильно, а его результаты не были подвергнуты надлежащей проверке.

Развитие физического моделирования идет по пути создания моделей двух видов: 1) моделей, дающих подобие процессов и установившихся режимов только во времени, и 2) моделей, дающих подобие процессов и режимов как во времени, так и в пространстве. Модели первого вида являются в сущности моделями электрических или электромеханических цепей. Изменяющиеся во времени сходные величины этих моделей и оригиналов отличаются лишь масштабами. В случае же моделей второго вида существенно не только подобие изменения сходных величин во времени, но и подобие их распределения в пространстве.

Для осуществления подобия необходимо, чтобы некоторые соотношения параметров модели и оригинала были одинаковы. Эти соотношения называются критериями подобия¹.

¹ Полные критерии подобия, обеспечивающие полное подобие процессов и подобие электромагнитных полей,

В критерии подобия временных процессов (модели первого вида) геометрические размеры не входят, они остаются скрытыми в величинах электрических и механических параметров. Однако, как это показано в настоящей статье, при конструировании специальных машин-моделей введение геометрических характеристик в критерии подобия оказывается необходимым. Напротив, при моделировании второго вида соотношения между геометрическими размерами модели и оригинала непосредственно входят в критерий подобия. Однако и в этом случае требование геометрического подобия не всегда обязательно. Возможно введение аффинных соотношений между геометрическими характеристиками модели и оригинала [Л. 3], и тогда первый и второй виды моделирования сближаются.

Моделирование может быть успешно применено при решении ряда практических задач трансформаторостроения и электромашиностроения. Опыт, накопленный в Московском энергетическом институте, показывает, что на динамических моделях можно проводить следующие работы:

1. Обучение персонала электрических станций, его тренировку в ликвидации аварийных режимов, воспроизводимых на модели, а также демонстрацию переходных процессов и аварийных режимов студентам старших курсов.

2. Проверку, настройку, регулировку устройств и аппаратов нового типа (релейных защит, регуляторов возбуждения, систем автоматического включения резервов и др.) в условиях нормальных и аварийных режимов электростанций и электропередач.

3. Исследование режимов некоторых конкретных систем с заданными параметрами. К этого рода исследованиям, проведенным на модели МЭИ, относятся: работы, связанные с оценкой величины динамических перенапряжений и влиянием на нее параметров электропередачи, а так-

найденные на основе уравнений Максвелла и относящиеся к элементам любой электрической установки, записываются в виде:

$$\pi_1 = \frac{\mu \gamma^{1/2}}{t}; \quad \pi_2 = \frac{\varepsilon}{\gamma \cdot t}.$$

же с оценкой эффективности демпферных обмоток в отношении улучшения динамической устойчивости, гашения перенапряжений и облегчения самосинхронизации; испытание схем ограничения напряжений на конденсаторах последовательной компенсации; исследование схем и способов электрического торможения генераторов для улучшения устойчивости; проверка статической и динамической устойчивости и оценка влияния различных факторов на запасы устойчивости, например форсирования возбуждения; исследование новых схем электропередач, например схем с компенсированными емкостью синхронными компенсаторами; исследования совместной работы электропередач и систем постоянного и переменного тока и др.

4. Исследования, направленные на уточнение конструкции и отдельных параметров элементов вновь сооружаемых дальних электропередач, проверку работы их в системе. В качестве примеров можно привести теоретическое и экспериментальное изучение параметров успокоительных систем явнополюсных синхронных машин, а также исследования поперечной обмотки возбуждения и ее влияния на устойчивость и условия возбуждения машин.

5. Исследования, направленные на уточнение характеристик системы в целом, например изучение ее частотных характеристик, влияния на них состава нагрузки и т. п.

6. Проверку теоретических положений, допущений и приближений, принимаемых в различных аналитических методах расчета.

Сказанное дает только самую общую характеристику больших возможностей метода динамического моделирования.

Развитие моделирования электрических систем прошло ряд этапов. В первых работах [Л. 1, 2 и 3] внимание обращалось преимущественно на моделирование электрических машин с точки зрения их влияния на устойчивость. При этом в качестве основных параметров, подлежащих моделированию, рассматривались омическое сопротивление обмоток, постоянная времени цепи ротора и основные реактивные сопротивления. В качестве условия подобия рассматривалось равенство этих величин в относительных единицах. В дальнейших работах [Л. 3, 5 и 6], основанных на применении теории моделирования, были уточнены условия подобия, вопросы точности моделирования, разработано моделирование системы возбуждения, выявлено значение для подобия добавочных потерь. С учетом этих теоретических разработок были намечены пути проектирования и создания модели синхронных генераторов со вспомогательными машинами для увеличения постоянных времени².

Практически наметилось три пути создания моделей крупных синхронных машин.

² Авторские свидетельства: № 88435 на имя В. А. Веникова, № 07724 на имя В. А. Веникова, А. В. Иванова-Смоленского и Л. З. Рубинштейна, № 87724 на имя В. А. Веникова, А. В. Иванова-Смоленского, М. С. Михайлова-Микулинского и Л. З. Рубинштейна.

Первый путь — изготовление моделей на базе небольших серийных синхронных машин с использованием готовых штампов для листов статора и ротора. Вводя дополнительные индуктивности в цепи обмоток и снижая номинальную мощность машины, можно обеспечить одинаковые долевые реактивные сопротивления модели и оригинала, но невозможно удовлетворить критериям подобия $\frac{r}{x} = \text{idem}$ для цепей якоря и воз-

буждения. Для получения подобия необходимо искусственно уменьшить активные сопротивления цепей статора и ротора путем введения в них коллекторных машин, создающих отрицательное активное сопротивление [Л. 1, 3 и 10]. Однако наличие коллекторных машин в цепи якоря может привести к значительным искажениям моделируемых процессов. Применение таких моделей с рядом ограничений (малая степень компенсации и т. п.) может быть рекомендовано только для моделирования электрических машин тех систем, которые в данном исследовании играют второстепенную роль.

Второй путь — специальное конструирование генераторов-моделей с малоиспользованной габаритной мощностью (завышенных размеров). В таких машинах омические сопротивления (сопротивления постоянному току) могут быть настолько малыми, что критерий подобия $\frac{r}{x} =$

$= \text{idem}$ в цепях якоря и возбуждения удастся обеспечить без применения коллекторных машин. Однако неизбежное увеличение добавочных потерь короткого замыкания и потерь в стали приведет и здесь к значительным искажениям моделируемых процессов. Уменьшить эти искажения можно только путем применения сложных и не всегда эффективных мер. Кроме того, чрезмерное увеличение махового момента ротора (постоянной инерции) делает модели такого рода не универсальными, пригодными для изображения лишь некоторых процессов в сверхмощных генераторах.

Наиболее правильным представляется третий путь, по которому пошли авторы модели, разработанной в МЭИ. Размеры генератора в данном случае выбираются из условия обеспечения критерия $\frac{r_a(1 + K_d)}{x_{ad}}$ для активного сопро-

тивления якоря, определенного с учетом добавочных потерь короткого замыкания. Избыточное сопротивление в цепи обмотки возбуждения компенсируется при помощи специальной коллекторной машины, что, однако, не приводит к сколь угодно существенным искажениям моделируемых процессов, так как сопротивление уменьшается не более чем в 2—3 раза. Компенсация получается вполне надежной, так как здесь нас интересует в первую очередь затухание медленно изменяющейся апериодической составляющей тока.

Как показывают опыты, осуществленные на модели МЭИ, при включении в обмотку возбуждения дополнительных сопротивлений со спе-

циально подобранными частотными характеристиками и при выборе степени компенсации из условия получения необходимого омического сопротивления удастся получить подобие контуров обратной последовательности (r_2 и x_2), а при полной демпферной обмотке и подобие частотных характеристик по осям d и q .

Следует подчеркнуть, что в МЭИ отказались от применения компенсации сопротивления в цепи якоря ввиду того, что она не дает желательного эффекта. Дело в том, что для получения подобия процессов, связанных с апериодической составляющей тока статора, степень компенсации омического сопротивления якоря должна выбираться по критерию $\frac{r_a}{x_{ad}}$. При таком выборе компенсация активного сопротивления якоря, определенного с учетом добавочных потерь короткого замыкания, оказывается случайной и в большинстве случаев недостаточной. Это приводит к нарушению подобия процессов, связанных с периодической составляющей тока короткого замыкания. Выбирая степень компенсации таким образом, чтобы удовлетворить критерию $\frac{r_a(1+K_d)}{x_{ad}}$ для активного сопротивления якоря, мы не получим подобия процессов, обусловленных апериодической составляющей тока якоря.

Компенсированная часть активного сопротивления не должна быть больше омического сопротивления обмотки r_a , так как в противном случае компенсатор сопротивления самовозбудится.

Таким образом, даже идеально точная компенсация, обеспечивающая в цепи якоря в любом режиме одно и то же отрицательное сопротивление, в общем случае не позволяет получить подобия процессов. Только в одном частном случае, когда модель спроектирована так, что добавочные потери в ней удовлетворяют условиям подобия, $\frac{K_d r_a}{x_{ad}} = \text{idem}$, а компенсировать нужно только часть избыточного омического сопротивления, такая идеальная компенсация могла бы обеспечить подобие процессов в цепи якоря³. Однако и здесь погрешности самой компенсации в цепи переменного тока, связанные с непостоянством величины отрицательного сопротивления, препятствуют получению удовлетворительного подобия.

Как показали опыты [Л. 1 и 3], применение для компенсации активного сопротивления в цепях переменного тока однофазных и трехфазных коллекторных машин позволяет получить только общую качественную картину.

³ В некоторых моделях с применением компенсации в цепи якоря их авторы необоснованно стремились получить омическое сопротивление более низким, чем это требуется из условий подобия. Это, естественно, приводило к получению в несколько раз завышенных добавочных потерь короткого замыкания и исключало возможность эффективного применения компенсации.

Применение компенсации в обмотке возбуждения и отсутствие компенсации в обмотке якоря определили конструкцию машин-моделей МЭИ.

Проектирование моделей синхронных генераторов. Физические модели должны иметь определенные соотношения между параметрами, так называемые критерии подобия. При их проектировании нельзя применить известную теорию соразмерностей, рассматривающую геометрически подобные, одинаково использованные в тепловом отношении электрические машины и не позволяющую установить связь между параметрами и размерами машины. Анализ ряда геометрически подобных машин, выполненных из одинаковых материалов, показал, что при уменьшении размеров соотношения между параметрами машины изменяются, так как индуктивные сопротивления остаются примерно неизменными, а активные оказываются обратно пропорциональными квадрату размеров [Л. 1, 2 и 3]. Однако этот анализ не указал путей рационального конструирования физических моделей и не предотвратил ошибок, допускавшихся при проектировании, например стремления к чрезмерному увеличению сечения электропроводников статора и ротора машин-моделей.

Как известно, в литературе [Л.4] приводятся формулы, позволяющие выразить связь между параметрами машины в относительных единицах и ее мощностью через полюсное деление τ , воздушный зазор δ и электромагнитные нагрузки A и B_0 :

$$S = c_1 p \tau^2 l A B_0;$$

$$\frac{I_m}{I_n} = \frac{1}{x_{*m}} = c_2 \left(\frac{\delta}{\tau} \right) \frac{B_0}{A}.$$

Однако эти формулы в указанном виде также не дают возможности достаточно строго подойти к решению задачи о проектировании физических моделей электрических машин.

Задача проектирования физических моделей может быть сформулирована двояко: а) заданы критерии физического подобия, которым удовлетворяет оригинал и которым должна удовлетворять физическая модель:

$$\frac{r_i}{x_n}; \frac{x_i}{x_n} \text{ и т. д.,}$$

необходимо определить размеры модели; б) заданы размеры оригинала, необходимо определить размеры физической модели. Для решения этих задач необходимо выявить основные соразмерности не геометрически, а физически подобных синхронных машин. При этом будем считать допустимым неполное подобие некоторых явлений, например вытеснения тока, нагревания, влияния естественных демпферных контуров ротора, емкостных токов.

Связь критериев подобия и критериальных величин⁴ синхронной машины с размерами их

⁴ В соответствии с приведенным выше общим определением под критериями подобия электрической машины понимаются некоторые безразмерные величины, характе-

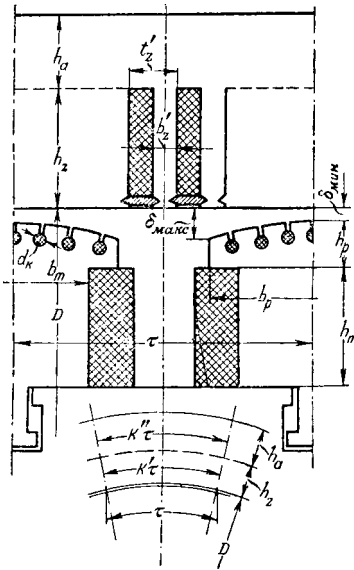


Рис. 1. Разрез одного полюсного деления модели синхронной машины.

активных частей (рис. 1) устанавливается системой следующих уравнений⁵:

$$M = \text{idem}, \text{ где } M = M_p + M_T + \Delta M$$

(для оригинала $\Delta M = 0$),

$$M_p = \frac{\tau^2 p^2}{S} (C_m \cdot K_l \cdot K_g); \quad (1)$$

$$\frac{r_a}{x_{ad}} = \frac{\delta \cdot p_a}{h_z \cdot \tau^2} \left(C_a \frac{K_N}{K' K_{3n}} \cdot \frac{K_z}{K_z - 1} \right) = \text{idem}; \quad (2a)$$

$$\frac{K_g \cdot r_a}{x_{ad}} = \frac{h_z \cdot p_z}{\delta} (C_{ag} \cdot K' \cdot K_z) = \text{idem}; \quad (2b)$$

$$P_{ca} \cdot x_{ad} = \frac{\tau^2 \cdot p_a}{\delta \cdot h_a} \left(C_{ca} \frac{K''}{K_{3c}} \right) = \text{idem}; \quad (3a)$$

$$P_{cz} \cdot x_{ad} = \frac{h_z \cdot p_z}{\delta} \left(C_{cz} \frac{K' K_z}{K_{3c}} \right) = \text{idem}; \quad (3b)$$

$$T_{d0} = \frac{x_{fd}}{\omega \cdot r_f} = \text{idem} \text{ или } \frac{r_f}{x_{ad}} = \text{idem},$$

где $r_f = r'_f - \Delta r_f$ (для оригинала $\Delta r_f = 0$);

$$\frac{r'_f}{x_{ad}} = \frac{\delta \cdot p_f}{\tau \cdot Q_{f\tau}} (C_f \cdot K_{fw}); \quad (4)$$

$$U = f(I_f) = \text{idem}; \quad (5a)$$

ризующие подобие временных процессов и не зависящие от выбора начального номинального режима. К числу критериев подобия относятся отношения вида: $r_i : x_n$ и $x_i : x_n$ для всех электрически- и магнитно связанных контуров машин. Эти отношения не зависят от выбора начальной мощности и начального напряжения. Идентичность (idem) этих критериев в модели и оригинале означает возможность подобия, которое будет осуществлено, если подобны начальные режимы [Л. 1, 3 и 5].

⁵ Уравнения были приведены в докладах авторов на конференции по физическому моделированию в Научно-техническом обществе МЭИ в 1954 г. (Электричество, № 5, 1954).

$$x_{*ad} = \frac{S}{p \cdot \tau \cdot l} \frac{1}{(\delta \cdot B_\delta^2)} C_{ad}; \quad (5b)$$

$$\frac{x_{a1}}{x_{ad}} = \frac{K_{a1}}{K_{ad}} = \text{idem}; \quad (6)$$

$$\frac{x_\sigma}{x_{ad}} = \text{idem}, \text{ где } x_\sigma = x'_\sigma + \Delta x_\sigma$$

(для оригинала $\Delta x_\sigma = 0$);

$$\frac{x'_\sigma}{x_{ad}} = \frac{\delta}{\tau} q \cdot \lambda'_\sigma (C_\sigma). \quad (7)$$

Аналогичные соотношения имеют место между параметрами обмотки возбуждения и демпферной обмотки.

Эти уравнения, положенные в основу проектирования физических моделей МЭИ, показывают, что: а) физическая модель не должна быть геометрически подобна оригиналу; б) размеры физической модели зависят не только от критериев подобия, но и от граничных или начальных условий, выраженных в критериальной форме и характеризующих исходные режимы работы модели; в) одна и та же синхронная машина при различных начальных значениях S и U может быть использована как физическая модель различных оригиналов; г) при их помощи могут быть найдены основные размеры модели, если известны основные размеры оригинала или если известны критерии подобия и дополнительные критериальные величины.

Определяющими при выборе размеров модели синхронного генератора являются уравнения (1), (2) и (3). Уравнение (4) в случае компенсации активного сопротивления обмотки возбуждения по методу МЭИ не накладывает особых условий на выбор основных размеров машины.

Из уравнения (1) следует, что модель, имеющая меньшую, чем оригинал, мощность, должна иметь и меньшее полюсное деление. Как видно из уравнения (2a), при сохранении отношения δ/h_z это приведет к увеличению отношения r_a/x_{ad} . Уменьшение же отношения δ/h_z с целью сохранения критерия r_a/x_{ad} вызовет увеличение добавочных потерь короткого замыкания (2a) и потерь на перемагничивание зубцов якоря (3b). Отсюда следует, что наиболее полное подобие имеет место, если полюсное деление модели близко к полюсному делению оригинала. Практически вполне достаточно, если полюсное деление модели будет не менее половины полюсного деления оригинала. При этом значения ряда коэффициентов (K_{3n} , K_{3c} , K'' , K_w , K_l и т. д.), входящих в рассматриваемые уравнения, у модели будут более благоприятными, чем у оригинала. Уменьшение числа полюсов p также позволяет снизить мощность S модели.

В большинстве случаев все критерии подобия не могут быть выдержаны полностью. Приходит-

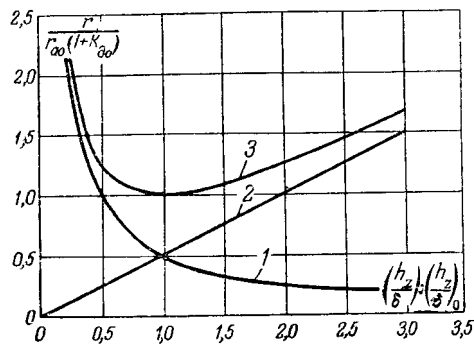


Рис. 2. Зависимость активного сопротивления обмотки якоря (с учетом добавочных потерь короткого замыкания в стали) от отношения h_z/δ . Здесь $r_{a0}, (h_z/\delta)_0$ — значения величин при $K_{\delta 0} = 1,0$, т. е. при равенстве основных и добавочных потерь короткого замыкания; r_a, K_{δ} — значения величин при произвольном отношении h_z/δ .

$$1 - \frac{r_a}{r_{a0}(1+K_{\delta 0})}; \quad 2 - \frac{r_a \cdot K_{\delta}}{r_{a0}(1+K_{\delta 0})}; \quad 3 - \frac{r_a(1+K_{\delta})}{r_{a0}(1+K_{\delta 0})}.$$

ся несколько нарушать соотношения (36) и (26), обуславливающие выбор размеров, и, следовательно, несколько завышать добавочные потери короткого замыкания и относительные потери в стали зубцов якоря. Как показывают специальные исследования, увеличение относительных потерь в стали на 2...3% не оказывает решающего влияния на осуществление подобия [Л. 5].

Минимум полных потерь короткого замыкания при заданном τ получается при выборе такого отношения δ/h_z , которое обеспечивает равенство основных и добавочных потерь короткого замыкания (рис. 2). Это условие выполняется, если имеет место соотношение

$$\left(\frac{h_z}{\delta}\right)_0 = \frac{1}{K'\tau} \sqrt{\frac{C_a}{C_{a\delta}} \frac{p_a \cdot K_w}{(K_z - 1) \cdot K_{3n} \cdot p_z}}.$$

При физическом моделировании синхронных машин без компенсации в цепи якоря наиболее существенное значение имеет правильное отражение полных потерь короткого замыкания. Поэтому во всех тех случаях, когда не может быть выполнено каждое из уравнений (2а) и (2б) в отдельности, следует стремиться к равенству относительных полных потерь модели и оригинала.

При заданных значениях мощности модели S , критериях подобия и критериальных величинах уравнения (1), (2) и (3) позволяют определить расчетный диаметр D , расчетную длину l , полюсное деление τ , отношение δ/h_z .

Оптимальная величина воздушного зазора определяется уравнениями (4) и (5).

Воздушный зазор δ должен быть выбран таким образом, чтобы модель имела минимально возможное отношение r'_f/x_{ad} . При выбранных значениях S, x_{ad}, l, τ, p это отношение (4) пропорционально воздушному зазору δ и обратно пропорционально сечению проводов обмотки возбуждения на одно полюсное деление $Q_{f\tau}$.

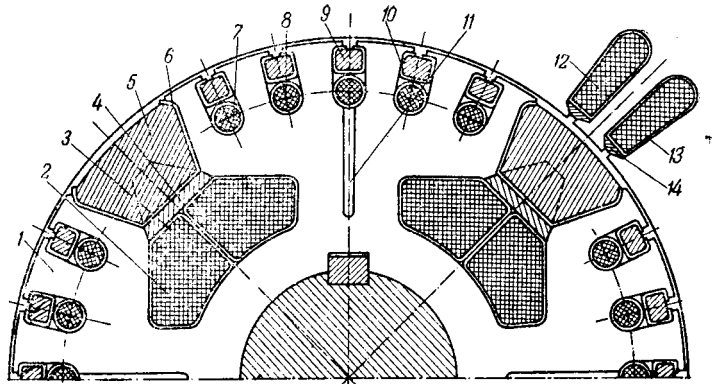


Рис. 3. Поперечный разрез физической модели крупного синхронного компенсатора.

1 — магнитопровод ротора; 2 — обмотка возбуждения; 3 — пазовая изоляция обмотки возбуждения; 4 — изоляционный клин; 5 — магнитный клин (пунктиром показан магнитный клин другой формы); 6 — немагнитная прокладка; 7 — демпферная обмотка; 8 — пазовая изоляция демпферной обмотки; 9 — магнитный клин; 10 — немагнитная прокладка; 11 — прорез в полюсе; 12 — обмотка якоря; 13 — пазовая изоляция; 14 — немагнитный клин.

Индукция в сердечнике полюса B_m выбирается на колене характеристики намагничивания стали полюса, при этом ширина сердечника полюса, определяющая сечение $Q_{f\tau}$, оказывается пропорциональной $\sqrt{\frac{1}{\delta}}$:

$$b_m \equiv \frac{\sigma \cdot \tau}{B_m} \sqrt{\frac{1}{\delta}}.$$

При изготовлении сердечника полюса из стали марки СТЗ, коэффициенте рассеяния полюсов $\sigma = 1,3$, числе пар полюсов $p = 2$ или 3 минимальное значение отношения $\frac{r'_f}{x_{ad}}$ имеет место

при максимальной индукции в воздушном зазоре модели, равной примерно 4 500...5 000 гс. Если выбранный по этой индукции зазор окажется слишком малым по конструктивным соображениям, его можно несколько увеличить.

Чтобы получить необходимые значения проводимости для магнитных потоков рассеяния обмотки возбуждения и демпферной обмотки, в конструкциях физических моделей, разработанных в МЭИ и изготовленных заводом «Электросила» им. Кирова, заводом им. Владимира Ильича и ВЭИ, применяются сменные магнитные клинья (рис. 3). Путем изменения формы и материала клина, а также зазора между клином и стенкой паза, заполненного немагнитным материалом, можно не только изменять ненасыщенное значение индуктивных сопротивлений рассеяния, но и характеристику намагничивания для полей рассеяния, а также частотные характеристики машины. Тот же эффект можно получить введением в цепь обмотки возбуждения дополнительных индуктивных сопротивлений со специально подобранными характеристиками намагничивания. В некоторых машинах-моделях МЭИ эти сопротивления, а также компенсатор активного сопротивления вводятся в цепи продольной и поперечной демпферных обмоток, которые в этом

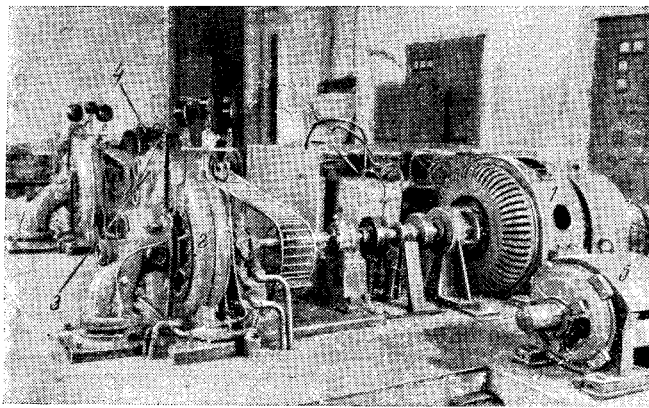


Рис. 4. Машинный зал динамической модели.

1 — гидрогенератор № 1; 2 — турбина № 1; 3 — регулятор турбины; 4 — модель турбогенератора; 5 — агрегат компенсации активного сопротивления статора.

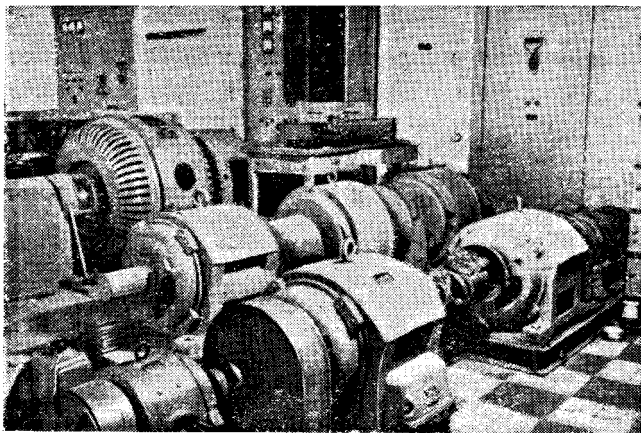


Рис. 5. Модель возбудителя со специальным дросселем, предназначенным для моделирования характеристик систем возбуждения.

случае выполняются многovitковыми, из изолированного провода [Л. 10].

В ряде случаев расчетный воздушный зазор модели может получиться равным нескольким десятым долям миллиметра. Тогда будет исключена возможность увеличения зазора под краями полюсов для получения необходимого отношения x_{aq}/x_{ad} в явнополюсных машинах, а также существенную роль будет играть магнитное сопротивление в сердечнике, ярме полюса и в подполюсном воздушном зазоре, если последний имеется. В такой модели заданное отношение x_{aq}/x_{ad} может быть получено только при роторе без подполюсного воздушного зазора и с полюсами, имеющими радиальную прорезь (щель) по продольной оси (рис.3). Эта щель, увеличивая магнитное сопротивление поперечному потоку, уменьшает сопротивление x_{aq} до необходимого значения. Краткая характеристика генераторов-моделей МЭИ⁶ приведена в таблице,

⁶ Следует отметить, что в проектировании генераторов участвовали Л. З. Рубинштейн, И. Л. Клейман, А. И. Орлова и Т. Е. Тиктина.

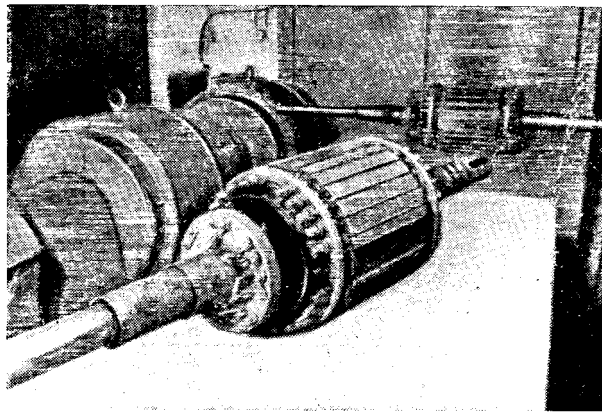


Рис. 6. Сменные роторы модели синхронного компенсатора МГ-15-1000.

а общие их виды и виды отдельных деталей показаны на рис. 4, 5 и 6.

Следует подчеркнуть, что модель генератора спроектирована так, чтобы изображать не только какой-либо конкретный генератор, но и «эквивалентную» электрическую систему, включающую как гидро-, так и турбогенераторы.

Особенностью модели синхронного компенсатора является простота конструкции, что позволяет изготовить ее из деталей серийных машин и получить при этом весьма большую постоянную времени (см. таблицу). Модель компенсатора выполнена таким образом, что ее легко превратить из явнополюсной в неявнополюсную путем механического соединения под углом 90 эл. градусов роторов двух машин-моделей, совместно изображающих группу синхронных компенсаторов.

Проектирование моделей трансформаторов.

Критерии подобия трансформатора и их связь с размерами его активных частей определяются следующей системой уравнений:

$$\frac{r_k}{x_\mu} = \frac{r_k}{\lambda_\mu \cdot a \cdot d} \left(1 + \frac{a}{l}\right) \left(1 + \frac{a}{2l}\right) C_k = \text{idem}; \quad (8)$$

$$P_{cc} \cdot x_\mu = p_c \left(1 + \frac{a}{l}\right) C_{cc} = \text{idem}; \quad (9)$$

$$P_{c\mu} \cdot x_\mu = p_c \left(1 + \frac{a}{l}\right) \frac{d}{h} C_{c\mu} = \text{idem}; \quad (10)$$

$$\frac{x_k}{x_\mu} = \text{idem}, \text{ где } x_k = x'_k + \Delta x_k; \quad (11)$$

$$U_0 = f(I_\mu) = \text{idem};$$

$$x_\mu = \frac{\Delta}{B} \frac{al}{(l+h+d+a)} C_\mu. \quad (12)$$

Из уравнений (8), (9) и (10) следует, что если трансформаторы модели и оригинала изготовить из материалов с одинаковыми удельными электрическими сопротивлениями (p_k) и потерями в стали (p_c), если ненасыщенное значение удельной магнитной проводимости (λ_μ) будет также одинаковым, то полное подобие возможно только при совпадении размеров оригинала и модели. Однако при приближенном моделировании трансформаторов можно отказаться от выполнения

Основные технические данные физических моделей синхронных машин типа МЭИ

Тип машины	Номинальные величины				Основные критерии подобия					
	$S, \text{кВА}$	$U, \text{В}$	$n, \text{об/мин}$	$x_{ad}, \text{ОМ}$	$M, \text{сек}$	$T_{d0}, \text{сек}$	r_a / x_{ad}	$r_a K_D / x_{ad}$	$P \cdot x_{ad}$ * *	x_{aq} / x_{ad}
МГ-25-1000	15	200	1 000	1,25	6/16	2,05/9	0,0094	0,0004...0,006	0,012	0,65
		200	1 000	1,90	6/16	3,3/10	0,0060	0,003...0,004	0,018	—
МТ-25-1000	5...20	200	1 000	2,30	6/16	3,7/11	0,0050	0,002...0,003	0,022	—
		25	400	1 000	6/13	2,6/11	0,0014	0,005...0,007	0,054	1
МК-3-1500	3 (2...5)	355	1 500	70	3/8	2,5/11	0,0022	0,0035...0,009	—	0,61

Примечание. Минимальные значения постоянных времени получены при отсутствии компенсации активного сопротивления обмотки возбуждения и снятых добавочных маховиков. Омические сопротивления r_a приведены к температуре 15° С и даны без учета дополнительных сопротивлений в цепи статора и ротора. Параметры МГ-15-1000 приведены для сменных роторов с зазорами

$\delta = 2,27$; $\delta = 1,50$; $\delta = 0,9$. Все машины имеют нормальные характеристики холостого хода. Коэффициент добавочных потерь короткого замыкания K_D зависит от величины тока, при котором производится опыт (меньшее значение соответствует большему току). Потери в стали определены экспериментально.

уравнений (9) и (10), т. е. пойти на некоторое увеличение потерь в стали.

Необходимые для приближенного подобия процессов значения x_μ и x_κ можно получить путем последовательного и параллельного присоединения дросселей со специально подобранными характеристиками. Существенное снижение потерь в стали можно также получить, если в качестве модели трансформатора использовать автотрансформатор, хотя при этом будут нарушены условия протекания токов нулевой последовательности.

Таким образом, нормальный режим трансформатора и его переходные процессы моделируются достаточно просто с довольно хорошими результатами и без искажений режима системы в целом.

Моделирование линий электропередачи. Модель линии электропередачи может быть получена в виде цепочечной схемы замещения.

Все провода, тросы линии и все их эквивалентные «зеркальные изображения» в земле в модели изображаются цепочками сосредоточенных элементов, содержащих индуктивности и связанные друг с другом взаимоиנדуктивностями и емкостями. Все «собственные» и «взаимные» индуктивности и емкости отдельных проводов оригинала при этом оказываются пропорциональными (подобными) соответствующим индуктивностям и емкостям модели. Такое подобие будет полным с точки зрения воспроизведения явлений, имеющих место на линии электропередачи при полнофазной и неполнофазной ее работе.

Следует отметить, что для более точного моделирования активных сопротивлений нулевого провода необходимо применять нелинейные сопротивления. Отдельные цепочки, соответствующие зеркальному изображению проводов, могут в узловых точках объединяться между собой поперечными связями, создающими своего рода сетку, моделирующую землю.

В простейших случаях, не требующих тщательного изучения несимметричных режимов, можно не создавать индуктивных связей между фазами цепочек, моделирующих линию электропередачи, и ограничиться введением индуктив-

ного $x_{(м)}$ и активного $r_{0(м)}$ сопротивлений в нулевой провод [Л. 7 и 8].

В модели МЭИ предусмотрены секционированные индуктивные катушки, позволяющие создавать взаимоиנדукцию между отдельными фазами и нулевым проводом, т. е. осуществлять моделирование линий для простейших случаев и для случаев, когда требуется более тщательное изучение несимметричных режимов.

Моделирование первичных двигателей гидро- и турбогенераторов. Полное подобие первичных двигателей модели первичным двигателям оригинала обеспечивается соблюдением критериев, фиксирующих гидромеханическое подобие и устанавливающих подобие внутренних процессов. В критерии должны быть введены пространственные соотношения. Однако в большинстве случаев для исследования систем можно ограничиться неполным моделированием, при котором роль турбины-модели сводится к созданию определенных граничных условий на валу генератора. При этом во всех режимах агрегата изменение вращающего момента турбины-модели в зависимости от скорости должно быть таким же, как и у турбины-оригинала. Разумеется, что удовлетворить этому условию можно тем легче и полнее, чем природа модели ближе к природе оригинала. В этом отношении известные преимущества имеют гидротурбины, примененные в модели МЭИ, но неплохие результаты дают и электродвигатели.

Моделирование регуляторов скорости может быть полным, с сохранением геометрического подобия и неполным, отражающим только влияние регулятора на изменение вращающего момента турбины при изменениях скорости.

При моделировании процессов в электрических системах в большинстве случаев нет необходимости стремиться к полному моделированию регуляторов. Для этой цели достаточно получить соответствующие регулятору-оригиналу скорости действия его элементов.

Теория моделирования регуляторов скорости, разработанная в процессе создания динамических моделей [Л. 8], предусматривает реализацию условий подобия при помощи обычных (переде-

ланных) регуляторов скорости малых гидротурбин или при помощи специальных электрических регуляторов. При этом особое внимание обращается на то, чтобы регулятор-модель потреблял с вала генератора достаточно малую мощность, так как в противном случае условия подобия могут нарушиться.

При моделировании действия регуляторов частоты применяются натуральные (немоделированные) регуляторы. Точное моделирование действия регуляторов частоты требует, чтобы агрегат, регулирующий частоту, изображался отдельным генератором.

Моделирование систем возбуждения и регуляторов возбуждения. При моделировании электрических систем, осуществляемом без изменения масштаба времени, регуляторы возбуждения генераторов-моделей могут быть взяты натуральными, немоделированными. Однако условия работы модели предъявляют определенные требования к свойствам регуляторов. Так, напряжения на входе и выходе регулятора-модели должны быть пропорциональны соответствующим напряжениям регулятора-оригинала. Соотношения между напряжениями при холостом ходе, нормальном нагрузочном режиме, форсировочном режиме должны быть такими же, как и в оригинале. Потребление мощности на входе регулятора модели должно быть настолько мало, чтобы в результате его включения не изменялось напряжение генератора-модели.

Для осуществления подобия системы возбуждения необходима идентичность всех схем включения (рис. 7) и относительных характеристик возбудителей и подвозбудителей.

В первом приближении достаточно, чтобы условию $U = f(I)$ удовлетворяли только харак-

теристики холостого хода, для более точного приближения необходимо соблюдение этого условия и для нагрузочных характеристик. Постоянные времени цепей обмотки возбуждения возбудителя должны отвечать условию $T_{*en} = idem$.

Взаимное влияние обмоток возбуждения возбудителя в оригинале и модели должно быть одинаково. Это достигается специальной конструкцией возбудителя и включением дополнительного трансформатора-дросселя, увеличивающего постоянные времени и создающего необходимые взаимоиנדуктивности.

В схеме возбуждения модели должно иметься устройство для компенсации излишнего активного сопротивления обмоток возбуждения синхронного генератора. На практике для этой цели применяется серийный коллекторный ненасыщенный генератор со слабо выраженной реакцией якоря, низким переходным сопротивлением щеток и шихтованной станиной, снабженный вибраторными обмотками⁷, которые питаются переменным током и уменьшают явления гистерезиса в магнитной системе.

Точность компенсации удается повысить, если возбудитель включить в цепь возбуждения не непосредственно, а через специально сконструированный ненасыщенный коллекторный генератор с независимым возбуждением (преобразователь напряжения) [Л. 3], также имеющий слабо выраженную реакцию якоря, низкое переходное сопротивление щеток и шихтованную станину.

При необходимости уменьшения активного сопротивления обмотки возбуждения генератора

⁷ Авторское свидетельство № 88435 и 87724 на имя В. А. Веникова и Л. З. Рубинштейна; А. В. Иванова-Смоленского и М. С. Михайлова-Микулинского.

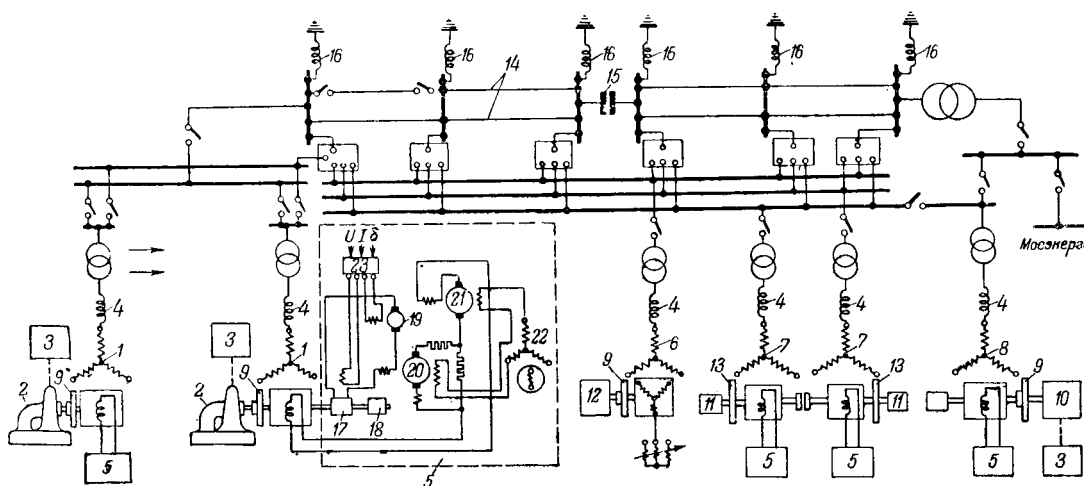


Рис. 7. Общая схема динамической модели типа МЭИ.

1 — модель крупного гидрогенератора МГ-15-1000; 2 — модель гидравлической турбины; 3 — регулятор скорости вращения; 4 — дополнительные индуктивности в цепи статора синхронных машин; 5 — система возбуждения синхронной машины; 6 — модель асинхронной нагрузки системы; 7 — модель крупного синхронного компенсатора МК-3-1500; 8 — модель крупного синхронного турбогенератора МТ-25-1000; 9 — дополнительный маховик со сменными дисками и динамометр; 10 — электродвигатель, моделирующий паровую турбину; 11 — электродвигатель, компенсирующий избыточные механические потери в модели синхронного компенсатора; 12 — мо-

дель нагрузки на валу асинхронных двигателей; 13 — маховик; 14 — модель линии электропередачи; 15 — модель емкостной последовательной компенсации сопротивления линии; 16 — параллельные дроссели; 17 — возбудитель на валу генератора; 18 — вспомогательный синхронный генератор для измерения угла δ ; 19 — возбудитель с отдельным двигателем; 20 — преобразователь напряжения возбудителя; 21 — компенсатор активного сопротивления; 22 — вспомогательный синхронный генератор повышенной частоты для питания размагничивающих обмоток; 23 — регулятор возбуждения.

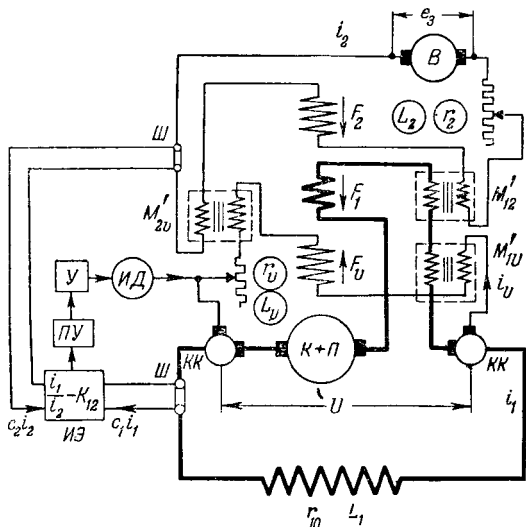


Рис. 8. Схема электромашинной компенсации активного сопротивления с жесткой обратной связью и автоматическим регулированием результирующего сопротивления цепи.

L_1, r_1 — индуктивность и омическое сопротивление обмотки возбуждения генератора; ИД — исполнительный двигатель, воздействующий на реостат в цепи обратной связи; В — возбудитель; Ш — шунты.

более чем в 2...3 раза в МЭИ применяется схема рис. 8, в которой преобразователь напряжения и компенсатор сопротивления объединены в одной машине (К+П), имеющей шихтованную станину и вибраторные обмотки. Отличительная особенность этой схемы состоит в том, что в ней имеется жесткая отрицательная обратная связь по напряжению, оказывающая линеаризирующее действие на характеристики машины. Если через K_U обозначить отношение э. д. с. вращения соответствующей обмотки обратной связи к напряжению на кольцах обмотки возбуждения, то при одинаковой компенсации сопротивления ошибка в результирующем сопротивлении в схеме с обратной связью будет в $(1 + K_U)$ раз (практически в 3...5 раз) меньше, чем в схеме без обратной связи. При питании обмотки обратной связи от дополнительных щеток на кольцах обмотки возбуждения (КК) удастся уменьшить ошибки, связанные не только с нелинейностью характеристики намагничивания и реакции якоря, но и с непостоянством переходного сопротивления скользящих контактов в цепи с изменением температуры обмоток компенсатора (К+П).

При медленном изменении сопротивления обмотки возбуждения генератора на 3...5% из-за нагрева результирующее сопротивление контура поддерживается неизменным при помощи устройства автоматического регулирования, воздействующего на реостат в цепи обратной связи. Измерительный орган ИЗ этого устройства реагирует на изменение отношения токов $\frac{i_1}{i_2}$. Благодаря специальной блокировке в усилителях (ПУ и У) учитывается только изменение этого отношения в установившемся режиме. Степень

компенсации изменяется воздействием на величину K_{12} .

Как показывает анализ схемы рис. 8, для правильного ее действия необходимо при помощи компенсирующих взаимных индуктивностей M'_{12} ; M'_{1U} ; M'_{2U} избавиться от магнитной связи между контурами схемы⁸ и выбрать постоянные времени контуров из условия

$$T_{U0} \approx T_2 \ll T_1,$$

где

$T_{U0} = \frac{L_U}{r_U}$ — естественная постоянная времени контура тока i_U ;

$T_2 = \frac{L_2}{r_2}$ — постоянная времени контура тока i_2 ;

T_1 — постоянная времени контура тока i_1 с учетом компенсации.

Моделирование нагрузки электрических систем. Для моделирования нагрузки электрической системы при медленных изменениях напряжения последней достаточно совпадения суммарных статических характеристик $S = P + jQ = f(U)$ нагрузки модели с соответствующими характеристиками нагрузки оригинала при одинаковых соотношениях между составляющими нагрузок:

$$\frac{P_{\partial s}}{P_{0cs}} = \text{idem}; \quad \frac{Q_{\partial s}}{Q_{0cs}} = \text{idem}.$$

Эффект нагрузки при быстро протекающих процессах должен в ряде случаев учитываться не статическими, а динамическими характеристиками. В этом случае к ранее записанным критериям подобия добавляются еще следующие:

$$P_{\partial s} = f(S) = \text{idem}; \quad M_{\partial s} = \text{idem},$$

где $M_{\partial s}$ — постоянная инерций эквивалентного асинхронного двигателя комплексной нагрузки модели.

Закключение. Характерной особенностью метода физического моделирования является возможность установления подобия простейших элементов системы с последующим объединением их в сложный комплекс. Соблюдение критериев подобия для каждого элемента дает определенную уверенность в правильности моделирования. В то же время переход от элементов к сложной системе при соблюдении подобия только граничных условий не связан с теми трудностями, которые в этом случае характерны для аналитического метода.

Методы теории подобия могут быть с пользой применены в лабораторных исследованиях и при опытах в системах, а также испытаниях оборудования и аппаратуры, проводимых на мощных установках. Лабораторные и аналитические исследования корректируют друг друга и должны сочетаться друг с другом. Указанный подход к исследованию, сочетающий эксперимент и анализ, открывает большие возможности.

⁸ Авторская заявка № К 618-5234 — 2/XII 1953 г. на имя В. А. Веникова и А. В. Иванова—Смоленского.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Перечень обозначений

- S — мощность кажущаяся;
 r_a — омическое сопротивление обмотки якоря;
 K_δ — коэффициент добавочных потерь короткого замыкания;
 $r_a(1 + K_\delta)$ — активное сопротивление обмотки якоря с учетом добавочных потерь короткого замыкания в стали;
 $P_{ca} = \frac{P_{ca}}{S}$ — относительные основные потери на перемагничивание стали ярма якоря;
 $P_{cz} = \frac{P_{cz}}{S}$ — относительные основные потери на перемагничивание стали зубцов якоря;
 $x_\sigma, x'_\sigma, \Delta x_\sigma$ — полное, естественное и дополнительное индуктивные сопротивления рассеяния якоря (Δx_σ — дополнительное индуктивное сопротивление, введенное в цепь якоря вне машины);
 r_f — полное омическое сопротивление обмотки возбуждения;
 Δr_f — «отрицательное» сопротивление, вводимое в цепь обмотки возбуждения компенсатором активного сопротивления;
 r'_f — естественное омическое сопротивление обмотки возбуждения;
 $Q_{f\tau}$ — активное сечение обмотки возбуждения на одно полюсное деление;
 $I, M_p, M_m, \Delta M$ — постоянные инерции: полная, ротора генератора, ротора турбины, дополнительная;
 λ'_σ — магнитная проводимость для полей рассеяния обмотки якоря на один паз на единицу расчетной длины;
 q — число пазов на полюс и фазу;
 C_a, C_{ag}, C_{ca} и т. д. — размерные или безразмерные коэффициенты, одинаковые для всех синхронных машин и в том числе для физических моделей крупных синхронных машин, если предположить, что:
 а) во всех этих машинах коэффициент полюсного перекрытия $\alpha \approx 0,70$; б) влияющие формы воздушного зазора на индуктивное сопротивление x_{ad} незначительно;
 K_{zn}, K_{zc}, K_w и т. д. — коэффициенты, которые в первом приближении можно считать постоянными;
 $\delta = K_\delta \left[\delta_{мин} + \frac{1}{3} (\delta_{макс} - \delta_{мин}) \right]$ — расчетный воздушный зазор;
 B_δ — расчетная индукция в воздушном зазоре;
 P_z, P_a — удельные магнитные потери в зубцах и ярме;
 ρ_a, ρ_f — удельные электрические сопротивления обмотки якоря и возбуждения;
 $K_l = \frac{l}{\tau}$ — отношение расчетной длины l к полюсному делению τ ;

$K_G = \frac{(GD^2)_p}{(GD^2)_{Dl}}$, где $(GD^2)_p$ — маховой момент ротора

машины;

$(GD^2)_{Dl}$ — маховой момент стального цилиндра диаметром D и длиной l ($K_G = 1$ для модели или быстроходной синхронной машины; $K_G = 0,75$ для тихоходного гидрогенератора);

$K_w = \frac{l_w}{l}$, где l_w — средняя длина полувитка обмотки якоря;

$K_z = \frac{l'_z}{b'_z}$ — коэффициент, характеризующий структуру пазового слоя якоря;

$K_{zn} = \frac{Q_a}{h_z(t'_z - b'_z)}$ — коэффициент заполнения паза якоря проводниками, где Q_a — активное сечение проводников якоря на один паз;

$K_{zc} = \frac{l_c}{l}$ — коэффициент заполнения магнитной системы сталью (l_c — полная длина активной стали);

$K_{fw} = \frac{l_{fw}}{l}$, где l_{fw} — средняя длина полувитка;

a, l — ширина и высота окна трансформатора;
 h, d — высота ярма и диаметр стержня трансформатора;

Δ, B — плотность тока в обмотках и магнитная индукция в сердечнике трансформатора.

Литература

- В. А. Веников. Моделирование электрических систем при помощи вращающихся машин. Электричество, № 9, 1939.
- М. П. Костенко и Е. Д. Трейвиш. Моделирование электрических машин и трансформаторов при экспериментальном исследовании устойчивости. Сборник трудов ЛПИ, № 1, 1946.
- В. А. Веников. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. Госэнергоиздат, 1949.
- Р. А. Рихтер. Электрические машины, т. II, ОНТИ, 1939.
- В. А. Веников и А. В. Иванов-Смоленский. Синхронный генератор для электродинамического моделирования электрических систем. Электричество, № 8, 1951.
- В. А. Веников. Некоторые вопросы применения подобия при моделировании электрических систем. Известия Отделения технических наук Академии наук СССР, № 1, 1954.
- Н. Г. Джанджугазов. Методы экспериментального определения некоторых электромагнитных характеристик мощных трансформаторов и реакторов (автореферат). Издательство Академии наук СССР, 1954.
- В. А. Веников. Пути применения теории подобия и физического моделирования к исследованию электрических систем (автореферат). Издание МЭИ, 1952.
- М. П. Костенко. Электродинамическая модель для исследования устойчивости. Электричество, № 9, 1950.
- Описание динамической модели МЭИ под ред. В. А. Веникова (техническая информация). МЭИ, 1955.

[15. 4. 1955]



Электродинамические модели гидрогенераторов Куйбышевской гЭС

Академик М. П. КОСТЕНКО и кандидат техн. наук И. Д. УРУСОВ

Ленинградское отделение Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР

При проектировании и исследовании электрических режимов дальних электропередач и межсистемных связей, в особенности в тех случаях, когда их нагрузки близки к предельным по условиям устойчивости, возникает ряд сложных вопросов, которые не могут быть решены только путем расчета или математического моделирования (расчетные столы, электрические и механические интеграторы и т. п.). К числу этих вопросов относятся: исследование устойчивости параллельной работы; исследование различных видов релейных защит, систем возбуждения и регулирования; исследование параметров генераторов, компенсаторов и турбин и их влияния на устойчивость и т. д.

Для решения этих вопросов в СССР успешно применяется метод электродинамического моделирования. Большая работа по разработке и применению этого метода проведена в ряде научно-исследовательских организаций, в том числе в Ленинградском отделении Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР.

Результаты исследований, проведенных на созданных в Ленинградском отделении ИАТ электродинамических моделях, показали, что электродинамическое моделирование является эффективным методом решения важнейших вопросов, связанных с проектированием объединенных энергосистем.

При создании электродинамических моделей энергосистем наиболее трудной задачей является проектирование синхронных машин, моделирующих мощные турбо- и гидрогенераторы, а также синхронные компенсаторы. В настоящей статье излагаются основные принципы этого проектирования, на основе которых в Ленинградском отделении ИАТ были осуществлены модели генераторов Куйбышевской гидроэлектростанции. Основные данные моделей приводятся в сравнении с данными других аналогичных моделей и моделируемого оригинала.

Чтобы исследования на электродинамической модели могли быть произведены с необходимой точностью, основные относительные параметры и характеристики ее генератора должны достаточно точно совпадать с теми же параметрами и характеристиками оригинала. Это требование вытекает из условия подобия динамического процесса движения ротора в модели и оригинале.

Динамический процесс движения ротора выражается уравнением [Л. 1]

$$\frac{H_j}{\omega_s} p^2 \Delta \theta + M_{sA} = M_m, \quad (1)$$

$$\text{где} \quad M_{sA} = i_q \psi - i_d \psi_q; \quad (2)$$

$$i_d = \frac{[p Z_q(p) + (1-s)^2 x_q(p)] G(p) E - Z_q(p) e_d - (1-s) x_q(p) e_q}{Z_d(p) Z_q(p) + (1-s)^2 x_d(p) x_q(p)}; \quad (3)$$

$$i_q = \frac{(1-s) r G(p) E - Z_d(p) e_q + (1-s) x_d(p) e_d}{Z_d(p) Z_q(p) + (1-s)^2 x_d(p) x_q(p)}. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) следует, что для подобия процесса необходимо почленное равенство следующих величин модели и оригинала¹:

$$H_j, E, e, x_p, x_d, x_q, r_d, r_f, x_{kd}, x_{kq}, r_{kd}, r_{kq}, x_f,$$

являющихся инвариантами подобия. Из этого условия, как следствие, вытекает аналогичное условие для постоянных времени $T_{d0}, T'_d, T''_d, T_a, T'_c$ и T''_c и реактивностей x'_d, x''_d, x'_q .

Применение для целей электродинамического моделирования нормальных каталожных машин малой мощности нецелесообразно. Действительно, если взять ряд геометрически подобных машин различной мощности, то окажется, что при условии постоянства индукции $B_{\delta 1}$ и плотности тока j с уменьшением геометрического размера машин в K раз ее индуктивные сопротивления и инерционная постоянная уменьшатся, а активные сопротивления возрастут в K раз [Л. 2]. Следовательно, создание машины малой мощности (модели), обладающей всеми параметрами и характеристиками оригинала большой мощности, возможно лишь при заметных отступлениях от геометрического подобия и обычного уровня электромагнитных нагрузок (A и $B_{\delta 1}$). При создании электродинамических моделей следует использовать по возможности конструктивные узлы и элементы машин каталожного исполнения.

Чтобы установить, в каких направлениях могут быть сделаны отступления от геометрического ряда обычных каталожных машин, пришлось более подробно рассмотреть выражения для параметров и инерционной постоянной синхронной машины в относительных единицах и произвести некоторые преобразования нормальных расчетных формул, используемых в заводских расчетах. Преобразованные формулы параметров синхронной машины приведены в табл. 1.

При предварительном выборе основных размеров модели D_i, l_t и δ , а также электромагнитных нагрузок A и $B_{\delta 1}$ должны быть выполнены следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} x_{ad}^{(м)} &= x_{ad}^{(оп)}; \\ H_j^{(м)} &= H_j^{(оп)}; \\ r_f^{(м)} &= r_f^{(оп)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Последнее условие является лимитирующим, так как площадь сечения меди обмотки возбуждения ограничена в наибольшей степени.

¹ При этом имеется в виду и равенство коэффициентов, учитывающих увеличение активных сопротивлений вследствие наличия добавочных потерь.

Таблица 1

Синхронная реактивность продольной реакции якоря	$x_{ad} \approx 0,4 \frac{\tau}{\delta_{мин}} \frac{A}{B_{\delta 1}}$
Синхронная реактивность поперечной реакции якоря	$x_{aq} = \frac{k_q}{k_d} x_{ad}$
Реактивность рассеяния статорной обмотки	$x_l = 0,12 \frac{k_w}{a f_{\beta}^2} \left[\frac{h_n}{q b_n} (3\beta + 1) + 3,09 \frac{\tau}{l_t} (3\beta - 1) \right] \frac{A}{B_{\delta 1}} + \frac{0,156}{q^2} \frac{x_{ad}}{k_{ad}}$
Реактивность рассеяния обмотки возбуждения	$x_f = 1,49 k_{ad} \frac{k_w}{a} \frac{A}{B_{\delta 1}} \lambda$
Реактивность рассеяния демпферной обмотки по оси d	$x_{kd} = 1,81 \frac{k_w}{a} \left[\frac{\left(1,7 + 2,8 \frac{h_s}{b_s} \right)}{B} + \frac{1}{2\pi} \frac{\tau}{l_t} \right] \frac{A}{B_{\delta 1}}$
То же по оси q	$x_{kq} = 0,75 x_{kd} \text{ (для полной клетки),}$ $x_{kq} = 2,0 x_{kd} \text{ (для неполной клетки)}$
Активное сопротивление обмотки статора	$r_a = 79 \frac{1}{k_w} \frac{k_{\Phi}}{a} \frac{l_a}{l_t} \frac{1}{Q_{\text{Сит}}} \frac{A}{B_{\delta 1}}$
Активное сопротивление обмотки ротора	$r_f = \frac{l_f/l_e}{k_4 \tau^2 p} \frac{A}{B_{\delta 1}}$
Активное сопротивление демпферной обмотки по оси d	$r_{kd} = 252 \frac{k_w}{a} \left[\frac{C_b}{B_{qb}} \frac{l_b}{l_t} + 0,128 \frac{\tau}{l_t} \frac{C_R}{q R} \right] \frac{A}{B_{\delta 1}}$
То же по оси q (для полной клетки)	$r_{kq} = 189 \frac{k_w}{a} \left[\frac{C_b}{B_{qb}} \frac{l_b}{l_t} + 0,256 \frac{\tau}{l_t} \frac{C_R}{q R} \right] \frac{A}{B_{\delta 1}}$
То же для неполной клетки	$r_{kq} = 578 \frac{k_w}{a} \left[\frac{C_b}{B_{qb}} \frac{l_b}{l_t} + 0,0637 \frac{\tau}{l_t} \frac{C_R}{q R} \right] \frac{A}{B_{\delta 1}}$
Мощность, квт	$P = 14,2 \cdot 10^{-10} \tau^2 l_t p k_w A \cdot B_{\delta 1}$
Инерционная постоянная, сек	$H_j = k_1 \frac{p \tau^2}{A B_{\delta 1}}$

Примечание. Формулы для активных сопротивлений даны для температуры 75° С. При температуре 35° С, принимаемой для синхронных генераторов-моделей, значение активных сопротивлений уменьшается в 1,15 раза. Обозначения, принятые в статье, соответствуют общепринятым в литературе и расчетной практике (см., например, В. Т. Касьянов, Расчет явнополюсных синхронных машин).

К условиям (5) следует добавить требование достаточного сохранения вида относительной характеристики холостого хода:

$$B_{\delta 1} \delta_{мин} = k_2 \tau^{\xi}. \quad (6)$$

Для лабораторных моделей можно принять $k_2 \approx 1,6$, а $\xi = 1,7 \dots 2$, как это получается в нормальных сериях синхронных машин.

Требуемые реактивности рассеяния отдельных цепей машины получаются в результате варьирования размерами пазов и полюсной дуги b_p , применения полузакрытых пазов с узкой щелью большой высоты и уменьшения промежутка между полюсными башмаками при больших значениях отношения $\frac{\delta_{макс}}{\delta_{мин}}$ (приложение II).

Используя соотношения табл. 1 и условие (6) при $\xi = 2$, получим следующие приближенные формулы для основных размеров и нагрузок модели в зависимости от τ :

$$A = 4\tau x_{ad}; \quad (7)$$

$$B_{\delta 1} = 975 \frac{\tau}{x_{ad} H_j}; \quad (8)$$

$$\delta_{мин} = 0,00164 \tau x_{ad} H_j; \quad (9)$$

$$\frac{l_e}{l_t} = 11,45 \frac{r_f \tau^2}{H_j x_{ad}^2}; \quad (10)$$

$$l_t = 0,71 \frac{\tau}{\frac{l_e}{l_t} - 1}; \quad (11)$$

$$P = \frac{10,9 \cdot 10^{-6,5}}{\left(11,45 \frac{r_f \tau^2}{H_j x_{ad}^2} - 1 \right) H_j}. \quad (12)$$

Вывод соотношений (7)...(12) дан в приложении I. В табл. 2 приедены значения A , $B_{\delta 1}$, $\delta_{мин}$, $\frac{l_e}{l_t}$, l_t и P в зависимости от полюсного деления. Значения последнего даны в пределах от 36,9 до 25,9 см для следующих значений параметров генератора Куйбышевской гидроэлектростанции: $x_{ad} = 0,415$, $r_f = 0,00032$, $H_j = 13,2$ сек и для коэффициента заполнения полюсного окна $k_m = 0,136$. Как видно из табл. 2, наименьшая возможная мощность генератора-модели $P = 42,4$ квт получается при $\tau = 31,7$ см, $D_i = 60,5$ см и $l_e/l_t = 1,62$ и при сохранении в ней указанных параметров генератора Куйбышевской гЭС.

В табл. 3 представлены полученные путем расчета величины сопротивления r_f в зависимости от воздушного зазора $\delta_{мин}$ при наименьшей мощности $P = 42,4$ квт, при полюсном делении $\tau = 31,7$ см и разных величинах ширины полюсного сердечника b_m генератора-модели.

Расчет велся при постоянстве отношения

$$\frac{F_m}{F_{\delta}} = \frac{[B_m - B_{\delta}] h_m k''}{B_{\delta 1} \delta k'} = \frac{\left[B_{\delta} \frac{\tau}{b_m} \frac{2}{\pi} \sigma_m - B_0 \right] h_m k''}{B_{\delta} \delta k'} = \text{const}, \quad (13)$$

Таблица 2

Идеальный ряд синхронных генераторов-моделей при постоянных параметрах: x_{ad} , r_f , H_j

τ , см	P , квa	$k = \frac{\tau_1}{\tau_2}$	l_t , см	$\frac{l_e}{l_t}$	$l_s = 0,71\tau$, см	$\frac{GD^2}{\kappa \cdot \text{см}^2}$	b_m , см	h_m , см	H_j , сек	$2\omega_e q_e$	k_m	x_{ad}	r_f	A , a/см	$B_{\delta 1}$, гс	B_m , гс	δ , мм	$\frac{F_m}{F_\delta}$
36,9	47,3	0,86	22,0	2,19	26,2	228	9,9	13,7	13,2	8 800	0,136	0,415	0,00032	61,3	6 560	16 000	3,325	0,165
31,7	42,4	1,0	36,3	1,62	22,65	204	8,5	11,8	13,2	6 500	0,136	0,415	0,00032	52,5	5 650	13 750	2,84	0,177
28,8	47,2	1,1	59,3	1,345	20,45	227,5	7,7	10,73	13,2	5 360	0,136	0,415	0,00032	47,7	5 140	12 500	2,58	0,148
25,9	104,5	1,22	200,0	1,092	18,4	504	7,0	9,65	13,2	4 350	0,136	0,415	0,00032	42,75	4 640	11 300	2,3	0,157

Таблица 3

Нахождение зависимости r_f от величины воздушного зазора $\delta_{мин}$ при $P = 42,4$ квa и $\tau = 31,7$ см

b_m , см	$B_{\delta 1}$, гс	$A = \frac{29700}{B_{\delta 1}}$, a/см	$\frac{A}{B_{\delta 1}}$	$198 - b_m$, мм	$2\omega_e q_e$	k_m	$\delta_{мин}$, см	r_f	B_m	$\frac{F_m}{F_\delta}$
8,0	5 460	54,4	0,00996	118	6 800	0,142	0,304	0,00033	14 100	0,079
8,5	5 650	52,5	0,0093	113	6 500	0,136	0,284	0,000322	13 750	0,079
9,0	5 850	50,7	0,00867	108	6 200	0,130	0,265	0,000314	13 500	0,079
10,0	6 240	47,6	0,00765	98	5 640	0,118	0,2335	0,000306	12 900	0,079
11,0	6 620	44,8	0,00676	88	5 060	0,106	0,206	0,000301	12 500	0,079
12,0	6 990	42,5	0,00609	78	4 490	0,0932	0,1857	0,000308	12 000	0,079

что гарантировало неизменность характеристики холостого хода. Уравнение (13) решалось относительно $B_{\delta 1} \delta_{мин}$ при $B_0 = 5000$ гс, B_0 определялось путем спрямления характеристики намагничивания роторной стали (рис. 1). При решении использовались формулы табл. 1. В результате

$$B_{\delta 1} \cdot \delta_{мин} = 0,18 \left[20,85 \frac{B_\delta}{b_m} - 5000 \right],$$

откуда

$$\frac{B_{\delta 1}^2}{b_m} - 240 B_{\delta 1} - 2,4 \cdot 10^6 = 0.$$

Затем находилась индукция и остальные интересующие нас величины для различных задаваемых значений ширины полюсного сердечника (табл. 3 и рис. 2).

Воспользовавшись принципом построения нормальных серий синхронных машин на основе приведенного выше генератора-модели мощностью 42,4 квa, имеющего $\tau = 31,7$ см, можно получить данные для ряда машин с постепенно уменьшающимися полюсными делениями от 31,7 до 15,7 см. Основные величины при этом будут изменяться следующим образом:

$$x_{ad} = \text{const}; \quad \delta \equiv \tau^{1/3}; \quad H_j \equiv \tau; \quad \xi \equiv b/3;$$

$$A \equiv \tau^{2/3}; \quad l_t \equiv \tau; \quad Q_e \equiv \frac{1}{\tau^{1,8}}; \quad b_m \equiv \tau^{5/4};$$

$$B_{\delta 1} \equiv \tau^{1/3}; \quad P \equiv \tau^4; \quad r_f \equiv \frac{1}{\tau^{3/2}}; \quad B_m \equiv \tau^{1/12}.$$

Полученные таким образом данные ряда синхронных машин приведены на графике рис. 3. Поскольку мощность первого, исходного генератора, принятого при расчете кривых рис. 3, оказалась несколько выше предельной мощности ($P \approx 30$ квa), приемлемой по условиям лабораторного использования модели, мощность гене-

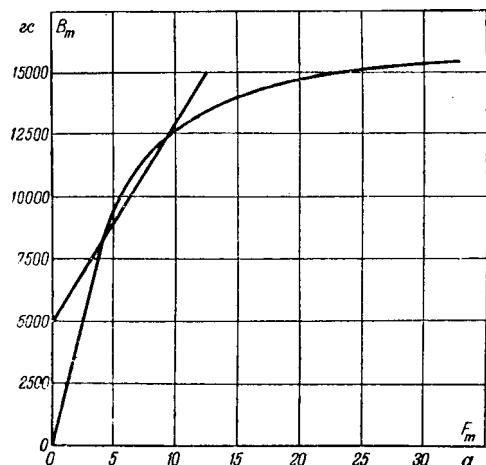


Рис. 1. Спрямление кривой намагничивания стали $B_m = f(F_m)$ при $B_0 = 5000$ гс.

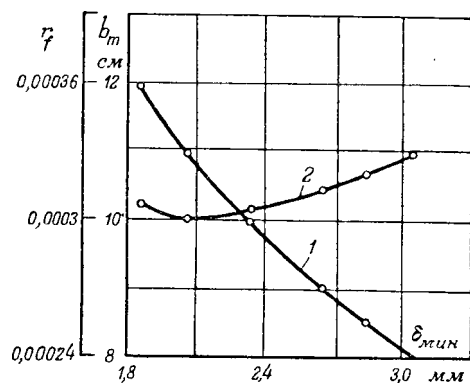


Рис. 2. График зависимости ширины полюсного сердечника b_m и активного сопротивления обмотки ротора r_f (в отн. ед.) от воздушного зазора $\delta_{мин}$.
 $1 - b_m = f(\delta_{мин}); \quad 2 - r_f = f(\delta_{мин})$.

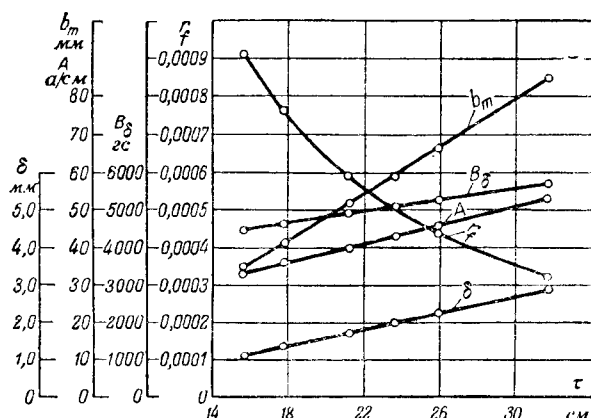


Рис. 3. Геометрический ряд синхронных машин с различными величинами полюсного деления τ , изменяющимися по закону изменения для нормальных серий.

ратора-модели была снижена путем уменьшения его длины до 26,5 см. В результате

$$P = 42,4 \frac{26,5}{36,3} = 31 \text{ ква.}$$

Ввиду того, что отношение $\frac{l_e}{l_t}$ при этом возросло с 1,62 до 1,85, относительное активное сопротивление также соответствующим образом увеличилось. С другой стороны, коэффициент заполнения медью полюсного окна получился равным 0,126, т. е. меньше наибольшего коэффициента, достигнутого в генераторах-моделях и равного 0,136, поэтому

$$r_f = 0,00032 \frac{1,85}{1,62} \frac{0,136}{0,126} = 0,00039.$$

В табл. 4 приведены данные выполненных в СССР генераторов-моделей с демпферными системами на роторе и полюсными делениями в пределах от 31,7 до 21,2 см, рассчитанными для индуктивного сопротивления $x_{ad} = 0,414$, соответствующего индуктивному сопротивлению генераторов Куйбышевской гЭС [Л. 3 и 4]. В этой же таблице приведены данные генераторов Куйбышевской гЭС.

Как видно из табл. 4, инерционные постоянные H_j генераторов-моделей с полюсными делениями, меньшими 31,7 см, меньше инерционной постоянной генераторов Куйбышевской гЭС, равной 13,2 сек. Однако инерционные постоянные указанных генераторов-моделей могут быть увеличены присоединением к валу ротора дополнительных инерционных дисков.

Отношение мощностей генераторов-моделей МГ-25 и МГ-18,7 равно 2, поэтому питание модели линии электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва можно осуществлять как от одного генератора-модели типа МГ-25 мощностью 31,0 ква, так и от двух генераторов-моделей типа МГ-18,7 мощностью по 15 ква. Это дает возможность производить сравнительные исследования регуляторов возбуждения при работе одного эквивалентного генератора и при параллельной работе двух генераторов-моделей.

Генератор-модель МГ-18,7 является универсальным, так как путем замены явнополюсного

Таблица 4

Параметры генераторов-моделей, работающих в режимах моделирования Куйбышевской гЭС

Параметры	Тип машины и автор проекта				
	МГ-25-6	МГ-18,7-6	МГ-15-6*	СГ-18,7-6	СВ 1500/200
	ЛСИАТ	ЛОИАТ	МЭИ	ЛПИ	„Электро-сила“
$2p$	6	6	6	6	88
$S, \text{ ква}$	31	15,5	15	8	123 500
$\cos \varphi$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$P, \text{ кВт}$	26,4	13,2	12,75	6,8	13 800
$n, \text{ об/мин}$	1 000	1 000	1 000	1 000	68,2
$U_n, \text{ в}$	230	230	230	230	10 500
$I_n, \text{ а}$	78	39	37,7	20,1	5 175
$K. п. д., \%$	91,5	91,8	90,65	80,0	97,13
$D_a, \text{ мм}$	850	850	850	560	14 880
$D_i, \text{ мм}$	605	495	450	405	14 300
$\tau, \text{ см}$	31,7	25,9	23,6	21,2	51,0
$l_t, \text{ см}$	26,5	32,4	30,0	19,0	200,0
l_e/l_t	1,85	1,62	1,64	1,87	1,16
Z	72	54	63	54	756
q	4	3	3 1/2	3	219/22
$\delta, \text{ мм}$	2,9	2,6	2,2	1,8	23
$C \cdot 10^{-4}$	313	512	405	390	22,6
$B_\delta, \text{ гс}$	5 650	4 300	4 200	4 800	9 500
$A, \text{ а/см}$	52,5	43,8	58,0	55,0	436,0
$h_n, \text{ мм}$	65	105	40	41	134
$b_n, \text{ мм}$	17,5	28,0	17,2	18,5	22,8
$b_m, \text{ см}$	8,5	6,0	6,5	8,0**	28,5
$k = \frac{\tau}{\tau_n}$	1,00	1,22	1,35	1,50	
k'_m	0,451	0,490	0,470	0,339	
k_p	0,279	0,287	0,199	0,228	
k_m	0,1260	0,136	0,1000	0,0774	
$2q_e w_e$	6 020	4 450	2 480	1 660	24 400
r_f	0,00039	0,00054	0,00110	0,0020	0,00033
r_a	0,00192	0,00140	0,00440	0,0053	0,0035
r_{kd}	0,00530	0,00561	0,00998	0,0210	0,0101
r_{kq}	0,00426	0,00492	0,00932	0,0216	0,0075
GD^{2***}	147	63	38	20	128 000
$H_j^{***} \text{ сек}$	13,2	11,1	7,0	7,2	13,2
x_{ad}	0,414	0,414	0,414	0,414	0,414
x_{aq}	0,208	0,208	0,236	0,210	0,243
x_l	0,029	0,034	0,026	0,027	0,089
x_d	0,444	0,448	0,440	0,441	0,503
x_q	0,237	0,242	0,262	0,237	0,322
x'_d	0,103	0,100	0,118	0,057	0,194
x_{kd}	0,0435	0,0595	0,082	0,021	0,110
x_{kq}	0,032	0,055	0,062	0,016	0,085
x''_d	0,057	0,065	0,069	0,039	0,143
x''_q	0,057	0,077	0,075	0,042	0,153
x_f	0,091	0,078	0,118	0,032	0,134
X_f	0,505	0,493	0,532	0,443	0,555
x_2	0,057	0,071	0,072	0,041	0,147
x_0	0,018	0,021	0,036	0,016	0,051
T_{d0}	4,13	2,91	1,70	0,705	5,4
T'_d	0,96	0,67	0,35	0,091	2,09
T''_d	0,039	0,046	0,029	0,013	0,050
T_a	0,095	0,163	0,052	0,024	0,133

* Данные о модели МЭИ взяты из [Л. 3, 4 и 7].

** Ввиду того, что полюса машины выполнены нормальным штампом, для повышения индукции по длине полюса равномерно распределено 30% немагнитных прокладок.

*** С турбиной.

ротора неявнополюсным он может быть превращен из гидрогенератора-модели в турбогенератор-модель со следующими основными данными: $P=30$ ква, $A=87,3$ а/см, $B_1=4\ 130$ гс, $r_a=0,00205$, $r_f=0,00192$, $x_{ad}=1,51$, $x_d=1,58$, $x'_d=0,129$, $x''_d=0,103$.

Активные сопротивления цепей возбуждения генераторов-моделей могут быть снижены до значений, соответствующих мощным генераторам-оригиналам, посредством введения в цепь возбуждения источников отрицательного активного сопротивления типа коллекторных однофазных последовательных генераторов. Однако генераторы-модели с меньшими активными относительными сопротивлениями представляют известное преимущество, поскольку в данном случае приходится компенсировать меньшую часть сопротивления r_f , имеющего повышенное значение.

Генераторы-модели МГ-25, МГ-18,7 и МГ-15, внутренние диаметры статорной стали которых равны соответственно 60,5; 49,5 и 45 см, выполнены по типу синхронных машин 14-го габарита. Поэтому, несмотря на различную мощность, стоимость этих машин практически одинакова, а внешний диаметр их статоров равен 85 см.

Благодаря увеличенному внешнему диаметру удалось получить увеличенные высоту и площадь пазов статоров указанных машин, а следовательно, повышенные значения сечений статорной меди и необходимые относительные величины активного сопротивления статорных обмоток. Последние величины указанных машин равны или даже меньше соответствующей величины активного сопротивления статорной обмотки генераторов Куйбышевской гЭС.

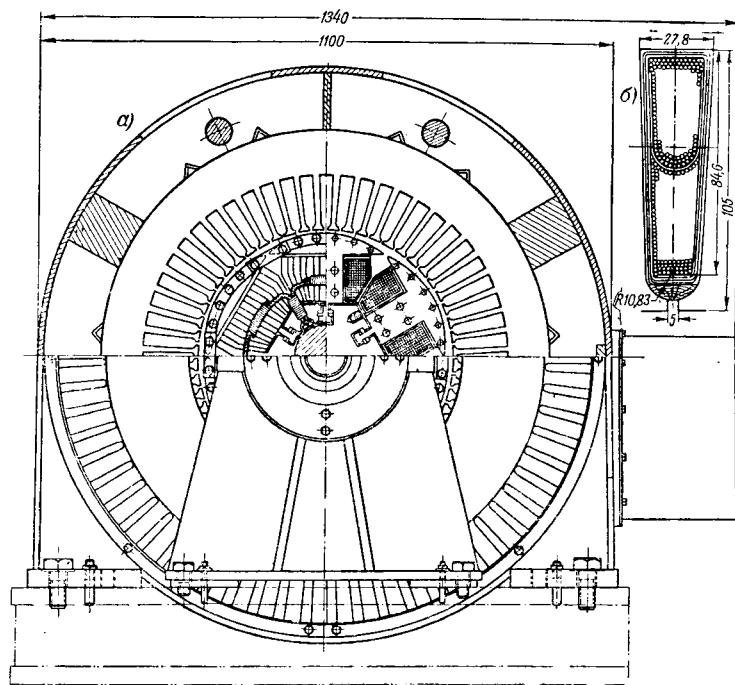


Рис. 4.

а — поперечный разрез генератора-модели типа МГ-18,7-6; б — укладка обмотки в паз.

Увеличение высоты пазов статора генераторов-моделей позволило в свою очередь увеличить индуктивное сопротивление их статорных обмоток, которое получилось заметно меньше соответствующего сопротивления генераторов Куйбышевской гЭС. Таким образом, оказалось возможным несколько уменьшить величину дополнительных индуктивных сопротивлений, включаемых в цепь статора. Внешний диаметр статора генератора-модели СГ-18,7, выполненного на основе синхронных машин 11-го габарита, равен 56, а внутренний —

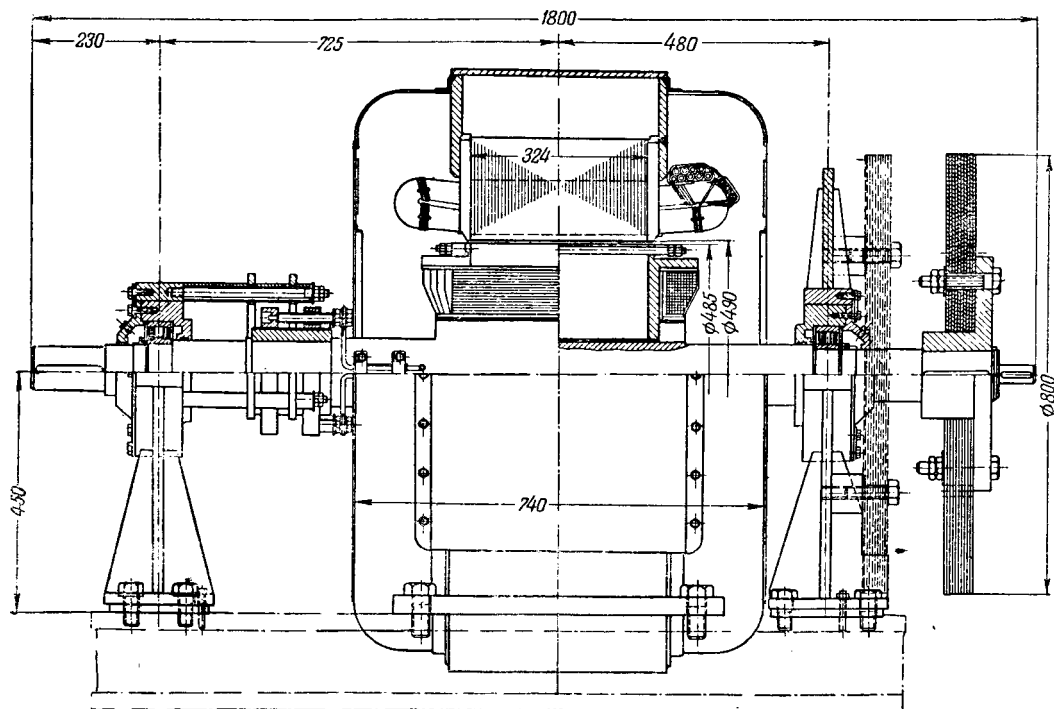


Рис. 5. Продольный разрез генератора-модели типа МГ-18,7-6.

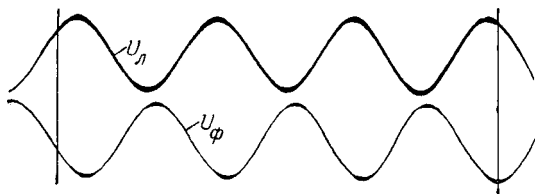


Рис. 6. Кривые фазного и линейного напряжений.

40,5 см, поэтому и в этом случае высота и площадь пазов статора увеличены до необходимых значений. Кроме того, предусмотрено включение в цепь статора источника отрицательных активных сопротивлений в виде трехфазного последовательного коллекторного генератора [Л. 2, 5 и 6]. При практическом моделировании электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва пришлось предусмотреть включение в цепь статора подобных

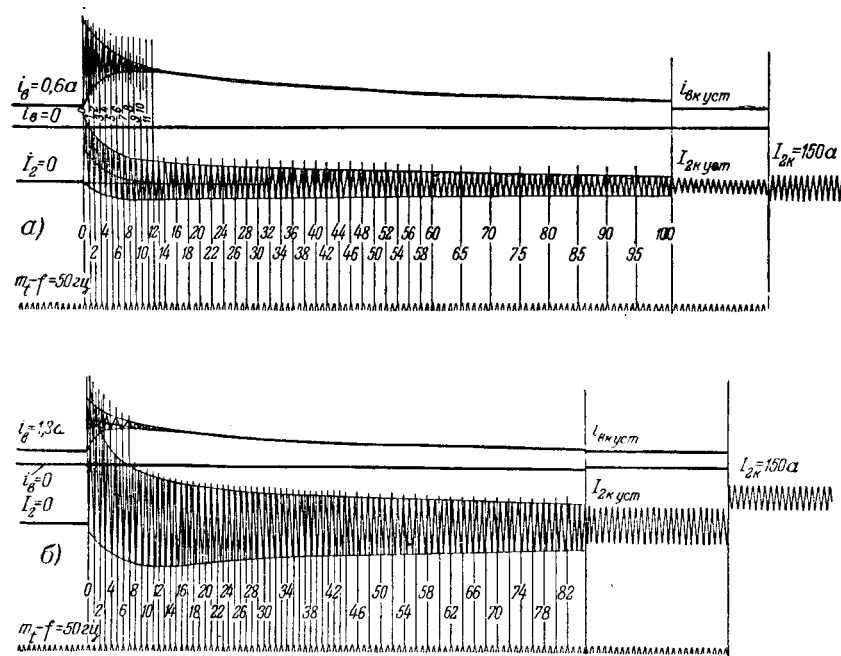
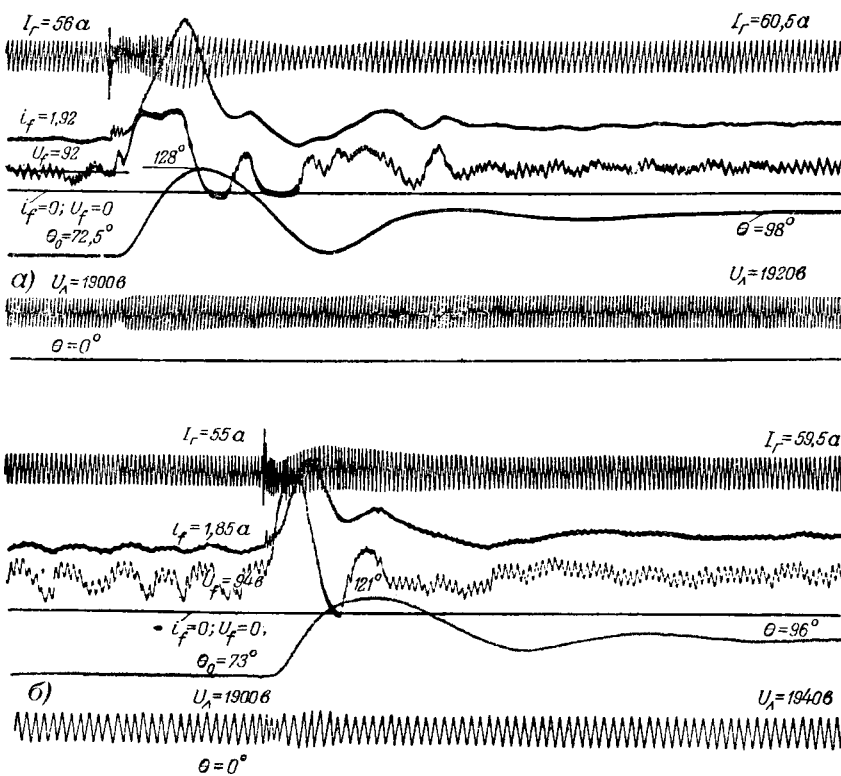
трехфазных коллекторных генераторов для компенсации активных сопротивлений соединительных кабелей, контактов и т. п.

Генераторы-модели имеют съемные демпферные клетки, позволяющие исследовать работу систем с генераторами, имеющими неполные демпферные клетки или вовсе их не имеющими. На роторах генераторов-моделей МГ-25; МГ-18,7 и СГ-18,7 имеются третьи кольца, позволяющие иметь на полюсах поперечную обмотку и осуществлять поперечное регулирование.

Для получения синусоидальной формы кривой напряжения генераторы-модели МГ-25, МГ-18,7 и СГ-18,7 имеют на статоре пазы, скошенные на одно зубцовое деление. Они также имеют целое число пазов на полюс и фазу, что позволяет при шести полюсах образовать на статоре шесть отдельных групп обмоток. При номинальной мощности две группы соединяются последовательно и три — параллельно, а при пониженной в 2,25 раза мощности три группы соединяются последовательно и две — параллельно.

Общий вид двух синхронных генераторов-моделей типа МГ-25-1000, установленных в лаборатории электродинамического моделирования Ленинградского отделения Института автоматики и телемеханики, представлен на рис. 4, а продольный разрез одного из генераторов-моделей — на рис. 5.

Синхронные генераторы-модели МГ-25-1000 были подробно исследованы как в отношении установившихся, так и переходных режимов работы.

Рис. 7. Осциллограммы токов при трехфазном коротком замыкании.
а — при напряжении 115 в; б — при напряжении 230 в.Рис. 8. Осциллограммы токов, напряжений и углов при внезапном коротком замыкании на промежуточном участке модели линии электропередачи за установкой продольной компенсации.
а — возбуждение регулируется по току и его производным; б — возбуждение регулируется по углу и его производным.

На рис. 6 приведены кривые фазного и линейного напряжений. Благодаря тому, что пазы статора скошены на одно зубцовое деление, гармоники пазовых э. д. с. исключены, и кривые напряжений имеют вполне плавный характер, без зубцовых пульсаций.

На рис. 7 представлены осциллограммы токов при внезапном трехфазном коротком замыкании при напряжении 115 и 230 в. Первый опыт (при 115 в) дал возможность определить ненасыщенное значение параметров и постоянных времени, а второй (при 230 в) — насыщенное.

На рис. 8 приводятся осциллограммы, иллюстрирующие поведение генератора-модели МГ-25-1000 при его работе на шины бесконечной мощности через модель дальней электропередачи при внезапном коротком замыкании на промежуточном участке линии за установкой продольной компенсации.

Приложение I. Вывод основных соотношений. Синхронная реактивность

$$x_{ad} = k_{ad} \frac{F_a}{F_\delta}, \quad (I,1)$$

но так как

$$F_\delta = 1,6 \cdot k_C k_B B_{\delta_1} \delta_{мин}, \quad (I,2)$$

а

$$F_a = 2,12 \frac{\omega_s k_w}{p} I_\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} A \cdot \tau \cdot k_w, \quad (I,3)$$

то

$$x_{ad} = 0,44 \frac{k_{ad} k_w}{k_B k_C} \frac{A}{B_{\delta_1}} \frac{\tau}{\delta_{мин}}. \quad (I,4)$$

Для моделей синхронных машин с синусоидальным распределением индукции вдоль воздушного зазора, как это имеет место в моделях Ленинградского отделения ИАТ, могут быть приняты следующие средние значения коэффициентов, входящих в формулу (I,4): $k_{ad} = 1,08$; $k_w = = k_p k_y = 0,925$; $k_C = 1,1$ (полузакрытые пазы) и $k_B = 1,0$. Подставив эти значения в формулу (I,4), получим формулу для ориентировочных расчетов

$$\frac{A}{B_{\delta_1}} \cdot \frac{1}{\delta_{мин}} = \frac{x_{ad}}{k_3 \tau}, \quad (I,5)$$

где

$$k_3 = 0,44 \frac{k_{ad} k_w}{k_B k_C} \approx 0,4. \quad (I,6)$$

При температуре 75°C, принимаемой для мощных машин-оригиналов, омическое сопротивление обмотки ротора (в относительных единицах)

$$r_f = \frac{333}{f} \cdot \frac{F_a}{2\Phi} \frac{k_{ad}^2 2l_e}{\omega_e q_e}, \quad (I,7)$$

где l_e — длина полувитка обмотки возбуждения,

$$\Phi = k_\Phi \Phi_1 = \frac{2}{\pi} k_\Phi B_{\delta_1} l_t \cdot \tau. \quad (I,8)$$

При частоте $f = 50$ гц и температуре 35°C, которая может быть принята для генераторов-моделей, имеющих малые плотности тока, сопротивление обмотки ротора

$$r_f = \frac{3330}{\epsilon_0} \cdot \frac{2}{1,15} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{k_{ad}^2 k_w}{k_\Phi} \cdot \frac{A}{B_{\delta_1}} \cdot \frac{l_e}{l_t} \cdot \frac{1}{2\omega_e q_e} = \\ = 129 \left(\frac{k_{ad}^2 k_w}{k_\Phi} \right) \cdot \frac{A}{B_{\delta_1}} \cdot \frac{l_e/l_t}{2\omega_e q_e}. \quad (I,9)$$

Здесь $2\omega_e q_e$ — приходящаяся на одно полюсное деление площадь сечения обмотки возбуждения. Выразим это сечение через коэффициент заполнения k_m по отношению к площади сектора, образуемого одним полюсом, т. е.

$$2\omega_e q_e = k_m \frac{\pi D_i^2}{4 \cdot 2p} = k_m \frac{\pi (2p\tau)^2}{8p\pi^2} 100 = \frac{p\tau^2}{2\pi} k_m \cdot 100, \quad (I,10)$$

где τ — в см. Коэффициент заполнения медью сечения полюса $k_m = k_p k'_m$, где k_p — коэффициент, равный отношению площади полюсного окна к площади полюсного сектора, а k'_m — коэффициент заполнения медью полюсного окна. Тогда

$$r_f = 8,1 \left(\frac{k_{ad}^2 k_w}{k_m k_\Phi} \right) \frac{l_e/l_t}{p\tau^2} \frac{A}{B_{\delta_1}}.$$

Как показал опыт выполнения генераторов-моделей в Ленинградском отделении ИАТ, можно получить $k_m = = 0,136$. Расчетная формула, при $p=3$ будет иметь вид:

$$\frac{A}{B_{\delta_1}} \frac{l_e}{l_t} = k_4 r_f p \tau^2, \quad (I,11)$$

где

$$k_4 = \frac{k_m k_\Phi}{8,1 k_{ad}^2 k_w} = 0,01565.$$

Можно задаться отношением длины лобовой части обмотки возбуждения к полюсному делению. Положим, что $\frac{l_s}{\tau} = 0,71$, тогда из отношения $\frac{l_e}{l_t} = \frac{l_s + l_t}{l_t}$ определим активную длину машины

$$l_t = 0,71 \frac{\tau}{\frac{l_e}{l_t} - 1}. \quad (I,12)$$

Аналогичным образом могут быть получены формулы для остальных сопротивлений синхронной машины.

Из формул в той записи, в какой они приведены в табл. I, исключаются абсолютные размеры обмоток и магнитопровода, потоки и н. с.; в них фигурируют лишь относительные размеры, площадь сечения меди на полюс (для активных сопротивлений) и отношение основных электромагнитных показателей $\frac{A}{B_{\delta_1}}$, характеризующих всякую серию электрических машин и закономерно изменяющихся в широком интервале полюсных делений τ .

К указанным выше соотношениям для сопротивлений необходимо добавить соотношение для инерционной постоянной

$$H_j = 2,74 \frac{GD^2 n^2}{P} 10^{-6}. \quad (I,13)$$

Но, учитывая, что мощность

$$P = 14,2 \cdot 10^{-10} \tau^2 l_t p k_w AB_{\delta 1}, \quad (I,14)$$

вес

$$G = \frac{\pi D_t^2 l_t}{4} k_t = \frac{\tau^2 p^2 l_t}{\pi} k_t, \quad (I,15)$$

а

$$GD^2 = \frac{\tau^2 p^2 l_t}{\pi} k_t \left(\frac{2p\tau}{\pi} k_g \right)^2 = \frac{4}{\pi^3} \tau^4 p^4 k_j l_t,$$

где

$$k_j = k_t k_g^2,$$

получим:

$$H_j = 2,74 \frac{4}{\pi^3} \frac{\tau^4 p^4 k_j l_t \cdot 3 \cdot 000210^{-6}}{14,2 \cdot 10^{-10} \tau^2 l_t p k_w AB_{\delta 1} p^2} =$$

$$= 0,224 \cdot 10^{10} \frac{k_j}{k_w} \frac{\tau^2 p}{AB_{\delta 1}} = k_1 \frac{\tau^2 p}{AB_{\delta 1}}. \quad (I,16)$$

Из выражения (I,16) найдем:

$$AB_{\delta 1} = k_1 \frac{p \tau^2}{H_j}. \quad (I,17)$$

Коэффициент k_1 , определенный для ряда построенных моделей с учетом двигателя, вращающего генератор, оказался достаточно стабильным и равным в среднем 1300.

Приложение II. Особенности проектирования элементов магнитопровода. Как указывалось выше,

в генераторах-моделях значения отношения $\frac{A}{B_{\delta 1}}$ являются пониженными, поэтому в них соответственно понижены и все индуктивности рассеяния, вследствие чего оказывается необходимым искусственно увеличить соответствующие магнитные проводимости.

Увеличение магнитной проводимости рассеяния полюсов достигается путем развития полюсной дуги. При этом значения α_p увеличиваются до 0,8 и более, а требуемое

отношение $\frac{x_{aq}}{x_{ad}}$ получается за счет соответствующего

выбора отношения $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}}$. Если принять $\alpha_p = 0,8$, а $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 3 \dots 5$, то распределение индукции в воздушном зазоре

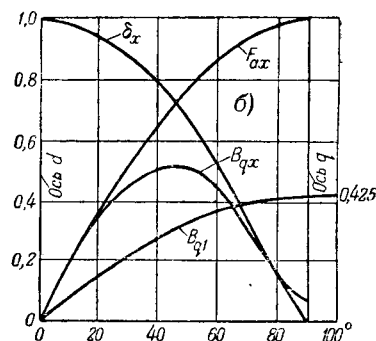
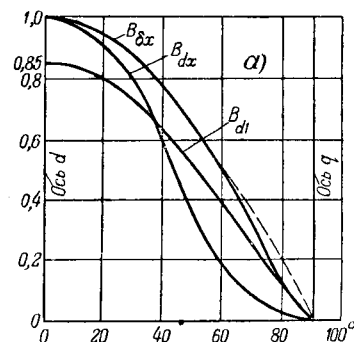


Рис. 10. Распределение полей реакции якоря в расточке.
а — поле продольной реакции;
б — поле поперечной реакции.

будет синусоидальным и будет обеспечено требуемое

отношение $\frac{x_{aq}}{x_{ad}}$.

Повышение магнитной проводимости пазов статора и ротора (пазы демферных обмоток, а также пазы моделей роторов турбогенераторов) достигается применением полузакрытых пазов с достаточно узкой щелью и большой высотой мостика (рис. 9).

Применение в моделях больших значений отношения $\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}}$, дающих практически синусоидальное распреде-

ление магнитной проводимости зазора, не позволяет пользоваться нормальной заводской методикой расчета н. с. и потоков статора и ротора по среднему зазору. При расчете моделей следует исходить из максимальной магнитной проводимости под серединой полюса и учитывать ее синусоидальное распределение по полюсной дуге. Распределение магнитной проводимости в междуполюсном пространстве должно быть найдено графически путем построения магнитных силовых трубок.

Общий порядок расчета следующий:

а) Для определения потока, создаваемого обмоткой возбуждения, рассчитывается магнитная цепь по минимальному зазору и определяется индукция под серединой полюса. В силу сказанного выше

$$B_{\delta \max} = B_{\delta 1} \quad (II,1)$$

и

$$\Phi \approx \frac{2}{\pi} \tau l_t B_{\delta 1}, \quad (II,2)$$

если пренебречь незначительным искажением синусоиды в междуполюсном пространстве (рис. 10).

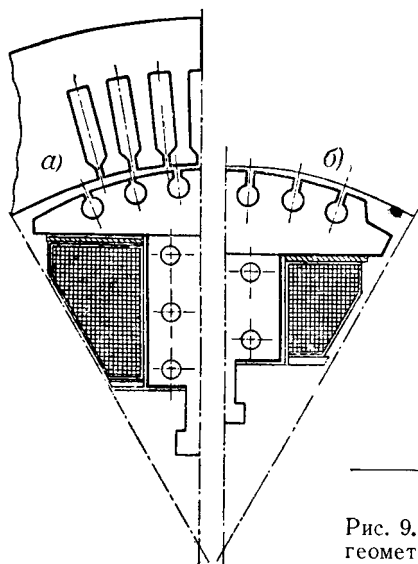


Рис. 9. Сравнение полюсной геометрии в двух моделях.
а — МГ-25-1000; б — МГ-15-1000.

6) Поля реакции якоря находятся из следующих рассуждений. Индукция поля реакции под серединой полюса

$$B_{d\max} \approx \frac{F_{a\max}}{1,6 \cdot k_C \cdot \delta_{\min}}, \quad (II,3)$$

где

$$F_{a\max} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2} I \omega k_w}{p} = 2,7 \frac{I \omega k_w}{p}. \quad (II,4)$$

В любой другой точке полюсной дуги

$$B_{dx} = \frac{F_{a\max}}{1,6 \cdot k_C \delta_x} \cos x, \quad (II,5)$$

где

$$\delta_x = \frac{\delta_{\min}}{\cos x}. \quad (II,6)$$

Следовательно,

$$B_{dx} = \frac{F_{a\max}}{1,6 \cdot k_C \delta_{\min}} \cos^2 x. \quad (II,7)$$

Значение амплитуды основной гармоники продольного поля реакции якоря может быть получено из разложения в ряд Фурье (рис. 10,а):

$$B_{d1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_{dx} \cos x dx, \quad (II,8)$$

или

$$\begin{aligned} B_{d1} &= \frac{F_{a\max}}{1,6 \cdot k_C \delta_{\min}} \cdot \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^3 x dx = \\ &= 0,85 \frac{F_{a\max}}{1,6 \cdot k_C \delta_{\min}}, \end{aligned} \quad (II,9)$$

откуда

$$\frac{B_{d1}}{B_{d\max}} = 0,85.$$

Поскольку поле возбуждения распределено синусоидально,

$$\frac{B_{\delta 1}}{B_{\delta \max}} = 1. \text{ Следовательно,}$$

$$k_d = \frac{B_{d1}}{B_{d\max}} : \frac{B_{\delta 1}}{B_{\delta \max}} = \frac{0,85}{1} = 0,85. \quad (II,10)$$

Значение амплитуды основной гармоники поперечного поля реакции якоря также получается из разложения в ряд Фурье (рис. 10,б):

$$B_{q1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_{qx} \sin x dx =$$

$$\begin{aligned} &= \frac{4}{\pi} \frac{F_{a\max}}{1,6 \cdot k_C \delta_{\min}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 x \cos x dx = \\ &= 0,425 \frac{F_{a\max}}{1,6 \cdot k_C \delta_{\min}}. \end{aligned} \quad (II,11)$$

Следовательно, коэффициент поперечной реакции

$$k_q = \frac{B_{q1}}{B_{q\max}} : \frac{B_{\delta 1}}{B_{\delta \max}} = 0,425, \quad (II,12)$$

реактивность якоря по оси d

$$x_{ad} = k_d \frac{F_{a\max}}{F_{\delta}}, \quad (II,13)$$

реактивность якоря по оси q

$$x_{aq} = k_q \frac{F_{a\max}}{F_{\delta}}. \quad (II,14)$$

Таким образом, благодаря синусоидальному изменению магнитной проводимости зазора получается, с одной стороны, хорошая форма кривой поля и напряжения (рис. 10) и, с другой, — весьма близкое к значениям, соответствующим мощным машинам-оригиналам, отношение $\frac{x_{ad}}{x_{aq}}$.

Литература

1. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергониздат, 1949.
2. М. П. Костенко и Е. Д. Трейвиш. Моделирование электрических машин и трансформаторов при экспериментальном исследовании устойчивости параллельной работы электрических станций. Труды ЛПИ, № 1, 1946.
3. В. А. Веников и А. В. Иванов-Смоленский. Синхронный генератор для динамического моделирования электрических систем. Электричество, № 8, 1951.
4. М. П. Костенко. Моделирование электромашиного оборудования при изучении устойчивости параллельной работы энергосистем, связанных с дальними линиями передачи. Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук, № 12, 1953.
5. М. П. Костенко. Электродинамическая модель для исследования устойчивости. Электричество, № 9, 1951.
6. А. И. Важнов и Э. С. Мкртчян. Трехфазный последовательный коллекторный генератор как отрицательное сопротивление. Электричество, № 11, 1952.
7. В. А. Веников и др. Краткое описание динамических моделей электрических систем. Изд. МЭИ. 1955.

[26. 3. 1955]



Математическое моделирование динамических систем¹

Член-корр. Академии наук СССР В. А. ТРАПЕЗНИКОВ

Развитие современной техники характеризуется интенсификацией процессов, повышением мощностей и скоростей, увеличением нагрузок, повышением точности действия установок. Все это предъявляет новые, более высокие требования к организации научных исследований. В послевоенные годы в области техники исследования приобретают большое значение методы и средства моделирования.

Цель настоящей статьи — познакомить широкие круги инженеров с некоторыми возможностями моделирующих устройств.

К числу сложных задач, требующих для своего решения применения средств моделирования, относятся разнообразны задачи динамики. Исследование динамических систем встречается ряд трудностей. Часто элементы систем работают в нелинейной части их характеристик. Исследование же нелинейных динамических систем со многими степенями свободы аналитическими методами затруднительно. Методы численного интегрирования в силу их громоздкости также не могут привести к необходимому результату. Существенную помощь оказывают здесь средства вычислительной техники и моделирующие устройства.

Однако значение моделирующих установок не ограничивается решением уравнений, трудно поддающихся исследованию аналитическими методами. Само по себе исследование динамических систем, в частности развитие теории автоматического регулирования, получает иной характер при сочетании аналитических и экспериментальных методов исследования. Изучение динамических процессов при помощи моделирующих устройств позволяет сосредоточить внимание на важнейших явлениях, определяющих поведение системы, отбросить второстепенные, несущественные факторы, подметить новые свойства системы, что дает толчок новым теоретическим исследованиям. Аналитические и экспериментальные методы представляют собой два взаимно дополняющих направления научной работы.

Известны [Л. 1 и 2] два принципиально различных направления в моделировании: метод физического моделирования и метод математического моделирования. Физическое моделирование предусматривает использование модели той же физической природы, что и оригинал. Примером является продувка модели самолетов в аэродинамической трубе. Другим примером являются электродинамические модели линий электропередачи [Л. 3 и 4], в которых электрические генераторы моделируются при помощи электрических генераторов меньших габаритов, линии электропередачи имитируются сопротивлениями, индуктивностями, емкостями и т. д.

Физическое моделирование динамических систем, в частности автоматических устройств, наи-

более целесообразно в тех случаях, когда система уравнений, описывающая явление, столь сложна, что ее исследование при помощи других средств, в том числе средств счетно-решающей техники, приводит к чрезмерным трудностям. В частности, именно эти обстоятельства делают целесообразным исследование ряда явлений в энергосистемах с использованием физических моделей.

Методы математического моделирования реализуются в двух направлениях: построением физических аналогов и построением счетно-решающих устройств.

При методике физических аналогий используется модель, имеющая иную физическую природу, чем оригинал, но описываемая тем же дифференциальным уравнением. Например, при помощи электродинамической колебательной системы можно исследовать колебания других систем.

Вторым направлением математического моделирования, которое получило существенное развитие в последние годы, является метод, базирующийся на применении счетно-решающих устройств. В отличие от физических аналогов, здесь нет прямого соответствия величин, характеризующих изучаемое явление в модели и оригинале. Модели, построенные на принципе счетно-решающих устройств, основаны на непрерывном проведении отдельных элементарных математических операций (сложение, умножение, интегрирование). Использование этих моделей предполагает, что уравнение, описывающее систему и его коэффициенты, известны. Если уравнение отдельных звеньев системы неизвестно, то математическая модель может быть сопряжена с физической моделью или с оригиналом отдельных звеньев системы.

При исследовании большинства динамических систем наиболее гибким и универсальным оказывается метод математического моделирования, основанный на применении счетно-решающих устройств. Он позволяет решать разнообразные линейные и нелинейные задачи, обеспечивает быстроту изменения коэффициентов, установку различных начальных условий, введение всевозможных возмущений. Он позволяет воспроизводить процесс в различных масштабах времени, в том числе и в натуральном.

Однако методы физического и математического моделирования не следует противопоставлять: каждый имеет свои преимущества и недостатки, каждый имеет свои области применения. В ряде случаев бывает целесообразно использовать в одной установке элементы как физических, так и математических моделей.

В последние годы получили большое развитие быстродействующие электронные цифровые машины. Эти машины позволяют решать сложнейшие задачи с высокой точностью и скоростью. Цифровые машины можно использовать и для построения моделирующих установок. Однако скорость цифровых машин не всегда оказывается достаточной для решения задач моделирования

¹ Краткое изложение докладов автора на общем собрании Отделения технических наук Академии наук СССР 1. 2. 1955 г. и в Московском энергетическом институте им. Молотова 14. 2. 1955 г.

при сочетании модели (цифровой машины) с реальной аппаратурой. Кроме того, решение многих задач требует перехода от одной системы дифференциальных уравнений к другой, что вызывает дополнительные осложнения при использовании цифровых машин. В силу перечисленных причин, а также вследствие более высокой стоимости и сложности эксплуатации в настоящее время для большинства случаев следует отдать предпочтение моделирующим устройствам непрерывного действия. В некоторых случаях целесообразно сочетание таких устройств с цифровыми машинами.

Моделирующие установки непрерывного действия, построенные на принципе счетно-решающих устройств, базируются на устройствах, интегрирующих дифференциальные уравнения. Такие устройства могут осуществляться при помощи механических, электромеханических и электронных элементов. Опыт показал, что наиболее эффективны электронные моделирующие установки. Их развитие тесно связано с развитием электронных интеграторов.

Первый электронный интегратор разработан в Советском Союзе в Энергетическом институте Академии наук СССР в 1946 г. [Л. 5]. Затем разработку электронных интеграторов и моделирующих установок вел ряд научно-исследовательских организаций.

Министерство машиностроения и приборостроения выпускает серийно ряд типовых электронных моделей. Модель ИПТ-4 предназначена для решения обыкновенных линейных дифференциальных уравнений до 6-го порядка с постоянными и переменными во времени коэффициентами. Она представляет собой стационарную установку, выполненную в виде стенда. Модель ИПТ-5, решающая линейные уравнения до 12-го порядка, состоит из отдельных блоков. Модель ИПТ-9 предназначена для решения линейных дифференциальных уравнений до 16-го порядка. К этим моделям разработаны нелинейные приставки. Кроме этих линейных установок, выпускается также электронная модель, предназначенная для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений.

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР за период 1949—1953 гг. выпустил линейные модели типов ЭМУ-1, ЭМУ-2, ЭМУ-3 и ЭМУ-4. Этими моделями оборудованы лаборатории института. Последняя модель типа ЭМУ-5, разработанная институтом в 1954 г., будет описана ниже.

Работы в области электронного моделирования весьма интенсивно ведутся и за рубежом: в США, Англии, Франции, Швеции, Норвегии, Японии. Только в США в области электронного моделирования работает свыше 25 фирм, в том числе многие самолетостроительные фирмы; военная авиация и флот субсидируют институты и университеты. Модели выпускаются различных типоразмеров как линейные, так и нелинейные. В США наметилась тенденция перехода к малогабаритным моделям.

Рассмотрим принцип действия моделирующей установки, основанной на использовании электронных счетно-решающих элементов.

Предположим что нужно интегрировать нелинейное дифференциальное уравнение вида:

$$\ddot{x} + a\dot{x} + bx + cx^3 = A \cos \omega t. \quad (1)$$

Это можно выполнить при помощи нескольких решающих блоков, выполняющих элементарные математические операции. В рассматриваемой модели математические величины представляются в виде напряжений на входе и выходе блоков. Решающие блоки соединяются между собой в зависимости от вида уравнения. Например, для нашего случая собирается схема, изображенная на рис. 1, которая и обеспечит интегрирование уравнения (1). Это видно из следующего.

Напишем уравнение (1) в виде:

$$\ddot{x} = -a\dot{x} - bx - cx^3 + A \cos \omega t. \quad (2)$$

Предположим, что значение $\ddot{x}$, представляемое напряжением в точке 1, известно. Подав его на вход интегрирующего блока II, мы получим на выходе этого блока в точке 2 напряжение, представляющее величину $\dot{x}$, а в точке 3 на выходе следующего блока III — величину x . Подав напряжения из точек 2 и 3 на входы масштабных блоков IV и V, получим на их выходах напряжения, представляющие величины $-a\dot{x}$ и $-bx$. Напряжение точки 3, поданное на вход блока функционального преобразователя VI, даст на его выходе величину $-cx^3$.

Представляя внешнее возмущение $A \cos \omega t$ в виде напряжения в точке 4 и подавая на вход суммирующего блока I четыре напряжения $-a\dot{x}$, $-bx$, $-cx^3$, $A \cos \omega t$, на выходе этого блока получим сумму напряжений. Но согласно (2) эта сумма равна $\ddot{x}$, которую мы приняли за исходную величину. Следовательно, схема рис. 1 соответствует уравнению (1) и напряжения в точках 1, 2 и 3 в известном масштабе дают значения $\ddot{x}$, $\dot{x}$, x . Эти величины могут быть записаны обычным магнитным осциллографом или другим способом.

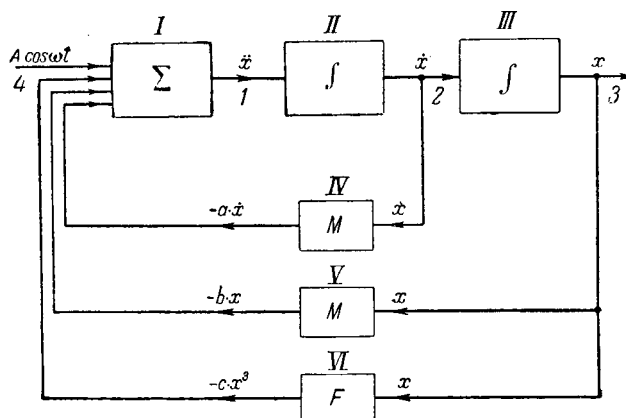


Рис. 1. Блочная схема для решения уравнения.

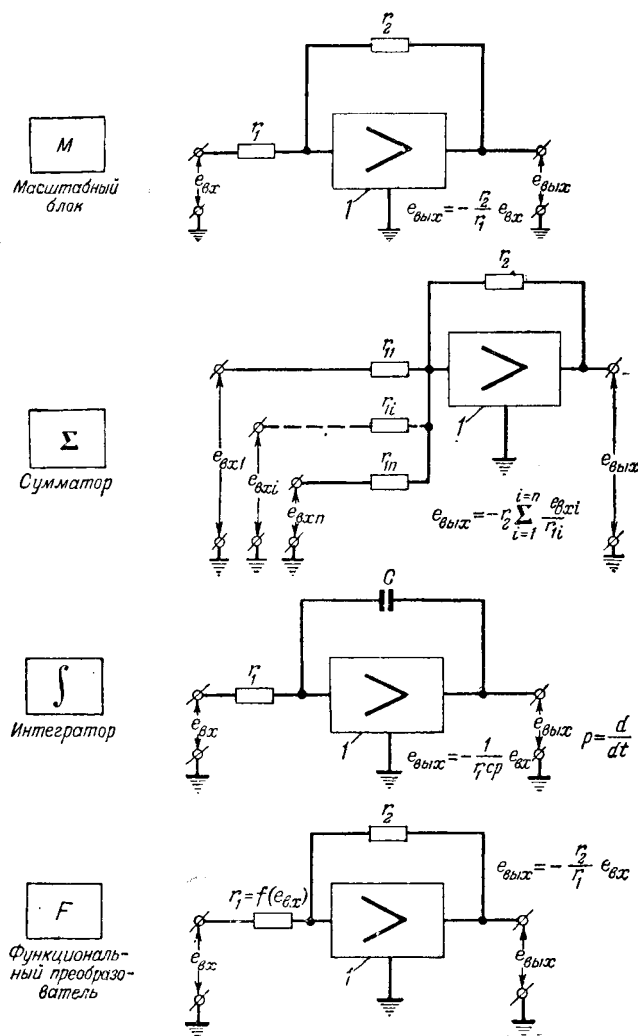


Рис. 2. Принципиальные схемы основных решающих блоков.

Чтобы учесть начальные условия, разъединяют блоки и устанавливают на выходе блоков II и III напряжения, соответствующие начальным условиям для x и $\dot{x}$. Затем мгновенно соединяют блоки между собой, и тогда процесс развивается в схеме соответственно набранному уравнению и заданным начальным условиям.

В электронных моделирующих установках основой решающего блока является усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления (от $5 \cdot 10^4$ до 10^5) и отрицательной обратной связью.

Напряжение на выходе усилителя

$$e_{вых} = -\frac{Z_2}{Z_1} \frac{1}{1 + \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{1}{k}} e_{вх},$$

где Z_1 — комплексное сопротивление входного элемента усилителя;

Z_2 — комплексное сопротивление элемента обратной связи;

k — коэффициент усиления усилителя;

$e_{вх}$ — напряжение на входе усилителя.

При больших коэффициентах усиления с достаточной точностью

$$e_{вых} = -\frac{Z_2}{Z_1} e_{вх}.$$

На рис. 2 показаны принципиальные схемы основных решающих блоков. Знак напряжения на выходе усилителя обратен знаку на входе. Это позволяет осуществить отрицательную обратную связь, а также инvertировать знак напряжения в любой точке схемы, пользуясь масштабным блоком с передаточным коэффициентом, равным -1 . Изменение знака на выходе усилителя следует учитывать при соединении блочной схемы, добавляя соответствующие инvertирующие блоки (на рис. 1 изменение знака напряжения для наглядности не учтено).

Решающий усилитель обычно выполняется в виде трехкаскадного усилителя постоянного тока с выходным напряжением, изменяющимся линейно в пределах ± 100 в.

На рис. 3 показана схема, а на рис. 3а — внешний вид решающего усилителя модели типа ЭМУ-5, разработанного В. В. Гуровым в Институте автоматики и телемеханики. Усилитель имеет экономичный выходной каскад, обеспечивающий, примерно, четырехкратное снижение установленной мощности источников питания по сравнению с используемыми, например, в моделях типов ИПТ-4, ИПТ-5 и др.

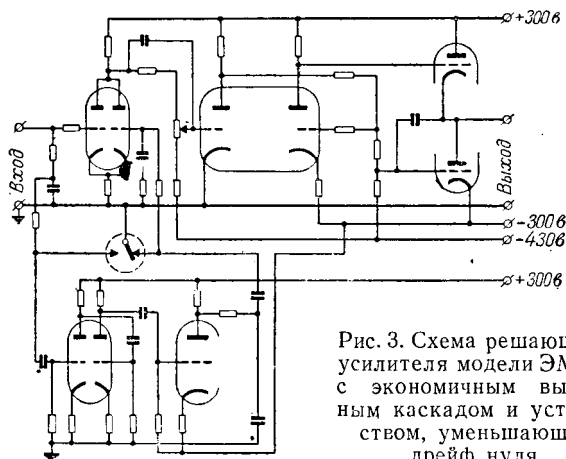


Рис. 3. Схема решающего усилителя модели ЭМУ-5 с экономичным выходным каскадом и устройством, уменьшающим дрейф нуля.



Рис. 3а. Внешний вид решающего усилителя модели ЭМУ-5.

Ширина полосы пропускания усилителя ЭМУ-5 составляет около 3 кГц. Емкость монтажных цепей при постановке усилителя в модель уменьшает ширину полосы пропускания примерно до 500 Гц.

Современные исследования динамических систем требуют решения разнообразных нелинейных уравнений. Нелинейности, встречающиеся при решении этих задач, в целях моделирования можно разбить на следующие группы:

- 1) типовые нелинейности: ограничение, люфт, трение, релейные характеристики с зоной нечувствительности, с петлеобразными характеристиками и т. п.;
- 2) фиксированные нелинейности: синус, косинус, квадрат и т. п.;
- 3) нелинейности произвольного вида (функции одной переменной);
- 4) функции двух переменных;
- 5) произведение (частное) двух величин.

Кроме того, моделирование систем автоматического регулирования требует воспроизведения временного запаздывания, переменных во времени коэффициентов и разного рода помех.

Остановимся на схемах, реализующих некоторые из перечисленных нелинейностей.

На рис. 4,а приведена схема ограничения выходного напряжения усилителя при помощи диодов, включенных в цепь обратной связи усилителя. В работе [Л. 6] показано, что при помощи различного сочетания решающего усилителя и диодных ограничителей можно воспроизвести и более сложные нелинейные характеристики (сухое трение, люфт, релейные характеристики и т. п.). Сочетание решающих усилителей с диодными элементами позволяет также создать функциональные преобразователи и множительные устройства.

На рис. 4,б изображена разработанная А. Д. Таланцевым схема, удобная для осуществления нелинейных преобразователей. При малом значении напряжения $e_{вх}$ диоды 1, 2, ..., n заперты. По мере увеличения $e_{вх}$ диоды отпираются и сопротивления r_{11} , r_{12} и т. д. один за другим включаются параллельно к сопротивлению r_0 , общее сопротивление на входе усилителя падает, а следовательно, его передаточное отношение растет.

Подбирая сопротивления, можно аппроксимировать требуемую кривую при помощи кусочно-ломаной функции. Если, например, подобрать сопротивления так, чтобы общее сопротивление на входе было обратно пропорционально входному напряжению, то получится квадратичный блок, у которого

$$e_{вых} = a e_{вх}^2.$$

Иногда удается получить функциональные преобразователи, включая диодные цепочки в

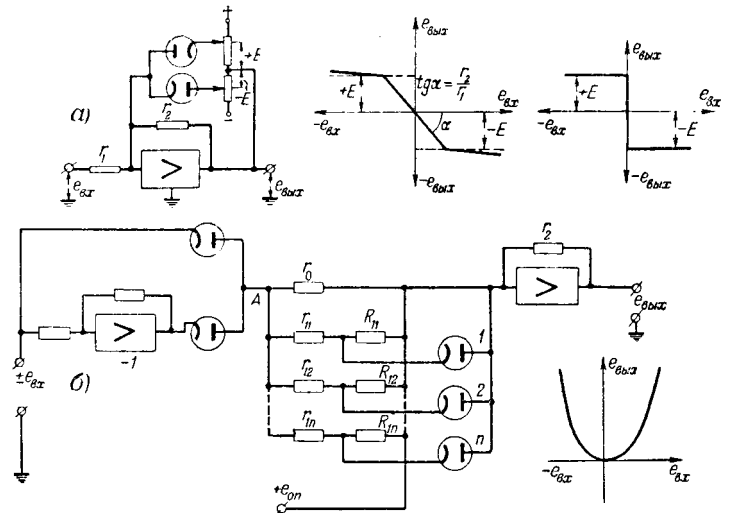


Рис. 4.

а — схема диодного ограничения; б — схема функционального преобразователя.

обратную связь усилителя и создавая, таким образом, значение r_2 , зависящее от $e_{вх}$. При помощи таких схем целесообразно воспроизводить различные элементарные функции: $\sin x$, $\cos x$ и др. Можно также воспроизвести функцию, изображающую кривую намагничивания электрической машины для исследования динамических процессов в сложных системах электропривода.

Диодные функциональные преобразователи для получения произвольных нелинейностей (универсальные преобразователи) в некоторых случаях получаются чрезмерно сложными, особенно, если приходится воспроизводить функции, имеющие несколько экстремумов. В этом случае оказывается целесообразным использовать преобразователи с электроннолучевыми трубками. Тогда функциональная зависимость осуществляется при помощи ширмы, вырезанной по необходимому профилю и помещаемой перед экраном электроннолучевой трубки.

Блоки, воспроизводящие функцию двух переменных, пока еще весьма сложны и их описания мы не приводим.

Произведение двух функций e_x и e_y чаще всего осуществляется при помощи уже описанных блоков в соответствии с формулой

$$e_x e_y = \frac{1}{4} [(e_x + e_y)^2 - (e_x - e_y)^2].$$

Блок умножения требует использования по крайней мере двух решающих усилителей.

Блок запаздывания, воспроизводящий какую-либо функцию с задержкой по времени, может быть построен, как это предложено В. В. Гуровым [Л. 7], на основе запоминающих конденсаторов. Эта система наиболее удобна для получения запаздываний от 1 мсек до 1 мин. Для получения запаздываний до 20 мин целесообразно записывать функцию на магнитной ленте. Такой блок построили В. А. Иванов и Н. А. Барцал в Институте автоматики и телемеханики.

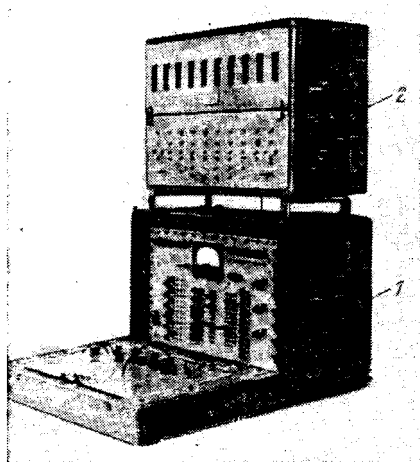


Рис. 5. Электронная моделирующая установка типа ЭМУ-5.

1 — линейная часть установки; 2 — нелинейная приставка.

Изменение коэффициентов во времени обычно воспроизводят при помощи программного механизма, изменяющего сопротивление на входе блока, или при помощи потенциометра, включенного на выходе блока.

Описанные блоки позволяют решать большинство задач, возникающих при исследовании динамических систем. На их основе построена электронная моделирующая установка типа ЭМУ-5 (рис. 5). Нижний блок 1 представляет собой линейную часть установки. Он имеет 12 усилителей и может решать обыкновенные дифференциальные уравнения до 6-го, а иногда и до 8-го порядка. Соединение между собой двух, трех и более установок при централизованном управлении всей системой обеспечивает решение уравнений до 12,18 и соответственно более высоких порядков.

Каждый линейный блок содержит четыре типичные нелинейности (типа ограничения или люфта). Блок имеет наборное поле, на котором при помощи вилок набирается требуемое уравнение. Верхний блок 2 является нелинейной приставкой и соединяется с линейной частью уста-

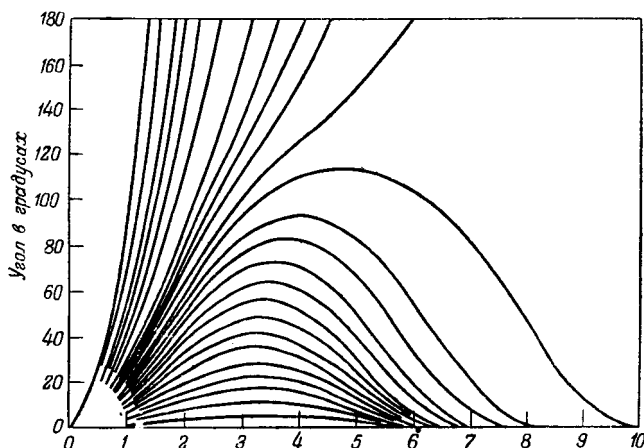


Рис. 6. Качания синхронной машины, найденные аналитически.

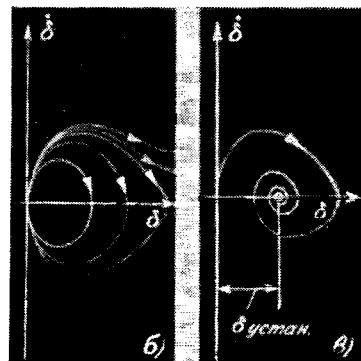
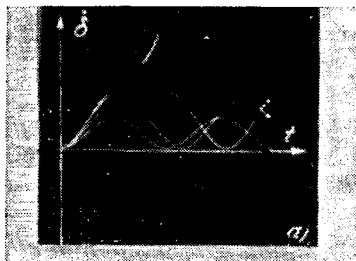


Рис. 7. Качания синхронной машины.

а — найденные при помощи моделирующей установки и сфотографированные с электроннолучевой трубки; б — то же изображенные на фазовой плоскости; в — то же, что и б, но при наличии демпфирования.

новки при помощи штеккерных разъемов. Он содержит шесть фиксированных нелинейностей ($\sin x$, $\cos x$, x^2 , x^3 и др.) и два множительно-делительных устройства. К линейной части модели ЭМУ-5 вместо нелинейной приставки может быть присоединен отдельный блок умножения — деления или функционального преобразования. Модель снабжается вспомогательной аппаратурой для настройки.

Установка имеет небольшие габариты: линейная часть 1 — $670 \times 600 \times 500$ мм, нелинейная приставка — $670 \times 500 \times 330$ мм. Установка построена с использованием дешевых деталей, тем не менее ее точность соответствует точности наиболее совершенных электронных моделей. При решении нелинейных уравнений погрешность обычно не выходит за пределы 3%, при решении нелинейных задач — за пределы 5...7%. Разработка установки потребовала решения многих сложных вопросов, изложение которых выходит за пределы настоящей статьи.

Моделирующая установка ЭМУ-5 позволяет исследовать самые разнообразные динамические системы. Иллюстрируем это несколькими примерами.

Качание ротора синхронной машины при отсутствии демпфирования описывается уравнением

$$\ddot{\delta} + A \cdot \sin \delta = F(t).$$

На рис. 6 показан первый полупериод качания при ступенчатом возмущении различной величины, рассчитанный на механическом интеграторе [Л. 8]. На рис. 7, а показаны кривые качаний, сфотографированные с экрана электроннолучевой трубки, присоединенной к модели. На рис. 7, б представлены качания, изображенные на фазовой плоскости. В этом случае по оси абсцисс отложен угол отклонения ротора δ , по оси ординат — скорость его отклонения $\dot{\delta}$. На рис. 7, в показаны качания синхронной машины при наличии демпфирования, также изображенные на фазовой плоскости.

На рис. 8 изображено найденное на модели решение уравнения Матье, имеющего большое



Рис. 8. Решение уравнения Маттье.

значение при исследовании задач частотной модуляции:

$$\ddot{y} + \frac{\omega^2}{4} (a - 2q \cdot \cos \omega t) \cdot y = 0,$$

при $\omega=1$, $q=2$ и $a=2,38$.

На рис. 9,а на фазовой плоскости показаны автоколебания релейной системы автоматического регулирования, описывающейся уравнением

$$\ddot{x} + 2,5 \dot{x} + x = 400 Z,$$

где $Z=f(x)$ — функция, изображающая характеристику реле, имеющего зону нечувствительности и коэффициент возврата, меньший единицы (рис. 9,б).

Электронные моделирующие установки позволяют не только решать уравнения, но и исследовать реальную аппаратуру. В качестве примера можно назвать: исследование автоматического регулятора печи, котла, следящих систем, сложных систем электропривода, автопилота и многих других устройств.

Рассмотрим способ исследования автопилота.

Прежде чем установить автопилот на самолет, его изучают в лаборатории в самых разнообразных режимах, соответствующих различным условиям полета. С этой целью поступают следующим образом. Зная уравнение, описывающее движение самолета и его коэффициенты (например, уравнение крена самолета), набирают это уравнение на модели таким образом, что напря-

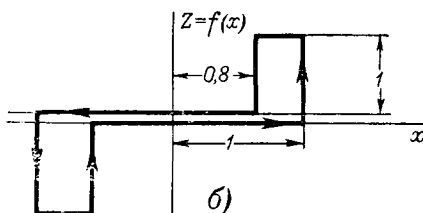
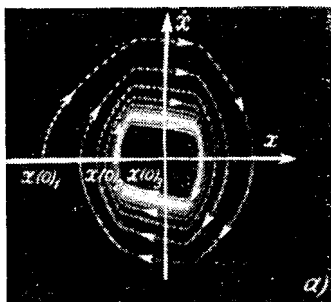


Рис. 9.

а — автоколебания релейной системы авторегулирования;
б — нелинейная функция.

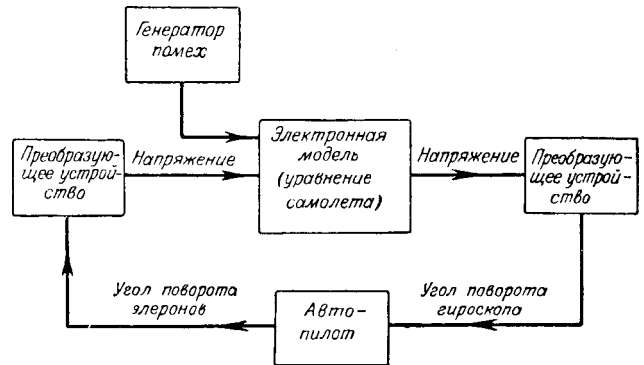


Рис. 10. Схема совместной работы электронной модели с реальной автоматической аппаратурой.

жение на входе в модель в некотором масштабе изображает поворот элеронов, а напряжение на выходе модели — угол крена самолета. Далее присоединяют к модели аппаратуру регулирования, в данном случае автомат крена. Но автомат крена реагирует на поворот гироскопа, а модель выдает этот угол в виде напряжения. Поэтому для связи модели с реальной аппаратурой необходимо превратить напряжение в угол поворота гироскопа. Это осуществляется при помощи преобразующего устройства, на которое устанавливается гироскоп. Автомат крена, реагирующий на поворот гироскопа при помощи рулевых машинок, поворачивает элероны. Угол поворота элерона необходимо преобразовать в напряжение, что легко осуществляется при помощи потенциометра, связанного с рулевой машинкой, вращающей элероны. Затем это напряжение следует ввести в модель.

Такая схема (рис. 10) обеспечивает динамику процесса, соответствующую условиям работы автопилота в полете, и дает возможность тщательно исследовать автоматическую аппаратуру в лаборатории, записав при помощи осциллографа переходные процессы во всех точках системы.

Моделирующие устройства позволяют изучать поведение системы при разнообразных видах помех. При исследовании автопилота такими помехами может являться ветер. С этой целью в модель вводят дополнительное напряжение от генератора помех. Если уравнение моделируемого объекта и его коэффициенты неизвестны, то нужно снять характеристики объекта экспериментальным путем (например, путем единичного толчка), а затем аппроксимировать найденную кривую переходного процесса при помощи уравнения, которое затем следует набрать на модели.

Вид преобразующего устройства зависит от исследуемой автоматической аппаратуры. В рассмотренном случае напряжение преобразовывалось в поворот платформы, на которой устанавливался гироскоп. При исследовании пневматических регуляторов необходимо преобразовать напряжение в давление воздуха и т. п.

На рис. 11 показано электрогидравлическое поворотное устройство, разработанное В. А. Хохловым и В. А. Котельниковым в Институте автоматики и телемеханики. Построение такого

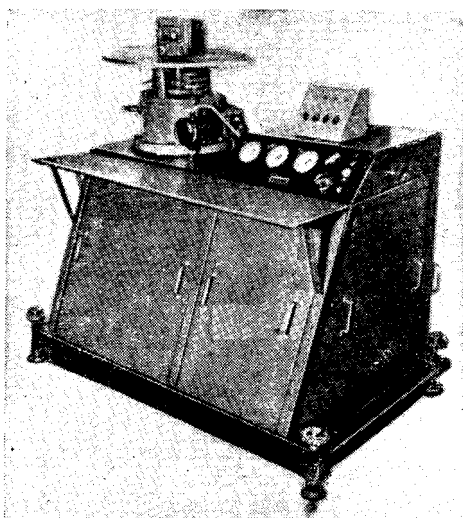


Рис. 11. Электрогидравлическое преобразующее устройство.

устройства является сложной задачей, если учесть, что, во избежание погрешностей, его динамические свойства должны быть значительно выше динамических свойств исследуемой аппаратуры. Устройство, изображенное на рис. 11, имеет выходную мощность около 1 квт и собственную частоту колебаний 35 гц.

Таким путем можно исследовать самые разнообразные системы, включающие автоматическую аппаратуру в полном комплекте или же лишь отдельные ее элементы. Приведенные примеры иллюстрируют небольшую часть возможностей моделирующих установок, в действительности они неизмеримо шире.

Может возникнуть сомнение в том, достаточно ли точность электронных моделей непрерывного действия. Для подавляющего большинства технических задач погрешность порядка 5% вполне допустима, так как значения коэффициентов, входящих в уравнения, обычно задаются со значительно меньшей точностью.

Электронные модели оказывают неоценимую помощь при исследовании разнообразных динамических систем во многих отраслях техники. Исключительное значение они имеют в автоматике. Можно сказать, что полноценное развитие теории и практики автоматического регулирования немыслимо без широкого использования средств моделирования.

Несомненно, что круг задач, охватываемых методами моделирования, будет непрерывно рас-

ширяться, а дальнейшая работа будет выявлять все новые пути и возможности использования моделирующих устройств. Сейчас уже ясны возможности дальнейшего совершенствования методов моделирования и моделирующих установок непрерывного действия, а также их сочетания с цифровыми вычислительными машинами. Открываются возможности использования таких установок не только для исследования динамических систем, но и для использования подобных установок в качестве устройств, автоматически управляющих производственными процессами.

Очевидно, жизнь выявит и другие направления развития и применения электронных счетно-решающих устройств.

Методами электронного моделирования должны овладеть широкие круги наших инженеров, а электронные моделирующие установки должны стать такой же распространенной аппаратурой, как осциллографы. Широкое развитие методов моделирования, несомненно, будет способствовать быстрейшему развитию нашей науки и техники.

Настоящая статья отражает некоторые результаты работ коллектива сотрудников Института автоматики и телемеханики, выполненных под руководством старшего научного сотрудника Б. Я. Когана и автора настоящей статьи.

Литература

1. Л. И. Гутенмахер. Электрические модели, изд. Академии наук СССР, 1949.
2. В. А. Трапезников и Б. Я. Коган. Принципы построения электронных моделирующих устройств для исследования систем автоматического регулирования. Автоматика и телемеханика, № 6, 1952.
3. В. А. Веников. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. Госэнергоиздат, 1949.
4. М. П. Костенко. Электродинамическая модель для исследования устойчивости. Электричество, № 9, 1950.
5. Л. И. Гутенмахер, И. С. Градштейн, В. А. Тафт. Электрическое моделирование физических процессов при помощи матричных схем с усилителями. Электричество, № 3, 1946.
6. Б. Я. Коган. О моделировании процессов автоматического регулирования при наличии типичных нелинейностей. Автоматика и телемеханика, № 2, 1955.
7. В. В. Гуров. Блок запаздывания к электронным моделям. Труды II Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования, т. III, изд. Академии наук СССР, 1955.
8. И. М. Маркович. Энергетические системы и их режимы, Госэнергоиздат, 1952.

[25. 5. 1955]

Использование асинхронных режимов генераторов для повышения надежности энергоснабжения

Кандидат техн. наук Л. Г. МАМИКОНЯНЦ

ЦНИЭЛ МЭС СССР

Введение. Длительное время асинхронные режимы синхронных генераторов считались недопустимыми из-за опасения повреждения генераторов и по причине возможных нежелательных воздействий на энергосистему. Последствиями этого запрета были: осложнение эксплуатации, увеличение времени ликвидации аварии, усложнение схемы автоматики и понижение надежности энергоснабжения.

Возросшая мощность энергосистем, массовое внедрение на всех синхронных генераторах и синхронных компенсаторах устройств автоматического регулирования возбуждения с использованием потолка напряжения возбудителей, внедрение автоматической разгрузки энергосистем по частоте сделали в подавляющем большинстве случаев вполне допустимой по условиям воздействия на энергосистему кратковременную (а в некоторых случаях и сравнительно длительную) асинхронную работу синхронных генераторов и отдельных частей энергосистемы относительно друг друга. Однако широкому использованию таких режимов препятствовали недостаточная изученность асинхронных режимов синхронных генераторов и укоренившееся представление об их опасности для машин. По инициативе Технического управления МЭС в послевоенные годы в ЦНИЭЛ, энергосистемах, проектных институтах и в наладочных организациях были поставлены работы по изучению и внедрению ряда мероприятий для повышения надежности энергоснабжения, которые в том или ином виде предусматривают асинхронные режимы генераторов.

В статье дается краткий обзор результатов этих работ и сформулированы задачи дальнейших исследований в рассматриваемой области.

Потеря возбуждения синхронных генераторов. Долго считали, что всякий синхронный генератор, потерявший возбуждение, следует немедленно отключить от сети. Устанавливались специальные защиты от потери возбуждения, блокировки между автоматом гашения поля (АГП) и выключателем генератора, отключающие генератор от сети при случайных отключениях АГП, и т. п.

Проведенные весьма ценные теоретические исследования асинхронных режимов синхронных машин [Л. 1 ... 5 и др.], к сожалению, не были проверены экспериментально. Существовало представление, что даже турбогенераторы с массивной бочкой ротора могут развивать момент, близкий к номинальному лишь при скольжении порядка 3% и более [Л. 6 и 7]. При таких больших скольжениях потери в роторе должны в несколько раз превышать потери от нормального тока возбуждения, и поэтому сколько-нибудь длительная работа в асинхронном режиме считалась недопустимой [Л. 8]. Вместе с тем в практике известны далеко не единичные случаи, когда персонал электростанций, в нарушение инструкций,

успешно восстанавливал возбуждение турбогенераторов при ошибочных отключениях АГП (если не было блокировки с выключателем) или ошибочном снятии возбуждения реостатом в цепи возбуждения возбудителя [Л. 9].

Теоретические исследования и испытания, проведенные силами ЦНИЭЛ и энергосистем на большом числе турбогенераторов [Л. 10 и 11], показали, что турбогенераторы с массивной бочкой ротора имеют очень жесткую характеристику асинхронного момента и развивают номинальный асинхронный момент при скольжении порядка нескольких десятков процента. При таких малых скольжениях потери в роторе от индуцированных в нем токов обычно не превышают потерь от номинального тока возбуждения и не могут поэтому вызвать опасного нагрева бочки ротора генератора. При осмотре массивных роторов турбогенераторов, на которых проводились испытания при работе в асинхронном режиме, следов повышенных нагревов не обнаружено.

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований было выяснено, что существовавшее ошибочное представление о сравнительно малой жесткости характеристики асинхронного момента турбогенераторов объясняется заниженной оценкой значения постоянной времени контура, эквивалентного массивной бочке ротора, в частности постоянной времени T'_ϕ по поперечной оси машины [Л. 11]. Были получены уточненные выражения для параметров генератора и его асинхронного момента, справедливые при любых соотношениях постоянных времени контура возбуждения и успокоительного контура ротора по продольной оси [Л. 12 и 13]. Была также разработана удобная для инженерных расчетов методика определения асинхронного момента вращения турбогенераторов с массивным ротором при малых скольжениях с учетом изменения параметров роторной цепи за счет вытеснения тока при увеличении скольжения [Л. 11].

На основании проведенных работ Техническое управление МЭС приняло решение о допустимости кратковременной (30 мин) работы в асинхронном режиме без возбуждения для турбогенераторов с цельными массивными роторами при наличии в сети необходимого запаса реактивной мощности [Л. 14 и 15]. В этом режиме допустимая нагрузка турбогенераторов определяется из того условия, чтобы ток статора не превышал допустимых значений, а потери в роторе не превосходили потерь от тока возбуждения при номинальном режиме работы. Опыт показал, что в подавляющем большинстве случаев допустимая нагрузка турбогенератора в асинхронном режиме равна примерно 50 ... 70% номинальной и ограничена током статора, а не потерями в роторе.

Было проведено также изучение возможности работы в асинхронном режиме без возбуждения

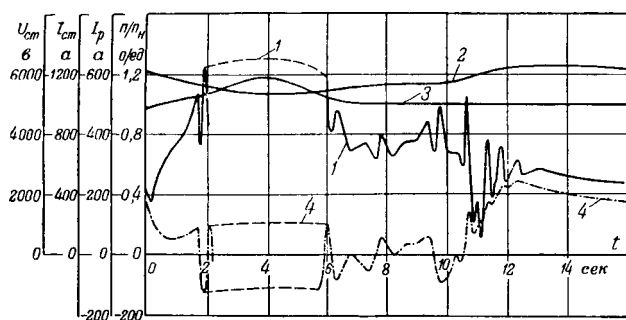


Рис. 1. Процесс потери и восстановления возбуждения генератора 5625 кВа при номинальной нагрузке ($P_a = 4400$ кВт).

1 — ток статора; 2 — его напряжение; 3 — скорость вращения; 4 — ток ротора.

синхронных машин с явно выраженными полюсами с успокоительными контурами на роторе и без них. Как теоретический анализ, так и испытания показывают, что сколько-нибудь длительная работа явнополюсных машин в асинхронном режиме нецелесообразна и недопустима. Это объясняется потреблением из сети большого намагничивающего тока (такие машины имеют обычно ОКЗ порядка единицы и более) и относительно малым значением асинхронного момента, развиваемого явнополюсными синхронными машинами. Для таких машин допустима кратковременная работа в асинхронном режиме длительностью несколько десятков секунд с тем, чтобы обеспечить возможность осуществления мер по восстановлению нормальной синхронной работы генератора. В случае безуспешности этих мер генератор следует отключить от сети. На рис. 1 приведены результаты обработки осциллограммы, на которой зафиксирован процесс потери и восстановления возбуждения на гидрогенераторе мощностью 5625 кВа, снабженного продольной успокоительной обмоткой.

Восстановление нормального режима при нарушении синхронизма. Нарушение режима синхронной работы в энергосистемах может иметь место и при сохранении возбуждения у генераторов, например при коротких замыканиях, резких колебаниях нагрузки, при слабых связях с системой и т. п. В таких случаях раньше обычно требовали немедленного разделения несинхронно работающих частей энергосистемы с последующим восстановлением параллельной работы способом точной синхронизации. Между тем уже давно в литературе рассматривался вопрос о возможности синхронизации выпавших из синхронизма частей энергосистемы без нарушения связи между ними и без вмешательства персонала [Л. 1 ... 3, 7, 16]. Для краткости этот процесс в дальнейшем будем называть *ресинхронизацией*.

Высказывалось справедливое мнение о том, что процесс ресинхронизации в энергосистемах имеет место значительно чаще, чем это предполагают, так как иногда персонал его не замечает. Теоретические и экспериментальные исследования последних лет полностью подтвердили правильность этого предположения [Л. 11, 17, 18

и 19]. В первый момент выпадения машин из синхронизма создается значительный небаланс между моментом первичного двигателя и электромагнитным моментом генератора, что приводит к увеличению скорости вращения агрегатов, удаленных (электрически) от центров нагрузки, и к уменьшению скорости вращения агрегатов, близких к нагрузке. Действием регуляторов скорости первичных двигателей небаланс между механическим и электромагнитным моментом уменьшается, и разность частот несинхронно вращающихся частей энергосистемы, пройдя через некоторый максимум, начинает снижаться, и при некотором достаточно малом скольжении машины могут синхронизироваться. Степень вероятности ресинхронизации выпавших из синхронизма генераторов в современных энергосистемах возросла вследствие массового применения устройств автоматического регулирования возбуждения на синхронных генераторах и компенсаторах, а также в результате применения устройств автоматической частотной разгрузки (АЧР). Автоматическое регулирование возбуждения обеспечивает поддержание более высокого уровня напряжения, что увеличивает электромагнитный момент генератора. Автоматическая частотная разгрузка ограничивает понижение частоты в перегруженной части системы, а следовательно, уменьшает разность частот несинхронно работающих частей системы.

При прочих равных условиях, ресинхронизация протекает тем успешнее, чем меньше инерция системы регулирования первичного двигателя и чем больше асинхронный момент, развиваемый генераторами. Поэтому ресинхронизация турбогенераторов протекает легче, чем ресинхронизация гидрогенераторов и других явнополюсных генераторов. В подавляющем большинстве случаев для ресинхронизации тепловых станций нет нужды в применении специальных мер; для этих целей достаточны устройства регулирования скорости первичных двигателей и средства системной автоматики. При этом больших скольжений между несинхронно вращающимися частями энергосистемы не наблюдается.

Специальные меры для восстановления синхронизма тепловых станций могут потребоваться лишь при связях с малым запасом статической устойчивости [Л. 20]. Такими мерами могут быть ручное или автоматическое воздействие на первичные двигатели или на величину нагрузки, направленное на уменьшение скольжения.

Машины с явно выраженными полюсами, в особенности машины без успокоительных контуров на роторе, как указывалось выше, в асинхронном режиме развивают асинхронный момент, меньший номинального, даже при непосредственной работе на мощные шины. Поэтому, выпадая из синхронизма, машины, если на их зажимах нет значительной местной нагрузки, практически полностью сбросят нагрузку и их скорость будет изменяться почти так же, как при сбросе нагрузки путем отключения генератора от сети. Тормозное действие асинхронного момента вносит неко-

торые отличия в этот процесс. При этом скорость вращения агрегата, как известно, может повыситься на 25% и более. В зависимости от типа гидротурбин, их регуляторов и т. п. снижение скорости до значений, близких к первоначальному, происходит за время порядка от нескольких секунд до 30 ... 40 сек (чаще порядка 15 ... 20 сек).

При снижении скорости до значений, близких к первоначальным, как показывает опыт [Л. 17], ресинхронизация гидрогенераторов возможна и без вмешательства персонала или воздействия специальных средств автоматики. Однако по причине малого значения асинхронного момента вероятность такой ресинхронизации мала, особенно если в приемной части энергосистемы понижается частота, что при относительно большой мощности выпавшей из синхронизма гидростанции может часто иметь место.

Кроме того, сравнительно длительная асинхронная работа возбужденных гидрогенераторов в энергосистеме при скольжениях порядка 10% и более нежелательна ввиду возможных сильных колебаний напряжения во всей энергосистеме или в отдельной ее части.

В связи с изложенным в тех случаях, когда есть основание ожидать, что при выпадении из синхронизма гидрогенераторы практически сбросят нагрузку и перейдут в асинхронный режим с большими скольжениями, необходимо предусматривать специальные меры по обеспечению их ресинхронизации.

К таким случаям относятся, в частности, работа гидростанций на энергосистему через линии электропередачи (особенно дальние) при отсутствии значительной местной нагрузки. Если гидростанция связана столь жесткими связями с тепловой электростанцией большой мощности, что выпадение ее из режима синхронной работы с нею маловероятно, но возможно их совместное выпадение из синхронизма по отношению к другой части энергосистемы, или если вблизи станции имеется относительно большая нагрузка, то специальные меры для ресинхронизации могут не потребоваться.

К мерам, способствующим осуществлению ресинхронизации, относятся: отключение возбуждения и обратное его включение при снижении скольжения до значений порядка 2 ... 5%; воздействие на первичный двигатель в целях обеспечения малого момента турбины и требуемого значения скольжения. Необходимость второго мероприятия уточняется в каждом конкретном случае. При работе генераторов через дальние линии электропередачи (например, типа Куйбышевская гзс — Москва) это мероприятие необходимо [Л. 21].

Испытания, проведенные ЦНИЭЛ МЭС в энергосистемах, а также МЭИ совместно с ЦНИЭЛ на электродинамической модели дальней линии передачи, показали, что при отключении возбуждения и последующем его включении асинхронный режим в процессе ресинхронизации протекает значительно спокойнее — как в части его воздействия на энергосистему, так и на гене-

раторы; кроме того, что очень важно, при этом облегчаются условия вхождения машины в синхронизм.

В связи с комплексной автоматизацией гидростанций и переводом их на работу без обслуживающего персонала операции по ресинхронизации должны быть автоматизированы.

Изучение опыта эксплуатации и уже проведенные исследования по ресинхронизации выпавших из синхронизма станций или отдельных частей энергосистемы позволили отказаться от рекомендованного ранее разделения несинхронно работающих частей энергосистемы. В настоящее время предписывается [Л. 22] при нарушениях синхронизма в энергосистеме принимать меры для понижения частоты в тех частях энергосистемы, где она повысилась, и для повышения частоты там, где она понизилась, что достигается повышением нагрузки станций, имеющих резерв, а при отсутствии резерва и понижении частоты ниже определенного предела — отключением потребителя. Разделение системы производится в тех исключительных случаях, когда в течение 3 ... 4 мин не удастся восстановить синхронизм.

Включение генераторов на параллельную работу способом самосинхронизации. Для включения синхронных генераторов на параллельную работу ранее повсеместно применялся способ точной синхронизации, ряд существенных недостатков которого хорошо известен. В послевоенные годы в СССР, особенно в связи с задачей широкой автоматизации электростанций, был поставлен вопрос об изыскании более простого и надежного способа включения синхронных генераторов на параллельную работу. В качестве такого способа был выбран принципиально давно известный [Л. 6, 7, 23 ... 27] и незаслуженно практически не применявшийся способ самосинхронизации или, как его иногда называют, способ грубой синхронизации.

Изучение способа самосинхронизации в ЦНИЭЛ МЭС, в энергосистемах и в ряде других организаций (ВИЭСХ, МИИТ, Южное отделение Оргрэн и др.) показало, что этот способ включения на параллельную работу можно рекомендовать для широкого использования для всех генераторов и синхронных компенсаторов с разгонными двигателями.

Были разработаны практические рекомендации, приборы и схемы для осуществления включения генераторов и синхронных компенсаторов на параллельную работу способом самосинхронизации. В настоящее время самосинхронизация успешно применяется как нормальный способ включения генераторов на параллельную работу на многих тепловых и гидростанциях Министерства электростанций, Министерства сельского хозяйства, Министерства коммунального хозяйства и других ведомств. Этим способом включаются на параллельную работу генераторы мощностью от нескольких десятков до 100 000 кВт включительно. По данным на 1 января 1955 г. только в энергосистемах Министерства электростанций способом самосинхронизации в нормальных условиях включается более 280 генераторов и 25 син-

хронных компенсаторов с разгонными двигателями. На некоторых станциях способ самосинхронизации применяется уже с 1947—1948 гг. Многие генераторы включались на параллельную работу этим способом по несколько сот и даже тысяч раз.

Опыт показывает, что способом самосинхронизации могут включаться генераторы с первичными двигателями любого типа — паровыми и гидравлическими турбинами, двигателями внутреннего сгорания, локомотивными, ветродвигателями и т. п.

Этот способ включения генераторов на параллельную работу успешно применяется и для двояных агрегатов типа Юнгстрем.

На ряде гидростанций успешно применяется автоматический запуск резервных агрегатов при снижении частоты в энергосистеме [Л. 22] и включение генераторов в сеть также производится способом самосинхронизации.

Результаты исследований и опыта применения самосинхронизации отражены в опубликованных за последние годы многочисленных статьях и отдельных брошюрах¹ [Л. 11, 13, 14 и 15].

Автоматическое повторное включение с самосинхронизацией. Автоматическое повторное включение линий, связывающих станцию с системой, так же как и всех линий с двусторонним питанием, как правило, осуществляется с контролем или улавливанием синхронизма, если только есть опасения, что отключение линии может привести к появлению несинхронных напряжений в месте разрыва. Схемы и устройства АПВ при этом получаются сложными и необеспечивающими надежного повторного включения.

Применение АПВ в сочетании с самосинхронизацией отделившихся генераторов позволяет просто и надежно решить вопрос восстановления связи между электростанцией и энергосистемой [Л. 21]. Восстановление связи этими способами осуществляется в следующем порядке:

1. При отключении линии передачи от действия защиты на генераторах гасится поле; генераторы могут отключаться от шин станции и могут оставаться присоединенными к ним.

2. Через некоторое время линия автоматически включается. Если повреждение самоликвидировалось, то на шинах станции появляется напряжение, которое может быть использовано для подачи импульса на включение (одновременное или поочередное) выключателей генераторов, если они отключались, и на включение автоматов гашения поля генераторов. После восстановления возбуждения генераторы входят в синхронизм. Если станция имеет местную нагрузку, не допускающую даже кратковременного перерыва питания, то при нарушении связи с системой часть генераторов может быть выделена для питания этой нагрузки, а часть будет участвовать в описанном выше порядке восстановления связи с системой. При наличии местной нагрузки мож-

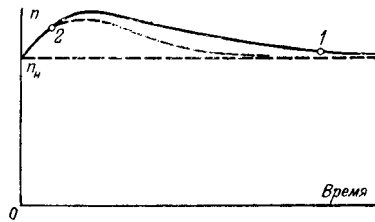


Рис. 2. Изменение скорости вращения гидрогенератора при сбросе нагрузки в результате воздействия регулятора скорости (сплошная кривая) и вследствие воздействия регулятора и асинхронного момента (пунктир).

но также в случае отключения линии электропередачи не гасить сразу поле на генераторах, сохраняя тем самым питание нагрузки. При успешном повторном включении линии передачи на выделенную свободную систему полос следует отключить генераторы и автоматически перевести питание нагрузки от линии электропередачи, после чего включить (автоматически) способом самосинхронизации генераторы.

В каждом конкретном случае (в зависимости от наличия или отсутствия местной нагрузки, ее характера, схемы станции и т. п.) выбирается тот или иной порядок осуществления АПВС.

Время перерыва связи станции с системой при АПВС может быть равным времени, в течение которого скорость вращения генераторов, пройдя после сброса нагрузки через максимальное значение, под действием регулятора скорости снизится почти до первоначального значения (рис. 2, точка 1). Для гидростанций это время, как указывалось выше, равно примерно 15...40 сек. В целях сокращения времени восстановления нормального режима можно осуществить повторное включение с интервалом времени, достаточным для снижения напряжения на генераторах до значения порядка 0,20...0,25 от номинального. При этом генераторы будут включены в сеть при относительно большом скольжении, иногда еще до достижения максимального значения скорости (рис. 2, точка 2). Генераторы, вращаясь со скоростью выше синхронной, будут отдавать в сеть активную мощность за счет асинхронного момента и, следовательно, будут тормозиться быстрее, чем при первом варианте включения. При наличии успокоительной обмотки дополнительный тормозной эффект, обусловленный асинхронным моментом, существенно сократит время восстановления нормального режима.

При таком порядке включения возбуждение на гидрогенераторах следует восстанавливать только тогда, когда скорость вращения приблизится к синхронной (скольжение порядка 2...5%). Это объясняется тем, что при включении возбуждения тотчас же после включения генератора в сеть ток возбуждения успеет достичь большого значения еще до того, как скольжение уменьшится до значений, при которых возможно вхождение генератора в синхронизм. Несинхронное же вращение возбужденного генератора, как уже указывалось, нежелательно.

¹ С 1949 г. большое количество работ по вопросам синхронизации было опубликовано на страницах журналов „Электричество“, „Электрические станции“, „Рабочий энергетик“ и др.

Выбор первого или второго варианта выполнения АПВС из условий длительности перерыва связи гидростанции с системой следует производить, исходя из местных условий и именно учитывая степень простоты схемы автоматизации, наличие или отсутствие на роторе генератора успокоительных контуров и пр.

Для турбогенераторов с цилиндрическим ротором всегда можно рекомендовать повторное включение без контроля значения скольжения, осуществляя включение его через промежуток времени, достаточный для снижения напряжения до безопасного значения. Вследствие незначительного повышения скорости (не более 10%) и большого асинхронного момента турбогенераторов их скорость после включения в сеть быстро приближается к синхронной. Поэтому обычно при осуществлении АПВС турбогенераторов либо вовсе не требуется вводить задержку включения возбуждения, либо вводить лишь небольшую задержку — порядка 1,0 ... 1,5 сек.

В настоящее время схемы АПВС смонтированы и находятся в эксплуатации на линиях электропередачи, связывающих гидростанции с основной сетью, в ряде энергосистем — Узбекэнерго, Мосэнерго, Молотовэнерго, Грузэнерго. В Ивэнерго находится в эксплуатации с 1952 г. схема² АПВС на линии, связывающей с сетью подстанцию, на которой установлен синхронный компенсатор 15 000 кВА.

Автоматическое повторное включение без контроля синхронизма. Дальнейшим усовершенствованием является автоматическое повторное включение без контроля синхронизма на линиях с двусторонним питанием даже в тех случаях, когда заведомо возможно наличие несинхронных напряжений в месте разрыва.

По поручению Технического управления вопрос о допустимости применения такого АПВ стали изучать в ЦНИЭЛ МЭС в 1954 г. Изучение опыта эксплуатации энергосистем показало, что и раньше неоднократно имели место ошибочные включения без контроля синхронизма двух несинхронно работающих частей энергосистемы. В этих случаях, как правило, после нескольких циклов асинхронного хода устанавливался синхронный режим.

Исследования ЦНИЭЛ позволили оценить значения токов и моментов, возникающих в генераторах при несинхронных включениях через различные внешние сопротивления, и установить критерий допустимости применения АПВ без контроля синхронизма.

До окончания проводимых сейчас специальных исследований механических деформаций и вибраций в машинах за критерий допустимости применения АПВ без контроля синхронизма было принято следующее условие: максимальные токи и моменты, возникающие при несинхронном включении, не должны превышать их значений при внезапном трехфазном коротком замыкании на зажимах машины при напряжении 1,05 от номинального (см. ГОСТ 183-41). Расчеты показали,

что при таком условии ограничивающим фактором для всех синхронных генераторов является момент вращения.

В условиях энергосистем подсчет моментов, возникающих в генераторах при несинхронном включении, довольно сложен. Удобнее определять токи. На основании проведенных расчетов были определены значения токов, соответствующих максимально допустимым моментом вращения. Эти токи были приняты за критерии допустимости применения АПВ без контроля синхронизма [Л. 32]. Для турбогенераторов допустимы пятикратные, а для гидрогенераторов трехкратные значения токов по отношению к номинальным. Расчет следует производить для периодических слагающих токов, по сверхпереходному реактивному сопротивлению в случае включения с углом 180°.

Все отмеченные выше особенности вхождения в синхронизм турбогенераторов и гидрогенераторов остаются в силе и при АПВ без контроля синхронизма, так как после несинхронного включения в большинстве случаев возникает хотя бы кратковременный асинхронный режим. При осуществлении АПВ без контроля синхронизма на линиях, связывающих с системой гидростанции, не имеющих большой местной нагрузки, как правило, возникает асинхронный режим со значительным увеличением скольжения. При этом целесообразно гасить на некоторое время поле генераторов, как при ресинхронизации. Это, однако, не требует специального усложнения схемы АПВ без контроля синхронизма, так как на таких гидростанциях, как указывалось выше, целесообразно выполнять схему автоматической ресинхронизации, которая придет в действие, если после АПВ возникает асинхронный режим.

Автоматическое повторное включение без контроля синхронизма в сочетании с автоматической ресинхронизацией целесообразно, в частности, осуществлять на дальних линиях электропередачи 400 кВ, связывающих гидростанции с энергосистемами [Л. 21]. Испытания, проведенные на моделях дальних линий электропередачи в МЭИ и на одной из гэс канала им. Москвы, подтвердили возможность и целесообразность выполнения такого мероприятия.

Испытания, проведенные ЦНИЭЛ совместно с энергосистемами [Л. 33], а также самостоятельно энергосистемами, показали полную возможность и целесообразность осуществления автоматического повторного включения без контроля синхронизма.

Следует вместе с тем отметить, что несинхронные включения могут вызвать ложные действия некоторых видов защит. Как правило, это не должно служить основанием для отказа от применения АПВ. В каждом конкретном случае следует принимать меры для предотвращения ложных отключений [Л. 32]. В ряде случаев, как показывает анализ, возможные ложные действия защиты не приносят существенного вреда энергосистеме и исправляются действием АПВ на отключенных ими участках сети, поэтому можно не

² Схема разработана Ивэнерго.

принимать каких-либо специальных мер по устранению таких отключений, если эти меры сложны или могут существенно ухудшить характеристики защиты.

Отказ от применения АПВ без контроля синхронизма из-за неселективных отключений защитой соседних участков сети может быть оправдан только в тех случаях, когда неселективное отключение может привести к развитию аварии в энергосистеме, по своим последствиям более тяжелой, чем при отсутствии АПВ без контроля синхронизма. В тех случаях, когда не удается осуществить АПВ без контроля синхронизма, следует применять АПВ с самосинхронизацией, а там, где и оно невозможно, — АПВ с контролем или улавливанием синхронизма.

АПВ без контроля синхронизма осуществлено в нескольких энергосистемах. В одной из энергосистем Главуралэнерго во время грозового сезона 1954 г. оно успешно действовало 8 раз.

Асинхронный пуск синхронных генераторов. В энергосистемах нередко возникает необходимость пуска генератора при отсоединенном первичном двигателе, например при использовании генераторов в качестве синхронных компенсаторов. В таких случаях обычно применялся частотный синхронный пуск. Для турбогенераторов с отставленными от бочки ротора бандажами допускался асинхронный пуск при напряжении не выше 0,25 номинального [Л. 33], что в условиях эксплуатации трудно осуществимо. Асинхронный пуск гидрогенераторов не применялся вообще. Между тем представлялось целесообразным рассмотреть вопрос о возможности ускорения пуска гидроагрегатов и упрощения схемы их автомати-

ки путем включения генератора в сеть одновременно с открытием направляющего аппарата турбины.

По поручению Технического управления МЭС ЦНИЭЛ изучает режимы асинхронного пуска турбо- и гидрогенераторов. Разработана инженерная методика определения нагрева массивного цилиндрического ротора турбогенератора за время пуска с учетом изменения глубины проникновения тока и распространением тепла вглубь ротора [Л. 11 и 33].

Расчеты и испытания показали, что для турбогенераторов с массивной бочкой ротора и отставленными бандажами допустим асинхронный пуск при напряжениях до 0,5 ... 0,6 номинального. Такое понижение напряжения при пуске в условиях эксплуатации в большинстве случаев не требует выделения специального генератора, так как оно может быть получено за счет внешних по отношению к пускаемому генератору сопротивлений — трансформаторов, линий и т. п.

Опыт эксплуатации показал, что при асинхронном пуске турбогенераторов и аналогичных по конструкции крупных синхронных двигателей с бандажами, насаженными на бочку ротора, возможно сильное подгорание посадочных поверхностей. Это обстоятельство заставило на нескольких машинах реконструировать систему посадки бандажей так, чтобы они не соприкасались с бочкой ротора.

Испытания ЦНИЭЛ совместно с Севкавказэнерго и Узбекэнерго на двух гидрогенераторах мощностью 3 500 и 5 625 ква с продольной успокоительной обмоткой подтвердили возможность их пуска при одновременном открытии направляющего аппарата и включении генератора в сеть. Время пуска агрегатов до момента восприятия нагрузки сократилось на генераторе 3 500 ква с 15 до 6 сек, на генераторе 5 625 ква — с 24 до 11 сек. На рис. 3 приведены результаты обработки осциллограммы такого пуска гидрогенератора 3 500 ква. Пуск осуществлялся с возбудителем, приключенным к ротору, и включенным автоматическим регулятором напряжения.

Аналогичные результаты получил Гидроэнергопроект на других гидроагрегатах.

Закключение. Проведенные исследования асинхронных режимов синхронных машин позволили внедрить их в практику эксплуатации энергосистем для повышения надежности их работы. Дальнейшие исследования в этой области особенно актуальны в связи с созданием объединений энергосистем. Эти исследования должны проводиться в первую очередь в следующих направлениях:

1. Исследование процессов вхождения в синхронизм, разработка практических инженерных критериев оценки возможности синхронизации без специального воздействия на первичные двигатели и нагрузку.

2. Разработка специальных мероприятий по обеспечению синхронизации в тех случаях, когда синхронизация затруднена (слабые связи и т. п.).

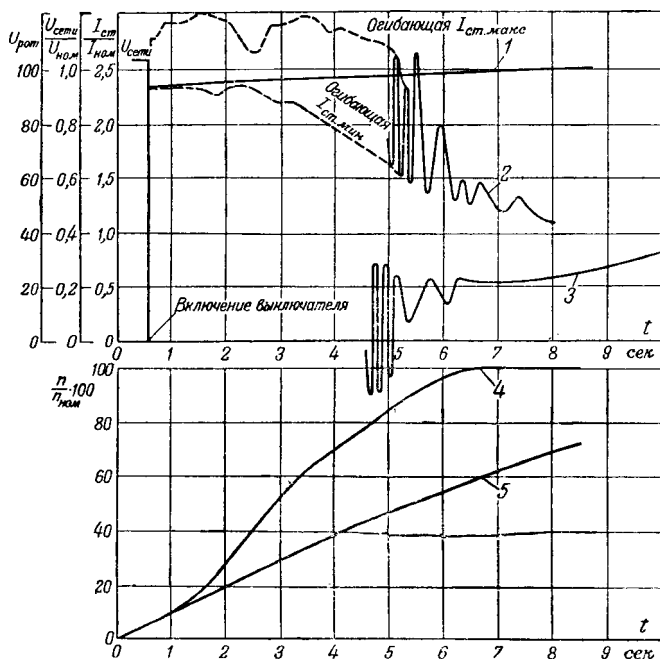


Рис. 3. Включение генератора 3 500 ква в сеть при неподвижном его состоянии и одновременном открытии аппарата турбины.

1 — напряжение сети $U_{\text{сети}}$; 2 — ток статора $I_{\text{ст}}$ и огибающие его максимальных и минимальных значений (пунктир); 3 — напряжение ротора $U_{\text{рот}}$; 4 — скорость вращения при асинхронном пуске; 5 — при нормальном пуске.

3. Исследования поведения релейной защиты при асинхронных режимах работы энергосистем и разработка рекомендаций по устранению возможности неселективных действий защиты.

4. Установление целесообразной области применения ускоренного пуска гидроагрегатов путем включения их в сеть одновременно с открытием направляющего аппарата турбин.

Литература

1. П. С. Жданов. Синхронизация машин при нарушениях устойчивости. *Электричество*, № 6, 1934.
2. П. С. Жданов и С. А. Лебедев. Устойчивость параллельной работы электрических систем. Энергоиздат, 1934.
3. П. С. Жданов. Асинхронный режим в электрических системах. *Электричество*, № 21, 1936.
4. Д. А. Городский. Асинхронный ход синхронной машины в системе. *Электричество*, № 1—2, 1944; № 3, 1945.
5. П. С. Жданов. Демпферный момент синхронной машины, работающей через внешнюю сеть параллельно с системой большой мощности. *Бюллетень ВЭИ*, № 9, 1935.
6. H. Rengier. Grobsynchronisierung leerlaufender Turbogeneratoren. AEG Mitteilungen, стр. 426, 1931.
7. В. И. Иванов. Синхронные машины ВЭТА — КУБЧ. Ленинград, 1934.
8. A. A. Johnson. Can Synchronous Generators Run Out-of Step with the System? *Power*, № 1, 1947.
9. А. М. Маринов. Потери возбуждения синхронных генераторов. *Электрические станции*, № 11, 1934.
10. И. А. Сыромятников. Работы синхронных генераторов с цилиндрическим ротором после потери возбуждения. *Электрические станции*, № 4, 1948.
11. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов, Госэнергоиздат, 1952.
12. Л. Г. Мамиконянц. О переходных процессах в синхронных машинах с успокоительными контурами на роторе. *Электричество*, № 7, 1954.
13. Л. Г. Мамиконянц. Электромагнитные моменты вращения синхронных машин при включении их в сеть способом самосинхронизации. *Электричество*, № 8, 1954.
14. Сборник директивных материалов Технического отдела МЭС СССР. Электрическая часть. Госэнергоиздат, 1950.
15. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Госэнергоиздат, 1953.
16. R. C. Buell, R. J. Saughey, E. M. Hunter, V. M. Marquis. Governor Performance During System Disturbances. *Tr. AIEE*, стр. 354, 1931.
17. И. М. Маркович, С. А. Савалов. Экспериментальное исследование ресинхронизации генераторов. *Электричество*, № 4, 1955.
18. И. М. Маркович. Энергетические системы и их режимы. Госэнергоиздат, 1952.
19. В. А. Веников, Л. А. Жуков. Переходные процессы в электрических системах. Госэнергоиздат, 1953.
20. В. М. Горнштейн. Некоторые пути повышения статической и динамической устойчивости энергосистем со слабыми связями. *Электричество*, № 5, 1955.
21. Л. Г. Мамиконянц. Включение на параллельную работу гидрогенераторов, связанных с линией 400 кВ. Труды ЦНИЭЛ, вып. II, Госэнергоиздат, 1954.
22. Техническое управление МЭСЭП. Противоаварийный циркуляр, № Э-1/1954.
23. W. Peters. Neue Verfahren zum Synchronisieren von Synchronmaschinen und Synchronkraftwerken, *Siemens-Zeitschrift*, стр. 163, 240, 1929.
24. W. Peters. Schnellsynchronisierung grosser Maschineneinheiten. *ETZ*, стр. 753, № 24, 1931.
25. G. Meiners. Grobsynchronisierung von Synchronmaschinen mit dem Stern dreieckschalter. *E. и M.*, стр. 441, 1932.
26. А. Х. Сараджев. Автоматическая синхронизация гидрогенераторов. *Электричество*, № 6, 1935.
27. Л. И. Гутенмахер. Синхронизационные устройства электрических станций. ОНТИ, 1938.
28. M. I. Braum, W. A. Derr. Automatic Control of Hydroelectric Generating Station. *Tr. AIEE*, т. 6, стр. 343.
29. И. А. Сыромятников. Расширение области применения автоматического повторного включения. *Электрические станции*, № 10, 1951.
30. И. Г. Мильграм, Г. В. Подковыров, Э. Г. Файнштейн. Трехфазное автоматическое повторное включение линии с самосинхронизацией для гидростанций. *Электрические станции*, № 10, 1951.
31. А. С. Степунина, Ю. М. Элькин. Схемы АПВ с самосинхронизацией линии 400 кВ. Труды ЦНИЭЛ, вып. II, Госэнергоиздат, 1954.
32. Техническое управление МЭС. Эксплуатационный циркуляр, № Э-55.
33. Завод „Электросила“. Турбогенераторы серии Т2. Лениздат, 1945.
34. И. А. Сыромятников. Нагрев массивных роторов при асинхронном пуске. *Электричество*, № 1, 1953.

[10. 5. 1955]



Рациональное построение сети низкого напряжения больших городов¹

Доктор техн. наук А. А. ГЛАЗУНОВ, кандидаты техн. наук Ф. Ф. ВОРОНЦОВ и Л. А. СОЛДАТКИНА

Московский энергетический институт им. Молотова

Кафедра электрических сетей и систем Московского энергетического института им. Молотова провела работу по выяснению рационального построения сети низкого напряжения больших городов. При исследовании имелись в виду районы, застроенные многоэтажными домами. Предполагалось, что сеть выполнена кабелями. Исследовались схемы и экономически целесообразное напряжение сети.

В качестве исходного условия принималось, что повреждения и ремонтные работы в сети

6 или 10 кВ, а также в трансформаторах не должны приводить к перерыву электроснабжения потребителей. Повреждения в сети низкого напряжения, как охватывающие небольшой район, могут вызывать прекращение питания части потребителей на время, необходимое для производства переключений в сети, связанных с восстановлением электроснабжения, но не на время, необходимое для исправления повреждения. Многочасовые перерывы электроснабжения, даже и для небольшого района города, считались недопустимыми.

На первой стадии работы предполагалось, что

¹ Печатается в порядке обсуждения.

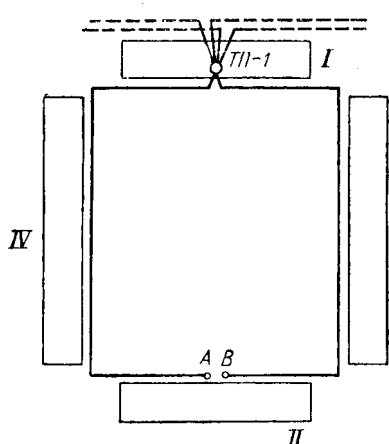


Рис. 1.

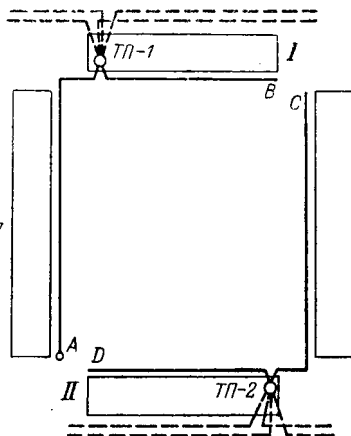


Рис. 2.

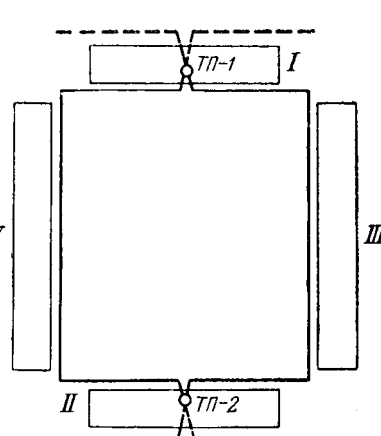


Рис. 3.

сеть низкого напряжения выполняется по петлевой схеме, т. е. с заводом ее в несколько подъездов одного и того же здания. Число вводов в здание зависело от общего числа подъездов; в среднем принимался один ввод на 2—3 подъезда.

При такой схеме наружная кабельная сеть низкого напряжения должна проходить по всему периметру зданий, получающих энергию от данного участка сети. Электроснабжение зданий децентрализовано; управление электроснабжением здания из одной точки невозможно. Кроме того, вводы в целый ряд подъездов здания принуждают ограничиться установкой простых ящиков, что исключает управление электроснабжением зданий города.

В работе рассматривалось большое количество возможных схем сети низкого напряжения.

На рис. 1 и 2 даны принципиальные схемы двухмагистральной (двухлучевой) автоматизированной сети высокого напряжения с резервированной сетью низкого напряжения² (в дальнейшем кратко именуется двухмагистральной сетью) при одной и двух трансформаторных подстанциях на группу близко расположенных друг от друга зданий I—IV. Резервирование сети низкого напряжения осуществляется устройством соединительного пункта АВ в здании II (рис. 1) или прокладкой не менее двух параллельных кабелей, питающих отдельные здания (рис. 2).

Поперечно-замкнутая сеть низкого напряжения опирается на две трансформаторные подстанции (рис. 3). Линии, связывающие эти подстанции, рассчитываются и на случай выхода из работы одной из подстанций.

Схемы продольно-замкнутых и сложно-замкнутых сетей не приводятся.

Произведенный анализ позволил сделать для сетей напряжением 220/127 в в районах, застроенных 5... 8- и 8... 14-этажными домами, следующие выводы:

1. В районах, застроенных 8... 14-этажными домами, двухмагистральная сеть может быть со-

оружена с такими же примерно капитальными затратами и эксплуатационными расходами, как и поперечно-замкнутая сеть. При этом двухмагистральная сеть требует примерно вдвое большего вложения цветного металла. Двухмагистральная сеть (рис. 1) имеет вдвое меньше трансформаторных подстанций, чем поперечно-замкнутая сеть (рис. 3). Экономические показатели двухмагистральной сети ухудшаются по мере уменьшения этажности зданий. В районах, застроенных домами в 5... 8 этажей, капиталовложения двухмагистральной сети увеличиваются на 25%, а эксплуатационные расходы на 10% по сравнению с поперечно-замкнутой сетью [Л. 2].

2. Двухмагистральная сеть может быть выполнена таким образом, что расход меди на нее будет примерно таким же, как и на поперечно-замкнутую сеть. При этом число трансформаторных подстанций в квартале окажется равным их числу при поперечно-замкнутой сети, а экономические показатели станут хуже показателей поперечно-замкнутой сети.

3. Сложно-замкнутая сеть низкого напряжения требует практически тех же капиталовложений, эксплуатационных расходов и затрат цветного металла, что и поперечно-замкнутая. Однако более целесообразной следует считать поперечно-замкнутую сеть, имеющую ряд технических преимуществ (простота схемы, охват сетью небольшой группы зданий, что исключает затруднения, возникающие при сооружении замкнутой сети, охватывающей большую группу зданий, при одновременном их строительстве и т. д.).

Указанные соображения, которые более подробно развиты в статье А. А. Глазунова, И. С. Бессмертного и Ф. Ф. Воронцова [Л. 1], заставили отказаться в дальнейшем от рассмотрения замкнутых и сложно-замкнутых сетей, охватывающих один или несколько кварталов. Необходимо отметить, что замкнутые сети в виде треугольников, опирающиеся на три трансформаторные подстанции, оказывались с худшими экономическими показателями, что объясняется плохой сочетаемостью треугольника с конфигурацией квартала — прямоугольника.

Полученные результаты в отношении двухма-

² Наименование отдельных схем сети соответствует принятому в [Л. 1].

гистральной и поперечно-замкнутой сетей обосновываются следующими соображениями.

Сравним двухмагистральную сеть низкого напряжения (рис. 1) с поперечно-замкнутой (рис. 3). При этом нагрузку будем считать равномерно распределенной вдоль длины сети, что достаточно близко к действительным условиям.

При расчете сети низкого напряжения по потерю напряжения момент нагрузок двухмагистральной автоматизированной сети будет в 4 раза больше, чем поперечно-замкнутой сети. В таком же соотношении должны находиться и сечения кабелей сравниваемых сетей.

При расчете сети по условиям допустимого нагрева в нормальном и аварийном режимах ее работы сечения четырехжильных кабелей с учетом поправки на температуру почвы зимой и аварийную перегрузку могут быть определены по эмпирической формуле

$$s = 0,01 \cdot I^2.$$

Эта формула показывает, что для двухмагистральной сети (рис. 1) цветного металла теоретически потребуется в 4 раза больше, чем для поперечно-замкнутой. Практически же при правильном выборе сечения кабелей его потребуется примерно в 2 раза больше.

Сеть высокого напряжения и трансформаторные подстанции при поперечно-замкнутой сети стоят дороже, чем при двухмагистральной, так как в первом случае потребуется построить две однострановые подстанции (рис. 3), а не одну двухтрансформаторную и проложить кабели высокого напряжения по двум трассам. Однако экономия в сети низкого напряжения перекрывает этот перерасход, поэтому поперечно-замкнутая сеть оказывается более экономичной.

При увеличении числа трансформаторных подстанций в квартале в случае двухмагистральной сети (рис. 2) облегчается сеть низкого напряжения и уменьшаются затраты цветного металла, но резко возрастает стоимость сети высокого напряжения и трансформаторов, а также стоимость потерь энергии в последних. В результате капитальные затраты и эксплуатационные расходы на двухмагистральную сеть получаются большими, чем на поперечно-замкнутую сеть.

На второй стадии работы учитывалось требование обеспечения централизованного управления электроснабжением отдельных зданий. Предполагалось, что в здании предусматривается один-два ввода на щиты управления (два ввода при очень большой кубатуре здания), от которых распределение электроэнергии внутри здания осуществляется горизонтальными магистральными линиями, выполненными изолированными проводами в стальных трубах. Внутренние сети не резервируются, так как этот тип прокладки обладает высокой степенью надежности. Для устранения колебаний напряжения на зажимах ламп накаливания силовая и бытовая нагрузки питаются по отдельным магистралям. Силовой щит предполагалось располагать всегда в центре здания, поэтому считалось, что при вводе кабеля

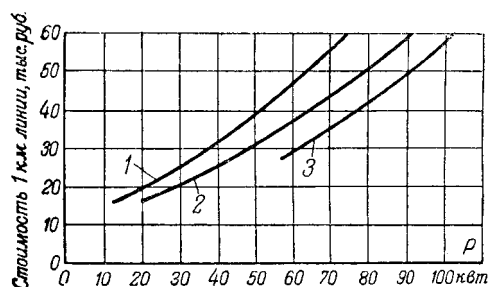


Рис. 4. Зависимость стоимости 1 км линии от ее пропускной способности, определяемой из условий допустимого нагрева.

1 — внутренняя магистральная линия для питания осветительной нагрузки, выполненная изолированными проводами; 2 — то же для питания силовой нагрузки; 3 — проложенная в траншее кабельная линия (с резервом).

в центр здания магистральная линия для силовой нагрузки не требуется, а при вводе в торец здания магистральная линия для силовой нагрузки идет до центра здания. Вопрос о вводе кабеля в середину или в ближайший к трансформаторной подстанции торец здания решался на основании технико-экономических показателей.

Значительное сокращение длины наружных кабельных линий, получаемое для некоторых вариантов двухмагистральной сети при одном вводе в здание, не приводит к улучшению экономических показателей этих вариантов. Объясняется это следующими обстоятельствами.

Сечение изолированных проводов внутридомовых магистральных силовых и осветительных сетей, как правило, определяется условиями допустимого нагрева проводов. При этом потеря напряжения в сети оказывается меньше допустимой. При относительно небольших расстояниях отдельных зданий от трансформаторной подстанции сечения кабелей низкого напряжения, проложенных к этим зданиям, также выбираются, исходя из условий допустимого нагрева при отключении одного из кабелей. На кабели, проложенные в земле, допускается значительно большая нагрузка, чем на изолированные провода того же сечения, проложенные в трубах. Допускаемая нагрузка на провода осветительных магистралей будет в среднем в 1,5 ... 2 раза меньше.

Стоимость прокладки изолированных проводов внутри дома по существующим ценам обходится дороже, чем прокладка кабельных линий того же сечения.

На рис. 4 представлена зависимость стоимости 1 км кабельной линии с резервом, проложенной в земле, и магистральной линии, выполненной изолированными проводами, от пропускной способности, определяемой допустимым нагревом. Пропускная способность кабельной линии определялась при отключении одного из двух кабелей. Из рис. 4 следует, что при одинаковой пропускной способности, определенной из условий допустимого нагрева, магистральная внутридомовая сеть стоит дороже резервированной наружной кабельной сети.

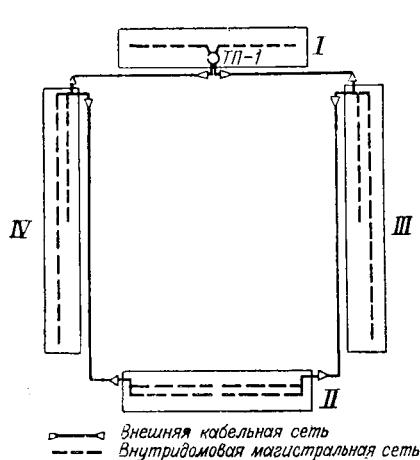


Рис. 5.

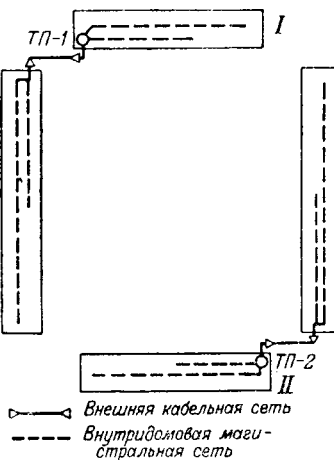


Рис. 6.

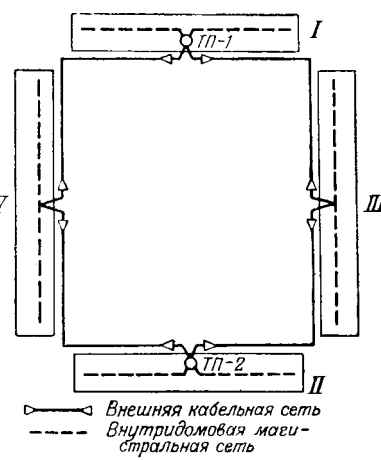


Рис. 7.

В работе подробно исследовались вопросы: о выборе мест в пределах квартала, в которых должны быть расположены трансформаторные подстанции, о расположении вводов в здания, о целесообразном сочетании внутренних и наружных сетей. Выяснено, что все эти обстоятельства относительно мало влияют на экономические показатели сети. Существенно влияют на эти показатели количество трансформаторных подстанций в квартале, тип и напряжение сети.

На рис. 5, 6 и 7 изображены принципиальные схемы внешних кабельных и внутридомовых магистральных сетей, принятые для двухмагистральной сети при одной и двух трансформаторных подстанциях на группу домов и для поперечно-замкнутой сети.

Выбор целесообразной схемы сети производился отдельно для сетей 220/127 в и для сетей 380/220 в. Наиболее целесообразные схемы для каждого из этих напряжений сравнивались между собой.

Известно, что при одной и той же мощности лампы накаливания для напряжения 220 в дают меньший световой поток, чем лампы 127 в. Для обеспечения одинаковой освещенности жилых помещений мощность ламп накаливания 220 в должна быть больше мощности ламп накаливания 127 в в среднем на 25...30%.

В настоящей работе при напряжении 220/127 в принят следующий средний состав нагрузок зданий, имеющих 5...14 этажей: осветительная нагрузка квартир — 50%; силовая нагрузка дома, осветительная нагрузка торговых и прочих учреждений, а также нагрузка от бытовых приборов — 50%.

Для сети 380/220 в осветительная нагрузка квартир принимается увеличенной на 20% по сравнению с той же нагрузкой для сети 220/127 в, остальные нагрузки остаются те же, что и для сети 220/127 в. Предполагается, что освещение торговых и общественных учреждений в основном выполняется люминесцентными лампами. Следовательно, суммарная нагрузка зданий при напряжении сети 380/220 в увеличивается на 10% против нагрузки при напряжении сети 220/127 в.

В табл. 1 и 2 приведены технико-экономические показатели двухмагистральной и поперечно-замкнутой сетей для одного из типовых кварталов при напряжениях 220/127 и 380/220 в. В табл. 2 в эксплуатационных расходах не учтена стоимость дополнительной электроэнергии, которая должна быть выработана станциями, вследствие увеличения нагрузки на 10% при напряжении сети 380/220 в. Эта статья расхода не зависит от схемы сети и потому при сравнении сетей одного напряжения не учитывается. При сравнении же сетей разных напряжений (220/127 и 380/220 в) эта статья расхода должна быть учтена, поскольку она является значительной величиной в суммарных ежегодных эксплуатационных расходах. В табл. 2 в суммарных капитальных затратах на сеть учтена стоимость дополнительной мощности на электростанциях, необходимой для покрытия потерь мощности в сети и

Таблица 1

Технико-экономические показатели сетей 220/127 в

Этажность здания района	Характеристики сетей	Суммарный расход меди		Суммарные капитальные вложения		Суммарные эксплуатационные расходы	
		т	%	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%
8...14	Двухмагистральная автоматизированная сеть высокого напряжения:						
	вариант 1	14,3	124	881	98	92	99
	вариант 2	9,1	79	1 033	115	115	124
	Поперечно-замкнутая сеть	11,5	100	900	100	93	100
5...8	Двухмагистральная автоматизированная сеть высокого напряжения:						
	вариант 1	3,0	71	260	119	27,4	130
	вариант 2	9,6	228	271	124	22,9	108
	Поперечно-замкнутая сеть	4,2	100	218	100	21,1	100

Таблица 2

Технико-экономические показатели сетей 380/220 в

Этажность зданий района	Характеристики сетей	Суммарный расход меди		Суммарные капиталовложения		Суммарные эксплуатационные расходы	
		т	%	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%
8...14	Двухмагистральная автоматизированная сеть высокого напряжения	9,45	105	1 164	96	93	98
	Поперечно-замкнутая сеть	9,0	100	1 214	100	95	100
5...8	Двухмагистральная автоматизированная сеть высокого напряжения	2,6	108	258	99	20,1	104
	Поперечно-замкнутая сеть	2,4	100	260,7	100	19,4	100

увеличения нагрузки сети 380/220 в на 10% по сравнению с сетью 220/127 в.

Анализ цифр табл. 1 приводит к следующим выводам:

1. Для районов города, застроенных 8...14-этажными домами, при напряжении сети 220/127 в двухмагистральная автоматизированная сеть высокого напряжения (вариант 1, рис. 5) и поперечно-замкнутая сеть требуют практически одинаковых капиталовложений и эксплуатационных расходов. Затраты меди несколько больше при двухмагистральной сети. При увеличении числа трансформаторных подстанций (вариант 2) в квартале расход меди в двухмагистральной сети значительно сокращается, но увеличиваются на 15% капиталовложения в сеть и примерно на 25% эксплуатационные расходы; последнее делает нецелесообразным применение варианта 2.

2. В районах, застроенных 5...8-этажными домами, поперечно-замкнутая сеть оказывается

экономически более целесообразной. При выполнении двухмагистральной сети (вариант 2) с тем же числом трансформаторных подстанций, что и для поперечно-замкнутой сети, экономия 1,2 т цветного металла достигается ценой увеличения капиталовложений на 42 тыс. руб., а ежегодных эксплуатационных расходов на 6,3 тыс. руб. (30%); предпочтение должно быть отдано поперечно-замкнутой сети.

При меньшем числе трансформаторных подстанций (вариант 1) двухмагистральная сеть при почти одинаковых эксплуатационных расходах требует увеличения капиталовложений на 53 тыс. руб. (25%) и расхода меди на 5,4 т (130%).

Из анализа табл. 2 для сетей 380/220 в следует, что в районах со зданиями в 5...8 и 8...14 этажей технико-экономические показатели двухмагистральной и поперечно-замкнутой сети получаются практически одинаковыми.

Подытоживая сказанное, получаем, что при напряжении 220/127 в предпочтение должно быть отдано поперечно-замкнутой сети, особенно в районах с более низкой этажностью домов. При напряжении 380/220 в обе схемы сети равноценны.

Для выяснения вопроса об экономически целесообразном напряжении сети низкого напряжения для районов больших городов, застроенных многоэтажными домами, сопоставлялись технико-экономические показатели сетей 380/220 и 220/127 в. В табл. 3 приведены показатели наиболее целесообразных вариантов сетей при обоих напряжениях. При определении капитальных затрат на сети напряжением 380/220 в учитывались капиталовложения на электростанции, связанные с необходимостью покрыть увеличенную на 10% нагрузку при этом напряжении, а также снижение расходов на внутридомовые сети. В ежегодных эксплуатационных расходах учитывалась стоимость дополнительной электроэнергии, которая должна быть выработана на станциях для покрытия большей нагрузки сети 380/220 в (стоимость электроэнергии принималась равной 15 коп/квтч).

Таблица 3

Технико-экономические показатели сетей 220/127 и 380/220 в

Этажность зданий райо- на	Напряжения сетей, <i>в</i>	Капиталовложения					Эксплуатационные расходы					<i>G_м</i>	
		<i>K_с</i>		<i>K_{эс}</i>	<i>K_Σ</i>		<i>И_с</i>		<i>И_{эс}</i>	<i>И_Σ</i>			
		тыс. руб.	%	тыс. руб.	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%	тыс. руб.	тыс. руб.	%	<i>T</i>	%
8...14	380/127	1 856	86	360	2 218	102	135	94	92,3	227,3	158	20,9	55
	220/127	2 176	100	—	2 176	100	144	100	—	144,0	100	38,3	100
5...8	380/220	412	82	78	490	98	28,5	90	18,3	46,8	148	5,5	51
	220/127	502	100	—	502	100	31,8	100	—	31,8	100	10,7	100

K_с — капиталовложения в сеть; K_{эс} — дополнительные капиталовложения на электростанциях вследствие увеличения нагрузки сети 380/220 в на 10% по сравнению с нагрузкой сети 220/127 в; K_Σ — суммарные капиталовложения; И_с — ежегодные эксплуата-

ционные расходы по сети; И_{эс} — ежегодная стоимость дополнительно выработанной электроэнергии на электростанциях вследствие увеличения нагрузки сети 380/220 в; И_Σ — суммарные ежегодные эксплуатационные расходы; G_м — расход меди на сеть.

Анализ цифр табл. 3 позволяет сделать следующие выводы:

1. В районах с 8... 14-этажными зданиями более целесообразно сооружать сети низкого напряжения 220/127 в, а не 380/220 в.

Капиталовложения при сооружении сетей обоих напряжений практически одинаковы. Но при сети 380/220 в эксплуатационные расходы возрастают на 83,3 тыс. руб., т. е. на 60%. Для выполнения сети 220/127 в в одном квартале меди требуется на 17,5 т больше. Следовательно, если построить сеть с напряжением 380/220 в, то каждый сэкономленный килограмм цветного металла потребует увеличения ежегодных эксплуатационных расходов на 4,75 руб. Затраты на цветной металл, вложенный в сеть 220/127 в, окупятся за время около 2 лет.

Если даже предположить, что увеличение нагрузки сети 380/220 в по сравнению с сетью 220/127 в составит не 10%, а только 5%, то и при этих условиях нужно считать напряжение 220/127 в более оправданным. Разница в ежегодных эксплуатационных расходах при этом предположении составит 37 тыс. руб. в пользу варианта 220/127 в. Следовательно, каждый дополнительный килограмм меди, вложенный в сеть 220/127 в, уменьшает ежегодные эксплуатационные расходы на сумму около 2 руб. Расходы на дополнительный цветной металл, вложенный в сеть 220/127 в, окупятся за 5 лет.

Необходимо подчеркнуть, что принятая в настоящей работе стоимость электроэнергии, равная 15 коп/квтч, для городских бытовых потребителей является сильно заниженной.

2. В районах с 5... 8-этажными зданиями также более целесообразно применение напряжения 220/127 в. Капиталовложения при обоих напряжениях одинаковы. Эксплуатационные расходы при 380/220 в в 1,5 раза больше, чем при 220/127 в. Дополнительный расход меди на сеть 220/127 в, равный около 5 т, ведет к снижению ежегодных эксплуатационных расходов на 15 тыс. руб. Расходы, связанные с вложением дополнительной меди в сеть 220/127 в, окупятся за 3 года.

Если предположить, что нагрузка сети 380/220 в увеличивается по сравнению с сетью 220/127 в не на 10%, а на 5%, то затраты на медь, дополнительно вложенную в сеть 220/127 в, окупятся за 8... 10 лет. Для таких капитальных сооружений, как городская электрическая сеть в новых районах крупных городов, срок окупаемости 8... 10 лет нужно считать безусловно приемлемым.

Полученные результаты показывают, что в районах крупных городов с 5... 8 и 8... 14-этаж-

ными зданиями экономически целесообразной является сеть напряжением 220/127 в, несмотря на то, что для выполнения ее требуется больше цветного металла. Отметим, что преимущества сети 220/127 в для районов с 5... 8-этажными зданиями меньше, чем для районов с 8... 14-этажными зданиями. Это обстоятельство, а также то, что рассмотрение велось только для кабельной сети, не позволяет сделать вывода о преимуществе сети 220/127 в для районов с меньшей этажностью зданий и сетей, выполненных воздушными линиями.

В заключение укажем, что проведенная работа показала полную возможность осуществления селективной защиты поперечно-замкнутой сети при помощи аппаратов, выпускаемых нашими заводами.

Выводы. 1. Для районов крупных городов с 5... 8 и 8... 14-этажными зданиями более целесообразной кабельной сетью является поперечно-замкнутая сеть низкого напряжения. В районах с 8... 14-этажными зданиями преимущества поперечно-замкнутой сети по сравнению с двухмагистральной автоматизированной сетью высокого напряжения меньше, чем для районов с 5... 8-этажными зданиями. В отдельных случаях, например при застройке квартала зданиями, объем каждого из которых составляет около 150... 200 тыс. м³, когда в каждом здании должна быть сетевая подстанция, целесообразно, повидимому, сооружение двухмагистральной автоматизированной сети высокого напряжения.

2. Экономически целесообразным напряжением для кабельной сети низкого напряжения в районах крупных городов с 5... 8 и 8... 14-этажными зданиями является 220/127 в. Ежегодные эксплуатационные расходы по сети при напряжении 380/220 в на 50... 60% больше, чем при напряжении 220/127 в. Дополнительные расходы, связанные с вложением большего количества меди, при напряжении сети 220/127 в окупятся в течение 2... 5 лет.

В районах, застроенных зданиями с меньшим числом этажей, преимущества сети 220/127 в будут уменьшаться и сеть 380/220 в может оказаться более целесообразной.

Литература

1. А. А. Глазунов, И. С. Бессмертный и Ф. Ф. Воронцов. Основные положения построения схем городских электрических сетей. Электричество, № 12, 1952.

2. Л. А. Солдаткина. К вопросу о схемах городской электросети низкого напряжения. Электричество, № 12, 1953.

[6. 4. 1955]



Электродинамические силы в трансформаторах

Доктор техн. наук Г. Н. ПЕТРОВ и кандидат техн. наук И. С. НАЯШКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Развитие энергетики Советского Союза, создание мощных тепловых и гидроэлектрических станций, строительство дальних электропередач переменного и постоянного токов ставят перед электропромышленностью среди многих задач — задачу освоения мощных высоковольтных трансформаторов.

Повышение мощности трансформаторов сверх 100 000 кВА в фазе при одновременном увеличении номинального напряжения до 400 кВ и больше связано со значительным возрастанием их габаритов. Даже при условии применения холоднокатанной листовой стали, позволяющей поднять индукцию в сердечнике до 16 000 и выше гаусс, диаметры стержней¹ таких трансформаторов превышают 1 м, а высота обмоток 2,5 м.

Создание жесткой, механически прочной обмотки при таких ее размерах с учетом неизбежной значительной неравномерности в распределении витков по высоте обмотки и всех ее других структурных особенностей является весьма трудной технической задачей. При этих условиях опасность нарушения целостности конструкции обмоток от электродинамических сил при аварийных процессах с ростом мощностей и напряжений трансформаторов повышается.

Современный трансформатор является одним из наиболее надежных элементов электрических систем. Число аварий трансформаторов относительно мало. Однако в условиях современного развития энергетических систем проблема надежности трансформаторов приобретает все возрастающее значение.

Расчет электродинамических сил и последующий анализ прочности обмоток связаны со значительными трудностями. Это объясняется сложным распределением магнитного поля рассеяния, особенностями упругих свойств обмоток, как механической системы, и своеобразным характером действующих на обмотку сил. Расчету электродинамических сил посвящено значительное количество исследований, опубликованных в отечественной и зарубежной технической печати. Однако эти исследования касаются главным образом простейших случаев, характерных для конструкций трансформаторов сравнительно небольших мощностей и напряжений. В настоящей работе делается попытка разработать метод расчета электродинамических сил, применимый к более сложным обмоткам, которые имеют трансформаторы весьма больших мощностей и напряжений.

Особенность упругих свойств обмоток. Обмотка трансформатора не является однородным телом. Наличие витковой изоляции и межкатушечных прокладок из прессованного картона создает значительное непостоянство упругих свойств обмоток. Модуль упругости обмотки при сжатии зависит от степени ее предварительной запрессовки в осевом направлении и изменяется в условиях

эксплуатации из-за неизбежной усадки изоляционного материала.

Другой особенностью механических свойств обмоток является полное отсутствие упругих деформаций растяжения. Подобное явление не встречается в обычных задачах сопротивления материалов и вносит принципиально новые качества в механические свойства обмоток трансформатора.

Изоляционные материалы занимают около половины всей высоты обмотки трансформатора. Поэтому наличие даже незначительной усадки изоляции при полном отсутствии внутренних упругих связей на растяжение между отдельными секциями и изоляционными прокладками может привести к заметному изменению упругих свойств всей обмотки.

Периодический характер внутренних электродинамических сил. Кроме внешних сил, действующих на обмотку в результате осевой запрессовки, в каждом витке секции обмотки возникают внутренние силы, определяемые известным равенством

$$d\mathbf{f} = i [d\mathbf{l} \cdot \mathbf{B}], \quad (1)$$

где i — мгновенное значение тока в элементе длины проводника $d\mathbf{l}$, находящемся в магнитном поле рассеяния, характеризуемом вектором индукции $\mathbf{B}$.

В переходном процессе при коротком замыкании в линии электропередачи или внутри обмотки, а также при резком изменении нагрузки трансформатора ток обмотки и обусловленная током индукция поля рассеяния являются сложными функциями времени: $i = \varphi(t)$ и $B = \Phi(t)$. Изменение электродинамической силы во времени может быть представлено как произведение этих функций:

$$\varphi(t) \Phi(t) = x(t).$$

В простейшем случае в установившемся режиме

$$\varphi(t) \equiv \Phi(t) \text{ и } \varphi(t) \equiv \sin \omega t,$$

и электродинамические силы будут изменяться во времени с двойной частотой:

$$x(t) \equiv 1 - \cos 2\omega t.$$

Периодический характер действующих сил может обусловить резонансные колебания в отдельных витках и секциях обмотки, хотя в целом обмотка и не будет испытывать подобных колебаний. Упругие свойства изоляционного материала в значительной степени зависят от сил сжатия, и они могут меняться в широких пределах в различных частях обмотки, изменяя тем самым частоту собственных колебаний отдельных витков и секций (катушек). При сближении частот собственных колебаний и действующих сил возникают местные резонансные колебания, в результате которых возможны разрушения изоляции провода и последующие витковые замыкания. Исследования, проведенные М. Либкиндом [Л. 1], показали, что резонансные явления, связанные

¹ В дальнейшем будут рассматриваться главным образом стержневые конструкции.

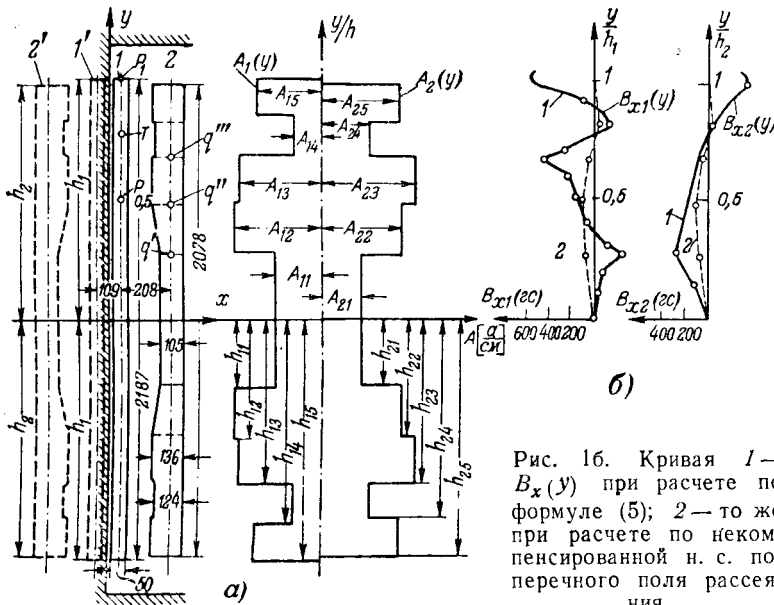


Рис. 1а. Размеры сечений обмоток трансформатора $\frac{220}{\sqrt{3}}$ кв, 40 000 кВа и изменение плотности н. с. $A(y)$ вдоль высоты обмоток.

с колебаниями всей обмотки трансформатора, в значительной степени определяются степенью предварительной запрессовки обмотки и характером изменения осевых сил вдоль высоты обмотки.

Отсутствие необходимого экспериментального материала не позволяет пока достаточно полно выявить значения и колебательный характер внутренних механических напряжений в обмотках трансформатора. Однако вне зависимости от этого нахождение пространственного распределения электродинамических сил в сечении обмотки является необходимым условием для оценки прочности конструкции при ее проектировании.

Если расчетным путем удастся найти с достаточной точностью силы, действующие на каждый виток или элемент обмотки, то из анализа распределения сил можно выявить те места обмотки, где ее опасные деформации наиболее вероятны.

В дальнейшем рассматривается инженерный метод расчета пространственного распределения электродинамических сил для тех случаев, когда в сечении обмотки имеется значительная неравномерность плотности намагничивающей силы (н. с.). Эту неравномерность принято связывать с отключением части витков одной из обмоток трансформатора. В действительности непостоянство плотности н. с. возможно и при неотключенных регулировочных витках, например в мощных высоковольтных трансформаторах, у которых для получения рациональной конструкции изоляции обмоток высшего напряжения предусматривается неравномерное распределение витков вдоль ее высоты.

Расчет поля рассеяния. Определение электродинамической силы, действующей на любой виток обмотки, сводится к расчету поля рассеяния: если в выражении (1) найден вектор индукции $\mathbf{B}$, то

Рис. 16. Кривая 1 — $B_x(y)$ при расчете по формуле (5); 2 — то же при расчете по некомпенсированной н. с. поперечного поля рассеяния.

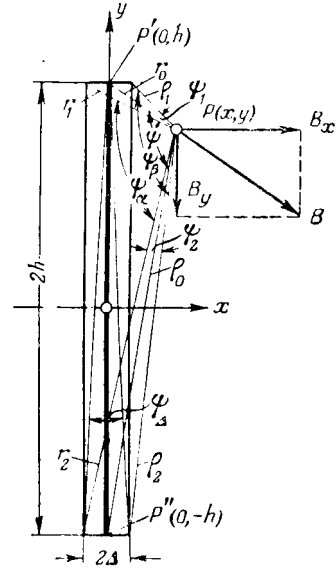


Рис. 2.

при известном токе обмотки без особого труда определяется и сила $\mathbf{f}$.

Расчет поля рассеяния производится в предположении бесконечно большого радиуса кривизны обмотки: $R = \infty$. Предполагается² также, что $i_2 \approx -i_1$. Наличие стального сердечника вблизи обмоток учитывается методом зеркального отображения действительных обмоток относительно плоскости, касательной к окружности, описанной вокруг ступенчатого сечения сердечника (рис. 1). Влияние конечной проницаемости стали сердечника может быть учтено умножением отраженного тока на коэффициент $\frac{\mu - 1}{\mu + 1}$, который, однако, во всех практических случаях близок к единице.

Для реальных соотношений между высотой $2h$ и шириной 2Δ сечений обмотки трансформатора ($\frac{h}{\Delta} \geq 10$) при расчете полей рассеяния можно пренебречь действительной шириной сечения и рассматривать обмотку в виде бесконечно тонкого цилиндра. Поле индукции $\mathbf{B}$, созданное током (рис. 2), имеет составляющие

$$B_x = 0,2 \cdot A\xi [zс], \quad (2)$$

и

$$B_y = 0,2 \cdot A\psi [zс], \quad (3)$$

где $A = \frac{i\omega}{2h}$ — линейная плотность н. с. обмотки (а/см);

$\xi = \ln \frac{r_0}{r_0'}$; $\psi = \arctg \frac{y-h}{x} - \arctg \frac{y+h}{x}$ — угол, под которым видна обмотка из данной точки $P(x, y)$;

r_0 и r_0' — соответствующие обозначения на рис. 2.

Как показывает долголетняя практика эксплуатации трансформаторов, главную опасность

² При условии, что $\omega_1 = \omega_2$.

для обмотки представляют осевые усилия, создающие напряжения изгиба в проводниках и напряжения сжатия (смятия) в изоляции. Поэтому наибольшие значения имеет точный расчет горизонтальной составляющей индукции поля рассеяния B_x в пределах сечения обмоток.

Сделанное выше допущение о возможности замены обмотки конечной толщины бесконечно тонкой приводит к бесконечно большому значению индукции B_x в точках P' и P'' (рис. 2) даже в простейшем случае, когда $A = \text{const}$. Действительно, при $\rho_0 \rightarrow 0$, $\xi \rightarrow \infty$; при $r_0 \rightarrow 0$, $\xi \rightarrow -\infty$, что физически невозможно.

Если $A \neq \text{const}$ вдоль высоты обмотки, а изменяется ступенями (рис. 1), то в точках q' , q'' , q''' , ... индукция B_x получает, согласно выражению (2), неопределенное значение.

Для устранения подобного затруднения необходимо учитывать конечные размеры сечения обмотки. В этом случае (рис. 2) в точке P' (приложение 1)

$$B_x = 0,2 \cdot A \vartheta, \quad (4)$$

где $\vartheta = \xi_\Delta + \frac{h}{\Delta} \psi_\Delta$;

$$\xi_\Delta = \ln \frac{h}{\Delta};$$

$$\psi_\Delta = 2 \cdot \arctg \frac{\Delta}{2h}.$$

Индукция B_x поля рассеяния в какой-либо точке, например в точке T (рис. 1а), может быть найдена как сумма индукций магнитных полей обмоток 1, 2 и их зеркальных изображений 1' и 2' при условии, что $i_2 = -i_1$. Применяя формулу (2) последовательно к отдельным частям обмоток, получаем после группировки подобных членов:

$$B_{xm} = 0,2 \cdot \left\{ \sum_{k=1}^n A_{1k} [(\xi_{1k} + \xi'_{1k}) - (\xi_{1(k-1)} + \xi'_{1(k-1)})] + \sum_{k=1}^m A_{2k} [(\xi_{2k} + \xi'_{2k}) - (\xi_{2(k-1)} + \xi'_{2(k-1)})] \right\}, \quad (5)$$

где A_{1k} и A_{2k} — линейные плотности н. с. обмоток 1 и 2 и их зеркальных отображений 1' и 2', постоянные в пределах k -той части высоты обмотки (рис. 1а);

ξ_{1k} и ξ_{2k} — значения функции $\xi = \varphi_0 \left(\frac{r_0}{\rho_0} \right)$ для рассматриваемой точки T относительно части обмоток с высотой³ h_k ;

ξ'_{1k} и ξ'_{2k} — значения функции $\xi = \varphi_0 \left(\frac{r'_0}{\rho'_0} \right)$ для аналогичных частей отраженных обмоток.

³ При распределении линейной плотности тока A_{1k} на части обмотки с высотой $h_k = h_{1k} - h_{1(k-1)}$ имеем: $A_{1k} h_k = A_{1k} h_{1k} - A_{1k} h_{1(k-1)}$; это равенство используется при выводе формулы (5).

Если расчет индукции поперечного поля B_x ведется для точек q' , q'' , q''' , ... (рис. 1а), расположенных на концах соответствующих частей высоты обмотки, где имеет место разрыв кривой $A(y)$, то вместо значений ξ_{11} , ξ_{12} , ξ_{13} , ... , обращающихся в бесконечность, следует брать значения функции ϑ_{11} , ϑ_{12} , ϑ_{13} , ... из (4), учитывающих конечные размеры сечений обмоток.

Расчет по формулам (2), (3) и (5) существенно упрощается, если воспользоваться семейством вспомогательных кривых $\xi = f(\varepsilon, \eta)$ (рис. 8) и $\psi = f_1(\varepsilon, \eta)$ (рис. 9) (см. приложение 2), позволяющих по известной высоте бесконечно тонкой обмотки и координатам рассматриваемой точки $P(x, y)$, определяемым параметрами $\varepsilon = \frac{x}{h}$ и $\eta = \frac{y}{h}$, найти для произвольного случая взаимного положения точки и обмотки искомые функции ξ и ψ .

Определение сил, действующих на витки. Расчет магнитного поля рассеяния трансформатора путем замены действительных обмоток, имеющих конечные размеры сечений, обмотками с бесконечно малой толщиной получил достаточно широкое распространение и использовался для определения суммарных сил между обмотками и между концевыми опорами и обмотками. Применение подобного метода для расчета сил, действующих на отдельные витки и секции, как уже отмечалось ранее, встречало затруднения, связанные с неточностью и неопределенностью аналитического определения индукции в местах изменения плотности н. с. По этой причине рассмотрение осевых сил обычно ограничивается простейшим случаем, когда в середине внешней обмотки отключены регулировочные витки, но плотность н. с. в сечении обмоток остается постоянной.

В общем случае, особенно в высоковольтных трансформаторах большой мощности, имеется значительная неравномерность плотности н. с. В этих условиях определение интегральных сил не дает полного представления о действительных напряжениях, возникающих в наиболее нагруженных частях обмоток. Если, пользуясь равенством (5), рассчитать распределение индукции B_x по высоте обмотки, то полученная кривая $B_x(y)$ одновременно позволяет судить о пространственном распределении осевых сил $f_y(y)$. Так как в реальных конструкциях трансформаторов $\Delta \ll h$, то изменение индукции B_x в пределах всех витков, составляющих секцию обмотки трансформатора, незначительно и с некоторым допущением в сторону повышения запаса прочности обмотки можно принять $B_x = \text{const}$ для каждой секции.

Так как осевые изгибающие силы в каждой секции можно рассматривать независимо, то очевидно, что наибольший изгибающий момент будет в тех секциях, которые располагаются в области максимума индукции $B_x(y)$. По максимуму B_{xm} кривой $B_x(y)$ (рис. 3) может быть найдена наибольшая элементарная осевая сила f_{ym} ,

действующая на 1 см длины витка между изоляционными прокладками:

$$f_{ym} = 1,02 \cdot i B_{xm} \cdot 10^{-7} \text{ [кг/см]}, \quad (6)$$

где i — мгновенное значение тока, а.

Если в первом приближении рассматривать виток в пределах между соседними прокладками как стержень, закрепленный на концах, то напряжение изгиба σ_m , соответствующее силе f_{ym} , будет определяться равенством

$$\sigma_m = \frac{5,1 \cdot i B_{xm} l_n^2}{a^2 b} 10^{-8} \text{ [кг/см}^2\text{]}, \quad (7)$$

где l_n — расстояние между центрами соседних прокладок;

a и b — соответственно, высота и ширина сечения обмоточного провода.

Очевидно, что место, где будет возникать наибольшая опасность деформации изгиба, и значение максимального напряжения изгиба не могут быть найдены без предварительного расчета кривой $B_x(y)$.

Определение суммарных осевых сил. Элементарные осевые силы одного знака в пределах части высоты обмотки $o'o''$ (рис. 3) создают суммарную осевую силу F_y :

$$F_y = 6,4 \cdot R m_y m_B \sum_{k=1}^N A_k S_k \cdot 10^{-7} \text{ [кг]}, \quad (8)$$

где A_k — значение линейной плотности н. с., а/см, постоянное в пределах k -го участка высоты;

S_k — площадь криволинейной трапеции, образованной кривой $B_x(y)$ с основанием, равным части высоты обмотки, в пределах которой плотность н. с. равна A_k ;

m_y и m_B — масштабы высоты обмотки и индукции поперечного поля на кривой $B_x(y)$;

R — средний радиус обмотки;

N — общее число элементов обмотки с различными постоянными значениями A между точками o' и o'' .

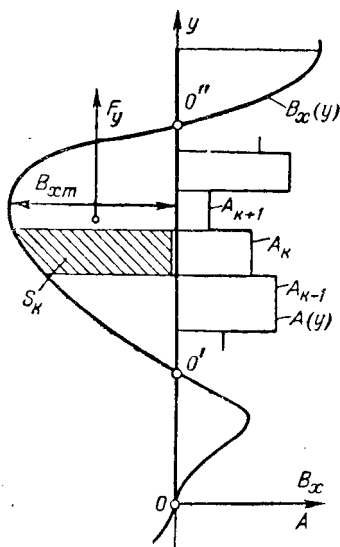


Рис. 3.

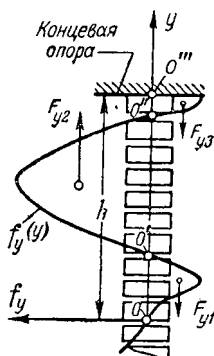


Рис. 4.

Так как полная поверхность изоляционных прокладок, воспринимающих на себя осевые силы сжатия, невелика, то в них и в соприкасающейся с ними изоляции витков могут возникать значительные напряжения на смятие.

Современные трансформаторы, как правило, строятся с одинаковыми по высоте обмотками, симметрично размещенными на стержнях. В этом случае принято интегрировать осевые силы в пределах половины высоты обмоток и находить, таким образом, наибольшее усилие в изоляционных прокладках [Л. 2].

Нетрудно показать, что при знакопеременном характере кривых $B_x(y)$ и $f_y(y)$ полученные путем такого интегрирования осевые силы могут не быть наибольшими силами, сжимающими прокладки. Более того, может оказаться, что интегрирование элементарных осевых сил в пределах половины высоты обмотки дает результирующую силу, не имеющую физического смысла.

Если на рис. 4 кривая $f_y(y)$ соответствует распределению элементарных сил f_y вдоль половины высоты обмотки и если интегральную осевую силу F_y в пределах этой части обмотки рассматривать в виде суммы трех составляющих F_{y1} , F_{y2} и F_{y3} , то очевидно, что при $|F_{y2}| > |F_{y3}|$ и $|F_{y2}| > |F_{y1}|$ интегральная сила

$$F_y = 2 \cdot \pi R \int_0^h f_y dy = |F_{y1} + F_{y2} + F_{y3}| \quad (9)$$

лишена физического смысла, ибо упругие связи на растяжение внутри обмотки отсутствуют.

Наибольшее усилие сжатия, действующее на изоляционные прокладки и изоляцию витков, характеризуется силой F_{y2} . Сила, с которой обмотка воздействует на концевую опору, определяется разностью сил: $F_{y2} - F_{y3}$.

Сила F_{y1} , хотя и направлена обратно силе F_{y2} , но не снижает давление на концевую опору, так как упругие связи при растяжении между частями обмотки oo' и $o'o''$ отсутствуют.

Таким образом, расчет суммарных осевых сил, действующих на отдельные части обмоток, не может быть выполнен без анализа кривой пространственного распределения индукции поперечного магнитного поля рассеяния.

Электродинамические силы в трансформаторах выпрямительных установок. Проблема дальнейшей передачи постоянного тока высокого напряжения связана с построением мощных трансформаторов, работающих в выпрямительных и в инвертерных установках. Надежная работа таких трансформаторов во многом зависит от механической прочности их обмоток при аварийных процессах, связанных с обратными зажиганиями ртутных вентилях. Ток в фазе вторичной обмотки трансформатора, соединенной с обратным горящим анодом вентиля, может, как показывает опыт, во много раз превышать номинальное значение вторичного тока. Вторичный ток в аварийной фазе имеет, помимо перемен-

ной $i_{2пер}$, значительную постоянную (выпрямленную) составляющую $i_{2нос}$: $i_2 = i_{2пер} + i_{2нос}$. В то же время в первичной обмотке той же фазы протекает только переменный ток $i_1 = -i_{2пер}$.

Отсутствие временного равновесия н. с. первичной и вторичной обмоток из-за постоянной составляющей тока $i_{2нос}$ существенно меняет характер электродинамических сил, действующих на отдельные части обмоток.

На рис. 5 показана цилиндрическая обмотка 1—2 с ее зеркальными изображениями 1'—2'. Поперечная составляющая индукции B_x , создающая в какой-либо точке T обмотки 1 осевую силу f_y , равна сумме индукций, обусловленных каждой из обмоток:

$$B_x = B_{x1} - B_{x2} + B'_{x1} - B'_{x2}.$$

Примем для простоты линейную плотность н. с. обмоток одинаковой: $A_1 = A_2 = A'_1 = A'_2 = A$, тогда согласно равенству (2)

$$B_x = 0,2 \cdot A \ln \frac{\rho_1 \rho'_1 \rho_2 \rho'_2}{r_1 r'_1 \rho_2 \rho'_2}. \quad (10)$$

Если намагничивающие силы обмоток 1 и 2 не компенсируют друг друга, например $A_2 = nA_1$, где $n > 1$, то при $A_1 = A$

$$B_x = 0,2 \cdot A \ln \frac{\rho_1 \rho'_1}{r_1 r'_1} \left(\frac{\rho_2 \rho'_2}{\rho_2 \rho'_2} \right)^n. \quad (11)$$

Из сопоставления равенств (10) и (11) следует, что в равенстве (10) под знаком логарифма стоит величина, близкая к единице, и $B_{x2} + B'_{x2} \approx B_{x1} + B'_{x1}$, поэтому результирующая индукция B_x в этом случае невелика. При нарушении равновесия н. с., как это имеет место при обратных зажиганиях, $B_{x2} + B'_{x2} \approx n(B_{x1} + B'_{x1})$. В этом случае в равенстве (11) под знаком логарифма стоит величина, существенно отличная от единицы, и поэтому значения результирующей индукции B_x и осевой силы f_y сильно возрастают, возможно даже изменение их знака. Это приводит к необходимости существенно усиливать механическую конструкцию обмоток трансформаторов, работающих в мощных преобразовательных установках.

Оценка точности расчета поля рассеяния. Аналитический метод расчета поля рассеяния трансформатора исходит обычно из бесконечно большой магнитной проницаемости стали сердечника, а также из безгранично больших размеров ярма и концевых опор. В действительности ширина плоскости ярма и концевых опор не превышает радиуса внешней обмотки. Кроме того, вихревые токи, возникающие в массивных ярмовых опорах трансформатора, заметно изменяют картину распределения поля рассеяния.

На рис. 6 представлены кривые $B_x(y)$, полученные экспериментально (кривая 1) и расчетным путем (кривые 2, 3 и 4). Кривая 3 харак-

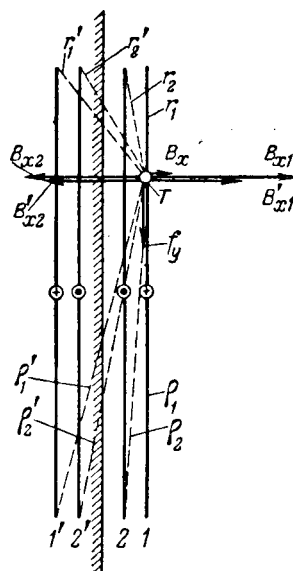


Рис. 5.

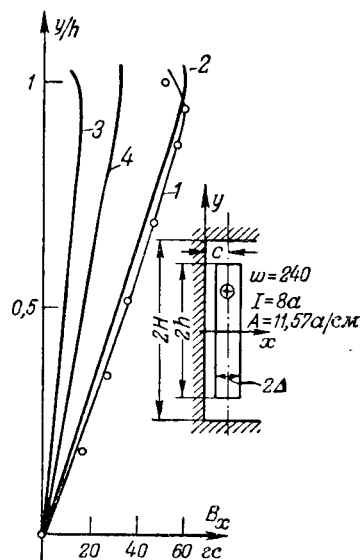


Рис. 6. ($2 \cdot \Delta = 51$; $2 \cdot h = 296$; $2 \cdot H = 352$; $c = 40$).

теризует изменение индукции $B_x(y)$ вблизи внешней поверхности обмотки (на расстоянии 3 мм от наружных витков) при бесконечно большом числе отображений обмотки относительно плоскостей ярма [Л. 2]. Кривая 4 соответствует значениям индукции $B_x(y)$ при учете ярма однократным зеркальным отображением.

Из сравнений кривых следует, что наилучшее приближение к действительности дает кривая 2, построенная расчетным путем по формулам (2) и (4) с учетом влияния только стальной плоскости сердечника.

При отключении в середине обмотки $2 \times 8,8\%$ витков (рис. 7) характер кривой $B_x(y)$ резко изменяется, но расчетная кривая 2 и опытная кривая 1 достаточно близки друг к другу.

При больших неравномерностях плотностей н. с. в сечениях обмоток в мощных высоковольтных трансформаторах поперечное магнитное поле рассеяния обычно рассчитывают, исходя из кривой некомпенсированной н. с. обмоток. Распределение индукции B_x в этих случаях отождествляется с распределением н. с.

На рис. 1а приведены размеры сечений обмоток и распределение плотности н. с. вдоль высоты обмоток для трансформатора 40 000 кВА, $\frac{220}{\sqrt{3}}$ кВ. На рис. 1б пунктирная ломаная линия 2 соответствует расчетной кривой $B_x(y)$, полученной для этого трансформатора, исходя из некомпенсированной н. с. и соответствия кривых распределения н. с. и индукции поперечного поля B_x . Кривая 1 получена при расчете индукции B_x по формуле (5) с учетом действительных конечных размеров секций обмоток в тех точках обмоток, в которых кривая $A(y)$ имеет разрыв. Сравнение полученных кривых показывает, что действительное распределение индукции B_{x1} , а следовательно, и элементарных осевых силы

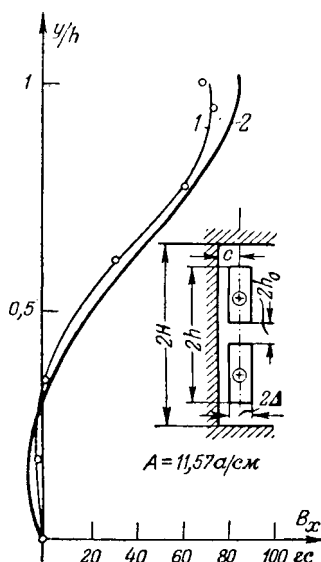


Рис. 7. ($2 \cdot \Delta = 51$; $2 \cdot h = 296$; $2 \cdot H = 352$; $c = 40$; $2h_0 = 54$).

Из кривых 1 и 2 рис. 1б следует, что если произвести приближенный расчет индукции поперечного поля B_x , исходя из некомпенсированной н. с. и соответствия распределения н. с. и индукции поперечного поля, то это может привести к значительным ошибкам.

Если согласно кривой 2 на концах обмоток $\frac{y}{h} = 1$, индукция $B_x = 0$, то из кривых 1 следует, что индукция B_x в этих местах обмоток имеет наибольшее значение, что физически вполне оправдано.

Многочисленные опыты авторов на специально построенных моделях обмоток подтверждают удовлетворительное совпадение опытных и расчетных данных, полученных по предложенному выше методу. Влияние стенок бака, ширины концевых опор и прочих факторов на осевые усилия в обмотках трансформатора незначительно и им можно пренебречь.

Заключение. Пространственное распределение сил, возникающих в обмотках трансформатора, является одним из основных факторов, определяющих механические процессы в трансформаторах. Исходя из особенностей упругих свойств обмоток трансформатора, нельзя ограничиться рассмотрением результирующих сил и не учитывать элементарные силы, приложенные к отдельным виткам. Более того, нельзя правильно оценить действия суммарных сил внутри обмотки, не зная общего характера распределения элементарных сил внутри сечения обмотки. Так как основой механического процесса в обмотках является взаимодействие электрического тока с магнитным полем, то главное внимание при расчете электродинамических сил следует обратить на правильность расчета магнитного поля.

При расчете осевых сил, представляющих для целостности обмоток наибольшую опасность, следует учитывать конечные размеры сечений обмо-

ток и характер изменения плотности н. с. по высоте обмоток.

С достаточной степенью точности (в пределах 10%) расчет поперечного поля рассеяния может быть произведен по предлагаемому методу без учета влияния концевых опор и стенок бака.

Метод расчета поля рассеяния, основанный на бесконечном числе отображений обмотки относительно плоскости ярма, дает неточные, заниженные результаты. Еще меньшую точность дает расчет поперечного поля по некомпенсированной н. с.

Для более полного решения вопросов механической прочности обмоток необходимо проведение экспериментальных определений деформаций изолированных медных проводников и изоляционных прокладок и установление взаимосвязей между действующими электродинамическими силами и упругими свойствами обмоток.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Магнитное поле обмотки прямоугольного сечения (рис. 2) определяется по формуле [Л.3]

$$B_x = 0,2 \cdot A \left(h_1 \psi_1 + h_2 \psi_2 + Q \ln \frac{\rho_1}{\rho_2} - q \ln \frac{r_1}{r_2} \right); \quad (1,1)$$

$$B_y = 0,2 \cdot A \left(h_2 \ln \frac{r_2}{\rho_2} + h_1 \ln \frac{r_1}{\rho_1} - Q \psi_\beta + q \psi_\alpha \right), \quad (1,2)$$

где

$$h_1 = h - y; \quad h_2 = h + y; \quad Q = x - \Delta; \quad q = x + \Delta;$$

$\psi_1; \psi_2; \psi_\alpha; \psi_\beta; \rho_1; \rho_2; r_1; r_2$ соответствуют обозначениям

рис. 2; $A = \frac{i\omega}{2h \cdot 2\Delta}$ — плотность н. с. обмотки, постоянная во всех точках ее сечения.

При $\Delta \rightarrow 0$ формулы (1,1) и (1,2) после раскрытия неопределенности принимают вид:

$$B_x = 0,2 \cdot A \ln \frac{r_0}{\rho_0} = 0,2 \cdot A \zeta; \quad (1,3)$$

$$B_y = 0,2 \cdot A \phi, \quad (1,4)$$

где $A = \frac{i\omega}{2h}$ — линейная плотность н. с. обмотки, постоянная по всей высоте;

$$\zeta = \ln \frac{r_0}{\rho_0};$$

$$\phi = \text{arctg} \frac{y-h}{x} - \text{arctg} \frac{y+h}{x}.$$

Если индукция B_x определяется в точке $P'(0, h)$ (рис. 2), то по формуле (1,3) $B_x \rightarrow \infty$, а по формуле (1,1)

$$B_x = 0,2 \cdot A \left(\zeta_\Delta + \frac{h}{\Delta} \phi_\Delta \right) = 0,2 \cdot A \theta,$$

где

$$\phi_\Delta = 2 \cdot \text{arctg} \frac{\Delta}{2h};$$

$$\zeta_\Delta = \ln \frac{h}{\Delta}.$$

2. Если рассмотреть несколько бесконечно тонких их проводов высотой $2h_1; 2h_2, \dots, 2h_n$ и определить значение

функций $\zeta_n = \ln \frac{r_n}{\rho_n}$ и $\phi_n = \text{arctg} \frac{y_n - h_n}{x_n} - \text{arctg} \frac{y_n + h_n}{x_n}$

для точек $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), \dots, P_n(x_n, y_n)$, удовлетворяющих по отношению к каждому из проводов условию

$$\frac{x_1}{h_1} = \frac{x_2}{h_2} = \dots = \frac{x_n}{h_n} = \text{const}$$

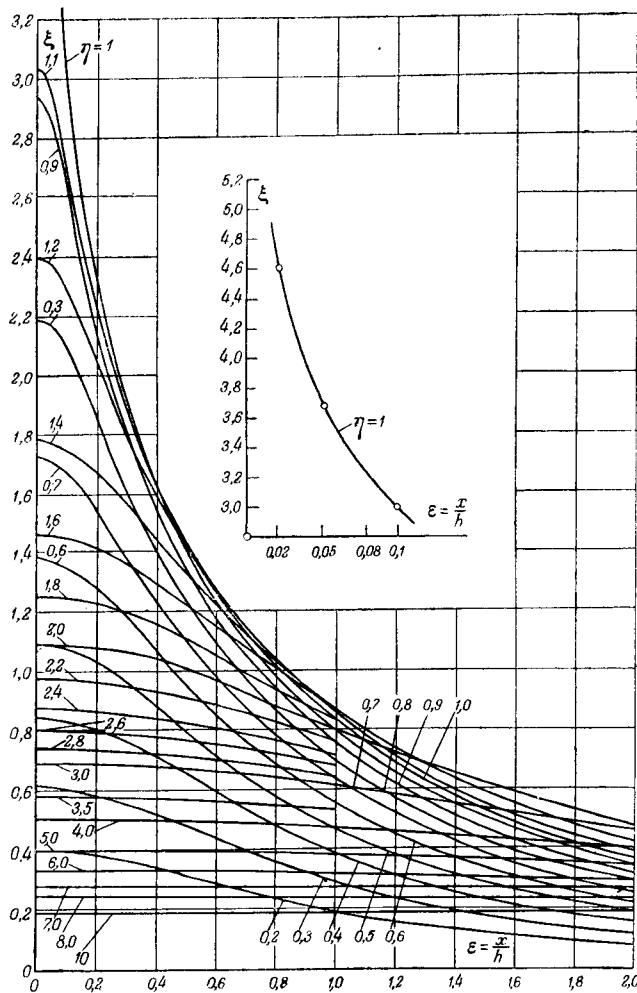


Рис. 8. $\zeta = f(\epsilon, \eta)$.

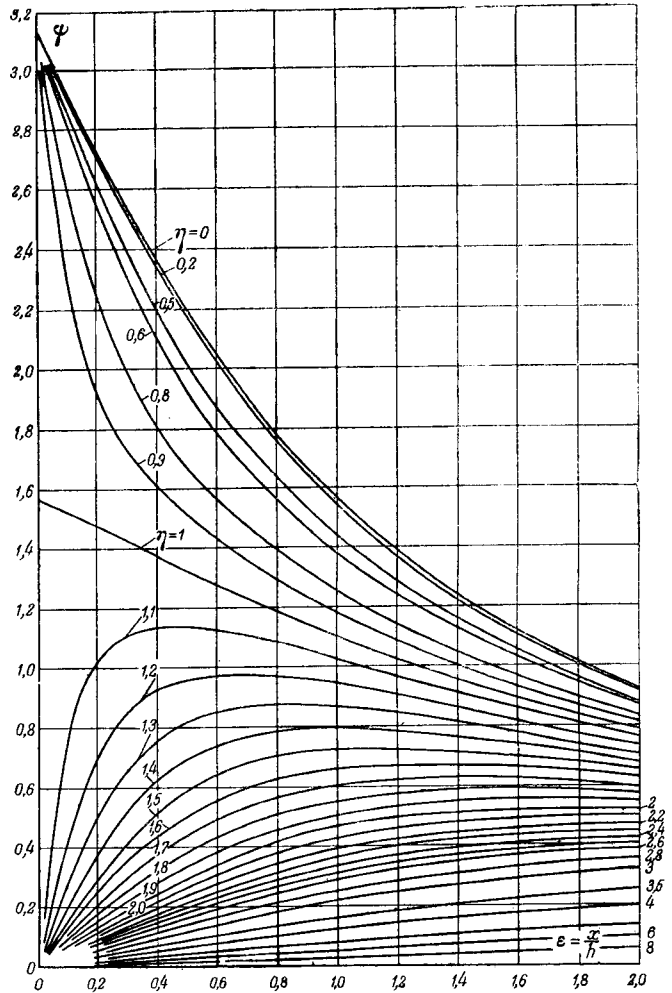


Рис. 9. $\psi = f_1(\epsilon, \eta)$.

и
$$\frac{y_1}{h_1} = \frac{y_2}{h_2} = \dots = \frac{y_n}{h_n} = \text{const},$$

то из геометрического подобия следует, что

$$\zeta_1 = \zeta_2 = \dots = \zeta_n = \text{const};$$

$$\psi_1 = \psi_2 = \dots = \psi_n = \text{const}.$$

Обозначим $\epsilon = \frac{x}{h}$ и $\eta = \frac{y}{h}$, тогда

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= \frac{1}{2} \ln \frac{\epsilon^2 + (\eta - 1)^2}{\epsilon^2 + (\eta + 1)^2}; \\ \psi &= \arctg \frac{\eta - 1}{\epsilon} - \arctg \frac{\eta + 1}{\epsilon}. \end{aligned} \right\} \quad (I,5)$$

Выражение (I,5) позволяет рассчитать семейства кривых $\zeta = f(\epsilon)$ при $\eta = \text{const}$ и $\psi = \psi(\epsilon)$ при $\eta = \text{const}$.

Тогда для любого частного случая, определив $\epsilon = \frac{x}{h}$ и $\eta = \frac{y}{h}$ по кривым (рис. 8 и рис. 9), находят искомые значения ζ и ψ .

В качестве примера рассмотрим обмотки I и 2, показанные на рис. 1а. Принимаем:

$$A_1 = \frac{i_1 \omega_1}{2h_1} = \text{const};$$

$$A_2 = \frac{i_2 \omega_2}{2h_2} = \text{const}.$$

Так как $i_1 \omega_1 \approx i_2 \omega_2$, а $h_1 \neq h_2$, то

$$A_2 = A_1 \frac{h_1}{h_2} = 1,048 \cdot A_1.$$

Определяем значение индукции B_x для точек $P_{0,5}$ и P_1 . Расположение обмоток — симметричное.

Расстояние точки $P_{0,5}$ от оси $x: y = 0,5 \cdot h_1$, поэтому

$$\eta_1 = \eta'_1 = \frac{x}{h_1} = 0,5;$$

$$\eta_2 = \eta'_2 = \frac{y}{h_2} = 0,524;$$

$$\epsilon_1 = \frac{x_1}{h_1} = 0, \quad \epsilon_2 = \frac{x_2}{h_2} = \frac{20,8}{103,9} = 0,2;$$

$$\epsilon'_1 = \frac{x'_1}{h_1} = \frac{10,9}{109,3} = 0,098, \quad \epsilon'_2 = \frac{x'_2}{h_2} = \frac{31,7}{103,9} = 0,305.$$

Для найденных значений $\epsilon_1, \epsilon'_1, \epsilon_2, \epsilon'_2$ и соответствующих параметров $\eta_1 = \eta'_1$ и $\eta_2 = \eta'_2$ по кривым $\zeta = f(\epsilon, \eta)$ находим $\zeta_1, \zeta'_1, \zeta_2$ и ζ'_2 . По формуле (5) имеем:

$$B_x = 0,2 [A_1 (\zeta_1 + \zeta'_1) - A_2 (\zeta_2 + \zeta'_2)] =$$

$$= 0,2 \cdot A_1 [1,1 + 1,08 - 1,048 (1,09 + 1,01)] = -0,004 \cdot A_1.$$

Электрические микромашины

Доктор техн. наук, проф. Ю. С. ЧЕЧЕТ

Московский энергетический институт им. Молотова

Электрические машины малой мощности — микромашины — получили весьма широкое распространение. В промышленности, сельском хозяйстве, транспорте, связи, медицине, звукозаписи и звуковоспроизведении, общественном питании и домашнем быту они получили разнообразное использование в качестве приводных двигателей для различных механизмов. В схемах автоматики, телемеханики и счетно-решающей техники микромашина часто является одним из основных элементов. Разнообразие областей применения микромашин и выполняемых ими функций привело к большому многообразию типов и конструктивных исполнений. Мощность микромашин колеблется в пределах от долей ватта до 500 Вт, скорость вращения — от одного оборота в час до 12 000 об/мин. Возникла новая большая отрасль электромашиностроения. Например, в США по суммарной выпускаемой мощности и стоимости микромашины оставили за собой производство крупнейших электрических машин — турбо- и гидрогенераторов.

Настоящая статья ставит целью краткое рассмотрение основных типов современных микромашин, их свойств и областей применения. Для более удобного анализа разделим все многообразие микромашин на две обособленные группы:

А. Микродвигатели широкого применения.

Б. Микромашины автоматических устройств.

Необходимость такого подразделения обусловлена двумя причинами. Во-первых, машины группы А являются исключительно двигателями, предназначенными для привода различных механизмов, в то время как в группе Б мы встретим и двигатели, и генераторы, и преобразователи (в широком понимании этого слова). Во-вторых, если мощность двигателей группы А лежит, как правило, в пределах 25—500 Вт, редко опускаясь ниже, то мощность машин группы Б часто весьма ничтожна, составляя иногда доли ватта.

А. Микродвигатели широкого применения. Внутри этой группы можно наметить следующую классификацию:

АI. Асинхронные двигатели трехфазного тока.

АII. Асинхронные двигатели однофазного тока:

АII1 — с повышенным сопротивлением вспомогательной фазы;

АII2 — с пусковой емкостью;

АII3 — с пусковой и постоянно включенной емкостями;

АII4 — с постоянно включенной емкостью;

АII5 — с короткозамкнутыми витками на полюсах.

АIII. Асинхронные двигатели с массивным стальным ротором.

АIV. Многоскоростные асинхронные двигатели.

AV. Синхронные реактивные двигатели.

AVI. Гистерезисные двигатели.

AVII. Универсальные коллекторные двигатели последовательного возбуждения.

AVIII. Двигатели постоянного тока:

AVIII1 — последовательного возбуждения;

AVIII2 — параллельного возбуждения.

Здесь перечислены лишь основные типы микродвигателей широкого применения, получившие наибольшее распространение. Иностранные фирмы выпускают также ряд комбинированных машин — асинхронных с репульсионным пуском, синхронно-индукционных и т. д.

АI. Асинхронные двигатели трехфазного тока. Если в области приводов средней и большой мощности доминирующее значение принадлежит трехфазным асинхронным двигателям, то в области микропривода наблюдается обратное явление: подавляющее большинство двигателей — однофазные. По данным Трикки (Trickey), в США 98,7% двигателей мощностью до $\frac{3}{4}$ л. с. (около 550 Вт) работают на однофазном токе. В Германии, по данным (довоенным) фирмы Заксенверк, удель-

Расстояние точки P_1 от оси x : $y = h_1$

$$\eta_1 = \eta'_1 = \frac{y}{h_1} = 1; \quad \eta_2 = \eta'_2 = \frac{y}{h_2} = 1,048;$$

$$\epsilon_1 = 0; \quad \epsilon'_1 = 0,098; \quad \epsilon_2 = 0,2; \quad \epsilon'_2 = 0,305.$$

При $\epsilon_1 = 0$ и $\eta_1 = 1$ $\zeta(0,1) \rightarrow \infty$, поэтому вместо $\zeta(\epsilon, \eta)$ определяем значение функции $\vartheta_1(\zeta_A, \psi_A)$ из равенства (4), учитывающего конечные размеры сечения обмотки I.

При $2\Delta_1 = 50$ из равенства (4) получаем

$$\zeta_A = \zeta\left(\frac{\Delta_1}{h_1}, \frac{y_1}{h_1}\right) = \zeta(0,0229; 1);$$

$$\psi_A = \psi\left(\frac{2h_1}{\Delta_1}, \frac{x_1}{\Delta_1}\right) = \psi(87,4; 0).$$

Значения ζ'_1 , ζ_2 и ζ'_2 определяются при помощи кривых рис. 8 по параметрам ϵ и η : $\zeta'_1 = \zeta(\epsilon'_1, \eta'_1)$, $\zeta_2 = \zeta(\epsilon_2, \eta_2)$, $\zeta'_2 = \zeta(\epsilon'_2, \eta'_2)$. Окончательно имеем по формуле (5):

$$B_x = 0,2 [A_1 (\eta_1 + \zeta'_1) - A_2 (\zeta_2 + \zeta'_2)] =$$

$$= 0,2 \cdot A_1 [5,44 + 3,0 - 1,048 (2,28 - 1,885)] = 0,814 \cdot A_1.$$

Если $A_1 \neq \text{const}$, $A_2 \neq \text{const}$, то расчет производится аналогично по формуле (5), причем при расчете индукции B_x для каждой из обмоток параметр $\epsilon = \frac{x}{h}$ остается постоянным, что в значительной степени облегчает и упрощает расчет.

Литература

1. М. Л. Либкинд. Диссертация. Академия наук СССР, 1942.
2. Г. С. Аронзон. Электродинамические усилия в трансформаторах. Известия ОТН Академии наук СССР, 1940.
3. Б. Хэг. Электромагнитные расчеты. ГЭИ, 1934.

[3. 5. 1965]



ный вес однофазных машин мощностью до 600 *вт* составляет 93,5%. Основной причиной этого следует считать то обстоятельство, что в большинстве установок, обслуживаемых микродвигателями, имеется только однофазный ток, к тому же однофазные двигатели могут работать и от трехфазной сети.

Основными потребителями трехфазных микродвигателей являются индивидуальный привод промышленных предприятий легкой промышленности и многодвигательный привод станков. Одной из интересных областей применения трехфазных микродвигателей является в настоящее время сверхскоростное шлифование и сверление малых отверстий. При скоростях до 24 000 *об/мин* здесь применяются двигатели с обычным короткозамкнутым ротором (беличьей клеткой), при более высоких скоростях (до 120 000 *об/мин*) приходится из условий механической прочности переходить на массивный стальной ротор (см. ниже АП3).

По своей конструкции трехфазные асинхронные микродвигатели почти не отличаются от аналогичных двигателей мощностью до 10 *квт*. Так, в СССР трехфазные микродвигатели единой всесоюзной серии конструктивно оформлены так же, как и двигатели АОЛ серии А и даже имеют тот же шифр. Пакет статора залит в алюминиевый корпус. Исполнение — обдуваемое, ротор — короткозамкнутый с алюминиевой заливкой. Подшипники — шариковые. Напряжение 127/220 и 220/380 *в*. Скорость вращения (синхронная) 3 000 и 1 500 *об/мин*. Предусмотрено также двухскоростное исполнение (3 000/1 500 *об/мин*). Мощности: 80, 120, 180, 270, 400 и 600 *вт* при 3 000 *об/мин* и 50, 80, 120, 180, 270 и 400 *вт* при 1 500 *об/мин*.

АП. Асинхронные двигатели однофазного тока. Начальный пусковой момент асинхронного двигателя при чисто однофазном питании статора равен нулю, поэтому все однофазные двигатели должны снабжаться вспомогательными обмотками. Параметры главной и вспомогательной обмотки должны быть подобраны так, чтобы их н. с. были сдвинуты во времени. Так как обмотки сдвинуты в пространстве, то тем самым создаются условия, необходимые для образования вращающегося магнитного поля (в общем случае эллиптического) и, следовательно, появления начального пускового момента. По окончании пуска вспомогательная обмотка в случаях АП1 и АП2 размыкается, а в случаях АП3, АП4 и АП5 остается включенной.

На рис. 1 показаны схемы соединений обмоток однофазных асинхронных двигателей. Главная обмотка обозначена буквой *Г*, вспомогательная — *В*. Далее, на этих схемах: *К* — выключатель, *R_п* — пусковое сопротивление, *C_п* — пусковой конденсатор, *C_р* — рабочий (постоянно включенный) конденсатор. Сопротивление *R_п* чаще всего реализуется путем повышения собственно активного сопротивления вспомогательной обмотки *В*, что может быть достигнуто либо уменьшением сечения провода вспомогательной об-

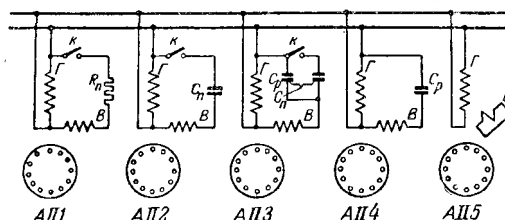


Рис. 1. Схемы однофазных асинхронных микродвигателей.

мотки, либо соответствующим выбором числа секций, либо, наконец, бифилярной намоткой части секций. В тех случаях, когда вспомогательная обмотка после пуска отключается (АП1 и АП2), для лучшего использования машины ей отводится лишь $\frac{1}{3}$ (реже $\frac{1}{4}$) общего числа пазов. При постоянно включенной вспомогательной обмотке (АП3 и АП4) обе обмотки расположены в одинаковом числе пазов. Исключение составляет двигатель с короткозамкнутыми витками на полюсах, где главная обмотка *Г* выполняется сосредоточенной и состоит из катушек, намотанных вокруг выступающих полюсов (ниже рис. 5), а вспомогательная обмотка *В* представляет собой массивный медный виток (кольцо), охватывающий часть полюсной дуги.

Показанный на схемах рис. 1 выключатель *К* служит для отключения после пуска вспомогательной обмотки или пускового конденсатора. Отключение происходит при скорости, составляющей 75...80% от синхронной. Конструктивно выключатель может быть выполнен либо центробежного типа, либо в виде реле. Иногда применяются и более простое неавтоматическое кнопочное устройство.

На рис. 2 показаны механические характеристики для двигателей рассматриваемых типов, входящих в единую всесоюзную серию малых машин.

Для двигателей с повышенным активным сопротивлением вспомогательной обмотки (АП1) пусковой момент составляет примерно 120% от номинального. Разбег совершается сперва по кривой 1, соответствующей включению обеих обмоток, а затем после отключения вспомогательной обмотки (точка *а*) совершается переход на кривую 2. Нерабочие части обеих кривых показаны пунктиром. Из кривых видно, что при скорости около 90% от синхронной кривая суммарного момента обеих обмоток пересекает кривую момента одной основной обмотки и в дальнейшем проходит ниже и, следовательно, из этих условий уже следует признать целесообразным отключение вспомогательной обмотки. При этом, разумеется, уменьшаются потери в статоре и повышается к. п. д. Вспомогательную обмотку следует отключать еще и потому, что она не рассчитана на длительную работу и может выгореть. Максимальный момент при однофазном режиме, соответствующий точке *б* на диаграмме рис. 2, составляет примерно 180% от номинального.

При желании получить двигатель с более вы-

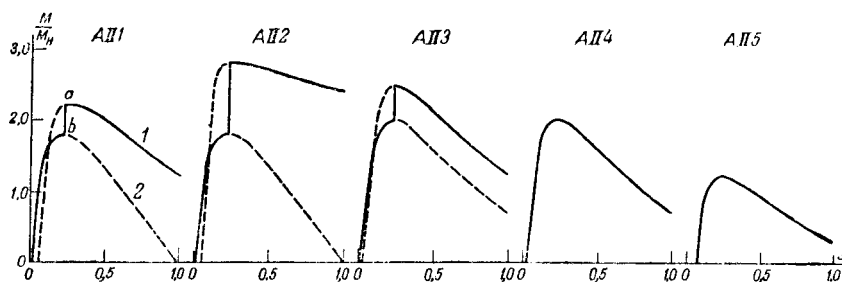


Рис. 2. Характеристики однофазных асинхронных микродвигателей.

соким пусковым моментом, приходится применить конденсаторный пуск (АП2). Как видно из рис. 2, начальный пусковой момент при этом способе пуска составляет около 240...250% от номинального. После отключения вспомогательной обмотки машина переходит на чисто однофазный режим работы и приобретает те же свойства, что и в предыдущем случае (АП1).

Недостатком обеих рассмотренных схем является то, что в рабочем (чисто однофазном) режиме двигателю свойственны низкие значения к. п. д. и коэффициента мощности, для них также характерно малое использование объема и веса. Если основная обмотка занимает $\frac{2}{3}$ пазов статора, то теоретическая мощность такого двигателя может быть доведена до 70% от мощности того же типоразмера в трехфазном исполнении. Однако перегрузочная способность оказывается при этом недостаточной, что заставляет снижать номинальную мощность однофазной машины до 45...50% от трехфазной. Значительно лучшего использования (70...75%) можно достичь в том случае, если вспомогательную обмотку оставить включенной и при работе двигателя и если к тому же так подобрать емкость конденсатора C_p , чтобы при номинальном режиме вращающееся поле машины было приблизительно круговым. Чтобы обеспечить одновременно достаточно высокий пусковой момент, необходимо при пуске включать в цепь вспомогательной обмотки такую добавочную емкость, чтобы она совместно с рабочей емкостью C_p имела необходимое для создания требуемого пускового момента значение C_n . По достижении скорости 75...80% от синхронной эта добавочная емкость отключается, и дальнейшая работа происходит только с емкостью C_p (рис. 1, схема АП3). Как видно из рис. 2, пусковой момент составляет уже 120%, а максимальный — 200% от номинального. Не следует считать, что такой двигатель, как это можно было заключить на основании кривых рис. 2, по своим пусковым свойствам равноценен двигателю с повышенным сопротивлением вспомогательной обмотки (АП1). Действительно, и в том и в другом случае пусковой момент составляет 120% от номинального, однако пусковой ток конденсаторного двигателя значительно меньше.

Сказанное хорошо иллюстрирует рис. 3. Здесь кривые 2 и 3 показывают зависимость пускового тока и пускового момента (в долях номинальных значений) конденсаторного двигателя от пусковой емкости C_n . Прямые 1 и 4 дают значения

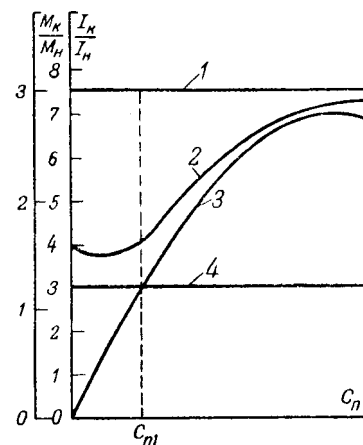


Рис. 3. Пусковой момент и пусковой ток двигателей с повышенным сопротивлением пусковой обмотки и с конденсаторным пуском.

пускового тока и пускового момента для двигателя по схеме АП1. Из кривых видно, что при некоторой емкости пусковые моменты обоих двигателей одинаковы (в данном случае оба составляют 120% от номинального), но пусковой ток конденсаторного двигателя равен четырехкратному номинальному, тогда как для машины с повышенным сопротивлением пусковой обмотки пусковой ток в 7,5 раза больше номинального и почти в 2 раза больше, чем для АП3. Из кривых также видно, что если путем увеличения емкости довести пусковой момент до максимально возможного значения 280% от номинального, то даже в этом случае кратность пускового тока здесь несколько ниже, чем при в 2,34 раза меньшем пусковом моменте схемы АП1. Существенными достоинствами схемы АП3 являются, кроме того, лучшее использование, а также достигаемое значительное увеличение к. п. д. и особенно $\cos \varphi$, приближающегося часто к единице.

При более скромных требованиях к значению пускового момента применяется схема АП4 с постоянно включенной емкостью. Если подобрать емкость C_p так, чтобы она соответствовала оптимальным условиям номинальной нагрузки, то пусковой момент может составлять 50...75% от номинального (рис. 2), что в ряде случаев вполне достаточно (например, для приводов, имеющих вентиляторную характеристику).

Единая всеобщая серия малых машин включает в себя три типа однофазных асинхронных двигателей: АОЛБ — с повышенным сопротивлением вспомогательной фазы; АОЛГ — с пусковой емкостью; АОЛД — с пусковой и постоянно включенной емкостями.

Все три типа имеют то же конструктивное исполнение, что трехфазные микродвигатели АОЛ. На рис. 4 слева показан двигатель АОЛБ мощностью 120 Вт, 3000 об/мин. Все двигатели рассчитаны на напряжение 127 и 220 В и на скорости 3000 и 1500 об/мин. Мощности двигателей АОЛБ и АОЛГ лежат в пределах от 30 до 270 Вт при 3000 об/мин и от 18 до 180 Вт при

1 500 об/мин, а для АОЛД соответственно от 50 до 400 и от 30 до 270 вт. Кратности пускового и максимального моментов соответствуют кривым рис. 2.

При разработке однофазных асинхронных микродвигателей приходится особое внимание уделять уничтожению или по крайней мере ослаблению высших пространственных гармонических в кривой поля (особенно третьей), могущих вызвать настолько глубокие провалы в механической характеристике, что в худшем случае двигатель не сможет развернуться до номинальной скорости. Для этой цели следует применять двухслойные обмотки с укороченным до $\frac{2}{3}$ полюсного деления шагом или специальные «синусные» обмотки с неодинаковым числом проводов в секциях.

Для приводов очень малой мощности (5... 15 вт) с вентиляторной характеристикой момента широко применяются в настоящее время простые по исполнению и недорогие по стоимости двигатели с короткозамкнутыми витками на полюсах. Поперечный разрез такой машины показан на рис. 5. Статор имеет выступающие полюсы, вокруг которых уложены сосредоточенные катушки главной обмотки Г. Часть полюсной дуги каждого полюса охвачена короткозамкнутым витком в виде массивного медного кольца. Для возможности размещения этих колец, образующих вспомогательную обмотку В, в полюсах имеются пазы. При питании обмотки Г от сети вследствие экранирующего действия короткозамкнутых витков В возникает сдвиг фаз между потоками в широкой и узкой частях полюсов, что и приводит к образованию эллиптического вращающегося поля. Как и в ранее рассмотренных типах двигателей, ротор выполнен в виде беличьей клетки. Между полюсами закладываются (не показанные на рисунке) стабилизирующие магнитные шунты. Типичная характеристика двигателя с короткозамкнутыми витками на полюсах показана на рис. 2 (АИ5).

Рассмотрим характерные применения однофазных асинхронных микродвигателей.

Двигатели с повышенным сопротивлением пусковой обмотки нашли широкое распространение в таких приводах, которые не требуют особо

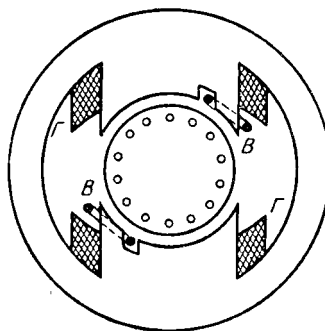


Рис. 5. Поперечный разрез двигателя с короткозамкнутыми витками на полюсах.

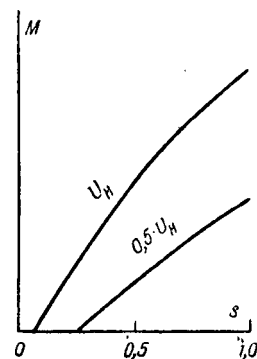


Рис. 6. Механические характеристики двигателя с повышенным сопротивлением ротора.

больших пусковых моментов. Сюда можно отнести центробежные насосы, форсунки, конторские машины, некоторые деревообделочные инструменты, маслобойки, полировочные машины, точильные машины. В СССР эти двигатели применяются для домашних стиральных машин, холодильников, ряда медицинских аппаратов (дезинфекторы, бактериальные анализаторы, отсасыватели) и т. д. Обычно мощности этих двигателей составляют 30 ... 200 вт.

Конденсаторные двигатели мощностью 50 вт и выше широко распространены за рубежом для таких приводов, которые требуют значительных пусковых моментов: компрессоры, установки для кондиционирования воздуха, стокеры, насосы бензоколонок, рефрижераторы и т. д. Для этих двигателей разработаны надежные малогабаритные электролитические пусковые конденсаторы, укрепляемые непосредственно на корпусе машины.

Двигателям с короткозамкнутыми витками на полюсах, помимо малого пускового момента, присущи еще и низкие к. п. д. и коэффициент мощности, поэтому их применение ограничено обычно мощностями до 30 вт (чаще всего встречаются мощности до 15 вт). Их устанавливают на небольших вентиляторах, аппаратах для сушки волос, электропроигрывателях, лентопротяжных механизмах (если не требуется строго постоянная скорость вращения) и т. д. Следует отметить, что у этих двигателей ток при неподвижном роторе лишь немногим больше, чем при номинальной нагрузке, вследствие чего они могут длительно находиться под напряжением в неподвижном состоянии без особых опасений за целостность обмотки.

АИИ. Асинхронные двигатели с массивным стальным ротором. Как известно, у асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором плавное регулирование скорости вращения можно осуществить лишь путем изменения напряжения на зажимах. Однако у машин с ротором нормального исполнения (клетка из медных стержней или литая из алюминия) пределы регулирования скорости получаются весьма небольшими. Поэтому, как правило, в тех случаях, когда требуется широкое плавное регулирование скорости вращения, применяются коллекторные универсальные двига-

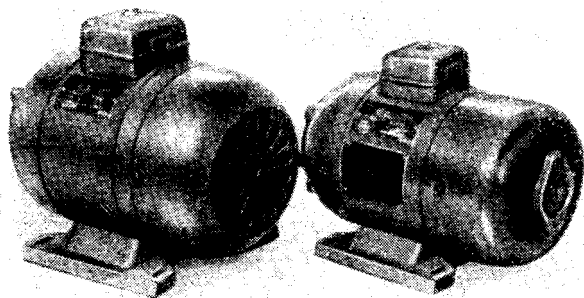


Рис. 4. Микродвигатели единой всесоюзной серии малых машин. Слева — однофазный асинхронный типа АОЛБ, справа — универсальный коллекторный типа УЛ.

тели, хотя им свойствен по сравнению с асинхронным ряд существенных недостатков (см. ниже). Если максимальная скорость, требуемая на валу двигателя, не превышает 2 500 ... 2 700 об/мин, то плавное его регулирование можно осуществить и в асинхронных двигателях при условии увеличения их критического скольжения, т. е. при условии увеличения активного сопротивления ротора. Для этой цели можно изготовить клетку из материала с повышенным удельным сопротивлением (латунь, бронза), однако для микромашин проще перейти к конструкции ротора в виде массивного стального цилиндра. На рис. 6 показана механическая характеристика при напряжениях $U = U_n$ и $U = 0,5 \cdot U_n$, а на рис. 7 дана регулировочная характеристика, показывающая характер изменения скорости вращения от напряжения при постоянном моменте вращения. Из рис. 6 видно, что увеличение активного сопротивления ротора вызвало изменение вида механической характеристики. Характеристика стала мягкой. Кривая рис. 7 показывает, что путем изменения напряжения здесь возможно плавное регулирование скорости практически от нуля до предельной. Несомненно, что вследствие увеличения сопротивления ротора потери двигателя увеличиваются и к. п. д. его падает, однако и в коллекторных микродвигателях регулирование производится путем введения в цепь машины добавочных сопротивлений (регулирующие трансформаторы для малых мощностей практически не применяют ввиду высокой стоимости и больших габаритов), что также вызывает увеличение потерь и снижает к. п. д. Наконец, простота устройства, эксплуатационная надежность, отсутствие скользящих контактов, отсутствие радиопомех—все эти преимущества, которые вполне окупают некоторое увеличение потерь. В настоящее время автор этих строк производит опыт замены коллекторных двигателей регулируемые асинхронными с массивным ротором в области медицинского оборудования. Некоторое уменьшение потерь может быть достигнуто путем омеднения поверхности ротора, однако для микромашин эта дополнительная операция не представляет особых выгод.

Необходимо подчеркнуть, что для работы с массивным ротором пригодны лишь трехфазные двигатели и те из однофазных, у которых вспомогательная обмотка не отключается, так как при чисто однофазном режиме двигатели с критическим скольжением больше единицы (что всегда имеет место в случае массивного ротора) не создают вращающего момента ни при какой скорости вращения.

АIV. Многоскоростные асинхронные двигатели. В тех случаях, когда плавное регулирование скорости не требуется, ее можно изменять скачкообразно, изменяя число полюсов статорной обмотки (роторная обмотка в виде беличьей клетки изменяет его автоматически). В простейшем случае можно заложить в пазы статора две самостоятельные обмотки с различным числом полюсов, например 2 и 4. Включая на сеть ту или иную

обмотку, получим соответственно 3 000 или 1 500 об/мин. Достоинством этого способа является минимальное число переключаемых выводов обмотки, а недостатками — низкое использование (всегда работает лишь половина заложенной в статор меди), увеличение размеров машины и практическая невозможность получения числа ступеней скорости больше двух. Более целесообразно для получения двух или трех ступеней скорости укладывать в пазы одну единственную обмотку с переключением числа полюсов. Широко известны схемы Т. Г. Амбарцумова и А. М. Харитоновой для трехфазных обмоток. Для однофазных двигателей весьма удачной оказалась схема на три ступени скорости, разработанная Турпитко (МЭИ им. Молотова) для трехскоростной медицинской центрифуги мощностью 80 вт, 3 000/1 500/1 000 об/мин. Двигатель управляется (переключение скоростей) при помощи простейшего переключателя барабанного типа. На верхней и нижней ступенях он работает как конденсаторный (емкость 7 мкф), а на средней — как чисто однофазный. Двухступенчатая схема для двигателя медицинской шлифмашины разработана также в МЭИ Саприцким.

AV. Синхронные реактивные двигатели. В тех случаях, когда по условиям работы приводного механизма требуется строго постоянная скорость вращения, применяются реактивные синхронные микродвигатели, не требующие, как известно, возбуждения постоянным током. Конструктивно эти машины не отличаются от рассмотренных выше асинхронных микродвигателей, за исключением формы поперечного сечения ротора. Чтобы создать неодинаковые магнитные проводимости по продольной и по поперечной осям машины, что необходимо для возникновения синхронизирующего момента, листам стали, из которых набран ротор, придают форму, показанную (для четырехполюсной машины) на рис. 8. Оба типа роторов с плоскими срезами (рис. 8, а) и с выемками по дуге окружности (рис. 8, б) создают, при прочих равных условиях, практически одинаковый момент входа в синхронизм, но момент выхода из синхронизма, характеризующий перегрузочную способность двигателя, во втором случае несколько выше. Так как ротор имеет обмотку в виде беличьей клетки, то синхронный реактивный двигатель пускается как асинхронный, причем в случае однофазных машин могут быть использованы все способы пуска, рассмотренные в разделе АII. Практически синхронный реактивный двигатель

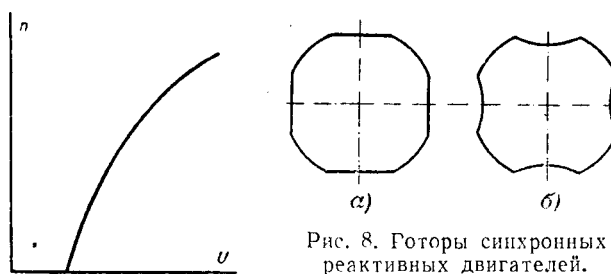


Рис. 8. Роторы синхронных реактивных двигателей.

Рис. 7. Регулировочная характеристика двигателя с повышенным сопротивлением ротора.

получают из асинхронного, используя его статор и видоизменяя только ротор. Необходимо учитывать, что мощность полученного таким путем синхронного двигателя составляет 35 ... 40% от мощности исходной асинхронной машины. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности также ниже. Подобные машины широко применяются в аппаратах звукозаписи и звуковоспроизведения, различного рода лентопротяжных механизмах, в приборах связи и т. д.

Для непосредственного получения низких скоростей вращения применяют так называемые редукторные двигатели, также относящиеся к рассматриваемому типу синхронных реактивных машин. Схематически такой двигатель показан в разрезе на рис. 9. Набранное из листовой стали наружное кольцо (статор) в случае, изображенном на рис. 9, имеет на внутренней поверхности 16 выступов. Двухполюсная обмотка статора, создающая магнитное поле, вращающееся относительно статора со скоростью 3 000 об/мин, помещена вне кольца (для ясности чертежа она не показана). Для получения начального пускового момента применяются рассмотренные выше методы — повышенное сопротивление, конденсатор, короткозамкнутые витки. На внешней поверхности ротора также имеются выступы (в данном случае 18). В момент времени, показанный на рис. 9, ось потока направлена по стрелке *a* и зубцы 1' (статорный) и 1 (роторный) с одной стороны и 9' и 10 с другой стороны находятся друг против друга, располагаясь по пути наибольшей магнитной проводимости. При повороте поля, например, в положение *b* на 45°, ротор повернется, очевидно, лишь настолько, чтобы поток снова проходил по пути наименьшего магнитного сопротивления, т. е. чтобы друг против друга оказались зубцы 3'—3 и 11'—12. Легко установить, что в общем случае скорость вращения ротора

$$n_R = \frac{Z_r - Z_s}{Z_r} \cdot \frac{f}{p} 60 \text{ [об/мин]},$$

где Z_r и Z_s — числа зубцов ротора и статора; f — частота сети; p — число пар полюсов. В случае рис. 9 $n_R = 333 \text{ об/мин}$. Для получения, например, $n_R = 75 \text{ об/мин}$ следует принять $Z_r = 80$ и $Z_s = 73$ и т. д.

Существуют и другие типы синхронных реактивных машин, но они имеют ограниченное применение.

АVI. Гистерезисные двигатели. Если ротор асинхронного двигателя выполнить в виде гладкого цилиндра или диска из стали с широкой петлей гистерезиса, т. е. со значительной коэрцитивной силой, то такой ротор самостоятельно придет во вращение под действием момента, вызываемого, с одной стороны, вихревыми токами, возникающими в массиве ротора, а с другой стороны, вследствие взаимодействия элементарных магнитиков (или молекулярных токов) с внешним полем машины. Первая составляющая момента по характеру ничем не отличается от момента

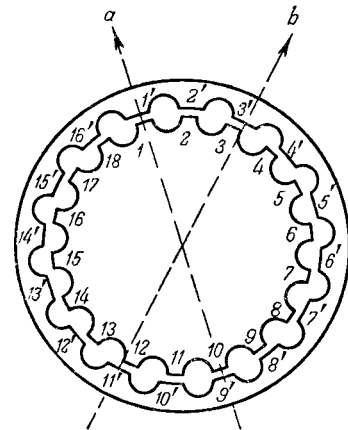


Рис. 9. Схема редукторного двигателя.

обычного двигателя с массивным ротором и приблизительно пропорциональна скольжению, а вторая — так называемый гистерезисный момент — не зависит от скольжения и определяется лишь значением коэрцитивной силы материала ротора. При достаточном значении гистерезисного момента ротор войдет в синхронизм. Для ослабления асинхронного момента от вихревых токов ротор следует набирать из изолированных друг от друга листов. До последнего времени гистерезисные двигатели строились лишь на мощности 5 ... 10 мвт для привода часовых и лентопротяжных механизмов, и они имели ничтожно малый к. п. д. (меньше 1%). Однако в настоящее время в США изготавливаются такие машины мощностью до 200 вт с весьма высоким к. п. д., до 80%. Этот успех связан с развитием методов уничтожения паразитных зубцовых моментов (путем применения совершенно закрытых пазов) и уменьшения тока возбуждения (путем добавочного толчкообразного намагничивания ротора повышенным напряжением). Большую роль сыграл здесь, конечно, и прогресс в технологии изготовления специальных магнитных сталей. Что касается схем статорных обмоток, то они и здесь ничем не отличаются от рассмотренных выше для трехфазных и однофазных асинхронных микродвигателей.

АVII. Универсальные коллекторные двигатели последовательного возбуждения. По своей конструкции универсальный коллекторный микродвигатель ничем не отличается от двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением без дополнительных полюсов, за исключением только того, что весь его магнитопровод набирается из листовой электротехнической стали. Как правило, ярмо и полюса штампуются одновременно из одного листа.

Универсальный двигатель имеет приблизительно одинаковые свойства и рабочие характеристики при питании как от переменного, так и от постоянного тока. Если отсутствует специальный регулятор скорости, зависимость скорости вращения от нагрузки имеет резко падающий характер (мягкая механическая характеристика). Типичные характеристики универсального двигателя показаны на рис. 10. При холостом ходе скорость достигает 12 000 ... 20 000 об/мин и ограничивает-

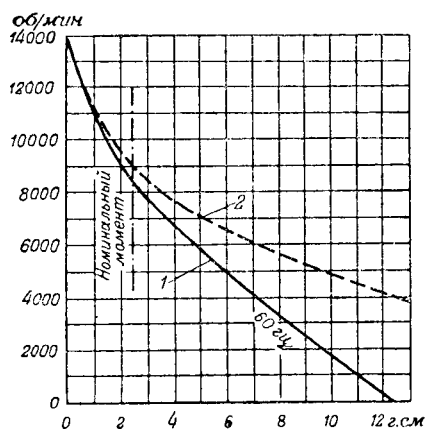


Рис. 10 Характеристики универсального коллекторного микродвигателя.
1 — переменный ток; 2 — постоянный.

ся лишь потерями или в случае необходимости специальным центробежным тормозом. При номинальной нагрузке скорость составляет обычно 3 500 ... 10 000 об/мин, а в некоторых случаях доходит даже до 18 000 об/мин. Чем выше номинальная скорость вращения, тем лучше энергетические показатели и тем совершеннее универсальность, иначе говоря, тем ближе друг к другу соответствующие характеристики на переменном и на постоянном токе. Однако при очень высоких скоростях труднее получить бесшумную коммутацию и обеспечить малозумность работы. Из кривых рис. 10 видно, что с уменьшением скорости наблюдается заметное расхождение характеристик. Объясняется это тем, что при питании переменным током создается значительное индуктивное падение напряжения, кроме того, при малых скоростях возникает большой сдвиг по фазе между током и напряжением. Для лучшего схождения характеристик можно устроить отводы на обмотке возбуждения, уменьшая число витков при переходе на переменный ток.

Регулирование скорости универсальных двигателей практически можно осуществить двумя способами: путем включения добавочного сопротивления в цепь якоря и обмотки возбуждения и путем включения добавочного сопротивления параллельно якорю (шунтирования якоря). Очень часто применяют смешанный способ регулирования, при котором на различных ступенях скорости имеют место различные комбинации последовательного и параллельного включения сопротивлений. Во всех указанных случаях возникают дополнительные потери в добавочных сопротивлениях, что приводит к уменьшению к. п. д.

Если условиями привода требуется постоянство скорости при различных нагрузках, то это может быть достигнуто при помощи автоматических центробежных регуляторов вибрационного типа, отключающих и включающих двигатель в допустимом диапазоне изменения скорости. Число включений и выключений доходит до 800 в секунду, что обеспечивает достаточно высокую стабильность скорости.

Существенным достоинством универсального двигателя является возможность непосредствен-

ного получения скоростей вращения и возможность их регулирования. Как следствие, с увеличением скорости связано и уменьшение веса и размеров. Тем самым оправдывается применение этих двигателей там, где возможна работа на высоких скоростях и где основную роль играет уменьшение объема и веса. Сюда следует отнести прежде всего многие бытовые приборы: пылесосы, волососушители, швейные машины, кухонные комбайны, электродрели и т. д. Однако часто мы встречаемся с применением универсальных двигателей в таких приводах, где это применение ничем не оправдано. Например, практикуемая у нас установка коллекторных двигателей на машины для натирания полов противоречит здравому смыслу, так как здесь малый вес является недостатком, заставляющим прибегать к дополнительному утяжелению аппарата. Повышенная скорость здесь не требуется, так же, как и не нужна ее регулировка. Такое же увлечение универсальными двигателями наблюдалось до последнего времени и в медицинской аппаратуре. Между тем универсальному двигателю наряду с указанными выше достоинствами¹ присущ ряд весьма неприятных недостатков и главнейшим является наличие коллектора и щеток и связанные с этим: уменьшение эксплуатационной надежности; сложность изготовления; возникновение радиопомех, требующих устройства сложных и дорогостоящих поглощающих фильтров; повышенная шумность; невозможность (из-за искрения) работать в атмосфере, насыщенной парами эфира, бензина и т. д., если только не применена полная герметизация.

Если исключить возможность непосредственного получения высоких скоростей и связанное с этим уменьшение размеров, то остальные положительные свойства коллекторных двигателей (мягкая характеристика, широкое регулирование скорости, высокий пусковой момент) могут быть реализованы при помощи однофазных асинхронных двигателей с массивным стальным ротором, и к тому же одновременно отпадут и все перечисленные недостатки. Исследования, проведенные по предложению и под руководством автора в лаборатории микромашин МЭИ им. Молотова, показали полную целесообразность такой замены в ряде случаев, в частности в медицинском оборудовании.

Единая всесоюзная серия малых машин предусматривает универсальные двигатели типа УЛ (в алюминиевом корпусе) на 8 000 об/мин (10 ... 600 Вт), на 5 000 об/мин (5 ... 400 Вт), на 2 700 об/мин (5 ... 400 Вт) и на 1 400 об/мин (5 ... 180 Вт). Внешний вид двигателя УЛ-061 мощностью 180 Вт, 8 000 об/мин показан на рис. 4 справа.

АVIII. Двигатели постоянного тока. Как и трехфазные асинхронные двигатели, двигатели постоянного тока широкого применения при мощностях до 500 Вт встречаются редко, в основном

¹ Часто приписываемое этому двигателю достоинство, в виде универсальности, в настоящее время, когда сети постоянного тока встречаются как исключение, вряд ли заслуживает внимания.

в тех случаях, когда сеть переменного тока отсутствует. Для портативных установок звукозаписи применяются микродвигатели пониженного напряжения, работающие от аккумуляторов. Такие же машины с аккумуляторным питанием применяются и в других случаях (в радиотехнике, в технике связи и т. д.). Двигатели пониженного напряжения применяются также в тех случаях, когда напряжение 110 в и выше не может быть допущено по соображениям техники безопасности.

Конструктивно микродвигатели постоянного тока отличаются от соответствующих машин большей мощности лишь отсутствием дополнительных полюсов. Встречаются также двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

В единой всесоюзной серии предусмотрены лишь двигатели параллельного возбуждения на 110 и 220 в мощностью 30 ... 400 вт при 2700 об/мин и 30 ... 270 вт при 1400 об/мин, а также на 24 в мощностью 10 ... 270 вт при 2700 об/мин и 10 ... 120 вт при 1400 об/мин. В качестве двигателей постоянного тока последовательного возбуждения можно использовать универсальные двигатели типа УЛ.

В заключение этого раздела приведем некоторые особенности конструкции и технологии изготовления микродвигателей широкого применения.

Для современных конструкций характерно широкое применение легких металлов и пластмасс. При использовании литья под давлением поверхности получаются настолько чистыми, что дальнейшая обработка не требуется. Запрессованный статорный пакет помещают в форму, в которой происходит отливка корпуса, и, таким образом, пакет, будучи как бы впрессован в алюминий, не нуждается в дальнейшем креплении при помощи стяжных болтов или шпилек.

Большое внимание уделяется в микродвигателях проблеме подшипников. Шариковые подшипники обладают тем преимуществом, что создают ничтожные потери на трение и требуют минимального ухода. Однако их существенный недостаток заключается в том, что они являются источником значительного шума, что во многих случаях (квартирные условия, медицинские учреждения, звукозапись и т. д.) совершенно недопустимо. В этом отношении преимущество на стороне подшипников скольжения, работающих практически бесшумно. В настоящее время широко применяются подшипники с бронзовыми вкладышами с фитильной смазкой и достаточным объемом масляного резервуара, обеспечивающим длительную работу машины без добавления смазки.

Правильно рассчитанное и сконструированное вентиляционное устройство позволяет значительно повысить мощность двигателя при данных габаритах или уменьшить габариты при данной мощности. Для асинхронных машин, у которых наиболее нагретой частью является статор, целесообразно применять наружный обдув. У коллекторных машин наибольшее количество тепла выделяется якорем и поэтому здесь следует рекомендовать обычную аксиальную вентиляцию.

Коллекторы современных микродвигателей собираются на пластмассе. Щеткодержатели — трубчатые прямоугольного или круглого сечения.

Б. Микромашины автоматических устройств. Основные типы машин, применяемых в автоматических устройствах, могут быть классифицированы следующим образом.

БI. Исполнительные двигатели:

БI1 — постоянного тока;

БI2 — асинхронные с полым ротором.

БII. Тахогенераторы:

БII1 — постоянного тока;

БII2 — асинхронные с полым ротором.

БIII. Поворотные трансформаторы:

БIII1 — синус-косинусные;

БIII2 — линейные;

БIII3 — построительные.

БIV. Сельсины:

БIV1 — контактные;

БIV2 — бесконтактные.

Перечень можно было бы дополнить еще рядом микромашин, применяемых в автоматике (например, шаговые двигатели, двигатели-гироскопы, магнесины и т. д.).

Необходимо отметить, что во многих случаях схемы автоматики, телемеханики и счетно-решающей техники предъявляют к микромашинам весьма высокие требования в отношении точности их работы. Иногда допустимые погрешности лежат в пределах сотых долей процента. Это обстоятельство накладывает особый отпечаток как на расчет машин, так и на их конструкцию и технологию изготовления. В качестве примера можно указать, что для поворотных трансформаторов применяются так называемые синусные обмотки, проводники которых распределяются в пазах по закону, обеспечивающему наименьшее содержание высших гармонических в кривой поля и э. д. с. При изготовлении пакетов применяют веерную сборку, поворачивая каждый последующий лист на одно пазовое деление, чем обеспечивается одинаковая магнитная проводимость пакета по всем радиальным направлениям. Весьма строгие допуски устанавливаются на эксцентриситет ротора относительно статора и относительно вала и т. д. Все это приводит к тому, что производство микромашин для автоматических устройств имеет практически такой же характер, как производство приборов точной механики.

БI. Исполнительные двигатели. Задачей исполнительных двигателей в схемах является обработка электрической величины (сигнала). До подачи сигнала, до включения обмотки двигателя на напряжение ротор неподвижен, после подачи сигнала ротор приходит во вращение и после снятия сигнала ротор должен немедленно остановиться без применения каких бы то ни было внешних тормозящих устройств.

В качестве исполнительного двигателя постоянного тока применяют машину обычного типа (без дополнительных полюсов) с независимым возбуждением от постороннего источника постоянного тока. Часто применяют также возбуждение от постоянных магнитов. Обмотку якоря можно назвать обмоткой управления, так как по-

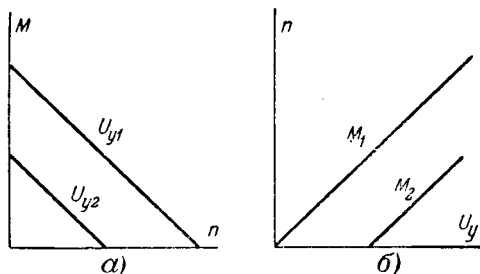


Рис 11. Схемы регулирования скорости коллекторного универсального микродвигателя.

а — механические и б — регулировочные характеристики исполнительного двигателя постоянного тока с якорным управлением.

дача сигнала (напряжения управления) на нее заставляет якорь приходить во вращение. Разумеется, обмотка возбуждения должна быть при этом длительно присоединена к сети. Большими достоинствами исполнительного двигателя постоянного тока с якорным управлением являются: значительный удельный момент (на единицу объема или веса машины), линейность основных характеристик и относительно небольшая электромеханическая постоянная времени, т. е. быстрое действие. Основными характеристиками исполнительного двигателя являются зависимость момента от скорости при постоянном напряжении управления (механическая характеристика) и зависимость скорости от напряжения управления при постоянстве момента (регулирующая характеристика). Если пренебречь влиянием насыщения и реакции якоря, что в данном случае практически вполне допустимо, то характеристики исполнительного двигателя постоянного тока с якорным управлением будут иметь вид, показанный на рис. 11, а (механические характеристики для двух различных напряжений управления) и 11, б (регулирующие характеристики для двух различных значений момента). Электромеханическая постоянная времени T_e обратно пропорциональна начальному моменту и прямо пропорциональна моменту инерции якоря. Так как начальный момент здесь достаточно велик, то постоянная получается небольшой, особенно если удлинить якорь и уменьшить его диаметр.

Если двигатель имеет независимое возбуждение, то управление можно осуществить путем подачи сигнала на обмотку полюсов при постоянно включенной на сеть обмотке якоря. Основным дефектом такого способа управления является нелинейность регулировочной характеристики, относительно большая мощность возбуждения и возможность «пригорания» щеток.

Недостатки, присущие всем коллекторным машинам (наличие скользящего контакта, радиопомехи и т. д.), а также относительные неудобства, возникающие при усилении постоянного тока, заставляют все чаще и чаще применять в схемах исполнительные двигатели переменного тока. Требования возможной линейности характеристик, малой электромеханической постоянной времени, немедленной остановки после снятия сигнала привели к созданию исполнительного асинхронного двигателя с полым немагнитным рото-

ром, конструктивная схема которого показана на рис. 12. На статоре 1 расположены под углом 90 эл. град. две обмотки 3: возбуждения, постоянно присоединенная к сети переменного тока, и управления, на которую подается сигнал. На валу насажен ротор 4 в виде полого тонкостенного цилиндра, изготовленного из алюминия. Для уменьшения магнитного сопротивления внутри ротора расположен неподвижный внутренний статор без обмотки 2. Для получения сдвига фаз между намагничивающими силами обеих статорных обмоток одну из них, обычно обмотку возбуждения, присоединяют к сети через конденсатор. Значительно реже применяется питание обмоток от двух сдвинутых по фазе напряжений (в этом случае конденсатор, разумеется, не ставится). Ввиду значительного активного сопротивления полого ротора механические и регулировочные характеристики аналогичны показанным на рис. 6 и 7 для двигателя с массивным ротором: строгая линейность не имеет места. Малая электромеханическая постоянная времени достигается за счет ничтожного момента инерции ротора, хотя удельный момент здесь много ниже, чем двигателя постоянного тока. При снятии сигнала ротор немедленно останавливается, так как в силу большого критического скольжения при переходе на чисто однофазный режим возникает тормозящий момент. Полное отсутствие скользящих контактов делает эксплуатацию двигателя весьма надежной, чем и объясняется широкое распространение исполнительных двигателей с полым ротором.

Мощности исполнительных двигателей колеблются в пределах от долей ватта до нескольких десятков ватт, в редких случаях 100 ... 200 вт. Двигатели переменного тока строятся на частоту от 50 до 500 гц.

БII. Тахогенераторы. В счетно-решающих схемах тахогенераторы в основном служат для электрического дифференцирования, а также для ускорения или замедления сигналов. Операция дифференцирования основана на том, что при постоянном потоке возбуждения э. д. с. генератора пропорциональна скорости вращения, иначе говоря, производной от угла поворота по времени. В силу свойства обратимости электрических машин в качестве тахогенератора может быть использован исполнительный двигатель, если его вращать от постороннего источника механической энергии. Свойства тахогенератора опреде-

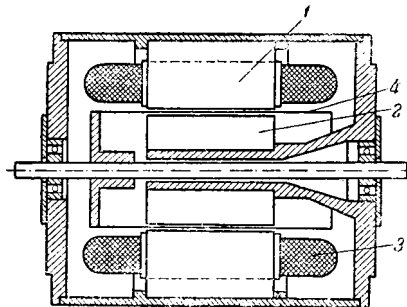


Рис. 12. Конструктивная схема исполнительного двигателя с полым ротором.

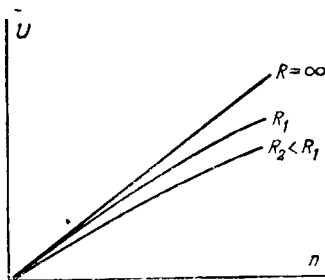


Рис. 13. Выходные характеристики тахогенератора.

ляются так называемой выходной характеристикой (рис. 13), представляющей собой зависимость выходного напряжения от скорости вращения при постоянстве внешнего сопротивления (нагрузки). Выходная характеристика — линейная только при разомкнутой обмотке, при бесконечно большом внешнем сопротивлении. Если это сопротивление имеет конечное значение, то возникает реакция якоря, искажающая линейность выходной характеристики и падение напряжения, уменьшающее выходное напряжение. Эти факторы действуют тем сильнее, чем меньше внешнее сопротивление. В тахогенераторах постоянного тока скользящий контакт между коллектором и щетками вносит дополнительное искажение, выражающееся в смещении характеристики из начала координат. Наиболее простым по конструкции является тахогенератор переменного тока, состоящий из статора с обмоткой и ротора в виде постоянного магнита. Однако такая машина далеко не всегда может быть использована в автоматических схемах, так как выходное напряжение изменяется здесь не только по величине, но и по частоте.

Используя в качестве генератора асинхронный двигатель с полым ротором, можно устранить этот недостаток, так как частота выходного напряжения не зависит здесь от скорости вращения и однозначно определяется частотой напряжения возбуждения. Погрешность выходной характеристики (отклонение от линейности) зависит от квадрата отношения измеряемой скорости к синхронной скорости. Так как последняя пропорциональна частоте, то, увеличивая частоту напряжения возбуждения, можно свести погрешность к ничтожно малой величине. Недостатком тахогенератора с полым ротором является нестабильность фазы выходного напряжения.

БIII. Поворотные трансформаторы. Современный поворотный трансформатор, служащий для получения на выходе напряжений, являющихся той или иной функцией угла поворота, представляет собой машину переменного тока, на статоре и на роторе которой уложены взаимно перпендикулярные в пространстве, распределенные обмотки (S и K на статоре, A и B на роторе, рис. 14). Если обмотку S питать однофазным переменным током, то в воздушном зазоре машины возникнет неподвижное в пространстве и пульсирующее во времени магнитное поле. Путем выбора схемы обмоток, числа пазов, степени насыщения магнитной цепи, а также при достаточно тщательном изготовлении машины можно добиться того, чтобы пространственное распределение этого поля в воздушном зазоре с достаточной степенью точности соответствовало закону синусоиды. Тогда при повороте ротора на угол α (рис. 14) э. д. с.

обмотки A будет пропорциональна $\sin \alpha$, а э. д. с. обмотки B — значению $\cos \alpha$. Таким образом, рассматриваемый так называемый синус-косинусный поворотный трансформатор может служить для определения тригонометрических функций угла поворота. При замыкании обмоток A и B на внешние сопротивления (приборы, схемы) проходящие по обмоткам токи создают каждый продольный (по оси обмотки S) и поперечный (по оси обмотки K) потоки реакции якоря. Продольные потоки приводят лишь к изменению масштабного коэффициента, а поперечные влекут за собой искажение распределения результирующей индукции в воздушном зазоре, что в свою очередь нарушает синусоидальный и косинусоидальный законы изменения выходных э. д. с. обмоток A и B от угла α . Это искажение можно уничтожить либо путем вторичного «симметрирования», если подобрать внешние сопротивления обмоток A и B одинаковыми (предполагается, что сами обмотки строго одинаковы), или, если это невозможно, путем первичного симметрирования, замыкая обмотку K на небольшое внешнее сопротивление.

Если соединить обмотки так, как показано на рис. 15, то мы получим схему линейного поворотного трансформатора, у которого напряжение на общих зажимах обмоток K и A с точностью до 1% пропорционально углу α в пределах от $\alpha = 0$ до $\alpha = 65^\circ$. Внешнее сопротивление, включенное в обмотку B , служит для симметрирования — уничтожения искажения, вносимого поперечным полем реакции.

Построительные поворотные трансформаторы служат для определения гипотенузы прямоугольного треугольника по двум заданным катетам. В этом случае к обеим статорным обмоткам S и K подводятся находящиеся в фазе напряжения, пропорциональные катетам, вследствие чего возникает результирующий магнитный поток, определенно направленный в пространство. Если повернуть ротор так, чтобы вольтметр, включенный в обмотку B , показал нуль, то обмотка A окажется расположенной на оси потока и индуцируемая в ней э. д. с. будет пропорциональна искомой гипотенузе. На других типах поворотных трансформаторов, например дифференциальных, фазопреобразователях и т. д., мы здесь не останавливаемся. При качественном выполнении поворотные трансформаторы являются весьма точными приборами и их применение в автоматических схемах открыло новые возможности

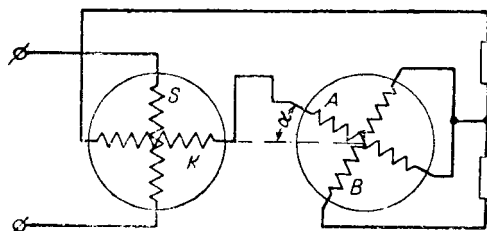


Рис. 14. Расположение обмоток поворотного трансформатора.

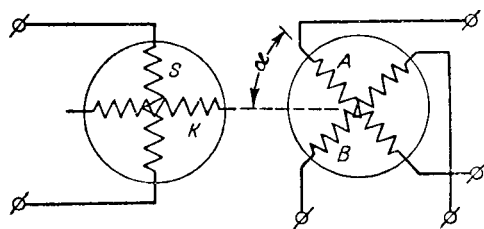


Рис. 15. Схема соединения обмоток линейного поворотногo трансформатора.

для создания совершенных счетно-решающих устройств.

БIV. Сельсины. В современных схемах синхронной связи для целей дистанционного управления, регулирования и контроля применяются почти исключительно микромашины, получившие наименование сельсинов. Конструктивно различаются сельсины контактные и бесконтактные.

Контактный сельсин имеет на статоре два явно выраженных полюса, на которых располагается однофазная обмотка возбуждения. На роторе размещены в пазах три обмотки, сдвинутые на угол 120° , начала которых соединены в общую точку, а концы выведены на три контактных кольца. Роторная обмотка носит название обмотки синхронизации. Существуют контактные сельсины, у которых на роторе расположена обмотка возбуждения, выведенная на два кольца, а на статоре — обмотка синхронизации.

Бесконтактный сельсин, предложенный А. Г. Иосифьяном и Д. В. Свечарником, имеет более сложное устройство, идея которого показана на рис. 16. Статор 1 имеет трехфазную обмотку синхронизации 2, уложенную в пазах. Ротор 4 состоит из двух половин (полюсов), разделенных немагнитной прослойкой 5. По обеим сторонам статора ротор свободно охватывается двумя кольцевыми обмотками возбуждения 3. Остов 6 служит магнитопроводом. Статор набирается из листов, плоскости которых, как обычно, перпендикулярны оси машины, а листы ротора расположены параллельно этой оси. Созданный обмоткой возбуждения магнитный поток, проходя вдоль ротора, встречает на своем пути большое магнитное сопротивление в виде прослойки 5 и вынужден поворачиваться в статор, обходя его по кольцевому пути, как показано крестиком и точкой, через магнитопровод 6. Таким образом, как в случае контактного, так и в случае бесконтактного сельсина поворот ротора вызывает изменение сцепления потока возбуждения с обмотками синхронизации, а следовательно, и изменение значений индуктируемых в этих обмотках э. д. с.

Как известно, существуют два режима работы сельсинов: индикаторный и трансформаторный. В индикаторном режиме обмотки возбуждения сельсина-датчика и сельсина-приемника присоединены к одной и той же однофазной сети, а обмотки синхронизации соединены между

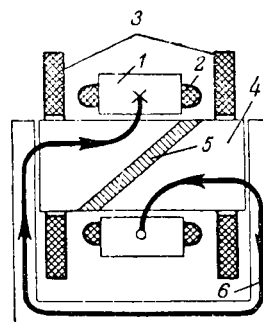


Рис. 16. Схема бесконтактного сельсина.

собой. Если от одного датчика работает несколько приемников, то и в этом случае все обмотки возбуждения присоединяются к сети, а все обмотки синхронизации — параллельно. При повороте ротора датчика (рассогласовании) э. д. с., индуктируемые в обмотках синхронизации обоих сельсинов, становятся неодинаковыми и вызывают уравнивающие токи, создающие синхронизирующий момент, поворачивающий ротор приемника на тот же угол (в согласованное положение). Практически величина синхронизирующего момента в индикаторном режиме достаточна лишь для поворота связанной механически с ротором датчика указательной стрелки или шкалы.

При трансформаторном режиме к сети присоединена обмотка возбуждения лишь сельсина-датчика. При повороте его ротора, питающего обмотку синхронизации приемника, поворачивается ось поля приемника и в его обмотке возбуждения индуктируется э. д. с. Через усилитель эта э. д. с. подается на обмотку управления исполнительного двигателя, мощность которого может быть выбрана достаточно большой. Тем самым осуществляется так называемый следящий привод. Наличие механической связи между исполнительным двигателем и сельсином-приемником приводит к тому, что как только ротор сельсина вернется в нулевое положение, двигатель остановится, отработав, таким образом, заданный угол.

Кроме индикаторных и трансформаторных сельсинов, существуют еще дифференциальные с трехфазными обмотками на статоре и на роторе. Они применяются для суммирования или вычитания угловых перемещений и могут работать либо как приемник от двух датчиков, либо как вторые датчики.

В нашем обзоре мы рассмотрели лишь основные типы микромашин как для широкого применения, так и для автоматических устройств. Однако даже из этого краткого очерка видно, как велики и многообразны те функции, которые возлагаются на современные машины малой мощности в области новой техники, по облегчению человеческого труда и улучшению быта.

Современные технические тенденции в горном электроприводе

Инж. В. С. ТУЛИН

ЦКБ по электроприводе и автоматике МЭП

Введение. Горная промышленность является поставщиком сырья и энергетических ресурсов, необходимых для работы металлургической и химической промышленности, тепловых электростанций, транспорта и всех остальных отраслей народного хозяйства. Главными отраслями горной промышленности являются угольная, рудная и нефтяная промышленность. Добыча полезных ископаемых в горной промышленности ведется открытым способом, шахтным способом и способом бурения скважин.

Электропривод при добыче открытым способом применяется для вскрытия полезного ископаемого, добычи его из пласта и погрузки в вагоны.

При добыче шахтным способом электропривод применяется для прохождения подземных выработок, их проветривания, откачки поступающей в них воды, добычи полезного ископаемого, навалки его на конвейер, транспортировки на откаточный штрек, откатки по штреку, подъема на поверхность и погрузки в вагоны.

В нефтяной промышленности электропривод применяется для бурения скважин, привода компрессоров при подъеме нефти из скважины сжатым воздухом или нефтяным газом, привода насосов при подъеме нефти из скважины погружными насосами и перекачки нефти на нефтеперерабатывающие заводы.

Таким образом, электропривод в горной промышленности является силовой основой механизации всех основных производственных процессов. Исключением является привод отбойных молотков в угольной промышленности и бурильных машин в рудной промышленности. В этих областях сохранилось применение пневматического привода. Однако экономические преимущества электропривода подчеркиваются применением его и для получения сжатого воздуха, необходимого для приведения в действие машин с пневматическим приводом.

Широкое распространение электропривода в горной промышленности объясняется прежде всего его экономическими преимуществами, являющимися следствием экономичной централизованной выработки электроэнергии и возможности передавать ее в места потребления без значительных потерь. Чрезвычайно важное значение в горной промышленности получили такие свойства электропривода, как его высокая управляемость и возможность удобного подвода энергии к самоходным машинам. Именно эти свойства электропривода сделали возможным создание таких машин, как многодвигательные комбинированные самоходные машины для подрубки, отбойки и навалки угля на конвейер (угольные комбайны), подъемные машины со скоростью свыше 10 м/сек, экскаваторы со стрелой длиной 100 м и ковшом емкостью 25 м³ с продолжительностью цикла менее 1 мин, машины для непо-

средственного привода долота на забое скважины (электробурь) и для непосредственного привода насоса в скважине (погружные электронасосы).

Возможность осуществить электропривод с высокой управляемостью при любой мощности механизмов делает его наиболее целесообразной силовой основой для комплексной механизации технологических процессов в горной промышленности.

Перечисленные преимущества электропривода дали ему возможность осуществить коренные преобразования во всех отраслях горной промышленности.

Революционную роль электропривода в угольной промышленности ярко охарактеризовал один из пионеров механизации шахт Е. Т. Абакумов. Характеризуя добычу угля в дореволюционном Донском бассейне, он писал: «Уголь добывался вручную. Кайло, обушок, да еще лопата — вот все, чем вооружали капиталисты шахтеров для их тяжелой работы. Так как сразу отбивать куски угля от массива пласта нельзя — уголь крепок, то шахтер делал сначала так называемую зарубку пласта. Для этого у подошвы пласта выдалбливалось углубление примерно в полметра глубины и высотой в четверть метра. Всю двенадцатичасовую смену зарубщики работали, лежа на боку. Затем забойщики отбивали подрубленный уголь при помощи кайл или обушков. Этот уголь надо было вытащить из низкого забоя на штрек. Так рождалась одна из самых изнурительных профессий капиталистического Донбасса — саночник. Лопатой наваливал он в «санки» — деревянный ящик на железных полозьях — от 200 до 250 кг угля. Потом, весь мокрый от пота, становился на четвереньки и, задыхаясь от жары, волоком тащил на себе эти санки до штрека. В штреке саночник опрокидывал санки, высыпая уголь на землю. Вагонщик грузил уголь с почвы в вагонетку и отвозил ее, толкая грудью, на 100 ... 200 м до уклона, и только с главного штрека до ствола вагонетки тащила уже лошадь».

Именно эту картину имели в виду творцы плана ГОЭЛРО, когда указывали: «Опираясь на достижения электромеханики, социалистическая власть может со сравнительной легкостью создать в шахтах такую обстановку, которая весь ужас подземной работы парализует наряду с другими кошмарами прошлого».

Картину добычи угля в механизированном на основе электропривода Донском бассейне Е. Т. Абакумов рисует уже следующим образом: «На смену зарубщикам в шахте появились мощные электрические врубные машины, которые за 3 ... 4 часа подрубают забой лавы длиной 100 ... 150 м. Отбойка угля после зарубки производится с помощью взрывчатых веществ или пневматическими отбойными молотками. На смену ка-

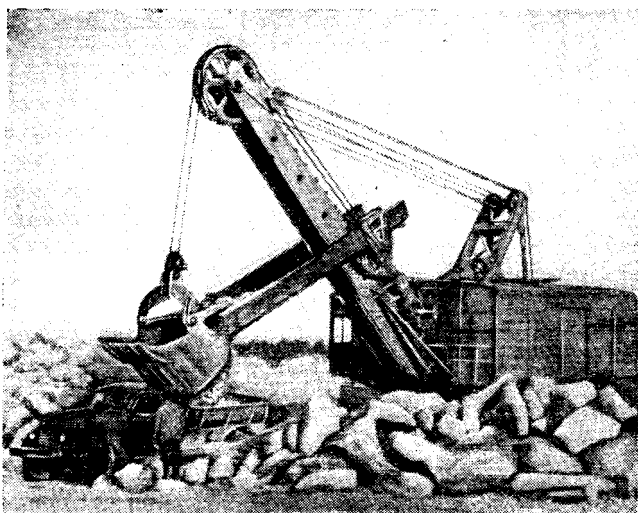


Рис. 1. Электрический гусеничный экскаватор средней мощности.

торжному труду саночника пришли мощные электрические конвейеры, которые доставляют сотни тонн угля на штрек. Здесь уголь без перегрузки поступает в вагонетки. По штрекам мощные электровозы ведут длинные поезда вагонеток. Они подвозят вагонетки к самому стволу и там электрическая подъемная машина поднимает их «на-гора». С помощью механизмов шахтер дает в час в пятьдесят раз больше угля, чем раньше». В дополнение к этой картине следует указать, что к настоящему времени она уже несколько устарела: сейчас (при наличии комбинированных угольных машин) уровень механизации в шахтах еще выше.

Не менее революционной является роль элек-

тропривода при механизации открытых горных работ. Еще не далеко ушло то время, когда основным орудием труда здесь была лопата, основным средством транспорта — тачка, а ведущей профессией — землекоп. Такой способ ведения открытых работ не только давал низкую производительность, но и ограничивал возможную область применения открытых разработок. На смену лопате пришли гусеничные экскаваторы с ковшом емкостью $0,5 \dots 15 \text{ м}^3$ (рис. 1). На смену тачке при так называемых бестранспортных системах открытых работ пришли шагающие экскаваторы с ковшом $4 \dots 20 \text{ м}^3$ и длиной стрелы до 75 м (рис. 2). Для транспортировки за пределы разреза применяются железнодорожные вагоны и электровозы. Механизация открытых работ сделала возможным проведение их в таких масштабах, когда, знакомясь с их результатом, можно с трудом дать себе отчет, что это дело рук человека, а не самой природы.

Такой же революционной является роль электропривода и в нефтяной промышленности, хотя разведка и начало разработки нефтяного месторождения часто начинаются еще до того, как соответствующий необжитый район получит централизованное электроснабжение, вследствие чего значительная часть буровых станков работает с дизельным приводом. В этой отрасли горной промышленности электропривод дает возможность коренного упрощения конструкций машин, применяемых для бурения скважин и добычи нефти. Особенно значительны эти упрощения в тех случаях, когда электропривод органически сливается с исполнительными органами машин, как это имеет место в случае электробура (рис. 3) и погружных электронасосов.

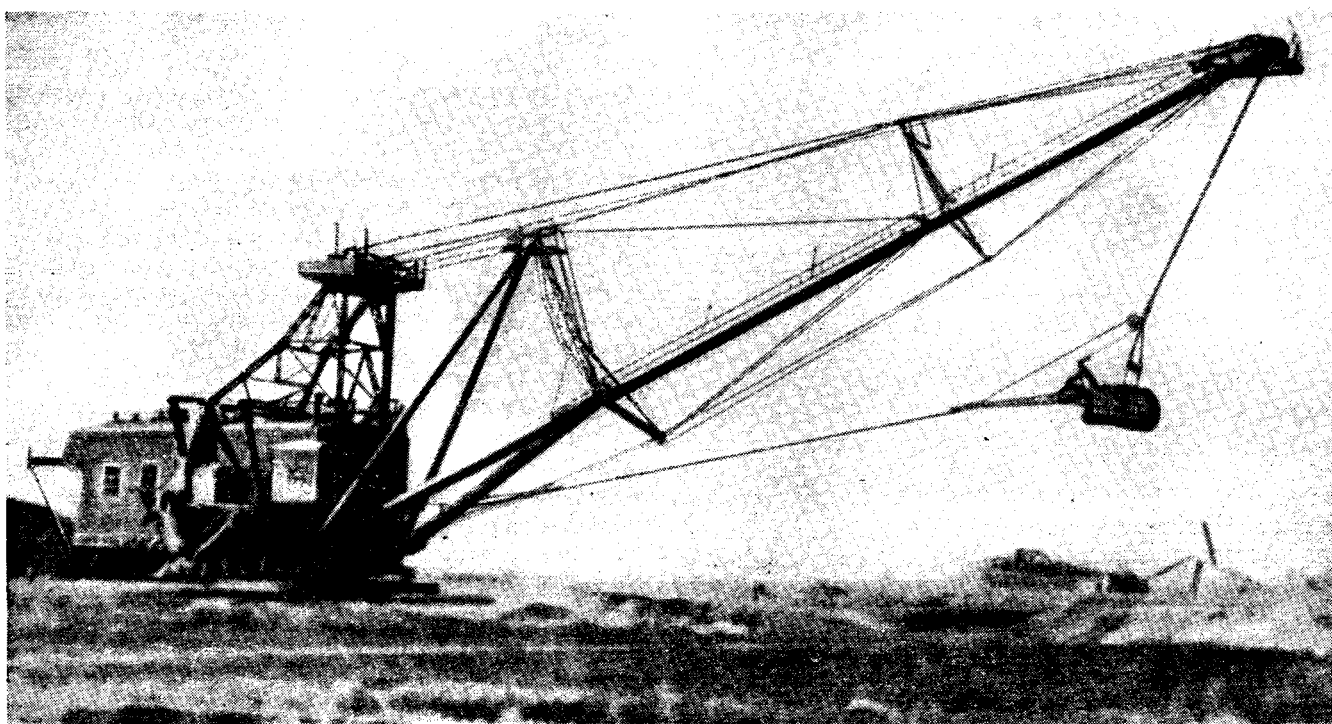


Рис. 2. Мощный шагающий экскаватор.

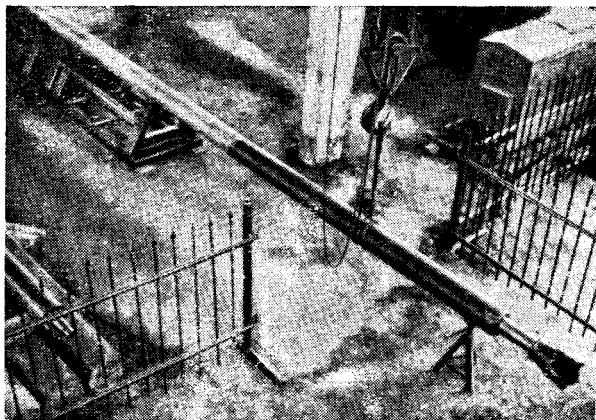


Рис. 3. Электробур и бурильное долото.

Преимущества электропривода в горной промышленности были оценены русскими инженерами уже в самом начале его промышленного применения. После теоретической разработки вопросов электропривода, произведенной Д. А. Лачиновым в 1880 г., и изобретения М. О. Доливо-Добровольским асинхронного электродвигателя в 1891 г. первое применение электропривода в шахтах получил на Урале в 1898 г. для приведения в действие лебедки мощностью 30 л. с., насоса мощностью 14 л. с. и сортировки мощностью 13 л. с. В 1909 г. на Урале была пущена первая подъемная машина с двумя электродвигателями по 40 л. с. В дальнейшем применение электропривода стало быстро прогрессировать, причем первенство перешло к Донецкому бассейну, где уже в 1910 г. на одной из наиболее крупных шахт была установлена подъемная машина с двухдвигательным безредукторным электроприводом постоянного тока общей мощностью 2 000 л. с.

Пионером электрификации угольной промышленности России является М. М. Федоров, впоследствии действительный член Украинской Академии наук и директор Института горной механики Академии наук СССР (умер в 1945 г.).

Большой путь пройден также русской нефтяной промышленностью. Первая нефтяная скважина в мире была пробурена в России в 1855 г., на 4 года раньше, чем в США. Приоритет разработки и первенство в широком применении турбобуров и электробуров принадлежит СССР.

Несмотря на быстрое развитие электропривода в горной промышленности СССР, в ряде случаев его развитие отстает от потребностей народного хозяйства, а в некоторых случаях и от уровня, уже достигнутого за границей. Последнее обстоятельство имеет место в области мощного экскаваторостроения по предельной емкости ковша и в области бурения нефтяных скважин по предельной грузоподъемности буровых станков.

Современные технические тенденции в горном электроприводе, имея своей целью наиболее полное использование его технических преимуществ, идут в следующих основных направлениях:

1. Создание новых типов горных машин для расширения областей механизации горных работ, а также увеличение мощности горных машин существующих типов для повышения их производительности.

2. Улучшение использования мощности горных машин посредством автоматизации их работы и совершенствование электропривода для уменьшения износа машин и их аварийности.

3. Уменьшение веса и первоначальной стоимости горных машин и их электропривода.

4. Повышение экономичности работы.

Электропривод в угольной и рудной промышленности. Технические тенденции в области создания новых типов машин и повышения мощности машин существующих типов приведены в табл. 1. В большинстве случаев приведенные в таблице цифры одновременно характеризуют технический прогресс в соответствующей отрасли, достигнутый в послевоенные годы.

Из рассмотрения таблицы видно, что в ряде случаев повышение параметров горных машин имеет не только количественный, но и качественный характер, так как открывает для машин новые отрасли применения. Так, повышение мощности насосов, вентиляторов и подъемных машин дало возможность экономично добывать шахтным способом уголь и руду с глубин, превышающих 1 000 м, а повышение емкости ковша и увеличение длины стрелы экскаваторов дали возможность добывать открытым способом уголь с глубин 100 м и выше.

Технические тенденции, характеризующие сдвиги в области улучшения использования мощности электрифицированных горных машин, уменьшения их веса и первоначальной стоимости и увеличения экономичности работы, приведены в табл. 2.

Наибольшее значение в электроприводе машин угольной и рудной промышленности имеют следующие технические тенденции:

1. Полный отказ от применения для нерегулируемого электропривода асинхронных двигателей с контактными кольцами и широкое применение для этой цели асинхронных короткозамкнутых и

Таблица 1

Наименование машин	Технические данные	Достигнутые пределы	
Насосы главного водоотлива	Установленная мощность одного насоса, <i>к т</i>	100 и ниже	1 000 и выше
Вентиляторы главного проветривания	Установленная мощность одного вентилятора, <i>к т</i>	100	2 000
Подъемные машины	Грузоподъемность, <i>кг</i>	4 000	12 000
Врубовые машины	Скорость, <i>м/сек</i>	8,0	14
	Мощность, <i>к т</i>	600	2 000
	Мощность, <i>квт</i>	16	100
	Емкость ковша, <i>м³</i>	0,5	15
	Мощность, <i>квт</i>	20	2 700
	Емкость ковша, <i>м³</i>	4	25
Гусеничные экскаваторы	Мощность, <i>квт</i>	260	3 200
Шагающие экскаваторы			

Таблица 2

Продолжение

Объект электропривода	Основные направления технического совершенствования	Объект электропривода	Основные направления технического совершенствования
Водоотлив шахт	Применение вертикальных асинхронных короткозамкнутых двигателей. Автоматизация работы в зависимости от уровня воды в отстойнике. Автоматическое повторное включение. Автоматическое включение резерва. Сигнализация диспетчеру		Наряду с основным направлением работа должна проводиться также в направлениях: а) внедрения электропривода постоянного тока с питанием от сети переменного тока через управляемый ртутный выпрямитель; б) применения турбомуфт и турборедукторов.
Проветривание шахт	Применение синхронных двигателей. Автоматическая повторная синхронизация после случайного выпадения из синхронизма. Автоматическое включение резерва. Дистанционное управление изменением направления проветривания. Сигнализация диспетчеру	Шагающие экскаваторы с ковшом емкостью до 4 м ³ с общим приводом подъема и тяги	Основным направлением остается применение электропривода переменного тока. Контактное управление заменяется контактно-дрессельным управлением для смягчения механических ударов, имеющих место при чисто контактном управлении
Получение сжатого воздуха	Применение тихоходных синхронных двигателей для привода поршневых компрессоров. Автоматизация работы в зависимости от давления в сборном резервуаре. Автоматическая повторная синхронизация после случайного выпадения из синхронизма. Автоматическое включение резерва	Шагающие экскаваторы с раздельным приводом	Основным направлением остается применение редукторного электропривода постоянного тока. Необходимо работа по применению ртутных преобразователей вместо электромашинных
Подъемные машины	Применение безредукторного электропривода постоянного тока с питанием от сети переменного тока через управляемый ртутный преобразователь. Автоматизация управления пуском, снижением скорости и ручное управление наложением тормоза после посадки на кулаки для грузоподъемных машин и комплексная автоматизация работы грузовых машин. Наряду с работой в указанном основном направлении ведется также работа по усовершенствованию электропривода переменного тока в направлениях: а) усовершенствования динамического торможения асинхронных двигателей; б) применения управляемых гидравлических муфт и синхронных двигателей	Гусеничные экскаваторы малой мощности	Основным направлением остается применение электропривода переменного тока. Его совершенствование ведется в направлении замены общего привода индивидуальным с контактно-дрессельным управлением
Врубовые, навалочные и комбинированные угольные и проходческие машины	Основным направлением в ближайшее время остается применение асинхронных короткозамкнутых двигателей со специальными рабочими характеристиками. В связи с ростом мощности машин и невозможностью соответствующего увеличения сечения гибких кабелей необходимо увеличение напряжения. Наиболее целесообразно увеличение напряжения до 660 в, так как при этом может быть обеспечена взаимозаменяемость двигателей на 380 и 660 в.	Гусеничные экскаваторы средней и большой мощности	Основным направлением остается применение электропривода постоянного тока: редукторного для экскаваторов средней мощности и безредукторного для механизма подъема экскаваторов большой мощности. Совершенствование систем управления должно идти в направлении перехода к ртутным выпрямителям с магнитным управлением

синхронных двигателей. Первые должны применяться на механизмах малой мощности, когда особую важность имеет нетребовательность двигателей к уходу и на механизмах большой мощности, когда особую важность имеет закрытое исполнение двигателя или отсутствие у него искрящих частей. Вторые должны применяться на устанавливаемых группами мощных механизмах с большим числом часов использования, когда экономические преимущества синхронных двигателей выявляются в наибольшей степени.

2. Улучшение условий работы асинхронных короткозамкнутых двигателей в подземных установках путем применения в них напряжения 660 в.

Таблица 4

3. Расширение применения для регулируемого в двигательном режиме привода асинхронных двигателей с контактно-дрессельным управлением.

4. Снижение износа и уменьшение аварийности механической части горных машин, оборудованных регулируемым электроприводом переменного тока, путем применения дросселей с соответственно выбранными постоянными времени.

5. Расширение применения для регулируемого как в двигательном, так и в тормозном режиме привода тихоходных двигателей постоянного тока с соответствующим упрощением механической части машины и уменьшением ее износа, а для механизмов, работающих на упор, со значительным снижением аварийности.

6. Замена электромашинных преобразователей ртутными и расширение области применения ртутных выпрямителей с запаянными вентилями.

7. Комплексная автоматизация водоотливных, вентиляционных, компрессорных и подъемных установок шахт.

Кроме перечисленных основных тенденций большое значение могут получить работы в области применения электропривода постоянного тока, турбомуфт и турборедукторов для врубовых и проходческих машин, так как применение этих технических средств может не только снизить высокую аварийность машин, но и повысить эффективность использования их исполнительных органов, обеспечив возможность работы последних при переменной скорости резания.

Электропривод в нефтяной промышленности. Технические тенденции в области повышения мощности электрифицированных машин приведены в табл. 3.

Из рассмотрения этой таблицы видно, что в нефтяной промышленности также имело место повышение мощности машин, в результате чего была обеспечена добыча нефти с больших глубин. Однако для нефтяной промышленности более характерными являются изменения в области технических средств механизации процессов бурения скважин и добычи из них нефти. Эти изменения приведены в табл. 4.

Наибольшее значение в электроприводе машин нефтяной промышленности имеют следующие технические тенденции:

1. Отказ от механической передачи энергии к долоту при бурении нефтяных скважин и к насосу при насосной добыче нефти из скважины и применение для этой цели гидравлической передачи (в случае бурения турбобуром) либо элек-

Технологический процесс	Основные направления технического совершенствования
Бурение вращательным столом	Бурение посредством бурильных труб, приводимых во вращение с поверхности, вследствие наличия потерь на вращение труб, износа и опасности их поломки перестает иметь самостоятельное значение
Бурение турбобуром	Турбинное бурение получило широкое распространение, так как оно превзошло по своим показателям бурение вращательным столом. Однако этому способу бурения свойственны недостатки: а) большие гидравлические потери в бурильных трубах при передаче энергии к турбине; б) отсутствие надежных средств контроля режима работы долота на забое; в) быстрый износ винтовых соединений бурильных труб вследствие высокого давления глинистого раствора
Бурение электробуром	Применение электробуров не нашло еще должного распространения, хотя преимущества электробура перед турбобуром выявились в достаточной степени. Недостатком электробуров является сложность конструкции, затрудняющая организацию обслуживания
Подъем бурильных труб	Большое распространение имеет в настоящее время дизельный привод подъемной лебедки. Основными недостатками его являются: а) наличие фрикционных муфт; б) необходимость в большом числе переключений скорости; в) передача на дизель толчков нагрузки, сокращающих его срок службы. Работа по устранению этих недостатков ведется в направлениях: а) применения управляемых электрических муфт скольжения; б) применения дизель-электрического привода переменного тока; в) применения дизель-электрического привода постоянного тока.
Спуск бурильных труб	Наибольшие технические возможности имеет дизель-электрический привод постоянного тока. При применении ртутных преобразователей эта система электропривода пригодна и при централизованном электро-снабжении

Таблица 3

Наименование машин	Технические данные	Достигнутые пределы	
Буровые станки	Грузоподъемность, т Мощность, кВт	125	250
		150	660
Грязевые насосы	Мощность, квт	180	540

В целях упрощения конструкции бурового станка спуск труб ведется без рекуперации энергии. Применяются фрикционные тормоза с ручным управлением, гидравлические тормоза и асинхронные двигатели, работающие в режиме динамического торможения. Возможно также применение в качестве тормозов электрических муфт скольжения. Наиболее просты гидравлические тормоза

Продолжение

Технологический процесс	Основные направления технического совершенствования
Промывка скважин глинистым раствором	Применяется асинхронный электропривод. Имеется тенденция к переходу на синхронный привод. Однако целесообразность применения синхронных двигателей требует эксплуатационной проверки
Выработка сжатого воздуха или газа для компрессорной добычи нефти	Целесообразен переход на синхронный электропривод компрессоров, установленных группами и имеющих большое число часов использования
Насосная добыча нефти	Наибольшее распространение имеет привод насосов посредством станков-качалок с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Основной задачей, учитывая непрерывную работу станков-качалок, является повышение экономичности работы. Для этой цели целесообразна разработка специальных двигателей с пониженными нагрузками активных материалов и применение статических конденсаторов. Еще более значительное повышение экономических показателей, а также возможность добычи с больших глубин дает применение погруженных в скважину электронасосов

трической передачи (в случае бурения электробуром и добычи нефти погружными электронасосами).

В этом случае достигается не только повышение экономичности, но и повышение надежности передачи.

2. Повышение эффективности работы долота на забое за счет увеличения скорости его вра-

щения при обязательном одновременном увеличении давления на забой.

3. Автоматическое регулирование режима работы долота на забое в зависимости от крепости грунта и износа долота.

4. Упрощение механической конструкции буровых станков с целью уменьшения их износа и сокращения простоев из-за неисправностей, что может быть достигнуто за счет перехода от дизельного привода к дизель-электрическому.

5. Переход от децентрализованного питания электроэнергией буровых станков к централизованному питанию переменным током с преобразованием его в постоянный ток посредством управляемых запаянных ртутных выпрямителей.

6. Повышение экономичности работы станков-качалок и грязевых насосов путем применения для их привода специальных асинхронных двигателей с улучшенными технико-экономическими показателями и путем установки статических конденсаторов.

7. Повышение экономичности работы компрессоров путем применения для их привода синхронных двигателей.

Заключение. Способность электропривода служить наиболее экономичной основой механизации производственных процессов и наиболее целесообразной технической основой их автоматизации в полной мере проявляется и в горной промышленности. Стоящая перед горной промышленностью задача добывать сырье и энергетические ресурсы в любых условиях их нахождения в природе и при этом обеспечивать высокую производительность труда должна решаться на основе полного использования экономических и технических преимуществ электропривода. Поэтому большая ответственность в обеспечении решения этой задачи лежит на электротехнической промышленности.

[9. 5. 1955]

ОТ КОМИТЕТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМИНОЛОГИИ

Комитет технической терминологии Академии наук СССР обращается к читателям журнала с просьбой сообщить Комитету свое мнение о терминологии, разработанной Комитетом для нового положения об изобретениях и технических усовершенствованиях.

Замечания и отзывы необходимо направлять не позднее 20 октября с. г. по адресу: Москва, ул. Кирова, Малый Харитоньевский пер., 4.

ТЕРМИНОЛОГИЯ:

Научное открытие — Установление ранее неизвестных объективно существующих явлений, свойств и закономерностей материального мира.

Изобретение — Прогрессивное решение технической задачи, неизвестное ранее и дающее качественно новый эффект.

Техническое усовершенствование — Улучшение применяемого в данной отрасли народного хозяйства, на данном предприятии или на отдельном его производственном участке технологического процесса, конструкции оборудования или выпускаемого предприятием изделия путем изменения их известными в технике приемами или способами.

Организационно-техническое предложение — Предложение производственно-технического характера, улучшающее производственный процесс путем более эффективного использования применяемых в данной отрасли народного хозяйства, на данном предприятии или на отдельном его производственном участке материальных ресурсов (оборудования, материалов и т. д.) или рабочей силы.

Организационно-хозяйственное предложение — Предложение, улучшающее применяемые в данной отрасли народного хозяйства, на данном предприятии или на отдельном его производственном участке системы хозяйственного управления (планирования, учета, отчетности, кооперирования, снабжения и т. п.).

Электронискровая обработка металлов

Доктор техн. наук Б. Р. ЛАЗАРЕНКО и инж. Н. И. ЛАЗАРЕНКО

Москва

Принцип предварительной концентрации энергии и последующего мгновенного освобождения ее используется человеком очень давно, и, как показывает практика, всякое открытие разновидности его проявления всегда дает новое мощное техническое средство. Поэтому ударная импульсная техника все более привлекает к себе внимание исследователей. Как известно, последние десятилетия характеризуются интенсивным развитием во всех странах исследований, идущих именно в этом направлении.

Открытый в 1938 г. во Всесоюзном электротехническом институте электронискровой способ обработки металлов основан на использовании этого же принципа. Тогда было установлено, а затем нашло подтверждение во всей последующей практике, что размерную электрическую обработку металлов возможно осуществить, используя только короткие импульсы электрической энергии, сфокусированные на участках поверхности материала, подлежащей обработке. Такое мгновенное и локальное выделение отдельных порций энергии вызывает направленный взрыв металла в точке приложения импульса, к чему собственно и сводится процесс обработки.

Этот способ позволяет без применения какого-либо режущего инструмента с большой точностью обрабатывать металлы и их сплавы с любыми физическими и химическими свойствами. Более того, применение этого способа делает осуществимым технологические процессы такого рода, которые невыполнимы другими способами.

За истекший с момента открытия период времени электронискровая обработка металлов получила в нашей стране не только признание научной и инженерной общественности, но и прочно стала внедряться в самые разнообразные области народного хозяйства. Можно подвести некоторые итоги развития этой новой области прикладной электротехники.

Нами было ранее доказано [Л. 1, 2, 3 и 4], что электрическая эрозия металлов является селективным процессом. Полярность этого процесса при прочих неизменных условиях (состав материала электродов, межэлектродной среды и др.) определяется только длительностью импульса электрического тока. Установлено, что электрические импульсы длительностью более 10^{-3} сек непригодны для осуществления размерной электрической обработки металлов; в этом случае точность обработки невелика, и поверхность обрабатываемого металла всегда имеет следы обжига.

Накопившийся экспериментальный материал дал возможность построить модель физических процессов, возникающих при электронискровой или (по неточной терминологии) электроэрозионной обработке металлов.

При наложении напряжения на электроды, где анодом является изделие, а катодом — обрабатываемый электрод, после достижения определенного градиента происходит образование так называемого канала сквозной проводимости и,

как следствие этого, перекрытие межэлектродного промежутка. Достижение необходимого градиента потенциала осуществляется или повышением напряжения, или сближением электродов.

В момент пробоя электроны, освобожденные из катода первыми из всех им предшествующих, без соударений достигают анода, и через образовавшийся канал сквозной проводимости проходит практически весь запас энергии, накопленный системой, создавая импульс тока. Резкое возрастание тока в искровом канале происходит потому, что в отличие от процесса прохождения тока через металл здесь нет неподвижной пространственной решетки. Движущийся от катода поток электронов с большой скоростью ударяется о твердую металлическую поверхность анода. Энергия электронов, внезапно остановленных, выделяется в поверхностных слоях анода. Возникающее при прохождении импульса магнитное поле усиливает сжимающее действие и приводит в конечном итоге к тому, что громадные мощности обрушиваются на очень малые участки анода. Как следствие этого, еще в процессе импульса не только расплавленный, но и размягченный металл выбрасывается из чаши, вмещающей пораженный объем металла. Естественно, после такого взрыва металла на участке анода, пораженного импульсом, остается глубокий кратер.

По степени концентрации энергии взрыва конденсированные электрические разряды примерно в 10 раз превосходят наиболее мощные взрывчатые вещества [Л. 5]. Если импульсы затягиваются во времени и начинают превосходить названную выше величину 10^{-3} сек, то процесс стабилизируется — возникает вначале импульсный, а затем стационарный электрический дуговой разряд.

Таким образом, мы приходим к представлению о принципиальной электрической схеме установок электронискрового действия, как схеме, обеспечивающей прохождение между электродами униполярных импульсов электрического тока с заданными временными и энергетическими характеристиками.

Электротехника располагает разнообразными схемными решениями, при помощи которых могут быть осуществлены эти требования. Напомним некоторые из них. Самой простой является схема, обеспечивающая возможность получения напряжений, не превышающих минимального напряжения дуги. При работе с такого рода схемами возникновение дугового электрического разряда исключается при любых значениях тока, и необходимый импульс электрического тока возможно получать непосредственно от источника напряжения. Способность этих схем работать при чрезвычайно малых межэлектродных зазорах делает их применение в ряде случаев весьма желательным, например при изготовлении узких щелей (разрезание металла и пр.).

Стремление вложить в каждый импульс возможно большее количество энергии заставляет

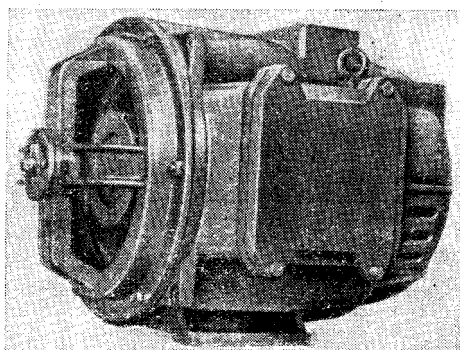


Рис. 1.

повышать напряжение на электродах далеко за пределы, обусловленные минимальным напряжением дуги. Возникает в связи с этим необходимость в применении мероприятий, исключающих затягивания импульса во времени. Наиболее простым средством является шунтирование электродов емкостью.

К конденсаторам, применяемым в установках электроискрового действия, предъявляется ряд специфических требований: максимальная емкость в единице объема, минимальная индуктивность, минимум потерь в диэлектрике, высокое пробивное напряжение, возможно большее сечение выводов. Министерство электротехнической промышленности разработало и выпускает блок конденсаторов типа ИМ-0,22-500, рассчитанный специально для работы в установках электроискрового действия. В нем максимально учтены все перечисленные выше требования.

Стремление перейти от электрических автоколебательных систем к системам с жестко заданной частотой подачи импульсов привело к созданию ряда других схем. В их числе так называемые электрически разобщенные схемы, схемы с модулированным напряжением, машинные генераторы импульсов. В Министерстве электротехнической промышленности создан ряд типов машинных генераторов импульсов электрического тока. Один из них — тип МИГ-36 — представлен на рис. 1. Генератор обеспечивает подачу 3 000 импульсов в секунду при длительности импульса 150 мксек. Каждый из перечисленных типов схем питания установок электроискрового действия имеет свою область рационального применения.

В процессе работы установки электроискрового действия электрод-инструмент должен всегда находиться от электрода-изделия на каком-то расстоянии, которое определяется напряжением, приложенным к электродам, и характером межэлектродного промежутка (состав и состояние промежутка); так как во время обработки расстояние между электродами непрерывно изменяется, то возникает необходимость в применении определенной электромеханической системы — следящей системы, назначением которой является постоянное поддержание наивыгоднейшего расстояния между электродами и обеспечение тем самым полной автоматизации процесса электроискровой обработки.

Из всего многообразия созданных для искровых установок следящих систем: электродинамической, системы с электромагнитными муфтами, с реверсируемыми двигателями и др., наибольшее распространение получила система с реверсируемыми двигателями.

При проведении электроискровой обработки количество металла, выбрасываемое импульсами тока, очень точно определяется соотношением

$$\gamma = k\epsilon n,$$

где ϵ — энергия единичного импульса;

n — частота импульсов;

k — коэффициент, определяющийся физическими константами материалов электродов и составом межэлектродной среды.

Наиболее целесообразно для управления работой следящей системы выбрать в качестве задающего параметра мгновенную мощность системы. Компактные электронные решающие приборы позволяют этот принцип весьма легко осуществить.

Несмотря на значительные достижения в области создания различных типов электроискровых установок и использования их в промышленности, конструкторы еще не смогли полностью оторваться от привычных для них кинематических схем и создать установки, полностью отвечающие их электрическим функциям. Только поэтому во многих случаях установки электроискрового действия тяжеловесны, инерционны и их следует рассматривать как примеры конструкции переходного периода от механического резания металлов к электрической его обработке.

Технологические особенности процесса и возможности электроискровой обработки достаточно широко освещены в литературе. Здесь будет более целесообразным привести некоторые параметры этого импульсного процесса:

- 1) температура межэлектродного канала значительно превышает 10 000° С;
- 2) в результате электронно-оптических эффектов плотность тока в импульсе достигает многих тысяч а/мм²;



Рис. 2.

3) давления, развиваемые импульсом на поверхности электродов, исчисляются тысячами кг/см^2 ;

4) мгновенные значения мощностей могут достигать десятков тысяч киловатт;

5) расщепляющее действие импульса столь велико, что все химические элементы, входящие в состав не только межэлектродной среды, но и в состав электродов, дают атомарный спектр;

6) в силу кратковременности импульсов термодинамические процессы, происходящие на поверхности электродов, адиабатические.

В свете изложенного становится ясным, что в результате одновременного действия этих факторов на поверхности электродов могут протекать сложные физико-химические процессы, чрезвычайно изменяющие первоначальный состав и структуру электродов. Это убедительно подтверждается практикой. На рис. 2 представлен микрошлиф стальной поверхности ($\times 200$), на которую с анода перенесен слой твердого сплава. Обращает на себя внимание очень глубокая электрическая диффузия перенесенного материала в толщу стали.

Рассмотрим некоторые технологические процессы, выполняемые электроискровой обработкой.

Возможность при помощи электроискрового способа получать прецизионные отверстия широко используется в промышленности, в том числе заводами, изготавливающими распылительную аппаратуру. На рис. 3 представлен производственный участок по изготовлению отверстий в форсунках. Прежний очень утомительный, трудоемкий и дорогостоящий процесс изготовления форсунок путем механического сверления отверстий заменен полуавтоматической электроискровой технологией, осуществляемой на установках, очень простых в обращении и не требующих высококвалифицированного труда. Производительность труда процесса изготовления отверстий повысилась в несколько раз при практически полной ликвидации брака, обусловленного ранее частой поломкой сверл. Одна электроискровая установка заменила три специальных станка.

Весьма плодотворным оказался процесс электроискрового шлифования металлов, особенно твердых сплавов.

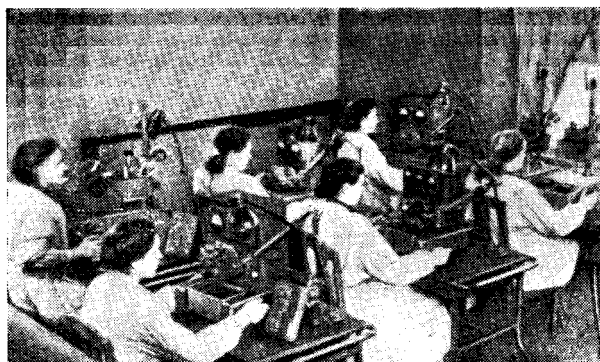


Рис. 3.



Рис. 4.

Интересный эффект дало введение электроискрового шлифования мельничных валков, где необходимо получать поверхности, обладающие высоким коэффициентом трения при одновременной очень высокой их геометрической точности. Как известно, технология абразивного шлифования не может удовлетворить этим двум взаимоположенным требованиям. Введение электроискрового шлифования валков позволило повысить производительность мельничных агрегатов до 20%.

Мы обращаем особое внимание на целесообразность применения электроискрового шлифования для обработки пакетов магнитопроводов. Полное отсутствие при электроискровой обработке механических усилий предотвращает образование замкнутых контуров, что приводит к снижению потерь в стали.

На рис. 4 представлен внешний вид ротора электрической машины. Левая часть ротора шлифована электроискровым способом, а правая, для сравнения, — абразивом. В правой стороне, обработанной абразивом, неизбежны замыкания между пластинами.

Электроискровое разрезание металлов — экономически весьма выгодный процесс (рис. 5). Применение его дает не только экономию электроэнергии и инструмента, но, что особенно важно, осуществляя ширину реза, как



Рис. 5.

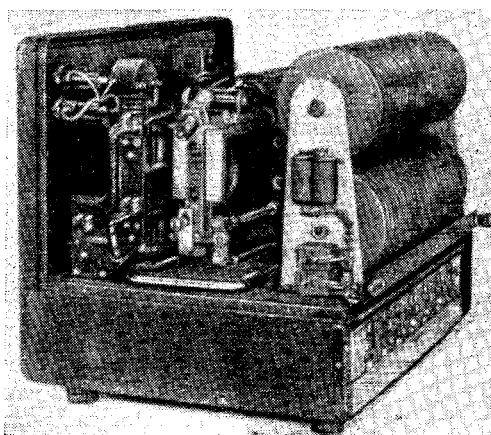
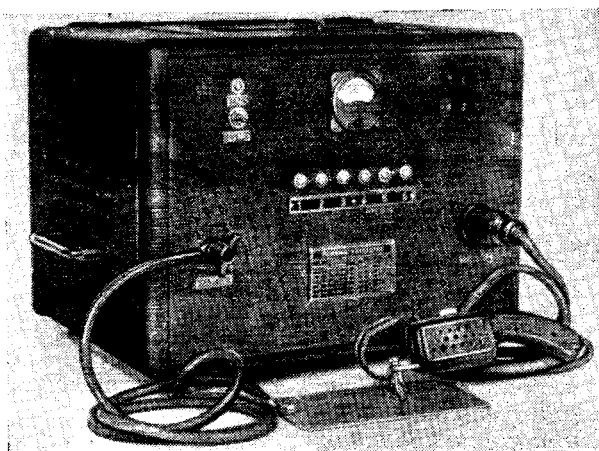


Рис. 6.

правило, не более чем в 2 мм, электроискровой процесс обеспечивает значительную экономию металла, обычно превращаемого в стружку при разрезке обычными способами.

Применение электроискровой обработки для изготовления фигур штампов представляет большой технический интерес. Эффективность этой технологии сказывается в том, что обрабатываемая заготовка предварительно термически упрочняется и, вследствие этого, исключается обычный так называемый термический брак штампов.

Возможность обработки электроискровым способом материалов любой твердости вызвала к жизни появление новых видов твердосплавного инструмента, в частности твердосплавных штампов. Стойкость их в десятки раз выше стойкости стальных штампов. Сейчас с полной уверенностью можно утверждать, что широкое освоение промышленностью твердосплавных штампов также резко увеличит производительность кузнечно-прессовых цехов, как в свое время введение твердосплавного резца резко повысило производительность процесса резания.

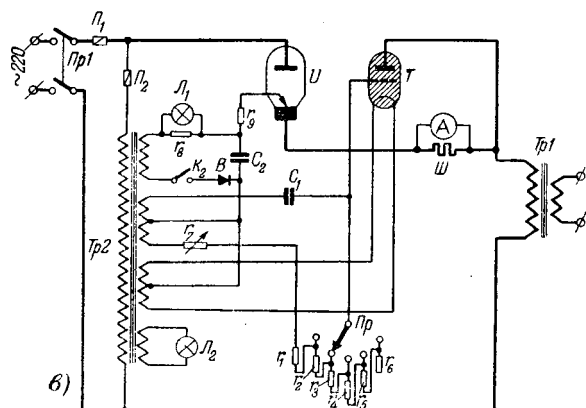
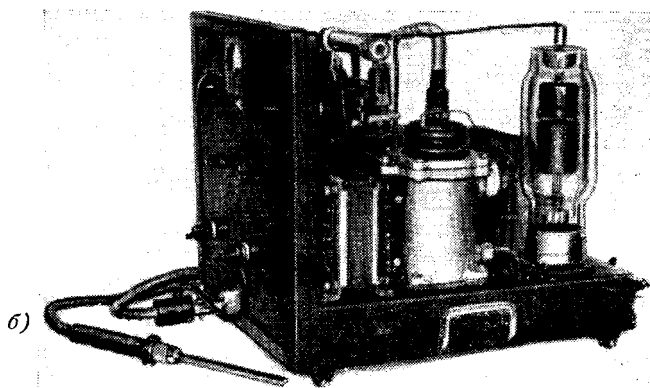
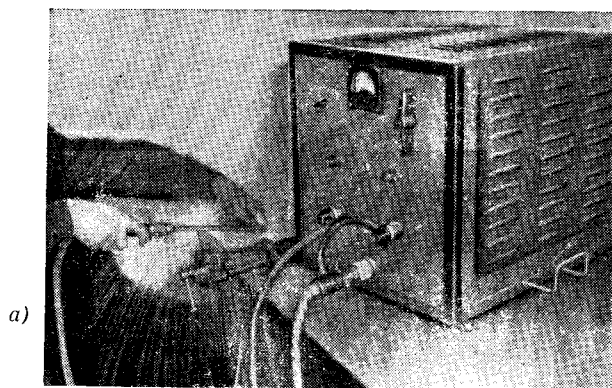


Рис. 7.

Достоинства электроискрового способа нанесения металлических покрытий следующие:

1. Исключительная прочность соединения наносимого слоя с основанием.

2. Возможность наносить на обрабатываемые поверхности как чистые металлы, так и их сплавы и, что очень существенно, при помощи этого способа осуществимо введение в поверхностные слои металлической поверхности различных легирующих элементов.

3. Отсутствие необходимости в какой-либо предварительной подготовке поверхности.

Этот способ нанесения покрытий очень широко применяется промышленностью для упрочнения инструмента и деталей машин. Министер-

ство электротехнической промышленности выпускает для осуществления этого процесса специальный тип электроискровой установки УПР-3м (рис. 6). Практика показывает, что при помощи этой установки процесс электроискрового упрочнения осуществляется наиболее просто.

Ежедневно многочисленная армия слесарей становится к верстакам и примитивно, в большинстве случаев используя мускульную силу, по крупинкам сдирает металл с изделия с тем, чтобы придать ему необходимую форму и размеры. Электричество и здесь приходит на помощь: слесарный инструмент электроискрового действия (рис. 7) позволяет слесарю производить снятие металла со значительно большей скоростью, чем это ранее им достигалось путем применения различного вида режущего инструмента.

Электроискровая обработка намного упрощает ремонт машин. Специалистам в области ремонта машин хорошо известны те многие трудности, с которыми приходится сталкиваться при возвращении в строй машины, достаточно много поработавшей.

При разборке машины, подлежащей ремонту, очень часто не удается снять отдельные детали машин: «заедают», не отвертываются гайки, заклинились шпонки, не вынимается какая-нибудь запрессованная каленая втулка, заклинилась на валу машины или в корпусе ее обойма подшипника и т. п. Трудности значительно возрастают, когда начинается собственно ремонт деталей. Некоторые детали, имея большую поверхностную твердость, не позволяют применить непосредственную их механическую обработку для придания им необходимых размеров. Приходится предварительно отжигать детали, при этом возникают новые трудности — появляется коробление. Наконец, при проведении механической обработки часто сверло, метчик или развертка ломаются и часть этого инструмента остается в отверстии. Поэтому весьма часто отказываются от ремонта дорогостоящих деталей машин, как не поддающихся восстановлению. С появлением электроискрового способа обработки металлов подавляющее большинство перечисленных трудностей ремонта машин и аппаратов снимается.

Для иллюстрации на рис. 8 показаны извлеченные электроискровым способом остатки сломавшихся инструментов.

Часто подшипник качения, напрессованный на вал, в процессе работы теряет тугую посадку и начинает провертываться. Существующие способы ремонта сложны, требуют много времени, а иногда и замены деталей. Электроискровая обработка позволяет нане-

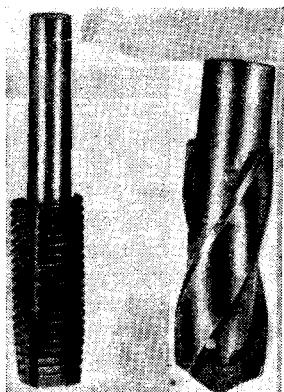


Рис. 8.

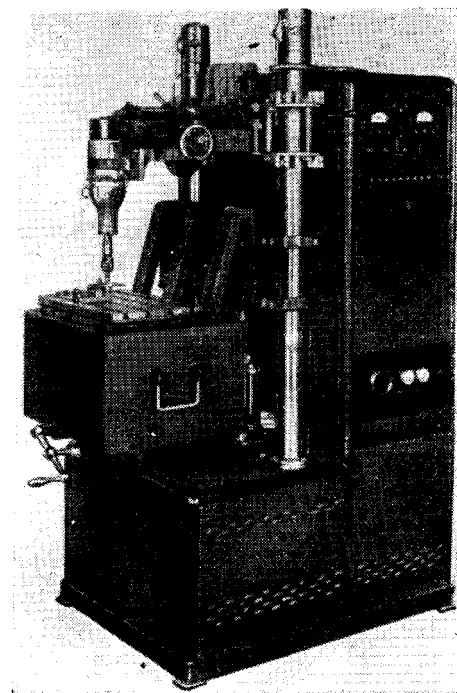


Рис. 9.

сением покрытий на шейку вала восстановить его размеры и вновь напрессовать подшипник.

Для осуществления процессов электроискровой обработки разработаны специализированные электроискровые установки. Для ряда производств, где требуется лишь эпизодическое применение электроискровой обработки, но с использованием большого числа разнообразных электроискровых процессов и операций, разработан специальный тип установки «Электром-12» (рис. 9). С ее помощью можно осуществлять изготовление отверстий, шлифование металлов, разрезку их, а также процессы электроискрового упрочнения металлических поверхностей и нанесение металлических покрытий.

Остановимся еще на двух применениях.

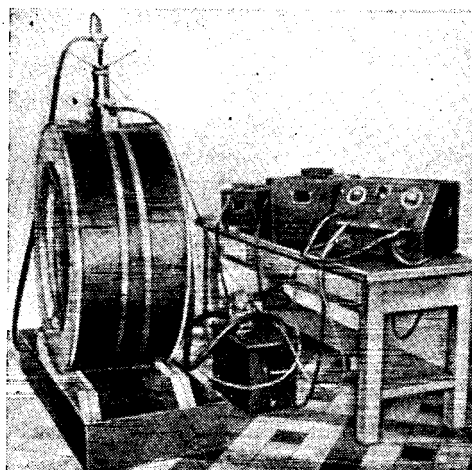


Рис. 10.

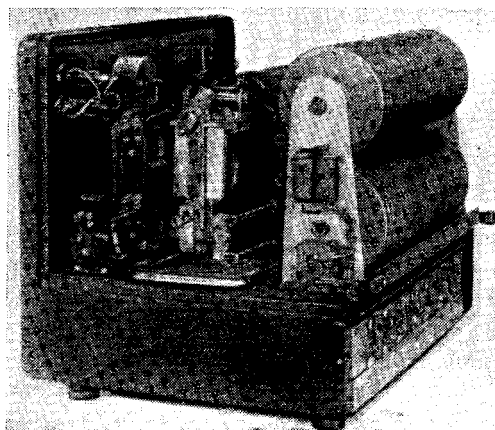
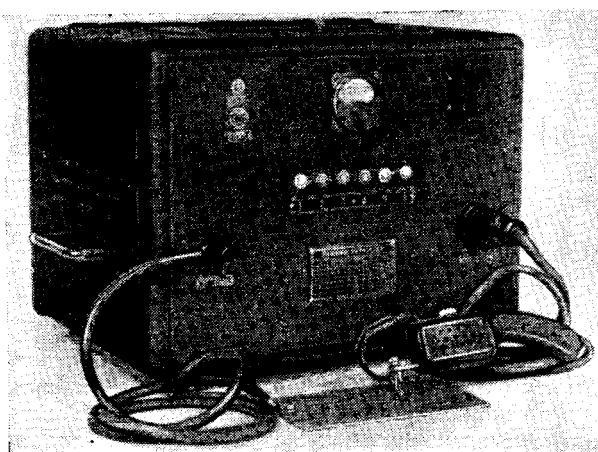


Рис. 6.

правило, не более чем в 2 мм, электроискровой процесс обеспечивает значительную экономию металла, обычно превращаемого в стружку при разрезке обычными способами.

Применение электроискровой обработки для изготовления фигур штампов представляет большой технический интерес. Эффективность этой технологии сказывается в том, что обрабатываемая заготовка предварительно термически упрочняется и, вследствие этого, исключается обычный так называемый термический брак штампов.

Возможность обработки электроискровым способом материалов любой твердости вызвала к жизни появление новых видов твердосплавного инструмента, в частности твердосплавных штампов. Стойкость их в десятки раз выше стойкости стальных штампов. Сейчас с полной уверенностью можно утверждать, что широкое освоение промышленностью твердосплавных штампов также резко увеличит производительность кузнечно-прессовых цехов, как в свое время введение твердосплавного резца резко повысило производительность процесса резания.

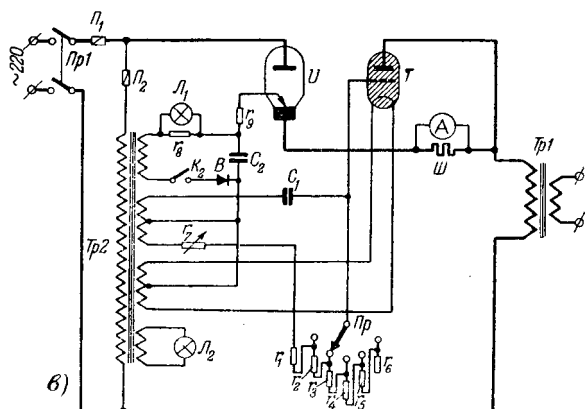
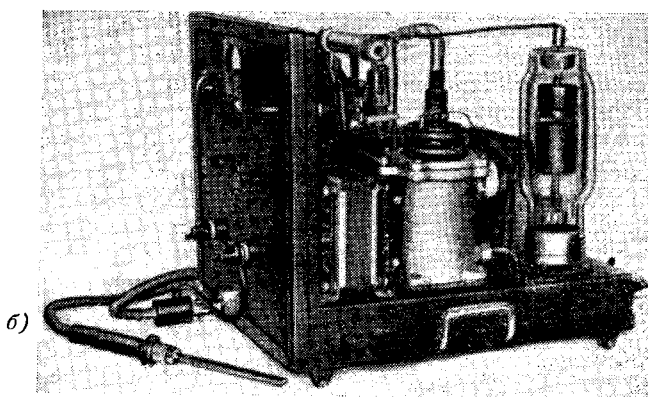
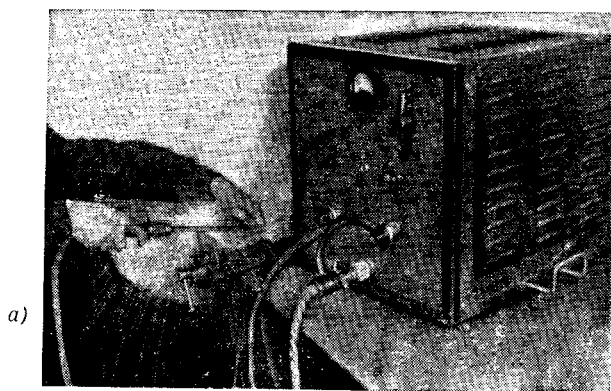


Рис. 7.

Достоинства электроискрового способа нанесения металлических покрытий следующие:

1. Искключительная прочность соединения наносимого слоя с основанием.

2. Возможность наносить на обрабатываемые поверхности как чистые металлы, так и их сплавы и, что очень существенно, при помощи этого способа осуществимо введение в поверхностные слои металлической поверхности различных легирующих элементов.

3. Отсутствие необходимости в какой-либо предварительной подготовке поверхности.

Этот способ нанесения покрытий очень широко применяется промышленностью для упрочнения инструмента и деталей машин. Министер-

ство электротехнической промышленности выпускает для осуществления этого процесса специальный тип электроискровой установки УПР-3м (рис. 6). Практика показывает, что при помощи этой установки процесс электроискрового упрочнения осуществляется наиболее просто.

Ежедневно многочисленная армия слесарей становится к верстакам и примитивно, в большинстве случаев используя мускульную силу, по крупинкам сдирает металл с изделия с тем, чтобы придать ему необходимую форму и размеры. Электричество и здесь приходит на помощь: слесарный инструмент электроискрового действия (рис. 7) позволяет слесарю производить снятие металла со значительно большей скоростью, чем это ранее им достигалось путем применения различного вида режущего инструмента.

Электроискровая обработка намного упрощает ремонт машин. Специалистам в области ремонта машин хорошо известны те многие трудности, с которыми приходится сталкиваться при возвращении в строй машины, достаточно много поработавшей.

При разборке машины, подлежащей ремонту, очень часто не удается снять отдельные детали машин: «заедают», не отвертываются гайки, заклинились шпонки, не вынимается какая-нибудь запрессованная каленая втулка, заклинилась на валу машины или в корпусе ее обойма подшипника и т. п. Трудности значительно возрастают, когда начинается собственно ремонт деталей. Некоторые детали, имея большую поверхностную твердость, не позволяют применить непосредственную их механическую обработку для придания им необходимых размеров. Приходится предварительно отжигать детали, при этом возникают новые трудности — появляется коробление. Наконец, при проведении механической обработки часто сверло, метчик или развертка ломаются и часть этого инструмента остается в отверстии. Поэтому весьма часто отказываются от ремонта дорогостоящих деталей машин, как не поддающихся восстановлению. С появлением электроискрового способа обработки металлов подавляющее большинство перечисленных трудностей ремонта машин и аппаратов снимается.

Для иллюстрации на рис. 8 показаны извлеченные электроискровым способом остатки сломавшихся инструментов.

Часто подшипник качения, напрессованный на вал, в процессе работы теряет тугую посадку и начинает провертываться. Существующие способы ремонта сложны, требуют много времени, а иногда и замены деталей. Электроискровая обработка позволяет нане-

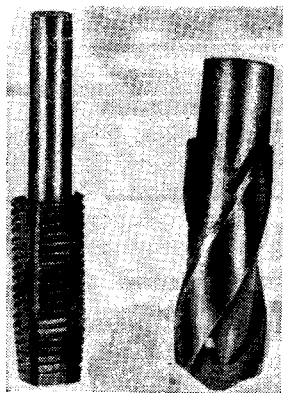


Рис. 8.

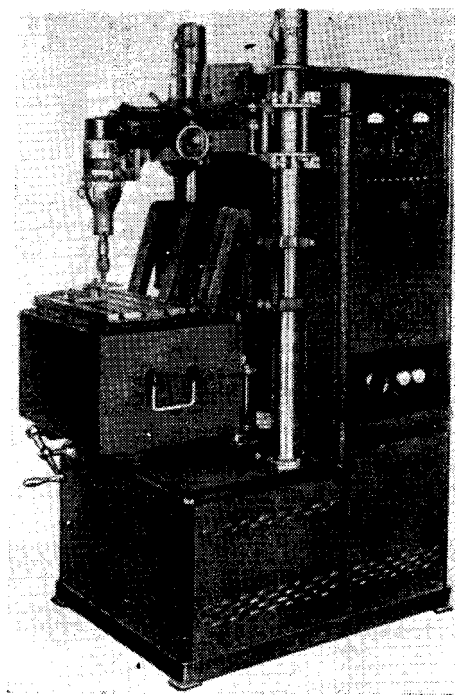


Рис. 9.

сением покрытий на шейку вала восстановить его размеры и вновь напрессовать подшипник.

Для осуществления процессов электроискровой обработки разработаны специализированные электроискровые установки. Для ряда производств, где требуется лишь эпизодическое применение электроискровой обработки, но с использованием большого числа разнообразных электроискровых процессов и операций, разработан специальный тип установки «Электром-12» (рис. 9). С ее помощью можно осуществлять изготовление отверстий, шлифование металлов, разрезку их, а также процессы электроискрового упрочнения металлических поверхностей и нанесение металлических покрытий.

Остановимся еще на двух применениях.

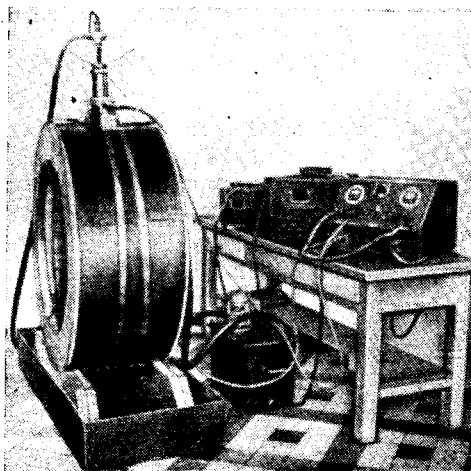


Рис. 10.

Строгая математическая зависимость количества перенесенного металла от прошедшего электричества позволила применить описываемый способ для целей количественного анализа металлов; для проведения спектрального анализа при помощи этого способа отбираются средние пробы.

Отсутствие механических усилий при электроискровой обработке позволило ее применить для взятия проб для определения остаточных напряжений в крупных поковках. При помощи переносной электроискровой установки, представленной на рис. 10, легко осуществить эту операцию.

Известен еще ряд применений электроискровой обработки с применением специальных типов схем, в частности с наложением колебаний ультразвуковой частоты, однако эти специальные вопросы требуют самостоятельного освещения.

В зарубежных странах электроискровая обработка также нашла значительное применение. Из публикаций известно, что в Чехословацкой республике, США, Англии, Франции и других странах изучению электроискрового процесса (в США и Англии он называется «икс-метод») уделяется значительное внимание, выпущены специальные установки [Л. 6 ... 8].

Выводы. Подводя итог сказанному, можно сделать вывод, что электроискровая техника за весьма короткий отрезок времени выросла в самостоятельную область прикладной электротехники и непрерывно совершенствуется. Не подлежит сомнению, что с каждым годом число процессов, выполнявшихся при помощи механического резания и вытесненных более простым и дешевым процессом — электроискровой обработкой, будет непрерывно расти. Тяжелые и хитроумные металлообрабатывающие станки со всей их подчас огромной массой движущегося металла так же, как и многочисленные двигатели, приводящие их в движение, начнут постепенно уступать место легким и

портативным установкам электроискрового действия.

Новые возможности обработки деталей и доступность изготовления их из наиболее прочных материалов, не считаясь при этом с физическими и химическими свойствами этих материалов, несомненно, изменят конструкцию современных транспортных, сельскохозяйственных, текстильных, строительных и многих других машин, приборов и аппаратов; они станут более целесообразными, легкими и вместе с тем более долговечными.

Тщательное изучение явлений, сопровождающих импульсное освобождение электрической энергии, показывает, что электроискровая обработка металлов является лишь частным случаем ряда электрических процессов. Нет сомнений в том, что в самое ближайшее время народное хозяйство нашей страны получит для использования новые весьма эффективные электрические процессы.

Литература

1. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Электрическая эрозия металлов. Вып. 1. Госэнергоиздат, 1944.
2. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Электрическая эрозия металлов. Вып. 2, Госэнергоиздат, 1945.
3. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Физика электроискрового способа обработки металлов. ЦБТИ Министерства электропромышленности, 1946.
4. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Электроискровая обработка металлов. Госэнергоиздат, 1950.
5. Г. И. Покровский. Физика взрыва. Издательство «Знание», 1954.
6. E. M. Williams, S. B. Woordford, H. E. Smith. Recent Developments in the Theory and Design of Electrical Spark Machine Tools.
7. M. M. Mara Bruma et Michel Magart. Contribution à la technologie de «l'usinage par étincelles».
8. L'usinage par étincelage a désormais droit de cité dans l'industrie mécanique. Machine Moderne, декабрь 1954.

[15. 4. 1955]



Современные достижения в области магнитных материалов

Доктор техн. наук, проф. А. С. ЗАЙМОВСКИЙ

Москва

Электротехническая, радиотехническая промышленность, автоматика и приборостроение в процессе современного их интенсивного развития ставят перед наукой и техникой все новые и новые задачи по усовершенствованию и разработке специальных электротехнических материалов. Среди этих материалов важное место занимают магнитные металлы и их разнообразные сплавы.

Всякое продвижение вперед в области познания магнитных процессов в ферромагнитных материалах тотчас же находит свое отражение в технике и оказывает благотворное влияние на усовершенствование технологии уже известных материалов и на создание новых магнитных сплавов.

Советской и дореволюционной русской науке принадлежит ведущая роль в области науки

о магнетизме. Важнейшие идеи и теоретические исследования по ферромагнитному веществу, предопределившие современные достижения в этой области, принадлежат отечественным ученым. В дореволюционный период и в 20-е годы разработка магнитных материалов в основном велась в передовых капиталистических странах при малом участии отечественных ученых и инженеров, что объясняется общей промышленной отсталостью царской России и трудностями пореволюционного восстановительного периода. Однако это отставание было ликвидировано в исключительно короткие сроки. Уже в 1928—1930 гг. советские ученые добились крупных успехов. В настоящее время отечественная наука о магнетизме прочно занимает ведущее место,

а на советских предприятиях изготавливаются магнитные материалы самых разнообразных марок и качества.

Явление ферромагнетизма было известно в древние времена. Постоянные магниты, например, в виде компасной стрелки, нашли практическое применение очень рано. Однако дату зарождения науки о ферромагнитном веществе следует отнести только к последней четверти 19-го в. И здесь с чувством законной гордости можно отметить, как первые крупные исследования в этой области, следующие работы А. Г. Столетова (1871 г. [Л. 1]): построение первой кривой намагничивания и кривой восприимчивости, выяснение роли размагничивающего действия концов прямолинейного стержня, введение баллистического метода измерений на кольцевых образцах. Перечисленные исследования именно и положили начало науке о ферромагнетизме, разумеется, чисто феноменологической на том этапе.

Русской науке в лице Б. Л. Розинга (1892 г., [Л. 2]) принадлежит честь разработки фундаментального теоретического положения о существовании некоего внутреннего молекулярного магнитного поля, объясняющего высокую магнитную проницаемость ферромагнетиков. Не стремясь умалить значение крупного вклада французского ученого П. Вейсса (1907 г., [Л. 3]) в теорию молекулярного поля, следует, однако, пожалеть, что до последних работ советского ученого С. В. Вонсовского [Л. 4] классическое исследование Б. Л. Розинга, намного лет опередившего П. Вейсса, было предано забвению.

В связи с развитием радиотехники особое значение в науке о магнетизме приобрело теоретическое и экспериментальное исследование поведения ферромагнетиков в быстропеременных магнитных полях. Пионером в этой области явился крупный ученый В. К. Аркадьев. На протяжении более 40 лет В. К. Аркадьев и его школа в лице Б. А. Введенского, И. Н. Малова, К. М. Поливанова, О. И. Велецкой, К. М. Волковой и др. развивают учение о дисперсии магнитной проницаемости, о магнитной вязкости и последствии, о роли доменной структуры ферромагнетиков в дисперсии проницаемости.

Обобщая теорию электромагнитного поля для вязких ферромагнетиков, В. К. Аркадьев ввел плодотворное понятие о магнитной проводимости ρ . Выражая сдвиг фаз между полем и индукцией, В. К. Аркадьев получает формулу:

$$B_0 = \sqrt{\mu^2 + \rho^2 H_0^2}.$$

В этом выражении μ — упругая проницаемость, определяющая обратимую энергию ферромагнетика: $\mu H^2/8\pi$; ρ — вязкая проницаемость, связанная с гистерезисом: $\rho' H_0^2/4$.

Величина ρ' связывает упругую проницаемость с комплексной проницаемостью μ' :

$$\mu' = \mu - i\rho'.$$

Работы В. К. Аркадьева и его школы на много лет опередили zahraniчные работы в области дисперсии проницаемости и ферромагнитного резонанса, широко сейчас там изучаемого.

Двухтомный труд В. К. Аркадьева «Электромагнитные процессы в металлах» (ОНТИ, т. I, 1934, т. II, 1936) и последующие сборники трудов и статьи в периодической печати (в частности, в журнале «Электричество»), являются наиболее полным и глубоким изложением вопросов электромагнетизма в ферромагнетиках.

Дальнейшее развитие теории ферромагнетизма пошло по пути выяснения физической природы молекулярного поля. В 1927 г. советский ученый Я. Г. Дорфман [Л. 5] экспериментальным путем показывает, что молекулярное поле Розинга-Вейсса не является магнитным. Классическая работа Я. И. Френкеля (1928 г., [Л. 6]) и более поздняя — В. Гейзенберга [Л. 7] объясняют молекулярное поле как результат квантово-механического обменного взаимодействия — вид электростатического взаимодействия электронных спинов. Дальнейшее развитие идеи обменного взаимодействия привело к разработке критерия ферромагнетизма (положительная величина интеграла энергии обменного взаимодействия) (1946 г., [Л. 8]). Базируясь на идее sd -обменной модели ферромагнетика, С. В. Вонсовский первый дает объяснение «загадочной» дробности атомных магнитных моментов, в частности железа, никеля и кобальта, которые в парамагнитном состоянии имеют целое число магнетонов Бора.

В 1928—1931 гг. Н. С. Акулов [Л. 9] выполнил фундаментальные работы, определяющие и в настоящее время развитие теории кривых намагничивания и гистерезиса ферромагнитных материалов. Открытие Н. С. Акуловым закона магнитной анизотропии, введение понятия о процессах вращения и инверсии, о максимальной коэрцитивной силе при отсутствии процесса инверсии, расчет кривых намагничивания монокристалла, разработка магнитного анизометра, экспериментальное подтверждение независимо от Биттера [Л. 10] существования областей спонтанного намагничивания — (доменов) путем осаждения на границах этих областей ферромагнитных порошков, — все эти работы нашли широкое применение в технике изготовления новых магнитных материалов с высокими свойствами.

Крупным вкладом в теорию ферромагнитных материалов составили две серии работ советского ученого Е. И. Кондорского. Введя в выражение для энергии анизотропии член, выражающий магнитно-упругую энергию, Е. И. Кондорский (1937 г., [Л. 11]) разработал теорию кривых намагничивания и гистерезиса мягких магнитных материалов. В 1940 г., указав на зависимость коэрцитивной силы от формы частиц в ферромагнитных сплавах, Е. И. Кондорский тем самым предвосхитил позднейшие работы по ферромагнетикам с высокой коэрцитивной силой, состоящим из мелких, однодоменных ферромагнитных частиц, вкрапленных в парамагнитную или слабомагнитную основу. Позднее, в большой серии работ, Е. И. Кондорский [Л. 12] развивает теорию однодоменных частиц, позволяющую объяснить свойства высококоэрцитивных материалов. В этой новой области значительное место занимают работы зарубежных ученых Л. Нееля [Л. 13], Ч. Киттеля [Л. 14] и др.

Рассмотренные выше важнейшие работы, являющиеся лишь частью большой литературы по теории ферромагнитных материалов, развивались параллельно с разработкой и внедрением в промышленность новых магнитных материалов. Взаимодействие теории и практики в этой области особенно легко проследить в последние 25...30 лет.

Для характеристики современного состояния техники и технологии магнитных материалов ниже описываются некоторые магнитные сплавы, применяемые или находящиеся в стадии внедрения.

Кремнистая электротехническая сталь — сплав железа с 1...4,5% кремния, первый по важности магнитный материал. Этот сплав, несмотря на полувекоевое свое существование, продолжает непрерывно совершенствоваться. Если в период 1920—1935 гг. важнейшими вопросами улучшения свойств этой стали были очистка ее от вредных примесей в виде углерода, азота, кислорода, серы и шлаков и выращивание крупных зерен, то к 1935 г., после экспериментальных работ Н. Госса [Л. 15], началась усиленная разработка текстурованной трансформаторной стали с 3...3,25%-ным содержанием кремния. В основу этой разработки была положена идея о создании в отожженной стали преимущественной ориентировки ребра куба {100} в направлении прокатки, при которой (как показал Н. С. Акулов) следует ждать резкого роста магнитной проницаемости. Х. Вилльямс [Л. 16] показал, что магнитная проницаемость в монокристалле кремнистой стали в направлении {100} в десятки раз выше, чем в обычной стали. На рис. 1 приведены кривые Вилльямса для проницаемости в слабых и средних полях.

В СССР разработкой текстурованной стали занимались А. Л. Гольдман [Л. 17], А. В. Расторгуев [Л. 18], Г. М. Фомин [Л. 19] и др. [Л. 20]. На рис. 2 приведены кривые индукции в слабых и средних полях отечественной текстурованной стали марок Э370 и Э320 по ГОСТ 802-54. Технология этой стали в корне отлична от технологии изготовления обычной горячекатанной стали. Текстура может быть получена лишь путем холодной прокатки и отжига, и поэтому содержание кремния в стали марок Э310, Э320 и т. д. снижается до 3...3,25%.

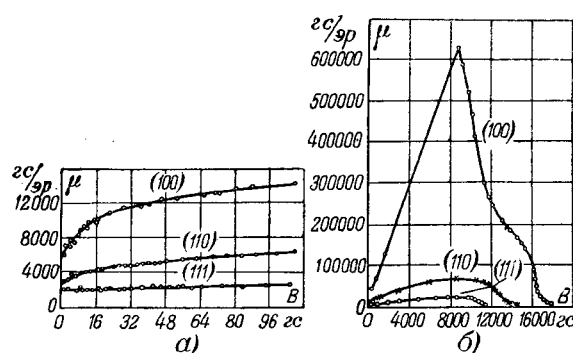


Рис 1. Проницаемость монокристаллов в слабых полях (а) и вплоть до сильных полей (б).

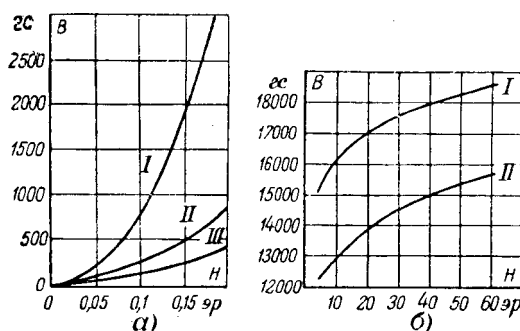


Рис. 2. Кривые намагничивания холоднокатанной электро-технической стали марок Э370 и Э320 в сравнении со сталью марки Э48 (толщина 0,35 мм).

а — слабые поля: I — Э370 (толщина 0,35 мм); II — Э48 (толщина 0,35 мм); III — Э47 (толщина 0,1 мм); б — средние поля: I — Э320; II — Э42.

Схема производства текстурованной стали предусматривает не только создание текстуры ребра куба {100} вдоль направления прокатки, но и очистку металла от вредных примесей и выращивание крупного зерна. Металл в листах выпускается с содержанием: углерода 0,003...0,005%, менее 0,1% марганца, менее 0,003% серы и 0,1% фосфора. После горячей прокатки на толщину 2,5 мм сталь прокатывается на непрерывном стане в холодную до толщины 0,3...0,35 мм с промежуточным отжигом при 900...950°С и обезуглероживающим отжигом при 800...850°С (отжиг во влажной восстановительной среде). Окончательный отжиг в чистом водороде при медленном нагреве до 1100...1200°С обеспечивает необходимую текстуру рекристаллизации, укрупнение зерна и дополнительную очистку от вредных примесей. Этот процесс, естественно, значительно сложнее обычной технологии горячей прокатки в пакетах с низкотемпературным отжигом, но повышенные расходы окупаются тем большим экономическим эффектом, который достигается в трансформаторостроении в виде снижения веса и габаритов трансформаторов.

Текстурованная сталь может быть прокатана до толщины 0,03...0,05 мм, и в виде такой ленты она успешно конкурирует с пермаллоем в применении в слаботочных трансформаторах, высокочастотных и импульсных.

Современная техника использует также явление существенного роста проницаемости и снижения потерь на гистерезис и вихревые токи в стали при повышении содержания кремния до 5...6%. Такая сталь хрупка и должна штамповаться при 100...150°С. В штамповках простой формы она может успешно применяться в слаботочной аппаратуре.

Сплавы с высокой проницаемостью типа пермаллоя. Сплав железа с 78,5% никеля, открытый Ильменом [Л. 21] и названный пермаллоем, замечателен тем, что при чистоте по загрязняющим примесям, равной чистоте обычного железа армо или трансформаторной стали, его магнитная проницаемость в десятки раз выше. Путем введения в сплав молибдена, меди, хрома при одновременном изменении состава по никелю

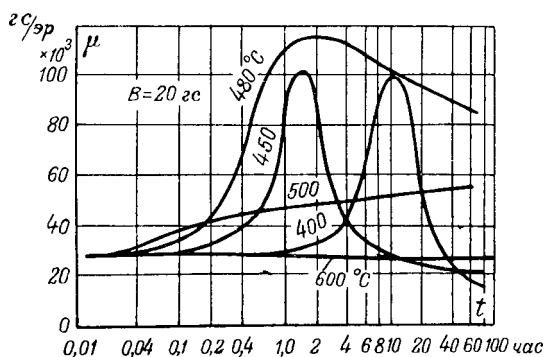


Рис. 3. Влияние времени отпуска при различных температурах на начальную проницаемость супермаллоя, предварительно отожженного при 1300° С и быстро охлажденного от 600° С.

удалось значительно повысить свойства пермаллоя. Рекордным является сплав супермаллой, содержащий 79% никеля и 5% молибдена (остальное железо). На рис. 3 приведена по Бозорту [Л. 22] зависимость магнитной проницаемости супермаллоя от длительности отжига при различных температурах.

При анализе причин высокой проницаемости пермаллоя Мак Кихан [Л. 23] обратил внимание на очень малую магнитострикцию сплава, а Н. С. Акулов [Л. 24] — на очень малую константу анизотропии. Лихтенбергер [Л. 25] показал, что состав железоникелевого пермаллоя (78,5% никеля) лежит между составами сплавов, у которых в отдельности магнитострикция и константа анизотропии равны нулю. Теоретически связь высокой проницаемости с малыми значениями анизотропии и магнитострикции оправдывалась, однако полную достоверность эта теория могла получить после подтверждения ее на ряде других сплавов. Работы в этом направлении были выполнены Я. П. Селиским и др [Л. 26] и И. М. Пузеем [Л. 27]. На рис. 4 и 5 показаны начальная магнитная проницаемость μ_0 сплавов железо—кремний—алюминий (альсифер), ход анизотропии K и магнитострикции λ тех же сплавов, а на рис. 6 — кривые нулевых значений K

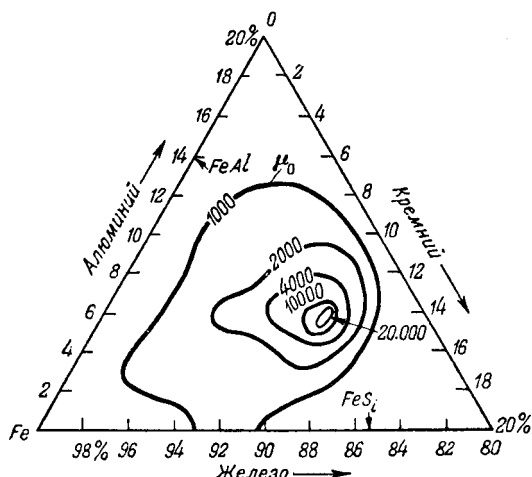


Рис. 4. Начальная проницаемость Fe-Si-Al-сплавов, отожженных при 1000° С.

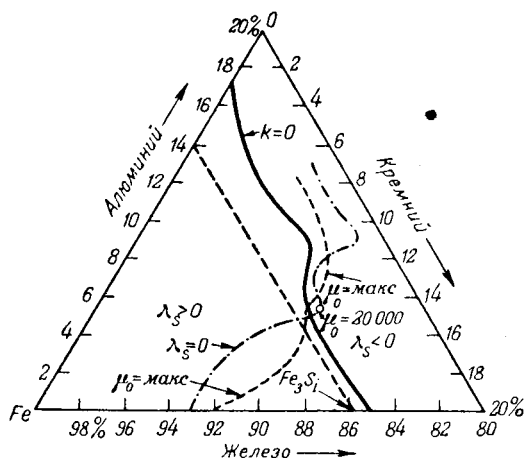


Рис. 5. Линии наивысшей начальной проницаемости μ_0 , наинизшей магнитострикции λ и кристаллической анизотропии K в Fe-Si-Al-сплавах.

(сплошные линии) и λ (пунктирная линия) для сплавов железо—никель—хром. Сопоставление кривых не оставляет сомнений, что проницаемость достигает максимума тогда, когда значения магнитострикции и анизотропии близки к нулю. Таким образом, разработка промышленных сплавов с высокой начальной проницаемостью ставится ныне на строго обоснованный теоретический фундамент: оптимальный состав сплава должен быть найден при одновременно близких к нулю значениях магнитострикции и анизотропии.

С этой же теоретической точки зрения следует рассматривать и вопросы термической обработки сплавов типа пермаллоя. Известно, что как в чистых железо-никелевых сплавах, так и в сплавах, легированных молибденом, а также в железо-кремне-алюминиевых сплавах наивысшая проницаемость зависит от скорости охлаждения. Изме-

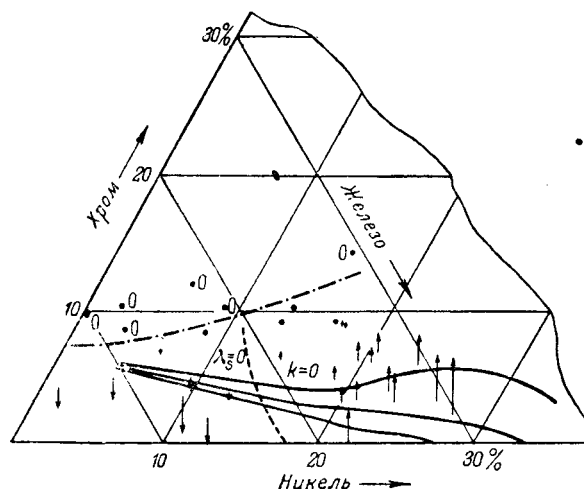


Рис. 6. Часть концентрационного треугольника с кривыми нулевой анизотропии (сплошные линии) и нулевой магнитострикции (пунктирные линии). Штрих-пунктирной кривой показана граница областей ферромагнетизма при комнатной температуре. Стрелки в соответствующем масштабе показывают значение магнитострикции для сплавов различных составов.

рения теплоемкости, электросопротивления, магнитного насыщения и рентгенографический анализ показывают, что зависимость проницаемости от термообработки имеет связь с образованием сверхструктуры типа Ni_3Fe в пермаллоев и $\text{Fe}_3(\text{SiAl})$ в альсифере. Очевидно, при различной степени упорядочения (образование сверхструктуры) происходит изменение анизотропии и магнитострикции, и оптимальным будет в различных случаях либо упорядоченное состояние, либо неупорядоченное. Для сплавов железо — никель Бозортсу [Л. 28] удалось показать, что при закалке пермаллоя (условия для получения наивысшей проницаемости) константы анизотропии и магнитострикции близки к нулю, в то время как после медленного охлаждения они сильно возрастают.

Своеобразная зависимость начальной проницаемости супермаллоя (рис. 3) от температуры и времени отжига при $400 \dots 600^\circ \text{C}$ показывает, что оптимальное сочетание близких к нулю анизотропии и магнитострикции получается при какой-то определенной степени упорядочения, не равной ни нулю, ни 100%.

Ферриты. С связи с широким внедрением разнообразных средств связи, использующих весьма широкий диапазон частот — от звуковых до десятков мегагерц — большое развитие в настоящее время получили ферриты — ферромагнетики с высоким удельным сопротивлением порядка тысяч и миллионов омсантиметров.

Ферриты, имеющие структуру шпинели, состоят из порошков феррита никеля и феррита цинка ($\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) и применяются: в качестве сердечников радиотрансформаторов и катушек индуктивности, магнитопроводов нагревательных высокочастотных устройств, в контурах усилителей, антенн, волноводов, магнитных модуляторов частоты, магнитострикционных генераторов и т. п.

Исследование ферритов позволило на этом новом классе материалов подтвердить основные закономерности высокопроницаемых материалов: высокую проницаемость в слабых полях близ точки Кюри, рост проницаемости в твердых растворах в связи с малыми значениями K и λ_s и др.

Советские ученые — Н. Н. Шольц и К. А. Пискарев, Г. А. Смоленский, Л. И. Рабкин и др. [Л. 29] — вскрыли ряд основных закономерностей в магнитных свойствах ферритов и разработали отечественные марки ферритов под названием «оксиферы», удовлетворяющие запросы радиотехники, приборостроения и специальной техники.

Высококоэрцитивные сплавы для постоянных магнитов. За последние годы техника и теория сплавов для постоянных магнитов получили большое развитие. Наряду с литыми и термообрабатываемыми сплавами альни, разработанными в СССР Б. Г. Лившицем [Л. 30], и сплавом магнико [Л. 31] были предложены сплавы, спеченные из высокодисперсного железного порошка из окислов железа и кобальта, а также пластичные железо-никель-медные магниты. Был разработан

сплав — соединение марганец — висмут, с исключительно высокими свойствами.

Теоретический анализ природы коэрцитивной силы этих сплавов, достигающей сотен и тысяч эрстед, показывает, что ни относительно высокая константа анизотропии, ни внутренние напряжения, связанные с дисперсионным или диффузионным твердением или с наличием дисперсных немагнитных фаз, не могут объяснить высоких значений коэрцитивной силы. По Н. С. Акулову [Л. 32] и по Беккеру [Л. 33] предельные значения коэрцитивной силы при отсутствии процесса инверсии (смещения границы между доменами) равны:

$$H_{c \text{ макс}} \approx \frac{K}{J_s} \quad (1)$$

и

$$H_{c \text{ макс}} = \frac{\lambda_s \sigma_i}{J_s} \quad (2)$$

H_c — коэрцитивная сила, эр;

K — константа анизотропии;

J_s — магнитное насыщение;

λ_s — константа магнитострикции;

σ_i — внутренние напряжения.

Подсчет показывает, что в сплавах альни и магнико, в пластичных железо-никель-медных, а также порошковых магнитах значение $\frac{K}{J_s}$ ред-

ко достигает $200 \dots 250$, в то время как коэрцитивная сила составляет $700 \dots 1200$ эр. Если по формуле (2) при $H_c \approx 700 \dots 1200$ эр найти σ_i , то эта величина оказывается равной сотням кг/мм^2 , что невозможно, так как такие напряжения разрушили бы сплав. Между тем железо-никель-медные магниты и в высококоэрцитивном состоянии пластичны и о напряжениях в них порядка сотен кг/мм^2 невозможно говорить. Как уже было указано выше, впервые Е. И. Кондорским было сформулировано то положение, что коэрцитивная сила магнитов может зависеть от формы ферромагнитных частиц в сплаве. Развитие этой идеи привело к разработке теории однодоменных частиц.

Известно, что в высокопроницаемых ферромагнетиках основным содержанием процесса инверсии является смещение стенки между доменами, так что домены, магнитный момент которых направлен вдоль поля, растут за счет доменов с магнитным моментом, направленным противоположно магнитному полю или под большими углами к нему. Толщина стенки и сами размеры доменов определяются минимумом свободной энергии, состоящей из энергии анизотропии, обменной энергии и энергии напряжений. Если ферромагнетик имеет достаточно большие размеры, то области спонтанного намагничивания — домены — замыкают свой магнитный поток друг на друга, будучи отделенными стенкой, на протяжении которой вектор намагничивания постепенно поворачивается на 180° от одного домена к другому. Когда же частица уменьшается до не-

скольких сотен онгстрем (десятки и сотни атомных слоев), то такая частица-кристаллик не может разбиться даже на два домена, так как энергетически это невыгодно. В этом случае при перемагничивании все магнитные моменты спинов совместно вращаются и затем скачкообразно поворачиваются в направлении поля (коэрцитивная сила). Если частица изолирована от соседних частиц и имеет хотя бы слабо удлиненную форму, то при перемагничивании внешнее поле должно совершить работу против энергии фиктивных магнитных зарядов на поверхности частицы. Элементарный расчет приводит в этом случае к значению коэрцитивной силы

$$H_{с макс} = J_s (N_{\kappa} - N_{\delta}),$$

где N_{κ} — размагничивающий коэффициент по короткой оси частицы, а N_{δ} — по длинной оси. Для удлиненных однодоменных цилиндров $N_{\kappa} = 2 \cdot \pi \approx 6$, а N_{δ} можно пренебречь. Тогда, например, для железа получаем:

$$H_{с макс} = 1700 \cdot 6 \approx 10000 \text{ эр.}$$

Практически столь высокие значения H_c не достигаются, так как однодоменные ферромагнитные кристаллики расположены в сплаве близко друг к другу, так что эффективное значение N_{κ} падает, однако последовательное применение этой теории позволило с успехом объяснить природу высококоэрцитивных сплавов. Разумеется, значение N_{κ} меняется в сплаве от частицы к частице, и известную роль играют и анизотропия и внутренние напряжения, так что реальное значение коэрцитивной силы H_c сплава складывается из нескольких составляющих.

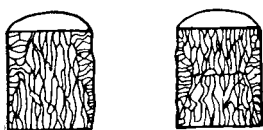
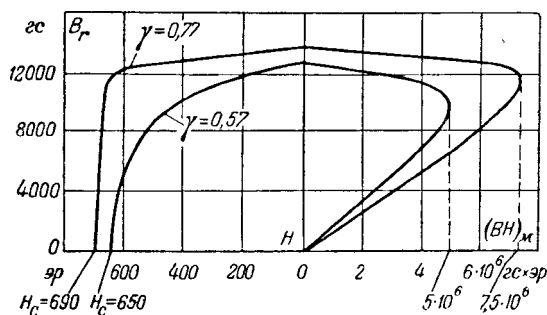


Рис. 7. Схемы отливок с направленной кристаллизацией.



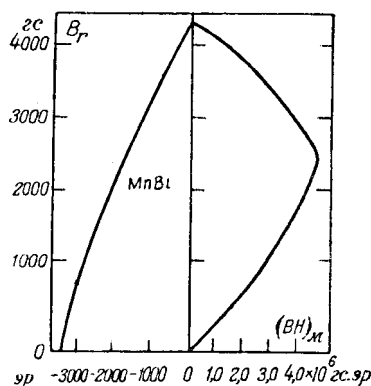


Рис. 10. Кривая размагничивания и магнитной энергии сплава висмутита марганца.

поле напряженностью 20 000 эр. Причина исключительно высокой коэрцитивной силы магнитов из MnBi двоякая: константа анизотропии кристалла MnBi весьма высока и размер однодоменной частицы довольно значителен; затем при прессовании, возможно, имеет место дополнительное дробление частиц так, что их размеры становятся однодоменными. Наличие избытка висмута, жидкого при температуре прессования (300°С), приводит к скреплению частичек MnBi и к магнитной изоляции их друг от друга. На рис. 9 приведена зависимость константы анизотропии K висмутита марганца от температуры, а на рис. 10—кривые размагничивания и магнитной энергии. Магниты из порошков MnBi, несомненно, займут подходящее место в технике сплавов для постоянных магнитов.

Большие успехи в разработке пластичных, изготавливаемых в виде ленты и проволоки, высококоэрцитивных магнитов — железо-никель-медных («кунифе»), кобальт-никель-медных («кунико»), железо-кобальт-ванадиевых («викэллой») и др. с коэрцитивной силой $H_c = 400 \dots 700$ эр и $B_r = 5000 \dots 10000$ гс также находят свое непосредственное объяснение в рассмотренных выше теоретических положениях о роли кристаллической текстуры и анизотропии однодоменных ферромагнитных частиц, ориентированных вдоль направления намагничивания.

Заключение. Подводя итог, следует сказать, что в настоящее время основные физические и металловедческие положения о связи между структурой и свойствами магнитных материалов позволяют совершенно сознательно вести в нужном направлении поиски новых сплавов, композиций и технологических приемов их изготовления. Можно не сомневаться, что советские исследователи, вооруженные передовой наукой о магнетизме, обогатят отечественную технику новыми высококачественными магнитными материалами, необходимыми для дальнейшего развития в СССР электротехники, приборостроения, средств связи, автоматики и телемеханики.

Литература

1. А. Г. Столетов. Собрание сочинений. ГТИИ, т. 1, 1939.
2. Б. Л. Розинг. ЖРФХО (часть физическая), т. 24, стр. 105, 1892.
3. П. Вейсс. Journ. de phys. et radium, т. 6, стр. 661, 1907.
4. С. В. Вонсовский. Современное учение о магнетизме. ГИИТЛ, стр. 200, 1953.
5. Я. Г. Дорфман. Nature, т. 119, стр. 353, 1927.
6. Я. И. Френкель. Zs. f. Phys., т. 49, стр. 31, 1928.
7. В. Гейзенберг. Zs. f. Phys., т. 49, стр. 619, 1928.
8. С. В. Вонсовский. ЖЭТФ, т. 16, стр. 981, 1946.
9. Н. С. Акулов. Ферромагнетизм. ОНТИ, 1939.
10. Ф. Биттер. Phys. Review, т. 38, 1903—1905.
11. Е. И. Кондорский. ДАН СССР, т. 18, стр. 325, 1938; т. 19, стр. 397, 401, 1938; т. 20, стр. 117, 1938. ЖЭТФ, т. 10, стр. 420, 1940. ДАН СССР, т. 63, стр. 507, 1948.
12. Е. И. Кондорский. ДАН СССР, т. 70, стр. 215, 1950; т. 74, стр. 213, 1950; т. 80, стр. 197, 1951; т. 82, стр. 365, 1952.
13. Л. Неель. Cahiers de phys., т. 25, стр. 21, 1944.
14. Ч. Киттель. Phys. Rev., т. 70, стр. 965, 1946.
15. Н. Госс. Trans. Am. Soc. Metals, № 23, стр. 515—531, № 23, 1935.
16. Ч. Вильямс. Phys. Rev., т. 52, стр. 747 и 1004, 1937.
17. А. Л. Гольдман. Электричество, № 11, 1947.
18. А. В. Расторгуев. Диссертация, 1947. Институт металлургии Академии наук СССР.
19. Г. М. Фомин. Проблемы физического металловедения. Труды Московского института стали, 1939.
20. А. С. Займовский и Л. Ш. Казарновский. Качественная сталь, № 8 и 9, стр. 18, 1936.
21. Г. Ильмен. Канадский патент 180539, 1917.
22. Р. Бозортс. Ferromagnetism, стр. 140, 1953.
23. Л. Мак-Кихан. Phys. Rev., т. 28, стр. 156, 1926.
24. Н. С. Акулов. Ферромагнетизм, 1939.
25. Ф. Лихтенбергер. Ann. Phys., (5), т. 15, стр. 45, 1932.
26. А. С. Займовский и Я. П. Селицкий. Сборник трудов по технической физике Академии наук СССР, т. 5, 1948. Journ. of Phys. Sovietunion, т. 4, стр. 563, 1941.
27. И. М. Пузей. Известия Академии наук СССР. Серия физическая, т. 16, стр. 549, № 5, 1952.
28. Р. Бозортс. Rev. Mod. Physics, т. 25, № 1, стр. 42, 1953.
29. Н. Н. Шольц и К. А. Пискарев. Изв. АН СССР, т. XVI, № 6, серия физ., 1952, стр. 739; Научно-техн. сборник. Лен. Отд. Инф., 1952; Г. А. Смоленский. Изв. АН СССР, т. XVI, № 6, серия физ., 1952, стр. 728; Г. А. Смоленский и Л. И. Рабкин. Вестник связи, стр. 6, № 10, 1951.
30. Б. Г. Лившиц. Высококоэрцитивные сплавы. Металлургиздат, 1945.
31. А. С. Займовский. Электричество, № 9, 1946.
32. Н. С. Акулов. Ферромагнетизм, 1939. Zs. f. Phys., т. 81, 790, 1933.
33. Р. Беккер. Magnetismus. Лейпциг, стр. 479, 822, 1933.
34. А. С. Займовский и Л. М. Львова. Сталь, № 4, 1945.
35. О. С. Иванов. Диссертация, ИОНХ Академии наук СССР, 1953.
36. Н. Н. Буйнов и В. В. Ключин. Известия Академии наук СССР. Серия физическая, т. 16, № 6, 1952.
37. Р. Д. Хейденрейх и Е. А. Несбитт. J. Appl. Phys., т. 23, стр. 366, 1952.
38. Эбелинг и Бурр. Journ. of Metals, т. 5, стр. 537—544, № 4, 1953.
39. Э. Адамс. Rev. Mod. Physics, т. 25, № 1, стр. 306, 1953.

[11. 3. 1955]

Некоторые задачи электроизмерительной техники

Доктор техн. наук, проф. Е. Г. ШРАМКОВ, доктор техн. наук, проф. В. О. АРУТЮНОВ, кандидат техн. наук, доц. А. М. ТУРИЧИН, кандидат техн. наук, доц. П. В. НОВИЦКИЙ

Электроизмерительная техника является неотъемлемым элементом автоматизации производственных процессов, мощным оружием научных и технических исследований и изысканий. Производство всевозможного рода электроизмерительной аппаратуры представляет собой широко развитую отрасль электротехнической промышленности.

К настоящему времени электроизмерительная техника в СССР достигла крупных успехов; она характеризуется большим разнообразием приборов для измерения самых различных электрических и неэлектрических величин как в производственных условиях, так и при лабораторных исследованиях.

Говоря о достижениях советской электроизмерительной техники, достаточно сказать, что решение крупнейших современных проблем в области атомной физики, практическое использование внутриатомной энергии для мирных целей — успешное создание первой в мире атомной электростанции, не могли бы иметь места, если бы наша электроизмерительная техника не находилась на должной высоте.

Возрастающие с каждым годом требования народного хозяйства выдвигают перед электроизмерительной техникой новые, более сложные и ответственные задачи. Это касается: а) дальнейшего повышения точности, чувствительности, надежности и быстродействия приборов; расширения их пределов измерения как в сторону больших, так и малых значений измеряемых величин; создания приборов для применения в различных условиях, резко отличающихся от обычных; б) удовлетворения растущих потребностей, связанных с автоматическим контролем, автоматизацией производственных процессов, телемеханизацией контроля и управления; в) создания аппаратуры, во многих случаях уникальной, для всевозможного рода научных исследований и метрологии.

Рамки настоящей статьи не позволяют сколько-нибудь полно и всесторонне осветить намечаемые задачи в области электроизмерительной техники. Из большого числа вопросов, вытекающих из указанных задач, мы остановимся лишь на некоторых, имеющих общий характер, а именно: на вопросах стабильности параметров электроизмерительной аппаратуры, использования ламповой техники в практике электроприборостроения и вопросах, связанных с автоматическим контролем производственных процессов.

Производимая нашей промышленностью разнообразная электроизмерительная аппаратура должна не только удовлетворять требованиям практики в отношении своих параметров, точности, чувствительности, быстродействия, допустимых габаритов, веса и др., но и быть в высокой степени надежной в эксплуатации. Объективной характеристикой надежности является длительность срока, в течение которого все параметры аппаратуры, определяющие ее свойства и усло-

вия применения, сохраняются неизменными в допустимых пределах, без какой-либо периодической регулировки или ремонта. В конечном итоге это сводится к требованию сохранения класса прибора.

Современное положение в этом отношении в свете возрастающих требований не может нас удовлетворить. Всестороннее изучение причин недостаточной стабильности отдельных элементов, а также приборов и устройств в целом, систематическое изыскание путей построения более надежных в указанном смысле приборов, вытекающих из научно обоснованной теории проектирования приборов, представляет одну из важнейших задач, имеющих существенное не только техническое, но и экономическое значение. Эти вопросы должны рассматриваться во всей своей широте по отношению и к простейшим приборам непосредственной оценки, и к наиболее сложным измерительным устройствам, и к тем мерам и приборам, которые используются для поддержания единства измерений в нашей стране, т. е. в области метрологического и проверочного обслуживания.

Следует отметить также, что повышение стабильности параметров приборов и входящих в них элементов открывает новые возможности в отношении совершенствования приборов, в частности повышения их точности. Остановимся на некоторых примерах.

Нашей промышленностью выпускаются приборы непосредственной оценки, удовлетворяющие требованиям высших классов точности, 0,2 и 0,1. Очевидно, при такой малой допустимой основной погрешности для сохранения класса на длительный срок необходимо иметь отчетливое представление, какие именно элементы прибора и в какой степени могут оказать влияние на стабильность параметров прибора в целом. Это требует проведения в широком масштабе научных исследований, связанных, в частности, с весьма точными измерениями параметров элементов приборов, с изучением применяемых материалов и анализом технологических процессов, чтобы можно было иметь обоснованную научно-техническую базу для проектирования высококачественных приборов. Так, например, исследования, проводимые в течение нескольких лет в Ленинградском политехническом институте с магнитными системами магнитоэлектрических приборов, показали, что при соответствующей конструкции и технологии изготовления магнитных систем с магнитами из современных сплавов можно гарантировать сохранение в нормальных условиях устойчивости магнитного потока в пределах 0,02% в течение длительного времени. Однако эти исследования касаются лишь одного элемента и одного вида приборов и могут быть распространены пока еще на ограниченное число магнитных систем из того большого числа систем, которые применяются нашими заводами. Проведение подобного рода исследований в широком плане, несомненно, в значительной мере поможет разрешить

задачу создания более совершенных приборов в отношении их стабильности и точности.

Изучение причин недостаточной стабильности и создание более стабильных образцовых электрических мер (катушки сопротивления, нормальные элементы, конденсаторы) является одной из важнейших задач современной метрологии. Подобная же задача должна быть поставлена и перед приборостроительной промышленностью, изготавливающей всевозможного рода рабочие электрические меры. В качестве иллюстрации современного положения остановимся на катушках сопротивления, широко применяемых во всевозможного рода измерительных устройствах.

С 1955 г. на измерительные катушки сопротивления введен новый ГОСТ 6864-54, которым предусматриваются весьма высокие требования, особенно к катушкам высшего класса точности, в отношении стабильности и точности установления действительного значения сопротивлений. Большое же число находящихся в настоящее время в обращении катушек не может удовлетворить требованиям этого ГОСТ, а имеющиеся образцовые меры не дают возможности обеспечить точность измерений действительных значений сопротивлений катушек, предусмотренную ГОСТ (0,001%), из-за недостаточной стабильности указанных мер.

Как известно, катушки сопротивлений изготавливаются из манганина, и несмотря на известные успехи у нас и за границей в отношении технологии изготовления манганина и изделий из него, проблема получения стабильных, обладающих возможно малым температурным коэффициентом сопротивлений в широком диапазоне их номинальных значений радикально не решена. Проведенное в 1954 г. Лонитоприбор научно-техническое совещание по вопросам производства и применения манганина наметило дальнейшие научные и практические работы в данной области, и для успешного их проведения необходима координация деятельности ряда организаций, имея в виду, что в результатах этих работ заинтересованы широкие круги приборостроителей. Вместе с тем было бы неправильно сосредоточить все внимание на использовании лишь манганиновых сплавов. Необходимы изыскания по применению и других материалов.

В электроизмерительной технике широко используются электронные лампы и измерительные устройства, сочетающие в себе электромеханические, электромагнитные и ламповые узлы. Широкие возможности, которые заложены в такого рода измерительных устройствах, не используются в полной мере. Во многих случаях их применение в производственных условиях ограничивается недостаточной стабильностью ламповых узлов, обусловленной нестабильностью параметров как самих ламп, так и других элементов (сопротивлений, емкостей и пр.). Например, изменение параметров ламп 6Н9 усилителей в выпускаемых нашей промышленностью автоматических приборах ЭПД, ЭПП и др. в течение первых 100 час работы достигает 15...35%, а в течение 1 000 час работы — 25...60%, что, естественно,

приводит к довольно частой смене ламп и необходимости применения регулируемых элементов. Создание более стабильных ламп, предназначенных для измерительных целей, является одной из важнейших задач, хотя и достаточно трудной.

Отметим, что предприятия, поставляя электроизмерительные приборы, указывают такой «гарантийный срок работы при нормальных условиях эксплуатации и хранения прибора», который свидетельствует о недостаточной уверенности в стабильности прибора во времени и вряд ли может рассматриваться как приемлемый. Так, например, для общепотребительных приборов непосредственной оценки, как лабораторных, так и щитовых, этот срок составляет 18 мес., а для приборов, предназначенных для работы в условиях, отличающихся от обычных, зачастую весьма ответственных, этот срок устанавливается еще более коротким, например 8 мес.

Электрические меры и электроизмерительные приборы, как известно, имеют допустимые погрешности лишь в определенном диапазоне изменения температуры, влажности, вибрации, частоты переменного тока и других факторов, сопутствующих любому измерению. Современные же условия применения электроизмерительной аппаратуры весьма разнообразны и ее потребитель вынужден увеличивать парк приборов, чтобы удовлетворить требуемым условиям. Мало того, ограниченность диапазонов, в которых могут применяться приборы, во многих случаях делает неопределенными результаты измерений и даже является препятствием для проведения эксперимента.

Известно также, что для большой номенклатуры приборов допустимые дополнительные погрешности в процентах установлены в соответствии с классом точности прибора. При дальнейшем усовершенствовании приборов и, следовательно, повышении их класса точности, естественно, должны быть понижены и дополнительные погрешности. Однако, если и в настоящее время во многих случаях при проектировании приборов вопрос о снижении дополнительных погрешностей представляет серьезную задачу, удовлетворительное решение которой нередко приводит к ухудшению других параметров прибора, например собственного потребления, то по мере повышения класса точности вопрос о расширении диапазона применимости мер и приборов осложняется еще больше. Например, практика требует применения нормальных элементов в широком диапазоне температур и в условиях вибрации и тряски. Современные же элементы не допускают этого.

В исследованиях, связанных с измерениями ионизационных токов, порядка 10^{-10} а и меньше, требуются высокоомные сопротивления, 10^9 ом и более, стабильные не только во времени, но и мало изменяющиеся под влиянием внешних условий, в первую очередь температуры. От стабильности этих сопротивлений в значительной степени зависит точность ионизационных измерений. Применяемые в настоящее время высокоомные сопротивления не могут удовлетворить растущих требований к точности такого рода измерений.

Таким образом, расширение диапазонов применимости мер и приборов представляет важную задачу электроприборостроения. Решение ее может дать значительный народнохозяйственный эффект и будет способствовать повышению точности и надежности измерений, т. е. выполнению основной задачи электроизмерительной техники.

Уже в настоящее время в практике лабораторных и производственных измерений достаточно широкое применение находит ламповая техника. Рациональное сочетание ламповых узлов с электромагнитными и электромеханическими узлами существенно расширило возможности электроизмерительной техники. Дальнейшее научно обоснованное использование достижений ламповой техники следует рассматривать как одно из прогрессивных направлений развития электроизмерительной техники.

Приходится констатировать, что новые достижения ламповой техники начали широко применяться в измерительной технике значительно позднее, чем в других областях (радиосвязи, телевидении, радиолокации и др.). Основываясь на достижениях ламповой техники в других областях, работники в области электроизмерительной техники могут и должны преодолеть это отставание.

Серьезной задачей является разработка научно обоснованной теории расчета и проектирования измерительных устройств с ламповыми узлами и самих ламповых узлов. Эта теория должна учитывать специфику применения ламп в измерительных устройствах. При разработке методов проектирования вопросы надежности работы ламповых измерительных устройств должны быть основными.

Как уже отмечалось выше, недостаточная стабильность ламп и отдельных элементов, входящих в ламповые узлы, в ряде случаев ограничивает возможности применения ламповой техники в измерительных устройствах. Однако и при существующем положении имеются пути повышения стабильности, а следовательно, и точности измерительных устройств с ламповыми узлами.

Одним из таких путей является использование ламповых узлов в цепях компенсационного преобразования с глубокой (99,0 ... 99,9%) компенсацией (обратной связью) вместо прямого, не компенсационного преобразования. В этом случае за счет соответствующего запаса (в 100 ... 1 000 раз) коэффициента усиления и применения в цепи компенсации (в цепи главной обратной связи) элементов повышенной стабильности появляется возможность соответствующего повышения стабильности компенсационной цепи в целом. Этот метод, уже давно применяемый в других областях, еще слабо внедряется в измерительной технике. Одной из причин, затрудняющей использование этого метода при относительно высокой несущей частоте, является отсутствие достаточно стабильных сопротивлений на повышенных частотах.

Другой путь — это переход от метода амплитудной модуляции к методам временной и фазной модуляции, использование всех достижений

импульсной техники. В ряде случаев этот путь может дать повышение точности на один-два порядка.

Следует также указать на тот факт, что во многих ламповых измерительных устройствах лампы используются в тех же режимах, что и в устройствах других областей, например в радиосвязи. Но если на работе радиотехнического устройства изменение параметров ламп на десятки процентов практически не сказывается, то в измерительном устройстве недопустимо отклонение уже в 1 ... 2%. Поэтому в измерительных устройствах приходится прибегать к частым периодическим регулировкам, что затрудняет их применение в производственных условиях. Измерительная техника требует особого подхода к применяемым лампам и к режимам их работы.

Крайне медленно в практику приборостроения внедряются пальчиковые и сверхминиатюрные лампы, использование которых позволяет в несколько раз снизить габариты и вес ламповых измерительных устройств.

Как известно, за последнее время начали применяться полупроводниковые диоды, триоды и более сложные полупроводниковые лампы. Долговечность их, в сотни раз превосходящая срок службы обычных газовых и вакуумных ламп, и их компактность представляют исключительную ценность. Однако в настоящее время использование полупроводниковых ламп затрудняется вследствие резкого изменения их параметров под влиянием внешних условий (температуры, влажности, света и пр.). Тем не менее перспективы, которые открываются для измерительной техники, нельзя недооценивать и работы по изучению и использованию всех возможностей, обуславливаемых полупроводниковыми лампами, должны интенсивно вестись.

Ламповые измерительные устройства находят весьма широкое применение, однако производство их находится не на должной высоте; в большинстве случаев они разрабатываются и изготавливаются самими потребителями. Необходимо разработать типовые конструкции ламповых узлов измерительных приборов и организовать заводской серийный их выпуск.

Развитие современного производства характеризуется усложнением производственных процессов, повышением требований к соблюдению режимов, необходимостью быстрого реагирования на отклонения от задаваемых режимов, переходом на массовый выпуск продукции. Вряд ли требуется доказывать, что при этих условиях автоматический контроль производственных процессов, включающий средства электроизмерительной техники, является одним из основных звеньев автоматизации производства.

Здесь в громадном большинстве случаев речь идет об измерении, контроле неэлектрических величин электрическими методами. В этой области измерений за последние годы достигнуты крупные успехи, однако надо признать совершенно недостаточным использование этих успехов для практического осуществления автоматического контроля в широких масштабах, особенно если

рассматривать данный вопрос в свете комплексной автоматизации.

Несмотря на разнообразие требований, вытекающих из практики различных производственных процессов, задачи, связанные с широким осуществлением автоматического контроля, могут и должны быть обобщены, что позволит обоснованно решить вопросы о типизации средств контроля, их проектирования и серийного изготовления. Естественно, что эти вопросы должны решаться применительно к методам как объективного автоматического контроля, так и субъективного, имея в виду, что последний имеет большое практическое значение.

Например, в области электрических измерений механических величин разработаны и используются многочисленные и разнообразные приборы для измерения сосредоточенных сил и давлений, деформаций, механических напряжений, перемещений, параметров вибраций и пр. Использование этих приборов в области исследовательских работ стало повседневным, применяются они и для производственного контроля. Разработка же и изготовление этих приборов выполняются, как правило, самыми заинтересованными организациями, без достаточного учета имеющегося опыта, кустарно. К тому же эти разработки в большинстве случаев не исходят из требований автоматического контроля.

Необходимо направить научную и техническую мысль на обобщение имеющегося теоретического и опытного материала, а также новейших достижений, на разработку и совершенствование научно обоснованной теории расчета и проектирования в первую очередь типовых серий измерительных преобразователей неэлектрических величин в электрические, измерительных блоков и блоков питания.

Не так давно электрические измерения рассматривались как небольшой раздел прикладной электротехники с ограниченной областью применения и ограниченными возможностями. Сейчас положение в корне изменилось, и мы с полным основанием говорим об электроизмерительной технике, как о широкой области со своими научными основами, многочисленными и разнообразными техническими средствами, разносторонним практическим применением и большими перспективами развития, вытекающими из самой сущности измерительного процесса, как важнейшего средства научного и технического прогресса. Совершенно естественно, что быстро растущие требования к электроизмерительной технике не могут быть реализованы успешно без глубоких теоретических обобщений, новых научных изысканий.

За последние годы советская наука обогатилась многими серьезными теоретическими и экспериментальными трудами, среди которых имеются и весьма ценные в научном отношении монографии. В этой связи хотелось бы отметить некоторые из теоретических вопросов, которые требуют дальнейшей разработки и обобщений.

В любом электроизмерительном приборе, а в сложных, комплексных приборах в особенности, существенной частью являются электрические и магнитные измерительные цепи. Одним из прогрессивных направлений развития ряда электроизмерительных приборов является использование методов сравнения с той или иной степенью уравнивания. Это хотя и приводит к усложнению цепей, однако позволяет расширить возможности аппаратуры в смысле повышения точности и чувствительности. Систематическое изучение электрических измерительных цепей, проведенное рядом советских авторов за последнее время, позволило выявить новые виды цепей, например фазопостоянные цепи, частото-зависимые и частото-независимые, цепи нулевого сдвига и др., которые позволяют решать новые задачи в области измерений. Дальнейшие работы в этом направлении, имея целью разработку теории и методов расчета и проектирования электрических и магнитных измерительных цепей, являются одной из существенных теоретических задач электроизмерительной техники.

Выше уже отмечалась важность создания научно обоснованной теории расчета и проектирования ламповых измерительных устройств, а также измерительных устройств для автоматического контроля.

Богатый опыт советской и иностранной техники телеизмерений еще недостаточно обобщен. Нет общей теории телеизмерений, на основе которой можно было бы анализировать существующие системы и определять пути их дальнейшего совершенствования.

Необходимо дальнейшее развитие теории основ электроприборостроения. При этом имеются в виду методы расчета и проектирования приборов, в частности автоматических, с учетом технико-экономических показателей, которым в настоящее время не уделяется достаточного внимания.

Известно, что достижения измерительной техники во многом способствовали развитию различных областей науки и техники, в свою очередь прогресс в этих областях всегда открывал новые возможности для измерительной техники. Совершенно естественно, что и современные достижения науки и техники, в первую очередь физики, ламповой, высокочастотной и импульсной техники, должны быть максимальным образом использованы для создания новых, более совершенных методов измерений и измерительной аппаратуры. Такие возможности имеются в настоящее время. Укажем хотя бы на использование ядерных явлений, в частности ядерного резонанса, для точных измерений напряженности магнитного поля. Уже сейчас можно говорить о создании образцовой аппаратуры, которая позволит резко, по крайней мере на два порядка, повысить точность передачи размеров магнитных единиц от эталона рабочим мерам. Следует также вести изыскания для выяснения возможности создания основных эталонов электрических и магнитных единиц на основе использования ядерных явлений.

Производство и потребление электроэнергии за рубежом

Инж. Г. В. СЕРБИНОВСКИЙ

Москва

Советский Союз принимал участие в работе 11-й и 12-й сессий Комитета по электроэнергии Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций, состоявшихся в мае 1954 г. и в марте 1955 г., на которых обсуждались вопросы производства и потребления электроэнергии в Европе. Секретариатом Комитета были подготовлены соответствующие обзоры, которые были дополнены сообщениями представителей отдельных стран. Обобщение этих данных может представить интерес для читателей журнала.

Производство электроэнергии за рубежом характеризуется следующими данными.

В 1953 г. в Европе¹ было произведено 382 млрд. *квтч*, или 30,7% всего мирового производства электроэнергии. По сравнению с 1952 г. производство электроэнергии выросло на 6%. Этот прирост оказался более низким, чем в предыдущие годы; в 1952 г. он составлял 7%, а в 1951 г. — 12%. По сравнению с довоенным 1938 г. производство электроэнергии в Европе выросло в 2,13 раза.

¹ Представленные материалы не охватывают данных по СССР.

В Соединенных Штатах Америки в 1953 г. было произведено 514 млрд. *квтч*, или 41,4% всего мирового производства электроэнергии. По сравнению с 1952 г. производство электроэнергии увеличилось на 11% (в 1952 г. оно увеличилось на 7%). В 1953 г. в США было произведено электроэнергии в 3,54 раза больше, чем в 1938 г.

В табл. 1 представлены данные о росте выработки электроэнергии в европейских странах и в США в 1953 г. по сравнению с 1946 и 1952 гг., а также об удельном весе гидроэлектрических станций в общей выработке электроэнергии.

Удельный вес электроэнергии, выработанной гидроэлектростанциями в Европе, составляет 37% (в 1938 г. также 37%), а в США понизился с 34% в 1938 г. до 21% в 1953 г. Нужно отметить, что в Европе тепловые электростанции пострадали от войны сильнее, чем гидроэлектростанции. Поэтому в 1946 г. выработка электроэнергии на тепловых электростанциях Европы увеличилась по сравнению с 1938 г. только на 11%. Но затем в результате восстановления и строительства тепловых электростанций она выросла в 1953 г. против 1946 г. почти на 80%. За этот же период выработка электроэнергии на гидроэлектростанциях выросла на 54%, а за 1953 г.

Таблица 1

Страны	Выработка электроэнергии в 1953 г., млн. <i>квтч</i>			Увеличение выработки, %		Выработка электроэнергии на гидроэлектростанциях в % к общей выработке электроэнергии
	Тепловые электростанции	Гидроэлектростанции	Всего	к 1946 г.	к 1952 г.	
Западная Германия ¹	48 540	9 211	57 751	289*	108	16
ГДР	23 250*	430	23 680	188*	106	2*
Австрия	2 334	6 430	8 764	244	109	73
Бельгия ¹	9 716	90	9 806	157	104	9
Болгария	820*	720*	1 540	368	115	47*
Испания	2 280	7 836	10 116	187	103	77
Дания ²	2 375*	30*	2 405	211	102	1
Финляндия	424	4 979	5 403	184	113	92
Франция ¹	20 300	21 000	41 300	181	101	51
Греция ²	891	20	911	313	112	2
Венгрия	4 572*	43*	4 615	361	110	1
Италия	4 822	27 797	31 619	187	106	85
Норвегия	137	19 485	19 622	170	104	99
Нидерланды	9 110	—	9 110	261	112	—
Польша	12 850*	750*	13 600	238	113	6*
Румыния	3 210*	300*	3 510	281*	117	9*
Англия	75 300*	2 000*	77 300*	157*	105*	3*
Швеция	1 140	21 220	22 360	158	109	95
Швейцария ³	58	13 407	13 465	134	104	99
Чехословакия	10 800*	1 600*	12 400	220	106	13*
Турция	1 142	68	1 210	215	119	6
Югославия	1 482	1 500	2 982	261	110	50
Прочие страны и районы	6 032*	1 753*	7 785*	—	—	—
Итого	241 000	141 000	382 000	189	106	37
США	404 068	109 452	513 520	190	111	21

* Предположительные данные, принятые секретариатом Комитета по электроэнергии.

¹ Не считая потребления на собственные нужды.

² Только электростанции общественного пользования.

³ Гидрологический год: 1 октября — 30 сентября.

Таблица 2

Страны	Гидроэлектростанции, тыс. кВт			Тепловые электростанции, тыс. кВт			Суммарная установленная мощность, тыс. кВт
	1946 г.	1952 г.	1953 г.	1946 г.	1952 г.	1953 г.	1953 г.
Западная Германия	2 046	2 463	2 503	6 900	10 834	11 433	13 936
ГДР*	70	70	70	1 930	3 530	3 730	3 800
Австрия	1 100	1 675	1 753	436	684	713	2 466
Бельгия*	23	23	27	1 901	2 882	2 958	2 985
Болгария*	49	160	185	78	190	215	400
Дания	10	10	10	700	1 031	1 307	1 327
Испания	1 350	1 900	2 220	405	650	670	2 890
Финляндия	440	810	875	350	400	440	1 315
Франция	3 743	6 303	6 780	3 000	5 637	6 050	12 830
Греция	7	10	10	135	243	270	280
Венгрия	10	25	30	700	1 300	1 370	1 400
Италия	4 748	7 169	7 882	815	1 687	2 183	10 065
Нидерланды	—	—	—	1 878	2 701	3 088	3 088
Норвегия	2 510	3 330	3 639	110	100	100	3 739
Польша	118	330	350	2 023	3 500	3 750	4 100
Румыния	50	60	90	500	650	750	840
Англия	346	643	650	11 500	15 554	16 855	17 505
Швеция	2 450	3 810	4 185	710	945	1 045	5 230
Швейцария	2 400	3 000	3 250	130	200	200	3 450
Чехословакия	2 300	500	550	1 520	2 400	2 450	3 000
Турция	15	26	30	233	411	472	502
Югославия	260	340	448	270	466	494	942
Итого, включая другие страны и районы	22 370	33 450	36 380	37 480	57 550	62 120	98 500
	15 829	21 418	23 059	47 237	75 871	84 270	107 329

* Предположительные данные, принятые секретариатом Комитета по электроэнергии.

производство электроэнергии на гидростанциях увеличилось лишь на 2,2%, при 8,5% роста выработки на тепловых электростанциях. Частично это может объясняться исключительно неблагоприятными гидрологическими условиями в Европе в 1953—1954 гг. В США производство электроэнергии на тепловых электростанциях в 1953 г. выросло на 14,3%.

В Европе основная часть электроэнергии — 69% — была выработана электростанциями общественного пользования; 31% электроэнергии был произведен на электростанциях промышленных предприятий. Выработка электроэнергии на электростанциях предприятий изменяется в широких пределах: от 4% в Португалии до 47% в Бельгии. В США доля электростанций предприятий в выработке электроэнергии составляет лишь 14% от общей выработки.

Сведения об установленной мощности на электростанциях Европы и США за период 1946—1953 гг. представлены в табл. 2.

Установленная мощность за период 1946—1953 гг. выросла на электростанциях Европы с 59,8 млн. кВт до 98,5 млн. кВт и в США с 63,0 млн. кВт до 107 млн. кВт. В Европе прирост мощности на гидроэлектростанциях был почти равен приросту мощности на тепловых электростанциях. В США прирост мощности тепловых электростанций опережал рост мощности гидроэлектростанций, особенно в последние годы. Рост выработки электроэнергии на тепловых

электростанциях Европы сопровождался увеличением потребления угля на 4% и lignита на 5% против 1952 г. В то же время повысился в среднем на 3% к. п. д. электростанций. В связи с этим удельный расход угля в Европе снизился с 600 г/кВтч в 1951 г. до 570 г/кВтч в 1953 г., что эквивалентно экономии угля примерно в 4 млн. т.

В табл. 3 показано потребление каменного угля и lignита, а также удельные расходы угля в 1953 г.

Таблица 3

Страны	Потребление, тыс. т		Средняя теплотворная способность угля, ккал/кг	Удельный расход угля, г/кВтч
	Каменный уголь	Lignite		
Западная Германия	9 021	24 705	7 000	510
Австрия	89	1 221	6 000	640
Бельгия	2 600	—	5 350	690
Франция	4 455	844	6 600	620
Нидерланды	3 593	—	7 000	530
Португалия	254	10	6 500	900
Англия	37 026	—	6 000	610
Турция	235	100	6 500	580
Европа в целом	61 410	27 371	6 500	570
США	104 834	—	7 200	490

Необходимо отметить, что в 1953 г. в ряде стран расходовалось большое количество угля низкого качества (во Франции — 65%, в Нидерландах — 53%, Бельгии — 48%), что не могло не сказаться на удельных расходах топлива. В США увеличение выработки на тепловых электростанциях на 8% в 1952 г. было достигнуто при увеличении потребления угля всего на 4%, что за год дало экономии около 6 млн. т угля. Увеличение к. п. д. тепловых электростанций в значительной мере объясняется вводом в эксплуатацию преимущественно крупных установок с мощными агрегатами, работающими при более высоких давлениях и температурах пара. На ряде электростанций Западной Германии и Франции были установлены турбогенераторы мощностью по 110 тыс. кВт, работающие при давлении пара 140—100 кг/см² и при температуре 525—540° С. Во Франции на электростанции Арриги установлен в 1953 г. турбогенератор 110 тыс. кВт, при этом впервые применены моноблочный агрегат и система вторичного перегрева (давление при вторичном перегреве равно 16,7 кг/см², а температура поднимается с 318,5 до 552° С). На этой станции установлен котел с производительностью 450 т/час.

В Англии в течение последних лет введены в действие 32 турбогенератора со средней установленной мощностью по 80 тыс. кВт каждый и 57 котельных установок со средней производительностью в 230 т/час. В 1953 г. на электростанции Баттерси «В» установлен агрегат мощностью в 100 тыс. кВт, работающий при давлении пара 94 кг/см². Предполагается ввести 14 турбогенераторов мощностью по 100 тыс. кВт (при давлении пара, 105 кг/см² и температуре 565° С), девять агрегатов мощностью по 120 тыс. кВт, один агрегат-моноблок мощностью в 200 тыс. кВт (при давлении пара 160 кг/см² и температуре 570° С). Электростанция в Марнгаме будет оборудована котлом с паропроизводительностью 560 т/час.

В Югославии заканчиваются работы по сооружению трех тепловых электростанций в Канже, Состанже и Колубаре, каждая с установленной мощностью по 120 тыс. кВт при давлении пара 84 кг/см² и температуре 530° С; эти электростанции расположены в каменноугольном районе и будут работать на отбросах угля.

В США работает несколько турбогенераторов мощностью по 200 тыс. кВт; кроме того, в 1953 г. введены в эксплуатацию котлы производительностью 300 т/час, с давлением 316 кг/см² и температурой 620° С.

Представляет интерес эксплуатация в Норвегии подземной гидроэлектростанции мощностью в 280 тыс. кВт в Ауре. Станция снабжает электроэнергией алюминиевый завод в Сунддалсоре. В Италии в 1953 г. введена в эксплуатацию гидроэлектростанция на р. Муконе мощностью в 110 тыс. кВт, с массивной сводчатой плотиной в 55 м и водоемом в 107 млн. м³; эта электростанция может вырабатывать около 200 млн. кВтч в год; годовая продолжительность использования ее определяется в 1500 час.

В последнее время в Европе и в США проводятся значительные исследования по газовым турбинам. Достигнутые к. п. д. (например, 34,8% на установке с открытым циклом мощностью в 27 мвт в Безнау в Швейцарии) в ближайшее время, повидимому, будут повышены. В Европе и в США разрабатывается проект смешанных установок, состоящих из газовой турбины и парового котла с повышением к. п. д. до 40...42%.

В ряде европейских стран было улучшено использование тепла, израсходованного на выработку электроэнергии, путем применения установок с противодавлением (с промежуточным отбором пара). Так, например, в Австрии к 1950 г. почти 1/5 всей электроэнергии вырабатывалась на установках с противодавлением.

Годовое использование электростанций Европы составляет в среднем 4 470 час.

Потребление электроэнергии в Европе (без СССР) достигает 25% мирового потребления.

В табл. 4 представлены данные о потреблении электроэнергии на душу населения и на 1 промышленного рабочего, а также распределение потребления электроэнергии между важнейшими группами потребителей: промышленностью, бытовым сектором (включая сюда торговлю и сельское хозяйство) и транспортом.

Анализ электропотребления за ряд лет показывает, что в Европе потребление указанных трех основных групп оставалось неизменным, причем промышленность получала около 68...69%, на долю бытового сектора (включая торговлю и сельское хозяйство) приходилось 26...27% и на транспорт 5% от общего потребления электроэнергии. Необходимо отметить, что рост потребления электроэнергии промышленностью опережает рост промышленного производства (табл. 5).

Некоторое представление о размерах электропотребления различными группами потребителей внутри так называемого бытового сектора можно иметь по данным США, Англии, Швеции и Австрии за 1951 г., приведенным в табл. 6.

Число новых потребителей электроэнергии продолжает непрерывно увеличиваться. В 1953 г., например, число новых абонентов во Франции составило 2,2%, в Бельгии—1,7% и в Италии—4%.

Потребление электроэнергии, приходящееся на одну семью, в Швейцарии в среднем равно 1 980 кВтч, а для семейств, имеющих полный комплект электрического оборудования, — 4 500 кВтч.

Из всех категорий потребителей быстрее всего растет потребление среди сельских абонентов, хотя по абсолютной величине оно все еще остается относительно незначительным. В Англии число абонентов в сельских районах увеличилось в 1953 г. на 15,8%. В Финляндии в течение одного года было включено в сеть 20 000 новых ферм; 68% ферм электрифицированы.

Экспорт и импорт электроэнергии. В настоящее время осуществляется передача электроэнергии через государственные границы ряда европейских стран. В 1953 г. через границы было передано 4,7 млрд. кВтч, что на 15% больше передано, осуществленной в 1952 г.

Таблица 4

Страны	Потребление электроэнергии в год, <i>квт ч</i>		Потребление электроэнергии в 1953 г., млн. <i>квт ч</i>			
	на душу населения 1953 г.	на промышленного рабочего 1952 г.	Промышленность	Бытовой сектор, торговля, сельское хозяйство	Транспорт	Итого
Норвегия	5 840	27 400	—	—	—	—
Швеция	3 070	12 500	11 235	5 030	1 450	18 837
Швейцария	2 550	5 800	4 358	4 421	1 158	10 787
Англия	1 570*	4 000*	37 800*	26 850*	2 150*	66 800*
Финляндия	1 300	11 600	3 242	814	23	4 733
ГДР	1 270*	5 100	—	—	—	—
Западная Германия	1 200	5 000	39 039	11 651	2 121	52 811
Бельгия	1 120	6 200	7 653	1 266	354	9 273
Австрия	1 100	4 900	4 290	1 551	599	6 440
Чехословакия	980*	4 200	—	—	—	—
Франция	970	6 400	28 698	5 300	2 150	36 148
Италия	690	6 800	18 971	5 700	2 300	26 971
Венгрия	500	3 700	3 319	514	207	4 040
Польша	500*	3 500	—	—	—	—
Болгария	210	2 300	—	—	—	—
Югославия	170	—	1 754	633	19	2 406
Нидерланды	870	4 500	5 503	2 320	545	8 368
Всего	900	5 300	226 000	86 500	15 300	331 200
США	3 220	13 900	261 100	187 900	5 000	454 000

* Предположительные данные, принятые секретариатом.

Таблица 5

Показатели	Индексы (1950—100)		
	1951 г.	1952 г.	1953 г.
Западная Европа			
Промышленное производство . .	110	111	117
Потребление электроэнергии промышленностью	113	121	128
С Ш А			
Промышленное производство . .	107	111	120
Потребление электроэнергии промышленностью	111	116	132

Таблица 6

Страны	Потребление электроэнергии, млн. <i>квт ч</i>			
	Домашние нужды	Сельское хозяйство	Торговля	Обслуживание
США	77 024	8 479	57 278	11 739
Англия	16 371	568	6 354	441
Швеция	1 841	814	1 110	471
Австрия	558	108	451	145

Однако объем экспорта и импорта электроэнергии еще незначителен: он достигает лишь 1,5% общей выработки электроэнергии. В основном это сезонный обмен электроэнергией, имеющий большое экономическое значение, так как при этом оказывается возможным лучше использовать имеющиеся мощности и экономичнее покрывать графики нагрузки.

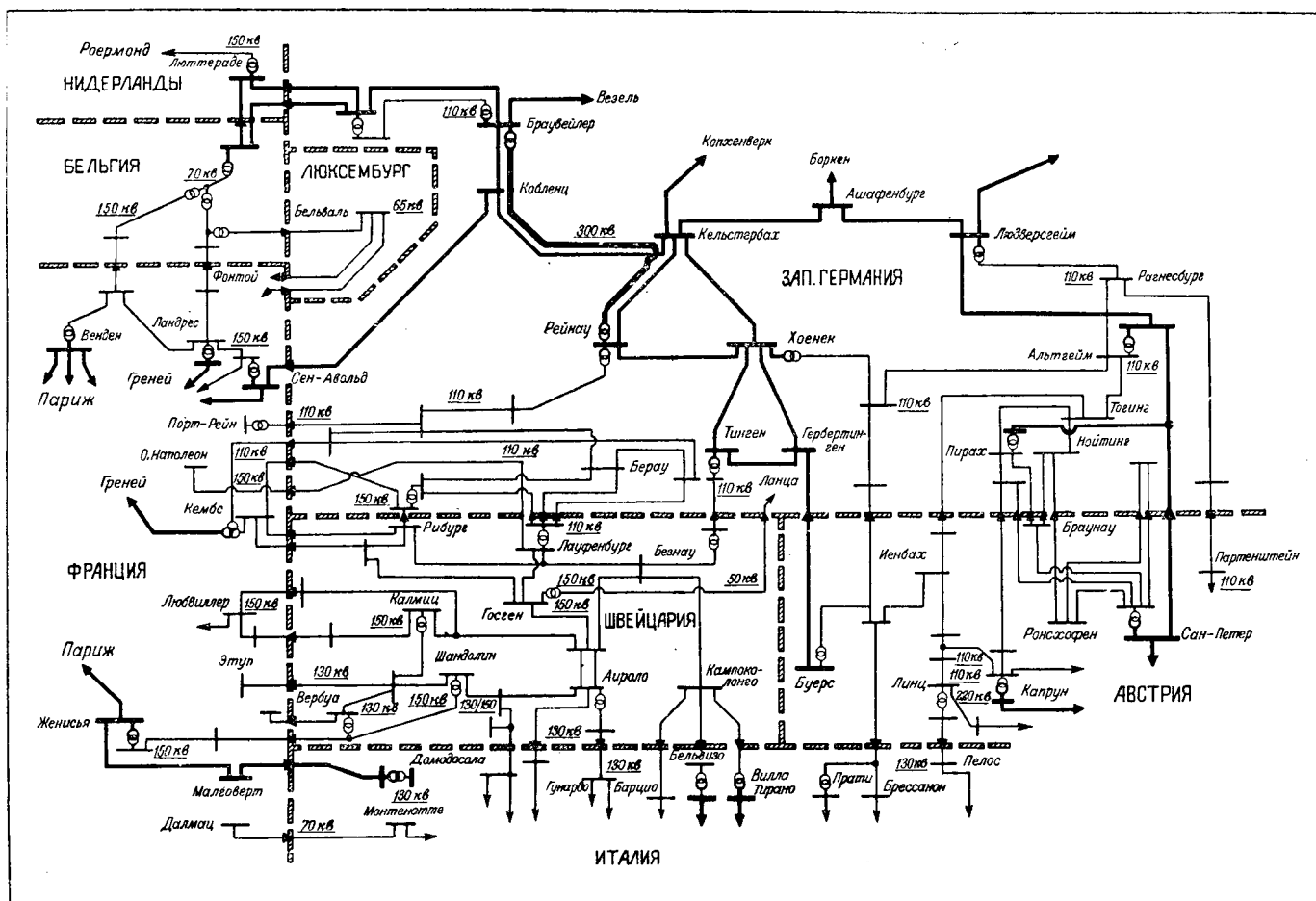
Из представителей западноевропейских стран создано «Объединение по координации производства и передачи электроэнергии». Были заключены, например, соглашения между Западной Германией и Францией, Бельгией, Нидерландами и Швейцарией о передаче электроэнергии в зимнее время для покрытия пиковой нагрузки.

Осуществленное в настоящее время объединение электрических сетей показано на рисунке.

Эти сети — в основном на напряжение 220, 150 и 110 *кв* — используются для осуществления параллельной работы электростанций Франции, Бельгии, Нидерландов, Швейцарии и Западной Германии. Параллельная работа велась также электростанциями Франции, Италии, Швейцарии. Таким образом, объединялись мощности, превышающие 25 млн. *квт*. Зимой 1953/54 г. Западной Германии была оказана существенная помощь электростанциями Франции, Бельгии, Нидерландов и Италии.

Предусматривается дальнейшее усиление сетей, связывающих между собой различные страны. Предполагается усиление связи между шведской сетью 380 *кв* и датской сетью 150 *кв*, а также соединение энергосистем Франции и Англии через Ламанш; проектируется строительство новых гидроэлектростанций в Югославии, в Люксембурге и в Западной Австрии, которые будут работать в основном на экспорт.

Ввод новой мощности и развитие сетей. В табл. 7 показана мощность новых электростан-



ций, строительство которых ведется или проектируется, или намечено по решениям, состоявшимся 1 января 1954 г.

В 1953 г. во многих европейских странах и в США сеть межсистемных линий была значительно расширена и ее пропускная способность усилена. Так, например, в Западной Германии сооружен 781 км линии на напряжение 220 кВ и 1 025 км на 110 кВ.

Включение новых трансформаторных подстанций позволило довести общую пропускную способность сети до 7 000 тыс. кВт для сети 220 кВ и до 16 200 тыс. кВт для сети 110 кВ.

Во Франции в 1953 г. было построено 570 км линий в габаритах 380 кВ, но эксплуатируемых пока на 220 кВ, 270 км линий на напряжение 220 кВ и 238 км на 150 кВ. При этом следует отметить значительное сокращение за последние годы протяженности линий 110 кВ за счет перехода их на более высокие напряжения.

Общая протяженность сети во Франции составляет:	
380 кВ (временнo)	1 062 км
220 "	6 160 "
150 "	8 965 "
110 "	226 "

В Англии ведется строительство линий 275 кВ, первый участок которых был введен в работу в 1953 г. Намечено сооружение 1 770 км линий этого напряжения. Часть этих линий запроектирована с учетом возможности работы в дальнейшем при напряжении 380 кВ. В 1953 г. было также введено 736 км линий 110 кВ.

В Италии было построено в 1953 г. 1 158 км линий 220 кВ и 379 км 150 кВ.

В Швеции в 1953 г. было построено 471 км линий 380 кВ, 87 км линий 220 кВ и 374 км линий 120 ... 139 кВ.

В США за 1953 г. введены в эксплуатацию 4 868 км линий, из них: 2 130 км от 100 до 139 кВ; 2 438 км от 140 до 199 кВ и 300 км 200 ... 240 кВ. Общая протяженность линий США составляет:

100 . . . 119 кВ	66 736 км
120 . . . 139 "	35 934 "
140 . . . 159 "	5 470 "
200 . . . 239 "	14 808 "
240 . . . 300 "	1 570 "

Характерно, что на строительство передающих и распределительных сетей затрачивается от 45 до 49% общих вложений в энергетику. Так, в 1953 г. соотношение вложений на строитель-

Таблица 7

Страны	1954 г.		1955 г.		1956 г.		1957 г.	
	Тепловые электростанции	Гидроэлектростанции	Тепловые электростанции	Гидроэлектростанции	Тепловые электростанции	Гидроэлектростанции	Тепловые электростанции	Гидроэлектростанции
Западная Германия	1 360	93	1 100	103	300	80	—	5
Австрия	—	90	—	86	—	73	—	510
Бельгия	115	—	125	—	146	—	144	—
Франция	765	493	556	189	641	305	345	35
Англия *	1 450	64	1 550	128	1 580	73	1 540	30
Италия	208	804	160	465	—	580	—	—
Нидерланды	481	—	269	—	237	—	190	—
Швеция	85	385	25	285	25	320	25	400
Швейцария	—	120	—	200	—	190	—	180
США *	12 121	1 264	9 871	1 476	4 928	3 301	—	—

* Только по электростанциям общественного пользования; по промышленным электростанциям сведений нет.

ство электростанций и сетей составляло в Западной Германии 57 и 43%, во Франции—56 и 44%, в Швеции, Англии и США — 51 и 49%.

Такое направление капиталовложений не случайно: развитие электросетей повышает надежность электроснабжения, облегчает условия при-

соединения потребителей, позволяет работать наиболее экономично — с наименьшими потерями электрической энергии, а значит, и с наименьшими затратами топлива.

[21. 4. 1955]



По страницам технических журналов

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ИОНИЗАЦИИ

При возникновении в изоляции ионизационных процессов образуются положительные и отрицательные заряды. Двигаясь под влиянием приложенного напряжения, они вызывают появление ионизационной составляющей тока. Это движение внутренних зарядов нарушает баланс во внешней цепи и вызывает появление токов, зависящих как от распределения зарядов, так и от постоянных внешней цепи. Измерением этих токов можно выявить наличие импульсной ионизации. Если для измерения ионизационных токов использовать падение напряжения на сопротивлении, то на нем появляются импульсы напряжения длительностью порядка 1 мксек и более. При нормальном импульсном воздействии зарядный ток также имеет форму импульсов; соответствующим устройством его можно отфильтровать без большого влияния на ток импульсной ионизации. Током утечки из-за его незначительной величины можно пренебречь.

Для компенсации зарядного тока используется мостовая схема рис. 1. Если постоянные времени обеих ветвей мостовой схемы сделать одинаковыми ($R_1 C_1 = R_2 C_2$), то разность напряжений между точками А и В, определяемая импульсными зарядными токами, теоретически равна нулю. При пренебрежении током утечки разность напряжений между точками А и В вызывается импульсной ионизацией в образце и равна $I_{\text{и}} R_2$. Сигнал подается на усилитель, к выходу которого подсоединен электронный осциллограф. Напряжение между точками А и В балансируется при небольших напряжениях импульса, когда ионизация отсутствует. Для улучшения баланса применяются вспомогательные переменные сопротивление и индуктивность, схема включения которых приведена на рис. 2 и которые после настройки остаются неизменными. Сопротивление и индуктивность применяются по возможности небольшой величины, так как иначе они могут исказить форму импульса и уменьшить коэффициент усиления усилителя. При больших испытательных напряжениях практически нельзя выполнить генератор импульсов экранированным и применить симметричные ветви. В этих условиях вслед-

ствие наличия паразитных емкостных связей в измерительной цепи будет некоторый дополнительный ток небаланса.

Обычно на фронте волны не удается получить баланс, что вызывает появление скачка в начале осциллограммы, за которым следует короткий пик обратной полярности. На рис. 3 эта часть кривой напряжения небаланса обозначена Φ (запись на фронте). Ионизационные пики, которые появляются при небалансе, могут быть выявлены

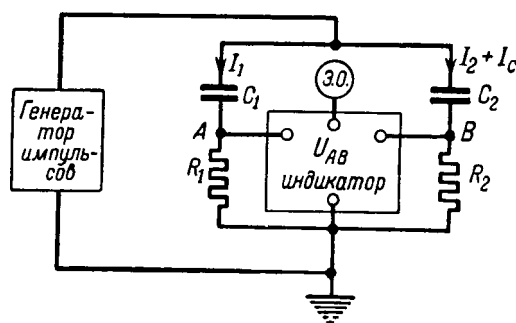


Рис. 1. Схема осциллографирования импульсной ионизации в диэлектрике.

C_1 — конденсатор без ионизации; I_1 , I_2 — импульсные зарядные токи; C_2 — испытуемый образец; $I_{\text{и}}$ — ток импульсной ионизации; R_1 , R_2 — омические сопротивления; ЭО — электронный осциллограф.

сравнением с осциллограммами при отсутствии ионизации. Форма искажающего импульса при повышении напряжения остается постоянной¹. При большинстве исследований с волнами 1,5/40 мксек пики ионизации появляются на амплитуде или вскоре за амплитудой, т. е. в той части осциллограммы, где небаланс исчезает или имеет небольшое значение.

¹ Если паразитная емкость коронирует, то искажающее влияние при разных напряжениях переменного по форме (Е. К.).

Минимальный ток ионизации, который можно выявить, определяется значением R_2 (рис. 1), коэффициентом усиления усилителя и чувствительностью осциллографа. Минимальное возможное значение R_2 равно волновому сопротивлению кабеля, соединяющего R_2 с усилителем (75 ом) *.

При коэффициенте усиления 750, чувствительности осциллографа 80 в/см и минимальной амплитуде отсчета, которую можно надежно заметить на осциллографе, равной 0,25 см, минимальный ток $I_{с мин} = \frac{0,25 \cdot 80}{750 \cdot 75} = 0,355 \cdot 10^{-3}$.

Критическая напряженность электрического поля, вызывающая появление ионизации, является функцией формы электродов, приложенного напряжения и пространственного заряда. Из-за кратковременности импульсного воздействия пространственный заряд не может образоваться в той же мере, как и при промышленной частоте. Поэтому обычно напряжение начала импульсной ионизации значительно выше напряжения начала ионизации при промышленной частоте. В масле условия значительно жестче, чем в воздухе, из-за наличия большого числа ионов перед началом ионизации. Это способствует повышенной образуемости пространственного заряда в масле.

Примеры исследований импульсной ионизации при электродах разных типов и волне 1,5/40 мксек приведены в таблице, а типичные формы осциллограмм — на рис. 3.

Электроды	Напряжение начала ионизации, кВ макс	Полярность	Амплитуда тока ионизации, мА
Игла против плоскости в воздухе. Искровой промежуток 120 мм	17 18	+	<5 10
То же, но в масле. Искровой промежуток 100 мм	150 190	+	10 25
Круглый стержень диаметром 12,5 мм с закругленным концом против плоскости в воздухе. Искровой промежуток 56 мм	50 60	+	130 50
Петля из 200-мм электрода, покрытого маслоспропитанной бумагой толщиной 0,15 мм, на расстоянии 38 мм от плоскости. Барьер из бакелизированной доски толщиной 3 мм в середине искрового промежутка	350	—	60
То же, толщина покрытия 0,8 мм; толщина барьера 6 мм	350	—	30

Пики тока ионизации в воздухе между иглой и плоскостью при положительной полярности иглы намного короче, чем при отрицательной (рис. 3, а и б).

Пики тока ионизации в масле между иглой и плоскостью сильно отличаются от пиков в воздухе. В этом случае наблюдаются многочисленные, последовательно возникающие импульсы тока (рис. 3, в и г), причем толчки тока, возникающие на хвосте волны, могут достигать большей амплитуды. Это указывает на образование пространственного заряда в результате предшествующего воздействия, достаточного для компенсации уменьшения напряжения на хвосте волны, или на уменьшение прочности изоляции предыдущим воздействием. Длительность отдельных импульсов при любых полярностях волны равна примерно 1 мксек. Число и повторяемость импульсов при разных полярностях иглы разные. Интересен вопрос о возможности определения наличия повреждения при барьерной или

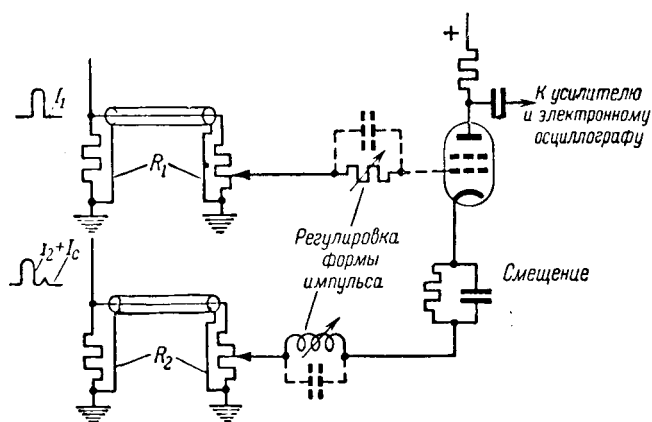


Рис. 2. Схема входа регистрирующей части устройства.

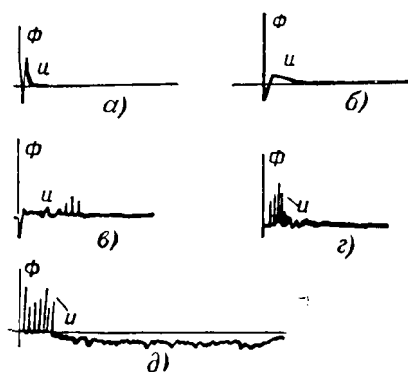


Рис. 3. Типичные осциллограммы импульсной ионизации (ось абсцисс—время; ось ординат—напряжение небаланса). а — игла-плоскость в воздухе, положительный импульс; б — то же, отрицательный импульс; в — игла-плоскость в масле, положительный импульс; г — то же, отрицательный импульс; д — барьерная изоляция, отрицательный импульс; Ф — запись на фронте; и — запись ионизации.

составной изоляции. В процессе исследований составных диэлектриков было найдено, что, помимо импульсов одной полярности, возникающих в устройстве с однородной диэлектрической средой, появляются импульсы противоположной полярности (рис. 3, д). Разборка образцов, на которых не было полного пробоя, показала в большинстве случаев наличие повреждения диэлектрика в виде растрескивания, обугливания и частичного пробоя твердой изоляции. По виду осциллограмм нельзя определенно выявить степень повреждения. Найдено, что при мягком диэлектрике (маслоспропитанная бумага) повреждаемость больше, чем при твердом (герколит). Повреждаемость зависит от числа импульсов. Вероятной причиной появления на осциллограмме импульсов напряжения противоположной полярности является рекомбинация положительных и отрицательных ионов, в противоположность процессу движения электронов в ранний период ионизации. Высказывается предположение, что причиной повреждения изоляции являются энергия, освобождающаяся при рекомбинации, и энергия бомбардировки твердой изоляции электронами в начальной стадии импульсной волны.

Описанный метод применим главным образом к образцам изоляции, составляющим элементы конструкции трансформаторов, аппаратов, кабелей, вводов и т. д. в виде емкостей. По результатам этих исследований можно определить поведение изолирующего устройства в целом. Однако пока нельзя определить поведение изоляции трансформатора или аппарата, имеющего значительную индуктивность. Это возможно лишь в тех случаях, когда ионизационные токи имеют очень большие значения или когда место возникновения ионизации благоприятно для возможности ее определения.

(J. H. Nagenguth, T. W. Liao. Tr. AIEE, т. 71, ч. III, стр. 461, 1952.)

* При исследованиях, не требующих воспроизводства точной формы импульса, а также при коротких соединительных кабелях (время пробега волны по кабелю короче фронта волны), когда последовательные отражения волн сглаживают искажения, не обязательно иметь в конце кабеля сопротивление, равное волновому (Е. К.).

СОВЕЩАНИЕ ПО ЭЛЕКТРОПЕЧНЫМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМ

В конце мая с. г. в Ленинграде состоялось совещание по печным выключателям, созданное Научно-техническим обществом энергетической промышленности (НТОЭП). На совещании присутствовали представители соответствующих заводов, проектных организаций и предприятий, эксплуатирующих электропечи.

Совещание заслушало сообщения А. А. Ерилова (Тяжпромэлектропроект) и Л. К. Грейнера (завод «Электроаппарат»), которые суммировали опыт эксплуатации советских и некоторых иностранных выключателей, применяемых в электропечных установках. Ряд выпускаемых заводами «Электроаппарат», «Уралэлектроаппарат» и некоторыми другими заводами выключателей для электропечных установок не удовлетворяет требованиям эксплуатации.

Разработка выключателей, предназначенных специально для этой цели, ведется недостаточными темпами. При этом существенным затруднением при разработке электропечных выключателей является отсутствие обоснованных и точно сформулированных технических требований к ним. В прениях отмечалось, что печные выключатели должны быть пригодны не только к частым (десятки раз в сутки) отключениям рабочих коротких замыканий в пенах, но также и сетевых коротких замыканий и ненагруженных печных трансформаторов. Выполнение всех этих требований возможно только в специальных конструкциях.

Из существующих выключателей, применяемых в электропечных установках, наиболее удовлетворительно работают выключатели ВМ-22, хотя эксплуатация их тяжела вследствие необходимости частой смены масла и контактов. Имеются положительные отзывы о работе выключателей ВМГ-133 и ВГ-10. Однако последний необходимо усилить в механическом отношении. Необходимо существовавший пружинный привод заменить усиленным электромагнитным. Мало пригодным в электропечных установках оказался выключатель ВМБ-10.

Необходимо иметь в виду, что в недалеком будущем войдут в строй значительно более мощные электропечи, чем существующие. Ограниченные сроки ревизии и ремонта печных выключателей ставят вопрос о применении в них механически более прочных и стойких материалов, а также дугостойких контактных наконечников.

На совещании был поставлен вопрос о том, что специальные типы выключателей, удовлетворяющие всем указанным выше требованиям, будут стоить значительно дороже. Однако представители эксплуатации единодушно заявили о том, что повышение стоимости выключателей не играет существенной роли, так как повышение надежности их работы очень быстро окупит повышение стоимости: простой печи вследствие необходимости частых осмотров и ремонтов выключателей обходится несравненно дороже стоимости самого выключателя.

В своем постановлении совещание просит Министерство электротехнической промышленности в кратчайший срок решить вопрос о выборе типов, разработке, испытаниях и выпуске выключателей для электропечных установок, учитывая потребности проектируемых в настоящее время новых мощных электропечей.

Из остальных пунктов решения следует отметить указание на необходимость организовать на одном из заводов МЭП выпуск запасных частей к выключателям типа ВМ-22. Хотя этот выключатель снят с производства, но в эксплуатации он еще имеется в большом количестве и отсутствие запасных частей очень затрудняет эксплуатацию.

Проф. А. М. Залесский

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта (ЛИИЖТ) в июне с. г. состоялось научно-техническое совещание по электрификации железных дорог. В совещании приняли участие 120 чел.: инженеры, техники и новаторы производства Октябрьской железной дороги, проектных и др. организаций.

О перспективах дальнейшей электрификации железных дорог страны с докладом выступил член-корр. АН СССР, проф. А. Е. Алексеев.

О нормировании колебаний напряжения в тяговых сетях электрифицированных железных дорог сделал доклад кандидат техн. наук, доц. С. Е. Кузин.

Инж. С. О. Григорьян сделал доклад о разработанной в ЛИИЖТ электрической схеме электровоза с автоматическим регулированием режимов рекуперации и тяги.

Начальник тяговой подстанции Е. В. Фирюлин и начальник дистанции контактной сети С. И. Червинский Ленинградско-Балтийского отделения Октябрьской железной дороги поделились своим опытом организации и метода обслуживания устройств электроснабжения, обеспечившими безаварийную работу.

С содержательным анализом эксплуатации моторвагонного подвижного состава на Ленинградско-Финляндском отделении Октябрьской железной дороги выступил ст. инженер электродепо З. В. Ицкович.

По вопросам типового проектирования устройств электроснабжения электрических железных дорог и внедрения автоматики и телеуправления выступили с сообщениями инж. Е. С. Липавский, Э. А. Хазанович (Ленгипротранс) и инж. И. Ф. Галкин.

Совещание обсудило также вопросы улучшения подготовки инженеров по электрификации железных дорог.

В выступлениях был выявлен ряд недостатков в работе персонала электрифицированных участков, а также научных работников ЛИИЖТ. При этом отмечалась слабая связь работников института с производством и проектными организациями. Много критических замечаний было высказано выступавшими в адрес главных управлений локомотивного хозяйства и электрификации и энергетического хозяйства МПС, которые слабо внедряют передовые методы работы. Совещание отметило как совершенно недопустимый факт медлительность рассмотрения и внедрения прогрессивных предложений, выдвигаемых рабочими-новаторами, техниками и инженерами. В качестве примера упоминалось о предложении машиниста Ленинградско-Финляндского электродепо т. Кейнянена об изменении цикличности ремонтов подвижного состава. Несмотря на наличие положительного опыта, проведение этого прогрессивного мероприятия было разрешено МПС лишь после обращения т. Кейнянена к товарищу Л. М. Кагановичу.

До сего времени в Главном управлении электрификации МПС затягивается утверждение типового проекта тяговой подстанции, разработанного в Ленгипротрансе.

Выступавшие на совещании высказали ряд пожеланий по улучшению качества основного и вспомогательного оборудования моторвагонных секций.

Совещание отметило, что направление молодых специалистов, окончивших институты, в проектные организации нецелесообразно, так как качество работы такого инженера не может быть достаточно хорошим без предварительного приобретения практического производственного опыта.

Инж. М. Н. Звездкин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. Андрианов, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова, Н. Г. Дроздов (главный редактор),
Е. Г. Комар, М. П. Костенко, И. А. Сыромятников (зам. главного редактора),
А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, М. А. Шателен.

ВЫШЕЛ ИЗ ПЕЧАТИ

ЮБИЛЕЙНЫЙ НОМЕР

журнала

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

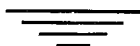
20 печ. л.

Номер высылается наложенным платежом (8 руб.).

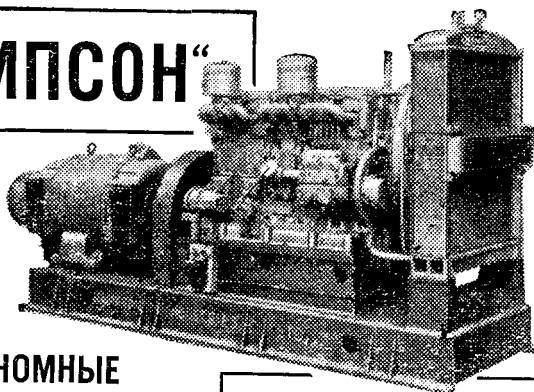
Заявки направлять по адресу:

Москва,
Шлюзовая набережная, 10,
Госэнергоиздат

За границей заявки оформляют
агентства В О „Международная книга“.



„ХАМПСОН“



АВТОНОМНЫЕ ГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

Генераторные установки „ХАМПСОН“ зарекомендовали себя наиболее надежными, эффективными и экономичными автономными агрегатами для снабжения независимой электрической энергией для освещения и промышленных, сельскохозяйственных и домашних надобностей. Дизельные или с бензиновым двигателем, они приобрели широкую известность своей бесперебойной службой и долговечностью. Агрегаты эти доставляются окончательно смонтированными, готовые к немедленному пуску в эксплуатацию. Иллюстрированная литература высылается по запросу.

Агрегаты могут быть оборудованы пускателями любого из нижеследующих типов: 1. автоматическим дистанционным управлением. 2. полным автоматическим контролем. 3. электрическим пускателем. 4. ручным пускателем или 5. как автоматический аварийный агрегат с пуском от магистрали.

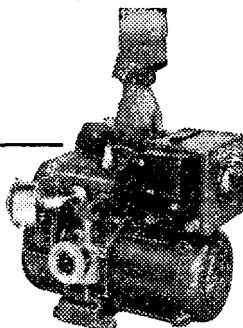
HAMPSON INDUSTRIES LIMITED

WEST BROMWICH, АНГЛИЯ. Тел. адрес.: HAMPGEAR WEST BROMWICH

Фирма производит насосные агрегаты с дизельными или бензиновыми двигателями, электросварочные агрегаты и воздушные компрессоры.

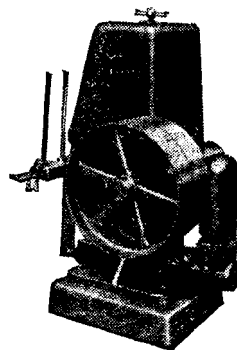
От $\frac{1}{2}$ до 500 квт.

На фотографии внизу агрегат
портативного типа

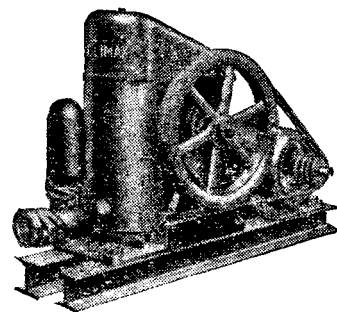


Climax

НАСОСЫ ДЛЯ БУРОВЫХ СКВАЖИН И ГЛУБОКИХ КОЛОДЦЕВ



- Рабочие части заключены в масляной ванне и фактически не требуют никакого ухода.
- Производительность 336-22730 литров в час.
- Привод от электродвигателя или двигателя внутреннего сгорания.
- Надежное водоснабжение поселков, индивидуальных хозяйств и т.п.



THOMAS & SON (WORCESTER) LTD.

ФАБРИКАНТЫ НАСОСОВ И ВЕТРЯКОВ

WORCESTER

АНГЛИЯ

Фирма основана в 1822 году

m and i

**THE MICANITE
& INSULATORS CO. LTD.**

EMPIRE WORKS, BLACKHORSE LANE,
WALTHAMSTOW, LONDON, E.17
АНГЛИЯ

Самая большая и старейшая Британская фирма специалистов по электрической изоляции.

Основные производства:

- „МИКАНИТ“ в виде листов, трубок, коммутаторных колец и т. п.
- „ПАКСАЛИН“ пропитанные смолой слоистые, с бумажной и тканевой основой, листы, трубки, прутки и т. п.
- „ЭМПИР“ лакированные изолирующие ткани, шелка и ленты.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРОХОДНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ для трансформаторов и масляных выключателей.

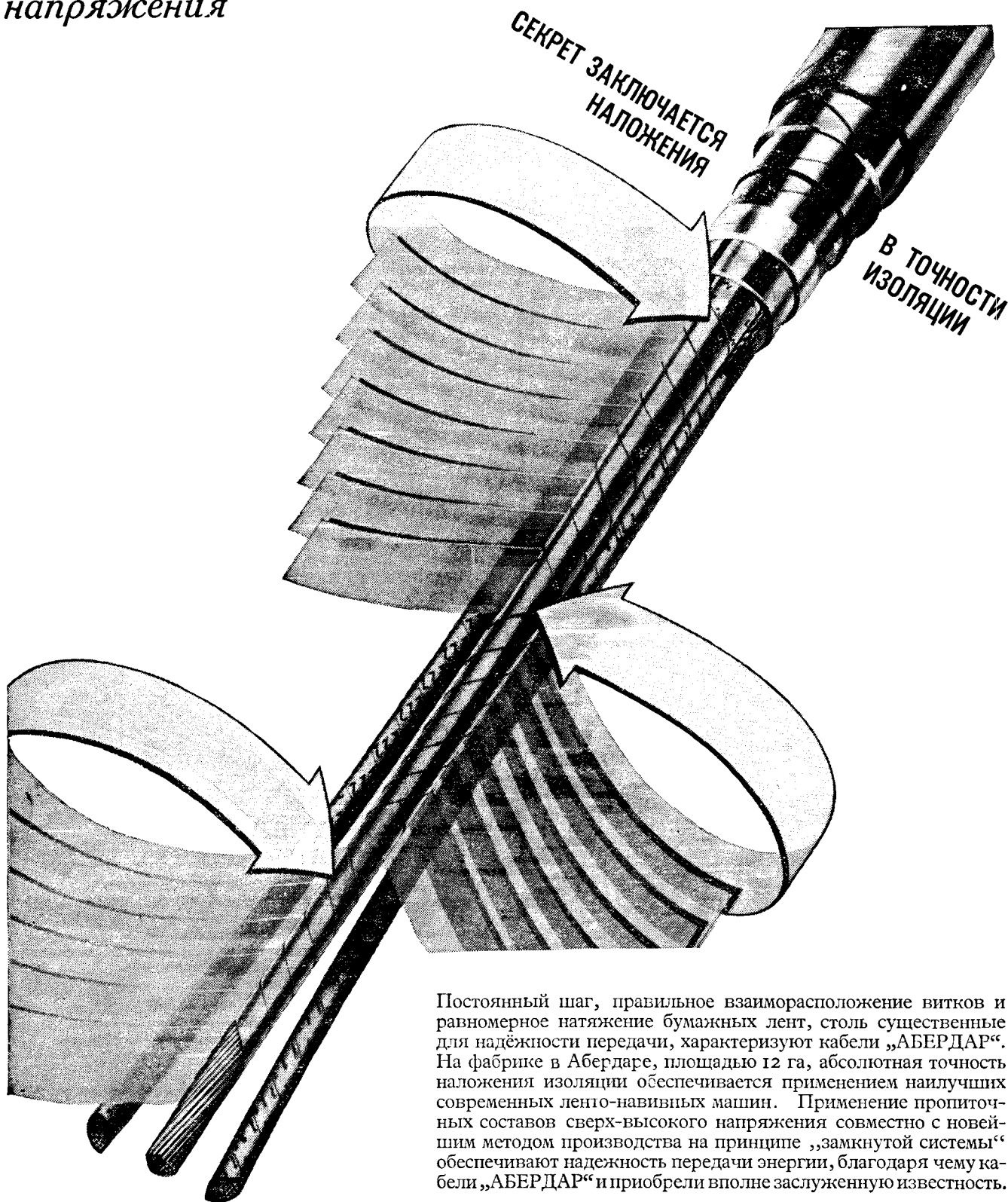
ВУЛКАНИЗИРОВАННАЯ ФИБРА И ЛЕДЕРОИД
Обмотка для проводов: выпрессованного хлористого поливинила, лакированная хлопчатобумажная и стеклянная.

Хлористый поливинил, профилированный под давлением.

Как поставлялись в СССР
в 1931-1935 годах

Телеграммы: MYTILITE, LONDON
Телефон: Larkwood 5500

Безукоризненная изоляция для кабелей высокого напряжения



Постоянный шаг, правильное взаиморасположение витков и равномерное натяжение бумажных лент, столь существенные для надёжности передачи, характеризуют кабели „АБЕРДАР“. На фабрике в Абердаре, площадью 12 га, абсолютная точность наложения изоляции обеспечивается применением наилучших современных ленто-навивных машин. Применение пропиточных составов сверх-высокого напряжения совместно с новейшим методом производства на принципе „замкнутой системы“ обеспечивают надёжность передачи энергии, благодаря чему кабели „АБЕРДАР“ и приобрели вполне заслуженную известность.

Aberdare Cables

ABERDARE CABLES LIMITED · NINETEEN WOBURN PLACE · LONDON · АНГЛИЯ

Фабрика: Aberdare, Glam., South Wales.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Электронные модели оказывают неоценимую помощь при исследовании разнообразных динамических систем во многих отраслях техники. Исключительное значение они имеют в автоматике. Полноценное развитие и практика автоматического регулирования немислимы без широкого использования средств моделирования. Сейчас открываются возможности использования моделирующих установок и их сочетаний с цифровыми вычислительными машинами не только для исследования динамических систем, но и для автоматического управления производственными процессами.

Статья преследует цель ознакомить широкие круги инженеров с методами электрического моделирования. В статье излагаются общие принципы математического моделирования при помощи электронных моделей. Дает-

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ СЕТИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ГОРОДОВ

В статье приводятся результаты проведенного кафедрой электрических сетей и систем МЭИ технико-экономического сравнения различных схем сети при напряжениях 220/127 и 380/220 в для районов больших городов, застроенных домами в 5...8 и 8...14 этажей.

При определении технико-экономических показателей сетей 380/220 в учитывались капиталовложения на электростанциях, связанные с покрытием увеличенной при этом напряжении нагрузки от освещения, а в ежегодных эксплуатационных расходах учитывалась стоимость дополнительной электроэнергии, выработанной на станциях, для покрытия большей нагрузки осветительных потребителей.

Оказалось, что целесообразным является применение поперечно-замкнутых сетей напряжением 220/127 в.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРОВОДОВ И ЕГО КОПИРОВАНИЕ ПОСРЕДСТВОМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ

Описывается метод копирования электрического поля трехфазной воздушной линии, провода которой расположены по вершинам треугольника.

Теоретическое обоснование методики измерения сводится к следующему. В непосредственной близости от проводов поле является вращающимся и эллиптическим. По мере удаления от проводов электрическое поле совокупности зарядов, изменяющихся со временем, можно представить суммой напряженности от эквивалентного заряда и напряженности от эквивалентного момента диполя.

Аналитический метод расчета трудоемок, а иногда и невозможен. Метод электролитической ванны заклю-

ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЕВРОПЕ

В статье содержится обзор производства и потребления электроэнергии за последние годы в европейских странах. Приводятся данные о росте производства электроэнергии, о размерах производства электроэнергии тепловыми и гидроэлектростанциями, о потреблении электроэнергии, отнесенном на душу населения, и о потреблении электроэнергии промышленностью, отнесенном на одного промышленного рабочего, и о структуре электропотребления.

Содержатся данные о размерах ввода мощности на электростанциях за последние годы и о намеченных вводах мощности на ближайшее время. Приводятся сведения о развитии электрических сетей в отдельных стра-

РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Физическое моделирование электрических систем приобретает все большее и большее значение для теоретических и практических исследований. Исследования на динамических моделях получили широкое распространение, и число сооружаемых моделей все продолжает расти.

В статье дается обзор развития физических моделей, освещается опыт работы МЭИ по разработке вопросов моделирования и созданию моделей электрических систем, ставятся задачи, относящиеся к области моделирования, и даются соображения о проектировании важнейших элементов динамических моделей МЭИ.

В статье публикуются уравнения, связывающие критерии подобия с проектными размерами элементов

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ШВЕЦИИ

Выработка электроэнергии в Швеции достигла в 1953 г. 22,5 млрд. кВтч, что составляет одну треть ежегодной выработки при полном использовании всех пригодных для промышленной эксплуатации источников водной энергии в северной Швеции; 9,5 млрд. кВтч, или 45% всей выработки, было произведено государственными электростанциями.

В настоящее время ежегодный прирост потребления электрической энергии в Швеции оценивается в 1,2 млрд. кВтч; к 1957 г. прирост потребления энергии возрастет до 1,5 млрд. кВтч. По предварительной оценке годовая выработка к 1960 г. достигнет 33 млрд. кВтч.

В 1953 г. был введен в эксплуатацию первый генератор на гидроэлектростанции Килфорсен на реке Ангерман. Полная установленная мощность станции со-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Дается обзор работ: 1) по изучению и внедрению в энергосистемы асинхронных режимов синхронных генераторов при потере ими возбуждения; 2) по восстановлению нормального режима при нарушении синхронизма; 3) по включению на параллельную работу синхронных машин способом самосинхронизации; 4) по автоматическому повторному включению с самосинхронизацией (АПВС); 5) по автоматическому повторному включению без контроля синхронизма; 6) по асинхронному пуску синхронных генераторов.

Долго даже кратковременная работа синхронных генераторов в асинхронном режиме считалась недопустимой вследствие недостаточной изученности этих режимов. Рост мощности энергосистем, массовое

ПРИМЕНЕНИЕ ШУНТИРУЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ В СЕТЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Работа линий электропередачи при $\cos \varphi = 1$ требует подведения значительных реактивных мощностей на концах линий. На отправном конце линии реактивная мощность наиболее экономично обеспечивается генераторами. Сравнение различных методов компенсации показало, что применение шунтирующих конденсаторов для покрытия всей необходимой реактивной мощности на приемных и промежуточных подстанциях дает минимальную стоимость передачи энергии.

Для Бонневильской электрической системы экономически наиболее целесообразной оказалась установка шунтирующих конденсаторов на шинах 115 кв. При значительной потребности в реактивной мощности оп-

Капиталовложения на сооружение сетей обоих напряжений практически одинаковы. Но при сети 380/220 в эксплуатационные расходы возрастают на 50...60%. Сеть 220/127 в требует по сравнению с сетью 380/220 в дополнительного количества цветного металла. Затраты на цветной металл, вложенные в сеть 220/127 в, окупаются в период от 2...3 до 5...8 лет.

Электричество, № 8, 1955.

ся краткое описание основных узлов электронной моделирующей установки типа ЭМУ-5, разработанной в Институте автоматики и телемеханики АН СССР и обеспечивающей решение линейных и нелинейных задач. Рассматривается решающий электронный усилитель с экономичным выходным каскадом, а также устройства, моделирующие различные нелинейности динамических систем.

В качестве иллюстрации приводятся результаты моделирования нескольких нелинейных динамических систем: качаний ротора синхронной машины, решения уравнения Матье, автоколебаний релейной системы автоматического регулирования.

Электричество, № 8, 1955.

нах и о сетях, общих для ряда стран, служащих для экспорта электроэнергии.

Приводятся данные о размерах капиталовложений в электрические станции и в электросети.

Электричество, № 8, 1955.

чается в том, что в ванну помещают модель линии. Для вышеупомянутой линии копии проводов ($\varnothing 2$ мм) изготовлялись из чистого золота. Медь неприменима, так как быстро образующаяся черная окись искажает результаты. В качестве копии земли принята медная пластина. Копия троса и пластина соединены и заземлены. Питание проводов производится трехфазным током 100 в и контролируется вольтметрами. Измерение потенциала зонда производится электронным вольтметром. Результаты получаются в процентах от напряжения питания. Размеры ванны 70×100 см. Модель линии была выполнена в масштабе 1:250 и 1:400. Сопоставление действительного распределения напряжения с измеренным на моделях показало хорошее совпадение при масштабе модели 1:400 и большое отклонение при масштабе 1:250, что объясняется влиянием стенок ванны на измерения.

Е. и М., стр. 81, № 4, 1954.

[Э-во, 8, 1955]

ставляет 240 мвт; годовая выработка энергии — 1,1 млрд. квтч. В дальнейшем будет сооружена гидроэлектростанция в Сторнорфоре на реке Уме мощностью 375 мвт с годовой выработкой электроэнергии 2,2 млрд. квтч.

В 1955...1956 гг. должны быть сооружены три новые линии 380 кв. После этого общая длина линий 380 кв в Швеции превысит 2700 км.

Введение продольной компенсации на линии 380 кв Мидског—Халлсберг увеличивает пропускную способность линии на 250 мвт, т. е. более чем на 50%. Установки продольной компенсации будут сооружены и на других линиях 380 кв.

Electr. Journal, т. 152, стр. 673, № 9, 1954.

(Э-во, 8, 1955)

динамических моделей. Полученные уравнения начинают методику проектирования, позволяя судить о возможности сооружения физической модели по заданным параметрам любой, в том числе самой крупной, синхронной машины.

В статье даются соображения о методике исследований на динамических моделях как лабораторного, так и промышленного типа.

Вопросы, достаточно освещенные в литературе, в статье не рассматриваются.

Электричество, № 8, 1955.

равдывается установка конденсаторов при напряжении 230 кв.

Общая мощность конденсаторов, установленных на Бонневильской системе, равна 870 мва. Из этого количества на подстанциях 115 кв установлено 125 мва, на подстанциях 13,8 кв — 627 мва. За время эксплуатации вышли из строя конденсаторы общей мощностью около 10 мва. Примерно 8 мва было повреждено вследствие причин, которые, по мнению фирм, изготовляющих конденсаторы, в настоящее время устранены.

При использовании выключателей, допускающих повторные зажигания дуги при отключении шунтирующих конденсаторов, могут происходить повреждения линейной изоляции и самих выключателей.

Tr. AIEE, т. 72, ч. III, стр. 1129, 1953.

(Э-во, 8, 1955)

внедрение устройств автоматического регулирования и форсирования возбуждения синхронных машин (в первую очередь генераторов и компенсаторов), а также проведенное в послевоенные годы теоретическое и экспериментальное изучение асинхронных режимов синхронных машин позволили приступить к широкому внедрению этих режимов в энергосистемы в целях повышения надежности энергоснабжения, упрощения и удешевления схем автоматики.

В заключение указываются задачи по дальнейшему исследованию процессов синхронизации синхронных машин, АПВ без контроля синхронизма и асинхронного пуска синхронных генераторов.

Электричество, № 8, 1955.

ГРОЗОУПОРНОСТЬ ЛИНИЙ 44...115 кВ НА ДЕРЕВЯННЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОРАХ

Опубликованы данные по грозоупорности 34 линий передачи 44...115 кВ общей длиной свыше 1100 км в штате Колорадо (США). Линии проходят по горной местности на отметках 1500...4000 м. Среднее число грозовых дней в году 50.

Одноцепные линии 44...69 кВ выполнены на одностоечных деревянных опорах с деревянными траверсами и штыревыми изоляторами без троса. Расположение проводов — треугольником. На опорах, наиболее часто поражаемых молнией, верхний провод целесообразно защищать трубчатыми разрядниками. Двухцепные линии 44 кВ монтировались ранее на металлических опорах с металлическими траверсами; ввиду высокой аварийности траверсы впоследствии были заменены на деревянные.

J. Salauze

2

ЩЕЛОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ПОРИСТЫМИ ПЛАСТИНАМИ ДЛЯ БОЛЬШИХ ТОКОВ

Пористые пластины для кадмие-никелевых стартерных батарей изготавливаются из никелевого порошка с диаметром частиц в единицы микрон. Порошок наносится на тонкую металлическую сетку и спекается при температуре 600...1000°С. Полученная таким образом пластина толщиной 2...2,5 мм имеет пористость порядка 80%. Затем в порах электролитически осаждается активная масса — гидрат никеля или (для отрицательных пластин) гидрат кадмия. Благодаря развитой поверхности активной массы допустимый толчковый разрядный ток в несколько раз больше, чем у обычных щелочных элементов.

В другой конструкции в целях экономии кадмия отрицательные пластины прессуются из смеси порошко-

М. П. Костенко и И. Д. Урусов

3

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ КУЙБИШЕВСКОЙ ГЭС

Электродинамическое моделирование является весьма эффективным методом исследования сложных процессов в энергосистемах при различных нарушениях режимов работы. Одной из главных задач при создании электродинамической модели энергосистемы является проектирование синхронных машин, моделирующих мощные синхронные генераторы и компенсаторы.

В статье устанавливаются основные критерии подобия и выводятся соотношения между ними, размерами магнитопровода модели и электромагнитными нагрузками А и В_δ. При помощи полученных соотношений могут быть найдены основные данные генератора модели минимальной мощности, при котором еще не требуется искусственная компенсация активных сопро-

Г. Н. Петроз и И. С. Налишков

3

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Рассматривается метод расчета электродинамических сил, возникающих в трансформаторах при аварийных процессах. В основу метода кладутся исследования магнитного поля и расчет осевой и радиальной составляющих вектора индукции в пределах пространства, занятого обмотками. Учет влияния стального сердечника производится при помощи зеркальных изображений. Данные опытов показывают, что результаты расчетов составляющих вектора индукции в пределах обмотки и у ее концов получаются более точными, если зеркальные изображения учитываются только по плоскости сердечника; учет таким же методом плоскости ярем и стальных концевых опор увеличивает расхождение между расчетом и опытом.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МИКРОМАШИНЫ

Электрические микромашины (машины малой мощности, до 500 Вт) получили в настоящее время весьма широкое распространение для самых разнообразных целей. В статье рассмотрены основные типы микромашин, их свойства и области применения по двум обособленным группам: микродвигатели широкого применения и микромашины автоматических устройств.

В группе микромашин широкого применения рассмотрены:

AI. Асинхронные двигатели трехфазного тока.

AII. Асинхронные двигатели однофазного тока различных типов.

AIII. Асинхронные двигатели с массивным стальным ротором.

AIV. Многоскоростные асинхронные двигатели.

AV. Синхронные реактивные двигатели.

J. Bader, W. Lech

3

ЗАЩИТА ИЗОЛЯЦИИ НЕЙТРАЛИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В трансформаторах с изолированной или компенсированной нейтралью изоляция обмоток вблизи нейтрали может подвергаться значительным воздействиям при атмосферных перенапряжениях. При набегании волны по трем проводам амплитуда перенапряжений на нейтрали в пределе может удвоиться. Даже в случае установки разрядников на зажимах трансформатора перенапряжения могут привести к перекрытию изоляции нейтрали, что эквивалентно воздействию на нейтраль волны с крутым фронтом (порядка 0,1 мксек).

Сравнение различных методов защиты показало, что наиболее целесообразным методом является установка специального разрядника у вывода нейтрали. Заземле-

J. Szablya

3

КОЭФФИЦИЕНТ ДИНАМИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Предлагается для оценки динамических свойств электрических машин с несколькими каскадами усиления пользоваться вместо добротности машины

$D \left(D = \frac{A}{T} \text{ сек}^{-1} \right)$ коэффициентом динамического использования C_D , определяемым по следующей формуле

$$C_D = \frac{A}{T_1 \cdot T_2^2 \cdot \dots \cdot T_m \cdot \dots \cdot T_n} [\text{сек}^{-(2n-1)}],$$

где $T_1, T_2, \dots, T_m, \dots, T_n$ — постоянные времени отдельных каскадов; A — коэффициент усиления по мощности.

Для обычного двухкаскадного электромашиного усилителя с поперечным полем

ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Генератор, предназначенный для привода от небольшого бензинового двигателя или дизеля, отличается следующими особенностями: система возбуждения расположена на статоре в виде равномерно распределенной обмотки по типу асинхронного двигателя. Три ветви обмотки возбуждения включены треугольником, причем одна из них замкнута накоротко для создания демпферного действия. Обмотка переменного тока на вращающемся якоре может соединяться в звезду или треугольник, концы ее выведены к трем контактным кольцам; кроме того, на якоре размещена обмотка постоянного тока для питания цепи возбуждения. Щетки на коллекторе обмотки возбуждения сдвинуты на определенный угол из нейтральной зоны в целях использования реакции якоря обмотки переменного тока для

АVI. Гистерезисные двигатели.

АVII. Универсальные коллекторные двигатели.

АVIII. Двигатели постоянного тока.

Свойства этих машин рассмотрены применительно к единой всесоюзной серии малых машин.

Для типов машин, не производящихся в СССР или не входящих в указанную серию, приведены данные по зарубежным источникам.

В группе микромашин автоматических устройств рассмотрены:

БI. Исполнительные двигатели постоянного и переменного тока.

БII. Тахогенераторы постоянного и переменного тока.

БIII. Поворотные трансформаторы.

БIV. Сельсины.

Электричество, № 8, 1955.

Для одноцепных линий 115 кв применены порталые деревянные или металлические опоры, для двухцепных — металлические опоры с расположением проводов шестигугольником.

Среднее число ежегодных грозвых отключений на 100 км длины линий разной конструкции указано в следующей таблице:

Грозозащита	Деревянные опоры	Металлические опоры
Без троса	8	13,2
То же с дугогасящей катушкой	3,3	4,2
1 трос на порталых опорах	4,4	7,1
1 трос на двухцепных опорах	Не применялись	3,2
2 троса		Не применялись

Линии на деревянных опорах с двумя тросами практически грозоупорны.

El. World, стр. 66, № 6, 1955.

(Э-во, 8, 1955)

ние нейтрали через емкость, активное сопротивление или импидор требует установки громоздких и дорогостоящих аппаратов. Экранирование обмотки вблизи нейтрали не обеспечивает защиты главной изоляции обмотки.

Испытания трансформатора 30 кв мощностью 100 ква и трансформатора 110 кв мощностью 31,5 тыс. ква показали, что даже при защите нейтрали 65%-ными разрядниками ее изоляция подвергается чрезмерным перенапряжениям. Для защиты изоляции нейтрали трансформатора необходимо значительно снизить пробивное напряжение разрядника, одновременно значительно увеличив в нем количество дисков рабочих сопротивлений.

CIGRE, доклад № 113, 1954.

(Э-во, 8, 1955)

образной меди и порошкообразной окиси железа. Смесь прессуется в холодном состоянии под давлением 1 000 ата.

Для дальнейшего увеличения допустимых разрядных токов толщина пористых пластин была снижена до 0,4...1 мм. Положительные и отрицательные пластины разделяются волокнистыми пластмассовыми прокладками толщиной до 1 мм и прессуются. В результате получаются плотные блоки с малым содержанием электролита, не выделяющие газов при заряде. Блок помещается в герметически закрытый кожух. Элемент может одновременно разряжаться током, превышающим одночасовой разрядный ток в 10...20 раз.

Vull. SFE, стр. 19, № 49, 1955.

(Э-во, 8, 1955)

$$C = \frac{A}{T_B \cdot T_K^2} [\text{сек}^{-2}],$$

где T_B — постоянная времени цепи управления; T_K — постоянная времени короткозамкнутой цепи.

Исходя из указанного выражения, оптимальным соотношением постоянных времени электромашинного усилителя является: $T_1 : T_2 : \dots T_m : \dots T_n = 1 : 2 : \dots 2 : \dots 2$. Для двухкаскадного электромашинного усилителя с поперечным полем оптимальным отношением постоянных времени является $T_K = 2T_B$. Для этих усилителей рассматриваются зависимости коэффициента динамического использования от отдельных параметров машины.

Приводятся примеры, показывающие правильность предлагаемого критерия динамических свойств машин.

Acta technica academicae scientiarum Hungaricae (Budapest), т. IX, стр. 365, 1954. (Э-во, 8, 1955)

тивлений обмоток. Приняв этот генератор за исходный, можно получить ряд машин-моделей с постепенно уменьшающимися полюсными делениями τ , по принципу построения нормальных серий синхронных машин. Рассматриваются особенности проектирования магнитопроводов (пазовая и полюсная геометрия).

Приводятся основные данные выполненных генераторов-моделей и некоторые результаты их экспериментального исследования.

Электричество, № 8, 1955.

В работе показано, что определение радиальных составляющих магнитного поля по некомпенсированной намагничивающей силе обмоток не дает правильных результатов, хотя этот метод широко применяется на практике.

Рассматриваются особенности расчета электродинамических сил в трансформаторах выпрямительных установок при возникновении обратных зажигания; показывается, что эти силы могут достигать весьма больших значений из-за наличия постоянной составляющей в токе вторичной обмотки.

Приводятся вспомогательные расчетные кривые, позволяющие находить составляющие индукции магнитного поля в наиболее общем случае, когда линейная плотность намагничивающей силы вдоль обмотки неравномерна.

Электричество, № 8, 1955.

компаундирования. Особое выполнение имеет магнитная цепь: благодаря сильному насыщению ядра якоря характеристика намагничивания в зоне насыщения представляется почти горизонтальной линией. Поэтому уже при холостом ходе генератора работа происходит в точке далеко за коленом характеристики, вследствие чего естественное падение напряжения генератора остается незначительным. Благодаря всем этим мерам колебания напряжения генератора во всем диапазоне нагрузок и при $\cos \varphi$ от 0,8 до 1 остаются в пределах $\pm 5\%$.

FTZ-A, т. 76, стр. 138, № 3, 1955.

(Э-во, 8, 1955)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОДОГРЕВ УГЛЕКИСЛОТЫ ПРИ ВЫТЕСНЕНИИ ЕЮ ВОДОРОДА ИЗ КОРПУСА ГЕНЕРАТОРА

Вытеснение воздуха и водорода из корпуса генератора при помощи CO_2 обычно длительная и дорогая операция. По данным автора, для неподвижного генератора процесс вытеснения водорода и заполнения корпуса воздухом занимает соответственно 7 час и 1 час. Непроизводительный, но необходимый простой генератора при выводе его в ремонт и обратном вводе в эксплуатацию составляет, следовательно, примерно 16 час. Операция продувки периодическая и часто носит полуаварийный характер, поэтому сокращение ее длительности имеет большое значение.

Выпуском CO_2 в виде жидкости из перевернутых баллонов или баллонов, снабженных сифонной трубкой

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СИЛОВЫХ СЕТЯХ

В статье описаны приборы, служащие для исследования высших гармоник напряжения и тока в сетях. Одним из таких приборов является динамометр, к одной катушке которого подведено анализируемое напряжение, в то время как другая соединена через амперметр с передатчиком, частоту которого можно регулировать. При совпадении частот исследуемого напряжения и напряжения передатчика показание амперметра может служить мерой амплитуды гармоники. Большие токи могут быть подведены через трансформатор тока, большие напряжения — через входное сопротивление. Метод позволяет также определить дробные гармоники. Прибор Вильсгауза, основанный на этом принципе, позволяет исследовать гармоники до 25-й. Потребляемая мощность составляет при измерениях гармоник тока 1,5 ва,

Е. Г. Шрамков, В. О. Арутюнов, А. М. Турчин,
П. В. Новицкий

НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Рассматриваются некоторые общего характера вопросы, связанные с дальнейшим развитием электроизмерительной техники:

1. Повышение стабильности параметров электроизмерительной аппаратуры, т. е. длительности срока, в течение которого параметры, определяющие свойства и условия применения этой аппаратуры, сохраняются в допустимых пределах, без регулировки или ремонта аппаратуры.

2. Облегчение ограничения применимости мер и приборов по таким факторам, сопутствующим измерению, как температура, частота переменного тока, вибрация и пр.

3. Более широкое и своевременное использование

J. Olle

ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВОЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Разработан четырехлучевой электронный осциллограф на напряжение до 60 кВ с непрерывной откачкой.

Осциллограф предназначен для непосредственной одновременной записи до четырех переходных процессов с амплитудой от нескольких сот вольт до 25 кВ. Скорость записи до 10 см/мксек.

В осциллографе поток электронов попадает сначала на диафрагму с четырьмя отверстиями малого диаметра. Через диафрагму проходят четыре луча, расположенные симметрично относительно оси. Электромагнитная фокусирующая линза, общая для четырех лучей, собирает при отсутствии отклонения все лучи в одну точку экрана или светочувствительной пленки. Диаметр светового пятна 0,03...0,05 мм. Каждый луч проходит через отдельную пару вертикальных отклоняющих пла-

R. Schwe'zke

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ СИЛОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Для защиты механических контактных выпрямителей при обратных зажиганиях применяются быстродействующие короткозамыкатели, соединяющие накоротко все три фазы питающей цепи. Для этой цели в Брауншвейгском техническом училище разработан короткозамыкатель с пружинным приводом, в котором для ускорения действия использован капсуль, содержащий 0,3 г азид свинца и 0,7 г тетрила; капсуль механически удерживает подвижной контакт короткозамыкателя. При обратном зажигании тиратронное устройство разряжает на цепь взрывателя высоковольтный конденсатор и заряд взрывается за $2 \cdot 10^{-5}$ сек. Подвижной контакт освобождается и замыкает под действием пружин

E. Zinn, K. Forger

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ

Погрешности трансформатора напряжения с коэффициентом трансформации 100:100 можно легко определить с большой точностью. При коэффициенте трансформации 200:100 погрешности можно определить по классическому методу Шеринга-Альберти. Однако в области сверхвысоких первичных напряжений этот метод непригоден в связи с особыми требованиями к конструкции потенциометра. Для этого случая в статье рассмотрен другой метод, основанный на получении напряжения, вдвое большего по величине и совпадающего по фазе с заданным. Заданное напряжение подводят к зажимам первичной обмотки трансформатора напряжения с коэффициентом трансформации 100:100, а удвоенное напряжение — к зажимам первичной об-

F. Petermichl

ИСПЫТАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Сооружена испытательная станция, позволяющая испытывать в искусственной схеме выключатели на напряжение до 380 кВ и разрывную мощность до $20 \cdot 10^6$ кВА. Токовая цепь питается от синхронного генератора 50 Гц, цепь высокого напряжения — от колебательного контура 500 Гц. Для синхронного приключения контура используется искровой промежуток, безинерционно управляемый током главной цепи. Схема обеспечивает нормальную скорость спада тока к нулю. Скорость и характер нарастания обратного напряжения регулируются в широких пределах.

Сооружена также установка для записи электрической прочности промежутка между контактами выключателя в процессе отключения. Установка состоит из

В. С. Тулин

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ГОРНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

В статье рассматриваются вопросы дальнейшего развития и улучшения электроприводов в горной промышленности.

Отмечается, что развитие электропривода должно идти в следующих основных направлениях:

1. Создание новых типов горных машин для расширения областей механизации горных работ, а также увеличение мощности горных машин существующих типов для повышения их производительности.

2. Улучшение использования мощности горных машин посредством автоматизации их работы и совершенствование электропривода для уменьшения износа машин и их аварийности.

3. Уменьшение веса и первоначальной стоимости горных машин и их электропривода.

гармоник напряжения — 20 *ва*. При пользовании корректирующими кривыми погрешность измерения ниже 1%.

Другой прибор — Полека и Вилимцига — построен на принципе резонанса с подавлением основной гармоники и возможностью переключения резонансного контура на 3, 5, 7 и 9-ю гармоники. Потребляемая мощность прибора при измерении гармоник напряжения составляет 2 *ва*, гармоник тока — 12 *ва*. Для уменьшения погрешности измерения при колебаниях частоты в пределах 48...52 *гц* необходимо построить резонансный контур посредством конденсатора переменной емкости. На том же принципе, но с двумя резонансными контурами построен прибор Грюнтера для измерения шести гармоник (от 3 до 27-й) анализируемых напряжений от 110 до 380 *в* и токов до 5 *а*.

Elektron-Anzeiger, стр. 4, № 1, 1955.

(Э-во, 8, 1955)

стин; электромагнитное горизонтальное отклонение выполнено общим для всех лучей. Благодаря этому запись четырех процессов производится строго синхронно. Поля для отклонения луча и фокусировки совмещены в одной плоскости.

Световые лучи, проникающие от катода через отверстия диафрагмы, задерживаются второй диафрагмой, помещенной между отклоняющими пластинами и экраном. Благодаря вращению движущихся электронов в фокусирующем магнитном поле электронные пучки беспрепятственно проходят через вырезы второй диафрагмы.

Для записи используется поворотный барабан с тремя светочувствительными пленками 6×9 *см* и люминесцентным экраном.

RGE, т. 64, стр. 104, № 2, 1955.

(Э-во, 8, 1955)

мотки трансформатора напряжения с коэффициентом трансформации 200:100, после чего их вторичные напряжения сравниваются между собой по компенсационной схеме.

Автор приводит схему для получения удвоенного напряжения, совпадающего по фазе с заданным, и схемы для определения погрешностей трансформаторов напряжения с коэффициентами трансформации 200:100; 250:100; 400:100; 500:100, а также метод суммирования для определения погрешностей при любом коэффициенте трансформации. В четырех таблицах сопоставлены результаты расчетов и экспериментального измерения погрешностей указанных четырех трансформаторов напряжения. Отмечается, что измерение частоты на 6% изменяет погрешность напряжения менее чем на 0,0001% и угловую погрешность менее чем на 0,01'.

ETZ-A, стр. 805, № 24, 1954.

(Э-во, 8, 1955)

4. Повышение экономичности работы.

Подробно рассмотрены технические тенденции в области электропривода в угольной, рудной и нефтяной промышленности.

Приводятся основные направления технического развития и совершенствования электроприводов типовых механизмов горной промышленности.

Электричество, № 8, 1955.

до дна, и испарением жидкого CO_2 в испарителе удалось снизить время продувки с 16 до 4 *час*.

Испаритель мощностью 12 *квт* снабжен электрическим подогревом, автоматически поддерживающим температуру выходящего газа 34°C при помощи термостата. Продувка корпусов генераторов с выпуском газообразного CO_2 из прямо стоящих баллонов при большой скорости опорожнения их приводит к замерзанию 50...25% содержимого в баллонах, сублимации выходящего газа и выпадению его в виде «снега». В связи с этим значительная часть содержимого баллонов теряется для процесса продувки.

Power Eng., стр. 72, № 1, 1955.

(Э-во, 8, 1955)

в измерительной технике достижений электронной техники.

4. Разработка научно обоснованной теории расчета и проектирования измерительных устройств с ламповыми узлами и ламповых узлов и разработка типовых конструкций.

5. Обобщение теоретического и опытного материала по расчету и проектированию типовых серий измерительных преобразователей неэлектрических величин в электрические, а также измерительных блоков и блоков питания применительно к методам как объективного, автоматического контроля, так и субъективного.

6. Обобщение и разработка теории и методов расчета и проектирования электрических и магнитных измерительных цепей; дальнейшее развитие теории основ электроприборостроения.

7. Использование достижений, в первую очередь в области физики, ламповой, высокочастотной и импульсной техники, для создания новых методов и аппаратуры.

Электричество, № 8, 1955.

силовую цепь в течение $2 \cdot 10^{-4}$ *сек*. Если заряд используется одновременно для механического ускорения подвижного контакта, время замыкания сокращается до $1 \cdot 10^{-4}$ *сек*.

На том же принципе может быть построен быстродействующий силовой выключатель. Стенки капсулы используются в этом случае в качестве токоведущей части, включенной последовательно в силовую цепь. При взрыве капсула разрушается и цепь мгновенно размыкается. Гашение дуги обеспечивается одним из обычных способов.

Для управления выключателем можно использовать быстродействующее первичное реле.

ETZ-A, стр. 187, № 5, 1955.

(Э-во, 8, 1955)

двух батарей конденсаторов. Первая заряжена до высокого потенциала, вторая — меньшей емкости — присоединена к первой через сопротивление. Испытуемый выключатель присоединен параллельно второй батарее. В процессе замыкания цепи вторая батарея заряжается до момента пробоя промежутка между контактами; при пробое батарея разряжается, затем вновь заряжается и т. д. Напряжение на выключателе, имеющее пилообразную форму, записывается электронным осциллографом. Огибающая записанной кривой определяет зависимость изменения электрической прочности промежутка от времени.

Е. и М., стр. 73, № 4, 1955.

(Э-во, 8, 1955)

ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

В статье дается краткий обзор современного состояния электронной обработки металлов, рассматриваются основные типы электрических схем, при помощи которых осуществляется этот процесс, дается схематическое описание физической модели процесса.

Значительное внимание уделяется применению электронной обработки для выполнения различных технологических процессов и операций. Рассматривается электронная обработка для выполнения отверстий в форсунках, позволивший полностью отказаться от применения сверл; процесс шлифования и разрезания металлов. Особо обращается внимание на появившуюся возможность изготовления твердосплавных штампов. Рассматриваются процессы электронного упрочнения металлических поверхностей и применение электроискро-

МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ПРИВОД ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Плиты сухой штукатурки для стен и потолков изготавливаются в виде непрерывной полосы на многосекционном агрегате и потом автоматически нарезаются на стандартные части. Агрегат приводится посредством нескольких двигателей постоянного тока, питаемых от общего генератора по системе генератор — двигатель, что обеспечивает сохранение одинаковых скоростей вращения у всех двигателей. Необходимые номинальные скорости для каждой секции осуществляются при помощи регулируемого механического вариатора — редуктора. Во избежание провеса («петлевание») материала или разрыва его между смежными секциями соотношение их скоростей должно поддерживаться с точностью до 0,03%. Это достигается посредством сельсинов, установленных на двух соседних валах, выход которых подается на дифференциальный сельсин. Послед-

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Регулируемый электропривод в установках переменного тока может быть осуществлен при помощи двигателя постоянного тока, питаемого из сети через полупроводниковый выпрямитель. Если в сети трехфазного тока 415...420 в применить твердые выпрямители по трехфазной мостовой схеме, то не требуется специального трансформатора и на стороне постоянного тока выпрямителя получается напряжение 500 в, непосредственно пригодное для питания двигателей постоянного тока. При такой схеме пульсация выпрямленного напряжения составляет всего лишь 4% при частоте около 300 гц. Изменение напряжения выпрямителя между нагрузками от 100 до 25% не превосходит 4%. Подобная система применяется в Англии для двигателей мощ-

МАСЛОНАПОЛНЕННЫЙ КАБЕЛЬ 310 кв

Связь между подземной электростанцией на реке Кемано (Британская Колумбия) и распределительным устройством 300 кв осуществляется при помощи однофазных маслонеполненных кабелей, проложенных в туннеле длиной 613 м, вырубленном в скале. При разнице уровней обоих концов в 11 м установка стопорных муфт не потребовалась.

Кабели изготовлены фирмой Пирелли, их пропускная способность по току при напряжении 310 кв равна 550 а. Изоляция кабелей рассчитана на максимальную рабочую напряженность 120 кв/см. Внешний диаметр кабеля равен 97 мм.

Так как наружный конец кабеля подвергается зимой воздействию очень низких температур, при которых обычно применяемое для пропитки кабелей масло становится очень вязким, пропитка кабеля 310 кв произведена маслом, обладающим стандартными электрическими

A. Leorhard

5

ПИТАНИЕ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Изолированное рассмотрение магнитного усилителя часто приводит к ложным выводам о нецелесообразности его использования. Это можно проследить на примере сравнения переходных процессов двух схем управления обмоткой возбуждения генератора постоянного тока: от другого генератора и от магнитного усилителя. В двухмашинной схеме передаточная функция описывается выражением

$$\frac{u_3}{u_1} = \frac{1}{(1+T_{1p})(1+\sigma T_{2p})},$$

где u_1 — входное напряжение первого генератора; u_3 — выходное напряжение второго генератора; T_{1p} и T_{2p} — соответствующие постоянные времени; σ — коэффи-

ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЕЙ 275 кв

В Англии сооружена установка для испытания в эксплуатационных условиях кабелей 275 кв. Испытуемые образцы кабелей включаются в одну из фаз воздушной линии 275 кв Стэйтхорп — Вест Милтон. Изоляция кабелей рассчитана на длительную работу при напряжении 300 кв.

Поставленные фирмой Каллендер маслонеполненный кабель и кабель под давлением газа рассчитаны на максимальную рабочую напряженность на поверхности жилы 11 кв/мм. Кабель фирмы Энфильд рассчитан на максимальную рабочую напряженность 15 кв/мм при нормальном давлении газа 17,5 кг/см².

Ввиду малой нагрузки линии увеличение нагрева кабелей до максимально допустимой температуры 80° С достигается путем изготовления токоведущей жилы из материалов, обладающих высоким удельным сопротив-

K. Backhaus

6

КЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

После краткого описания процессов получения и стандартизации керамических изоляционных материалов и изоляционных деталей для электротермического оборудования рассмотрены их механические, термические и электрические свойства. Приведена таблица свойств керамических изоляционных материалов, дополненная данными о температурной зависимости объемного сопротивления, пробивного напряжения, теплопроводности и механической прочности. Рассмотрено взаимное влияние между керамическими изоляционными материалами и материалами нагревательных элементов. Результаты исследований представлены следующими графиками: 1) зависимость удельного объемного сопротивления различных силикатно-керамических и алундо-керамических

НОВОЕ ТРАНСФОРМАТОРНОЕ МАСЛО

Трансформаторные масла, находящиеся в эксплуатации, неизбежно содержат измеримые количества металлов (меди, железа) в растворенном состоянии. Скорость старения масла в эксплуатационных условиях тесно связана с наличием в нем металлов. Так, например, медь, растворенная в количестве менее 0,001%, вдвое увеличивает способность образования осадка в течение всего лишь нескольких недель эксплуатации масла.

Фирмой Manchester Oil Refinery (Англия) выпущено «пассивированное» трансформаторное масло с добавлением таких химических веществ, в присутствии которых масло не растворяет ни меди, ни железа в любой форме. В масле содержится также антиокислитель. Пассивированное масло не только выдерживает продолжитель-

ний поворачивает валик потенциометра в цепи возбуждения одного из секционных двигателей на угол, соответствующий расхождению скоростей двух валов, что корректирует в нужном смысле скорость забежавшего вперед или отставшего двигателя. Максимальная скорость полосы около 0,5 м/сек; она поддерживается с точностью $\pm 0,0025$ м/сек.

El. Eng., т. 73, стр. 1029, № 11, 1954.

(Э-во, 8, 1955)

вой обработки при проведении ремонтных и восстановительных работ.

Рассматриваются выпускаемые промышленностью некоторые типы электроискровых установок, при помощи которых могут осуществляться описанные технологические процессы.

Содержание статьи показывает, что за прошедший сравнительно короткий отрезок времени электроискровая обработка металлов от отдельных незначительных применений развилась в самостоятельную область прикладной электротехники.

Удельный вес в промышленности этого нового способа обработки металлов непрерывно повышается.

Электрчество, № 8, 1955.

характеристиками, но втрое меньшей вязкостью. Кабели рассчитаны на внезапное приложение полной нагрузки при низких температурах воздуха.

Кабели были подвергнуты испытаниям на изгиб и последующим испытаниям изоляции импульсным напряжением и повышенным напряжением промышленной частоты. Испытания показали, что кабели и арматура обладают достаточным запасом прочности и выдерживают импульсные напряжения до 1250 кВ и напряжения промышленной частоты до 500 кВ.

Для уменьшения потерь оболочка кабеля заземляется только в одной точке.

BEAMA Journal, т. 62, стр. 32, № 1, 1954.

(Э-во, 8, 1955)

ностью от 8 до 120 л. с. Регулирования скорости в диапазоне 1...3 можно достигнуть изменением напряжения на якоре двигателя, для чего в цепь переменного тока должен быть включен индукционный регулятор. Если требуется стабилизация скорости двигателя, то последний должен быть снабжен еще дополнительной обмоткой возбуждения, на которую воздействует серворегулятор, управляемый на основе сравнения некоторого эталонного напряжения с напряжением, получаемым от тахогенератора на валу рабочего двигателя. Так как эталонное напряжение получается из общей сети переменного тока, то необходимо подводить его через стабилизатор напряжения. В статье описан такой электронный стабилизатор напряжения и приведен расчет его основных параметров.

El. Review, т. 155, стр. 991, № 26, 1954.

(Э-во, 8, 1955)

лением или путем применения специальной конструкции жилы.

Жила кабеля экранируется полупроводящей бумагой. Свинцовая оболочка усиливается с помощью двух слоев ленты из оловянистой бронзы, намотанных различным шагом.

Антикоррозийная защита кабеля осуществляется при помощи покрова из хлорвиниловой ленты, резины и пропитанного битумом джутового полотна.

BEAMA Journal, т. 61, стр. 157, № 203, 1954.

(Э-во, 8, 1955)

коэффициент, зависящий от степени компаундирования первого генератора. Чем меньше σ , тем меньше время нарастания i_3 до своего установившегося значения.

Значение σ находят из выражения $\sigma = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}$,

где α и β — углы наклона кривых $i_2(i_2)$ и $u_2(i_2)$. Величины i_2 , u_2 , i_2 — выходные параметры первого генератора.

При использовании вместо первого генератора магнитного усилителя передаточная функция имеет аналогичное выражение. Благодаря легко достигаемой в магнитном усилителе большой крутизне кривой $u_2(i_2)$ значение σ резко уменьшается, что приводит к большому снижению времени переходного процесса. Практически в этом случае $\sigma = 0,1$, что уменьшает время нарастания i_3 более чем в 2 раза.

ETZ-A, стр. 736, № 21, 1954.

(Э-во, 8, 1955)

ный срок эксплуатации, но и способно длительно находиться в условиях высоких температур.

Chem. Trade J., т. 134, стр. 1404, № 3496, 1954.

(Э-во, 8, 1955)

изоляционных материалов от обратной величины абсолютной температуры; 2) зависимость пробивного напряжения постоянного тока различных силикатно-керамических материалов от температуры; 3) зависимость пробивного напряжения переменного тока от толщины при температурах 20, 650, 850 и 950°С для высокочастотного материала «фреквента»; 4) зависимость пробивного напряжения переменного тока от толщины при температурах 400, 500 и 650°С для керамического изоляционного материала Q5 типа 510; 5) зависимость теплопроводности алунодо-керамических материалов от температуры; 6) зависимость прочности на сжатие и растяжение и модуля упругости от температуры для «фреквента»; 7) зависимость прочности на сжатие и растяжение и модуля упругости от температуры для алунодо-керамических материалов.

Elektrowärmetechnik, стр. 1, № 1, 1955.

(Э-во, 8, 1955)

НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ФОРМОЙ ВОЛН



Оборудование завода КРОМПТОН ПАРКИНСОН, изготовляющего трансформаторы, включает новейшую аппаратуру для импульсных испытаний. Установка эта генерирует 2 100 000 вольт с предусмотренной возможностью увеличения напряжения до 3 200 000 вольт.

Проектанты К. П. симулируют наиболее тяжелые рабочие условия напряжения, вызываемые волнами перенапряжений во всех частях обмотки и в приспособлениях для переключения ответвлений, и, принимая в расчет щедрые допуски запаса, вырабатывают соответствующую конструкцию.

Осциллографы высокой скорости регистрируют амплитуду и форму волны перенапряжений, а также и сложную волновую кривую пульсации тока обмотки, и только результаты чрезвычайно тщательного сравнения последней до и после испытания могут убедить инженеров К. П., что трансформатор выдержал испытание удовлетворительно.

Это одна из причин, почему трансформаторы К. П. завоевали мировую репутацию своей эффективностью и надёжностью.

Когда Вам потребуется ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ . . .

самое лучшее обратитесь к фирме

Crompton Parkinson
LIMITED

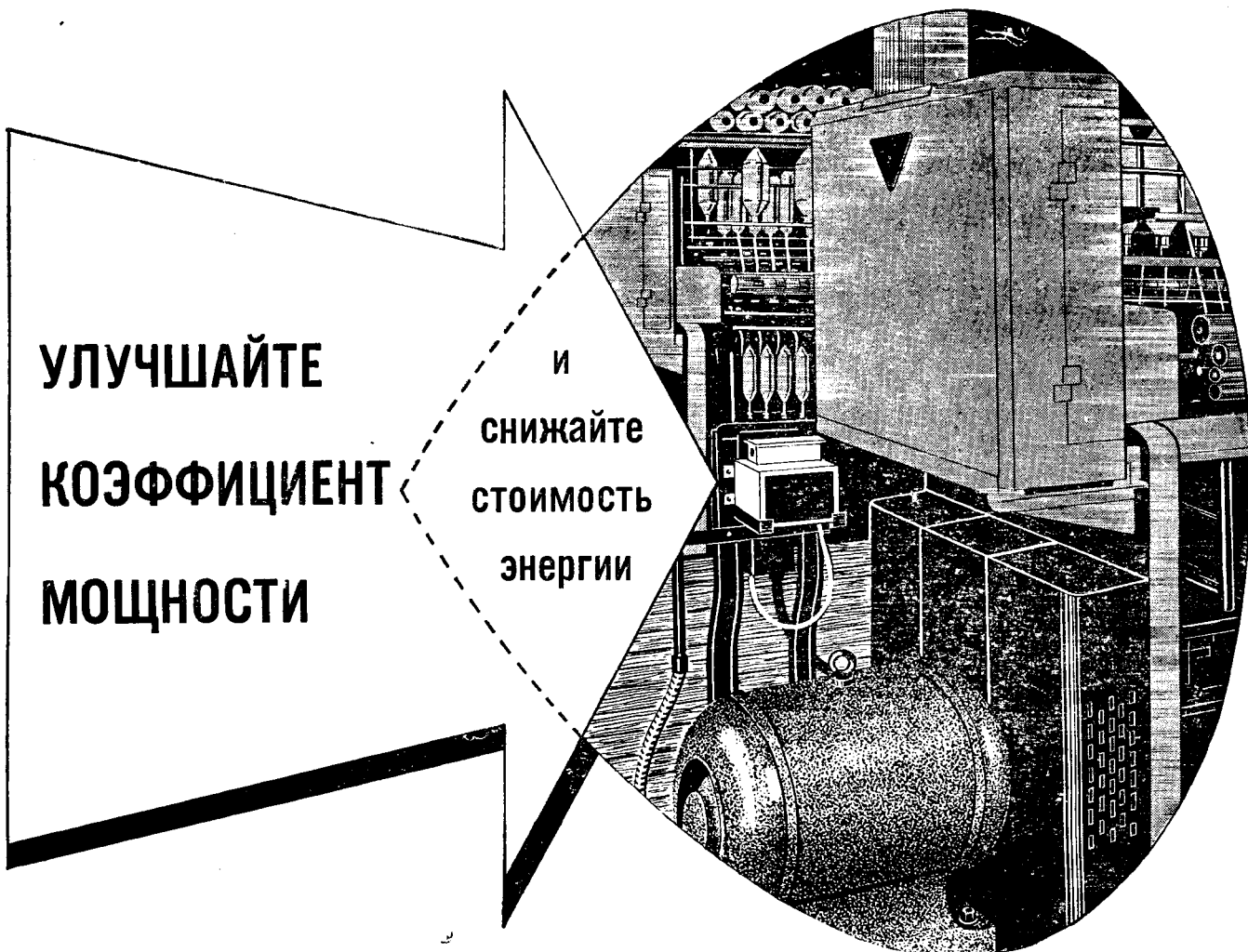


ELECTRICAL EQUIPMENT

КОТОРАЯ ИЗГОТОВЛЯЕТ — ЭЛЕКТРО-МОТОРЫ ВСЕХ ТИПОВ. АЛЬТЕРНАТОРЫ. ГЕНЕРАТОРЫ. АППАРАТУРУ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА. ТРАНСФОРМАТОРЫ. КАБЕЛИ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. ЛАМПЫ. ОСВЕТИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. АККУМУЛЯТОРЫ. ТЯГОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.

CROMPTON PARKINSON LTD. • CROMPTON HOUSE • ALDWYCH • LONDON, W.C.2 • АНГЛИЯ
ТЕЛЕГРАФНЫЙ АДРЕС: CROMPARK LONDON

Цена 8 руб.



**УЛУЧШАЙТЕ
КОЭФФИЦИЕНТ
МОЩНОСТИ**

**и
снижайте
стоимость
энергии**

Конденсаторы мощности «ВІСС», присоединенные к моторам, автоматически улучшают коэффициент мощности и, таким образом, сводят потери до минимума. В тех случаях, когда тариф энергии базируется на коэффициенте мощности, немедленным результатом применения конденсаторов «ВІСС» является экономия в потреблении электрической энергии, так что они обычно

окупают себя в весьма короткий срок. Установка их не представляет затруднений и они занимают мало места. Управление ими — простое, потери — незначительные, текущий ремонт — ничтожный.

**конденсаторами
мощности**

ВІСС

Запросите сегодня брошюру № 251, содержащую дальнейшие подробности. Инженеры-специалисты «ВІСС» всегда к Вашим услугам для консультации по всем вопросам, касающимся коэффициента мощности.

Качество конденсаторов окупает затраты на них



BRITISH INSULATED CALLENDER'S CABLES LIMITED

21 BLOOMSBURY STREET, LONDON, W.C.1

АНГЛИЯ