

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1955



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

6

СОДЕРЖАНИЕ

Д. И. Азарьев — Повышение пропускной способности электропередач	1	ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
Ю. М. Файнберг — О параметрах главного электропривода непрерывных прокатных станов	7	Г. Н. Петров — Академик К. И. Шенфер. Г. К. Церева — Чешский ученый Франтишек Петжина . . .	71
А. А. Воскресенский — Расчет токов переходного процесса в трансформаторах тока	12	ДИСКУССИИ	
Б. П. Медведев — Упрощенный расчет переходных процессов в синхронной машине	19	Электронные устройства для стабилизации следящих приводов переменного тока — В. А. Бесекерский и Богумил Миртез	75
Р. Х. Бальян — К расчету массивного ротора	25	Некоторые вопросы схем коммутации высоковольтных сетей — Н. Н. Крачковский	76
С. Е. Кузин — Расчет средних величин в системе питания электрических железных дорог	32	ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг — Новые разработки в области керамических конденсаторов низкого напряжения	37	Турбогенераторы с внутренним охлаждением активных частей. Защита линий связи от влияний линий высокого напряжения в Швеции	77
А. В. Стукачев — Схема для одновременного испытания аппаратов импульсным напряжением и напряжением промышленной частоты	43	ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
Е. Д. Сапир — Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110 . . . 220 кв	48	О развитии информационной библиографии.	81
П. М. Егоров — Исследование вихревых магнитных полей в электролитической ванне	54	ХРОНИКА	
Г. Г. Марквардт — Расчет блуждающих токов в подземных сооружениях	59	Научно-техническое совещание по электроснабжению промпредприятий. Вопросы технико-экономических расчетов дальних электропередач. Научно-техническая конференция в Одесском политехническом институте. Конференция читателей журнала „Электричество“ в Свердловске. Профессор Е. В. Нитусов. Альберт Эйнштейн	81
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ		БИБЛИОГРАФИЯ	
Е. Б. Даензон — Внедрение синхронного электропривода в морском разведочном бурении	65	А. М. Залесский — Еще о книге „Техника высоких напряжений“	86
СТАНДАРТЫ И НОРМЫ		Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	87
Г. С. Плис — О новом Государственном стандарте на синхронные компенсаторы	67	РЕФЕРАТИВНЫЕ КАРТОЧКИ	
П. С. Железняков — Нормы, требующие доработки	69		
З. П. Родионова — Изменения в Правилах безопасности	70		

В связи с исполняющимся 1 июля 1955 года 75-летием издания журнала «Электричество» юбилейный июльский № 7 журнала «Электричество» выпускается в увеличенном против обычного объеме.

В № 7 будут напечатаны крупные обзорные и оригинальные статьи по основным проблемам электрификации. В номере будут даны художественные вклейки.

Юбилейный № 7 журнала „Электричество“

можно выписать наложенным платежом по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, 10, Госэнергоиздат. За границей заявки на № 7 оформляют агентства В/О «Международная книга». Цена № 7—8 руб.

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

Адрес для телеграмм: МОСКВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт. почтовый ящик № 649.

Энергетика является важнейшей отраслью народного хозяйства. Освоение новых экономических районов, увеличение производства продукции промышленности и сельского хозяйства зависят, прежде всего, от развития электрификации страны. Мощность электростанций и протяженность линий электропередачи в СССР растут с каждым годом, однако темпы их прироста недостаточны, что сдерживает развитие отдельных отраслей народного хозяйства.

Товарищи энергетики! Всесоюзное совещание работников промышленности призывает вас полнее использовать новую технику и новые методы в эксплуатации и строительстве энергетических объектов в целях увеличения темпов ввода новых энергетических мощностей.

(Из обращения участников Всесоюзного совещания работников промышленности 18 мая 1955 г.)

Повышение пропускной способности электропередач

Кандидат техн. наук, доц. Д. И. АЗАРЬЕВ

Теплоэлектротехник

При помощи ряда мероприятий пропускная способность электропередач может быть значительно повышена. Осуществление этих мероприятий обходится во много раз дешевле, чем сооружение дополнительных цепей электропередач.

Мероприятия, обеспечивающие повышение пропускной способности электропередач, можно разделить на две категории.

К первой категории относятся: уменьшение индуктивного сопротивления линии путем расщепления проводов; уменьшение индуктивного сопротивления трансформаторов и генераторов; улучшение системы возбуждения генераторов; увеличение скорости отключения коротких замыканий. Мероприятия этой категории органически связаны с оборудованием, без которого электропередача неосуществима; они должны учитываться при проектировании оборудования.

Ко второй категории относятся: устройство переключательных пунктов; компенсация индуктивного сопротивления электропередачи при помощи статических конденсаторов; применение промежуточных синхронных конденсаторов¹; включение активных и индуктивных сопротивлений в нейтрали трансформаторов; применение нагрузочных сопротивлений, шунтирующих дросселей. Мероприятия этой категории связаны с применением устройств и сооружений, которые могут осуществляться не сразу, а по мере появления необходимости в них. Однако возможность их осуществления должна быть заранее учтена при проектировании электропередачи.

Выбор мероприятий как первой, так и второй

¹ Вопрос об эффективности промежуточных синхронных конденсаторов освещен в статье Д. И. Азарьева, В. А. Веникова и Н. Н. Соколова [Л. 1] и в настоящей статье не рассматривается.

категории должен быть основан на расчетах их эффективности и сопоставлении затрат на их осуществление. Рассмотрим количественное влияние различных мероприятий на повышение пропускной способности электропередач.

Уменьшение индуктивного сопротивления линии особенно эффективно в отношении повышения пропускной способности дальних электропередач. Такая электропередача изображена на рис. 1. Пропускная способность этой электропередачи в нормальном режиме без каких-либо мер ее повышения составит около 350 тыс. кВт при коэффициенте запаса 1,15.

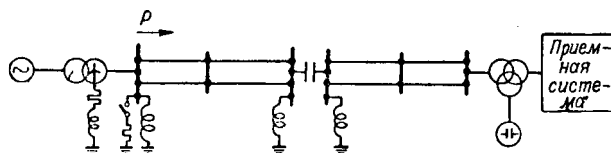


Рис. 1. Схема электропередачи напряжением 400 кВ, длиной 850 км.

Сумма приведенных к напряжению 400 кВ последовательных электрических сопротивлений всех элементов электропередачи составляет 385 ом, из которых 176 ом, т. е. 45,5%, приходится на линию. Поэтому уменьшение индуктивного сопротивления линии должно существенно повысить пропускную способность всей электропередачи.

Как известно, уменьшение индуктивного сопротивления линии достигается расщеплением ее фаз на несколько проводов. При расщеплении на два и три провода и расстоянии между прово-

дами 0,5 м индуктивное сопротивление линии (рис. 1) уменьшается соответственно до 142 и 126 ом. Пропускная способность при этом возрастает не только за счет уменьшения сопротивления линии, но и за счет уменьшения сопротивления трансформаторов и генераторов, так как с увеличением передаваемой мощности увеличивается и мощность последних. В результате пропускная способность возрастет до 500 тыс. квт.

Уменьшение индуктивного сопротивления трансформаторов также является эффективным средством и его следует применять в максимальной степени. Большой эффект в этом отношении могли бы дать автотрансформаторы на приемном конце электропередачи. Если реактивность трансформаторов уменьшить с 17 до 11%, то пропускная способность электропередачи с учетом увеличения включенной мощности трансформаторов и генераторов увеличится еще на 23%, т. е. будет равна 615 тыс. квт.

Уменьшение переходной реактивности синхронных генераторов с 30 до 20% повышает пропускную способность электропередачи, определенную по условию статической устойчивости, еще на 15%, т. е. до 710 тыс. квт.

Наиболее радикальным средством повышения пропускной способности дальней электропередачи является компенсация индуктивного сопротивления линии при помощи статических конденсаторов. Это мероприятие, относящееся ко второй категории, может быть применено не только на вновь строящихся электропередачах, но и на действующих. Если индуктивное сопротивление электропередачи, показанной на рис. 1, компенсировать на 40%, пропускная способность электропередачи с учетом увеличения включенной мощности генераторов и трансформаторов возрастает еще на 66%, т. е. до 1170 тыс. квт.

Весьма эффективным и самым дешевым средством повышения пропускной способности электропередачи является быстроедействие регулирование напряжения. При медленно действующих системах возбуждения и том же коэффициенте запаса, но определенном при постоянстве продольной синхронной э. д. с., пропускная способность рассматриваемой электропередачи будет примерно в 2 раза меньше, несмотря на применение всех указанных выше мероприятий.

При системах же возбуждения, которые в переходных режимах в состоянии поддерживать постоянство не только переходной э. д. с., но и напряжения на шинах генератора к моменту перехода угла вылета ротора генератора через максимум, пропускная способность с учетом увеличения включенной мощности трансформаторов увеличится еще на 27%, т. е. до 1500 тыс. квт. В этом случае можно было бы не уменьшать переходной реактивности генераторов.

Таким образом, применение рассмотренных выше мероприятий с учетом соответствующего увеличения мощности включенных трансформато-

ров и генератора, как видно из табл. 1, в 3...4 раза повышает пропускную способность двухцепной электропередачи, изображенной на рис. 1.

Таблица 1

№ п/п.	Меры повышения пропускной способности	Пропускная способность электропередачи, тыс. квт
1	При отсутствии мер повышения пропускной способности	350
2	При расщеплении проводов на 3	500
3	То же, что в п. 2, но при уменьшении реактивности трансформаторов с 17 до 11%	615
4	То же, что в п. 3, но при уменьшении переходной реактивности генераторов с 30 до 20%	710
5	То же, что в п. 4, но при продольной компенсации индуктивного сопротивления линии на 40%	1170
6	То же, что в п. 5, но при регуляторах, поддерживающих постоянно напряжение на шинах генераторов	1500

В ряде учебников устойчивости параллельной работы ошибочно утверждается, что при малой длительности короткого замыкания, характерной для современных систем, и вследствие большой постоянной времени цепи ротора влияние быстродействующего возбуждения на динамическую устойчивость невелико. Однако в 1947 г. в одной исследовательской работе, выполненной в связи с проектированием электропередачи 220 кв длиной 370 км и позднее электропередачи Куйбышевская гЭС — Москва, нами было показано, что при помощи высоких скоростей возбуждения можно резко повысить динамическую устойчивость станций, работающих через линии большой протяженности. На существенное влияние быстродействующих систем возбуждения на динамическую устойчивость электропередачи указывалось также в ряде статей, опубликованных в последнее время [Л. 2 и 3]. Поэтому мы не будем повторять положений, которые стали широко известными, а рассмотрим этот вопрос вместе с другими с целью количественного сопоставления влияния всех факторов на пропускную способность электропередач и возможности выбора тех или иных параметров машин, которые, как будет показано ниже, являются взаимозаменяемыми.

Влияние реактивного сопротивления генераторов на предельную величину передаваемой мощности по условиям устойчивости при двухфазных замыканиях на землю на линии 220 кв, длиной 370 км показано на рис. 2. При расчетах устойчивости принималось, что если продольная синхронная реактивность гидрогенераторов передающей станции равна 0,9, то их переходная реактивность составляет 0,3. Для других значений синхронной реактивности условно принималось то же соотношение.

Как видно из рис. 2, эффект уменьшения реактивности генератора в сильной степени зависит от скорости отключения короткого замыкания:

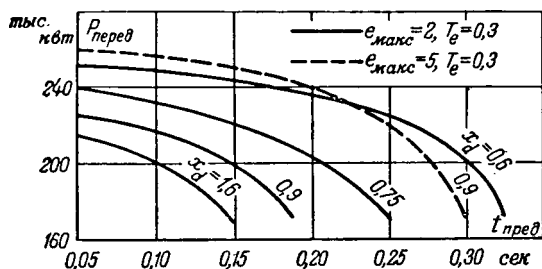


Рис. 2. Зависимость предельной величины передаваемой мощности от времени отключения короткого замыкания при различных значениях синхронной реактивности генераторов

чем медленнее отключается короткое замыкание, тем больший эффект дает уменьшение реактивностей генератора. Если короткое замыкание отключается в течение 0,1 сек, то при уменьшении продольной синхронной реактивности с 0,9 до 0,6, а переходной с 0,3 до 0,2 предельная величина передаваемой мощности увеличивается с 215 до 250 тыс. кВт, т. е. на 16,3%.

Из рис. 2 можно видеть также, что на предельной величине передаваемой мощности очень сильно сказывается «потолочное» напряжение возбuditеля. В тех случаях, которые на рисунке представлены сплошными линиями, принималось, что возбuditель имеет двукратный «потолок» и постоянную времени $T_e = 0,3$ сек.

Пунктирная же кривая получена для случая, когда $e_{\max} = 5$, $T_e = 0,3$ сек и $x_d = 0,9$. Она близка к кривой, полученной при $e_{\max} = 2$ и $x_d = 0,6$. Следовательно, уменьшение реактивности генераторов в 1,5 раза равноценно увеличению «потолочного» напряжения возбuditеля с 2 до 5.

Понижение постоянной времени возбuditеля с 0,5 до 0,1 при времени отключения короткого замыкания около 0,1 сек дает возможность увеличить передаваемую мощность примерно на 10%, а увеличение «потолочного» напряжения возбuditеля с 2- до 5-кратного увеличивает передаваемую мощность примерно на 20%.

Причину столь сильного влияния «потолочного» напряжения возбuditеля и постоянной времени последнего на предельную величину передаваемой мощности нетрудно установить из рис. 3, на котором показано вызванное коротким замыканием изменение фазы э. д. с. генераторов, напряжения на шинах генераторов и продольной переходной э. д. с. для разных «потолочных» напряжений.

При $e_{\max} = 2$ напряжение на генераторе и переходная э. д. с. в момент отключения короткого замыкания оказываются ниже величин в режиме, предшествующем короткому замыканию. Лишь в момент прохождения угла вылета генератора через максимум переходная э. д. с. вследствие действия регулятора возбуждения достигает

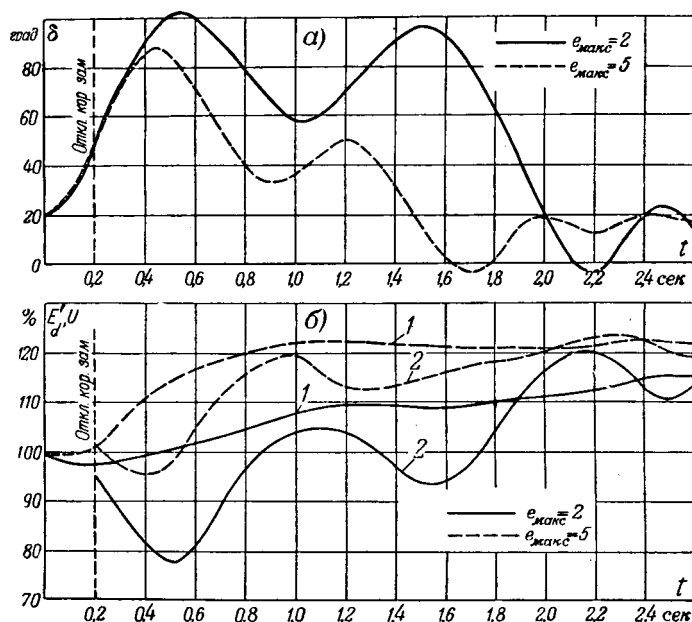


Рис. 3. Кривые качаний генераторов, вызванных двухфазным замыканием на землю (а), и изменения напряжения и переходной э. д. с. (б). $T_e = 0,3$.

$$1 - E'_d = f(t); 2 - U = f(t).$$

значения, соответствующего нормальному режиму, тогда как напряжение вследствие большого угла вылета генератора и к этому моменту составляет около 80% нормального, что сильно снижает нагрузку генератора. При $e_{\max} = 5$ переходная э. д. с. благодаря форсированию возбуждения достигает своего нормального значения уже к моменту отключения короткого замыкания. К моменту же прохождения угла δ через максимум ее значение почти на 10% превышает нормальное.

Напряжение к моменту прохождения угла через максимум удерживается почти на уровне своего нормального значения.

Зависимость предельной по условиям динамической устойчивости величины передаваемой мощности от переходной реактивности и постоянной механической инерции генераторов электропередачи (рис. 1) показана на рис. 4. При уменьшении переходной реактивности с 0,3 до 0,2 и при постоянной механической инерции $M = 10,5$ сек предельная величина передаваемой мощности увеличивается на 12%. Однако с уменьшением переходной реактивности с 0,3 до 0,2 постоянная инерции возрастает с 10,5 до 16 сек. Поэтому предельная величина передаваемой мощности возрастает не на 12, а на 18,9%, т. е. с 975 до 1160 тыс. кВт (см. кривую АБ). В зависимости от конструкции машины кривая АБ может менять свое положение в пределах заштрихованной зоны.

Кривые рис. 4 позволяют найти оптимальные соотношения между x'_d и M для достижения заданной пропускной способности по условиям динамической устойчивости. Например, мощность 1100 тыс. кВт может быть передана

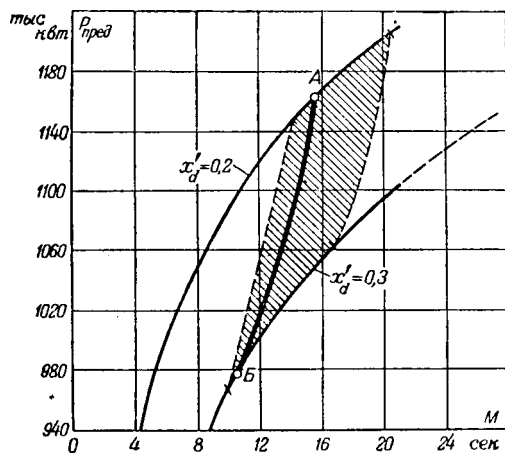


Рис. 4. Зависимость предельной (по условиям динамической устойчивости) величины передаваемой мощности от переходной реактивности и постоянной механической инерции генераторов при $e_{\max} = 3$.

либо при $x'_d = 0,2$ и $M = 11$ сек, либо при $x'_d = 0,3$ и $M = 21$ сек. Следовательно, эти кривые могут быть полезны при конструировании машин. Надо заметить, что уменьшение переходной реактивности увеличивает как динамическую, так и статическую устойчивость, тогда как изменение постоянной механической инерции почти не влияет на статическую устойчивость.

На рис. 5 показана зависимость предельной по условиям динамической устойчивости величины передаваемой мощности от постоянной инерции машин передающей станции при разных «потолочных» напряжениях возбуждения ($x_d = 0,55$, $x'_d = 0,2$, $x_q = 0,37$).

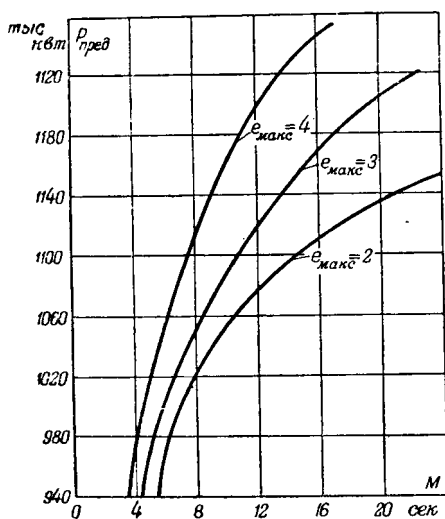


Рис. 5. Зависимость предельной (по условиям динамической устойчивости) величины передаваемой мощности от постоянной механической инерции при разных «потолочных» напряжениях возбуждения ($x_d = 0,55$, $x'_d = 0,2$, $x_q = 0,37$).

двухфазное замыкание на землю у шин 400 кв передающей станции. Короткое замыкание отключалось через 0,12 сек после его возникновения.

Как видно из рис. 5, влияние «потолочного» напряжения возбуждения на предельную по условиям динамической устойчивости величину передаваемой мощности тем больше, чем меньше механическая инерция машин. Это объясняется тем, что при малой механической инерции угол вылета генератора увеличивается быстрее и, следовательно, необходимо быстрее поддержать напряжение генератора, чтобы он не выпал из синхронизма. Кривые рис. 5 позволяют найти при заданной передаваемой мощности оптимальные соотношения между «потолочным» напряжением возбуждения и постоянной инерции. Например, мощность 1100 тыс. кВт может быть передана либо при $M = 14,6$ сек и $e_{\max} = 2$, либо при $M = 10,6$ сек и $e_{\max} = 3$.

На рис. 6 показаны кривые качаний генераторов, имеющих нормальные и улучшенные параметры, а в табл. 2 дается сопоставление эффективности различных мероприятий, улучшающих динамическую устойчивость электропередачи.

Таблица 2

Параметры генераторов			Предельная по условиям динамической устойчивости величина передаваемой мощности	
x'_d	e_{\max}	M , сек	тыс. кВт	%
0,2	4	16	1250	100
0,2	2	16	1110	88
0,2	4	10	1150	92
0,3	4	16	1140	91,2
0,3	4	10	1065	85,2
0,3	2	10	935	74,8

Активные сопротивления при правильном их выборе и использовании являются эффективным и недорогим средством повышения динамической устойчивости. Экономически наиболее целесообразно их включать в нейтраль трансформаторов передающей станции. Однако это мероприятие повышает устойчивость лишь при коротких замыканиях на землю вблизи передающей станции. При удаленных коротких замыканиях оно мало эффективно.

На рис. 7 показаны результаты расчета устойчивости электропередачи, показанной на рис. 1, для случая двухфазного замыкания на землю у шин 400 кв передающей станции при различных значениях активного сопротивления в нейтрали повысительных трансформаторов. При активном сопротивлении в нейтрали трансформаторов, равном 4%, двухфазное замыкание на землю становится почти равноценным замыканию между двумя фазами.

Предлагавшиеся многими авторами различные способы включения активных сопротивлений последовательно с какими-либо элементами электропередачи не дают удовлетворительного решения задачи повышения динамической устойчивости, так как основаны на использовании токов короткого замыкания для создания потерь мощно-

Рис. 6. Кривые качаний генераторов, вызванных двухфазным замыканием на землю у шин передающей станции.

1 — при нормальных параметрах генераторов.

$$M = 10 \text{ сек}, x'_d = 0,3,$$

$e_{\max} = 2, P_{\text{перед}} = 900 \text{ тыс. кВт};$ 2 — при улучшенных параметрах генераторов: $M = 16 \text{ сек}, x'_d = 0,2, e_{\max} = 3,$

$$P_{\text{перед}} = 1150 \text{ тыс. кВт.}$$

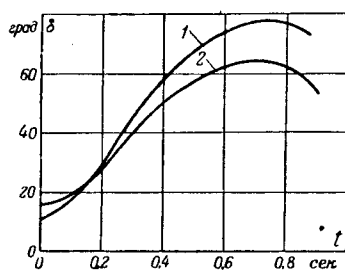
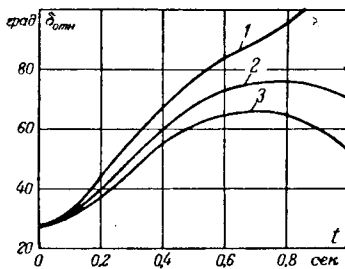


Рис. 7. Кривые качаний генераторов передающей станции, вызванные двухфазным замыканием на землю, при различных активных сопротивлениях в нейтрале повысительных трансформаторов.

1 — $r_{\text{нейтр}} = 0; 2 - r_{\text{нейтр}} = 4\%; 3 - r_{\text{нейтр}} = 8\%.$



сти в указанных сопротивлениях. Но величина тока короткого замыкания в сопротивлении, включенном последовательно, например, с обмоткой генератора в сильной степени зависит от того, где произошло короткое замыкание: в начале или конце линии. Поэтому нагрузка генератора, определяемая потерями в активном сопротивлении, будет различна, тогда как сброс нагрузки, вызванный, например, трехфазным коротким замыканием, как показывают расчеты, практически мало зависит от удаленности короткого замыкания. Задача в известной степени могла бы быть решена путем включения активных сопротивлений в различных точках электропередачи. Но это усложнило бы схему. Кроме того нет таких выключателей, которые могли бы включать сопротивление до отключения короткого замыкания и отключать его по истечении необходимого промежутка времени.

Использование разрядников, шунтирующих статические конденсаторы, позволяет решить задачу повышения динамической устойчивости лишь при коротком замыкании за конденсаторным пунктом. При коротком же замыкании между последним и передающей станцией разрядники не повышают, а понижают устойчивость, так как включенные последовательно с ними активные сопротивления увеличивают нагрузку приемной системы.

Присоединение активных сопротивлений к шинам генераторного напряжения или к шинам высокого напряжения передающей станции дает большие возможности, чем последовательное включение этих сопротивлений. Однако этот способ достаточно не был разработан, и применяющееся в некоторых системах включение сопротив-

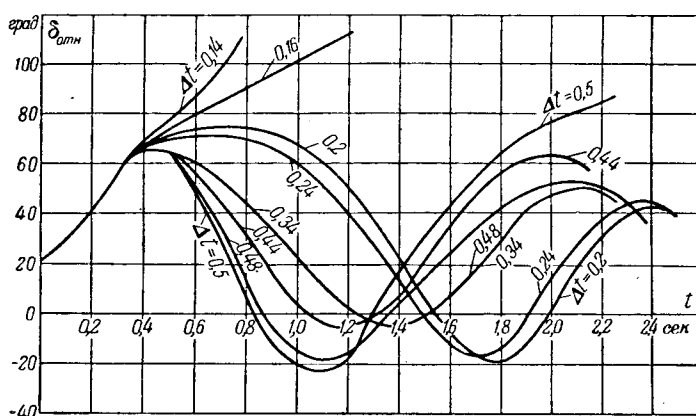


Рис. 8. Кривые качаний генераторов, вызванных трехфазным замыканием, при различной длительности времени, на которое включаются нагрузочные сопротивления.

лений на срок 10 и более сек [Л. 4] как мы увидим ниже, не годится для сильно нагруженных электропередач.

Для электропередачи, показанной на рис. 1, было предложено применить способ электрического торможения генераторов путем включения нагрузочных сопротивлений на время, зависящее от сброса мощности². То обстоятельство, что скорость отключения коротких замыканий во всех случаях одинакова и что, следовательно, кинетическая энергия, накопленная генераторами за время короткого замыкания, пропорциональна сбросу мощности, позволяет создать сравнительно простое устройство, дающее импульс на включение и отключение нагрузочных сопротивлений. В этом устройстве используется реле сброса мощности, а не счетчик энергии.

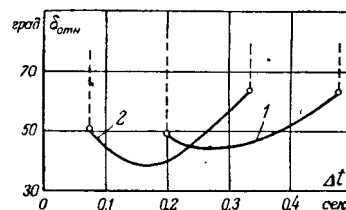


Рис. 9. Зависимость амплитуды второго цикла качаний от времени, на которое включаются нагрузочные сопротивления.

1 — при трехфазном коротком замыкании; 2 — при двухфазном коротком замыкании на землю.
За крайними точками кривых находятся зоны неустойчивой работы.

Путем расчетов динамической устойчивости была установлена величина активного сопротивления, при которой качания машин наименьшие. На рис. 8 показаны кривые качаний генераторов, вызванных трехфазным замыканием, при различной длительности времени, на которое включаются нагрузочные сопротивления этой величины. Оказывается, что при длительности Δt , равной 0,16 сек или менее, генераторы выпадут из синхронизма в первом цикле

² Заявка № 4529 от 30 августа 1951 г. Д. И. Азарьева.

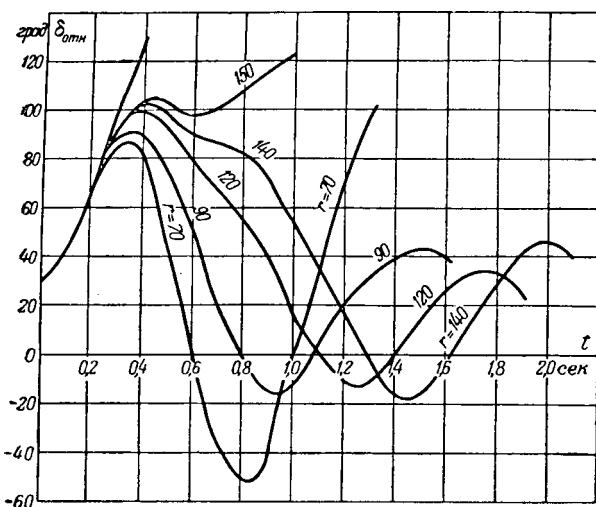


Рис. 10. Кривые качаний, вызванных трехфазным коротким замыканием, при различных нагрузочных сопротивлениях и при времени, на которое они включаются, равном 0,34 сек.

качаний, а при длительности Δt , равной примерно 0,5 сек, — во втором цикле. Минимальная амплитуда качаний во втором цикле будет при значении Δt , равном примерно 0,2 сек. Аналогичные расчеты были проделаны для двухфазного замыкания на землю у шин передающей станции.

На основании расчетов были построены кривые рис. 9, из которых можно установить то время, на которое должны включаться нагрузочные сопротивления при трехфазных замыканиях и двухфазных замыканиях на землю. Для трехфазных замыканий это время лежит в пределах 0,2 ... 0,5 сек, а для двухфазных замыканий на землю — в пределах 0,08 ... 0,35 сек.

Влияние нагрузочного сопротивления на качания машин при неизменном времени, на которое это сопротивление включается, показано на рис. 10 и 11. Расчеты, на основании которых получены эти зависимости, выполнены для машин с постоянной инерции, равной 10 сек, и для меньшей степени продольной компенсации. Из указанных рисунков видно, что устройство торможения не должно давать разброса по мощности или по времени более чем $\pm 40\%$.

Для повышения динамической устойчивости может быть применено и механическое торможение генераторов [Л. 5], к которому должно быть предъявлено такое же требование стабильности торможения, как и к нагрузочным сопротивлениям, т. е. величина момента, создаваемого тормозами, в зависимости от состояния тормозов или длительности торможения, не должна меняться более чем на $\pm 40\%$ заданной величины. Кроме того, при трехфазных коротких замыканиях момент, создаваемый тормозами, должен быть достаточно велик, так как с уменьшением момента, несмотря на увеличенное время торможения, амплитуда качаний будет увеличиваться, а допустимый разброс величины момента уменьшаться.

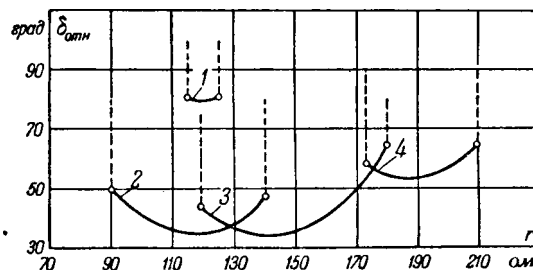


Рис. 11. Зависимость амплитуды второго цикла качаний генераторов, вызванных трехфазным коротким замыканием, от нагрузочного сопротивления при различном времени, на которое сопротивление включается.

1 — $\Delta t = 0,24$ сек; 2 — $\Delta t = 0,34$ сек; 3 — $\Delta t = 0,44$ сек; 4 — $\Delta t = 0,64$ сек. За конечными точками кривых находятся зоны неустойчивой работы.

На рис. 12 показана эффективность нагрузочных сопротивлений при схеме с уменьшенной степенью продольной компенсации (скомпенсировано около 30% индуктивности линии). Как видно, при этой схеме для сохранения устойчивости при трехфазных коротких замыканиях необходимо отключить четыре генератора. Если же на шины 400-кв станции после отключения короткого замыкания включить 120 ом на время 0,34 сек, то отключения генераторов не потребуется, а качания будут меньше.

Торможение генераторов может быть использовано не только для повышения динамической

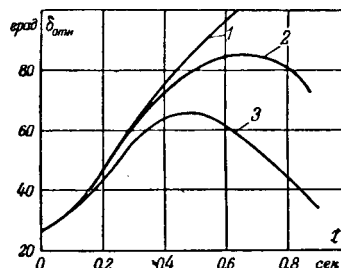


Рис. 12. Кривые качаний генераторов, вызванные трехфазным коротким замыканием.

1 — при отключении на гидроэлектростанции трех генераторов; 2 — при отключении на гидроэлектростанции четырех генераторов; 3 — при включении нагрузочного сопротивления 120 ом на шины 400-кв гидроэлектростанции на время, равное 0,34 сек.

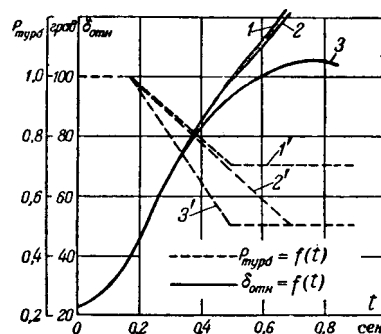


Рис. 13. Влияние на устойчивость при трехфазном коротком замыкании у шин передающей станции уменьшения момента, развиваемого турбиной.

Регуляторы турбины учитываются: 1 — по характеристике 1'; 2 — по характеристике 2'; 3 — по характеристике 3'.

О параметрах главного электропривода непрерывных прокатных станов

Доктор техн. наук Ю. М. ФАЙНБЕРГ

Харьковское отделение ГПИ Тяжпромэлектропроект

Решение задачи создания автоматизированного управления главным электроприводом непрерывных станов является существенным условием повышения производительности и улучшения качества продукции этих установок. Одним из решающих этапов проектирования подобных систем является выбор таких параметров электродвигателей и привода, которые в сочетании с действием регуляторов обеспечивали бы наилучшее протекание режимов управления технологическими процессами.

Каждый прокатный двигатель стана, быстро нагружаясь при входе металла в валки, претерпевает переходный процесс изменения скорости вращения, в результате чего возникает рассогласование угловых перемещений смежных валков. В зависимости от принципа технологической настройки стана в этот период между клетями образуется либо приращение длины («петля») металла, либо возникает растяжение и даже разрыв его.

Характер электромеханических переходных процессов при их естественном протекании существенно отличается от таковых при автоматическом управлении.

Основные функции автоматизированной системы управления главным электроприводом непрерывных станов должны сводиться к созданию и поддержанию в процессе прокатки определенного соотношения скоростей вращения смежных главных двигателей. Это соотношение принимается таким, чтобы независимо от величины преодолеваемого двигателями момента сопротивления приращение петли металла либо растяжение его не превосходили заданных значений.

На рис. 1 приведена упрощенная схема системы, состоящей из прокатного двигателя D , питающегося от ртутного выпрямителя PB , с устройством сеточного управления $УСУ$ и лампового усилителя.

Напряжение u_r тахогенератора $ТГ$, механически соединенного с валом двигателя D , снимается с потенциометра $ДН$ и на сопротивлении P сравнивается с эталонным напряжением u_0 . Разность этих напряжений $u_{ур}$ подается на сетку входной лампы $УН$ электронного усилителя. Элементы последнего включены по схеме моста, одним из плеч которого с переменным сопротивлением является входная лампа $УН$. Выходное напряжение u_0 усилителя создает регулирующий ток i_0 , который воздействует на устройство сеточного управления таким образом, что, например, при уменьшении скорости вращения двигателя напряжение $u_{рв}$ ртутного выпрямителя повышается. Вследствие этого скорость вращения двигателя вновь возрастает, приближаясь к заданному значению n_3 . Сопротивление $R_{кн}$ служит для некоторой компенсации колебаний напряжения. Величина крутизны S лампового усилителя может регулироваться изменением величины сопротивления R_0 . Стабилизация системы осуществляется при помощи сопротивления R_c и конденсатора C , включенных последовательно между анодом и сеткой

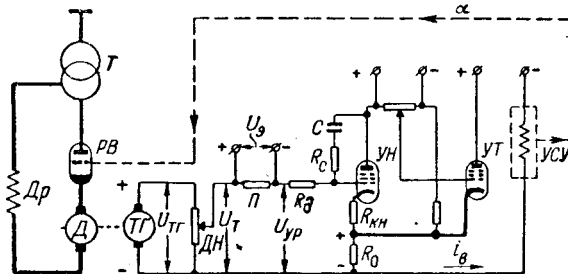


Рис. 1. Упрощенная схема регулирования скорости вращения прокатного двигателя.

устойчивости. Оно позволяет применить трехфазное автоматическое повторное включение одноцепной линии даже при большом цикле этого включения, так как нагрузочное сопротивление (или тормоза) не позволяет генераторам сильно увеличить фазу их роторов.

На рис. 13 показано влияние на устойчивость при трехфазном коротком замыкании у шин передающей станции уменьшения момента, развиваемого турбиной. Ввиду запаздывания и небыстрого снижения момента этот способ оказывается мало эффективным. Кроме того, некоторые гидротурбины при закрытии направляющих аппаратов в первые 0,2 ... 0,3 сек дают не уменьшение, а увеличение момента.

Литература

1. Д. И. Азарьев, В. А. Веников и Н. Н. Соколов. Схемы дальних электропередач большой пропускной способности. Электричество, № 12, 1953.
2. Д. Е. Трофименко. Об эффективности ионного возбуждения в повышении динамической устойчивости дальних передач. Электричество, № 1, 1954.
3. В. А. Веников. Передача электроэнергии переменным током на большие расстояния. Электричество, № 5, 1954.
4. M. François Gahen. Торможение группы генераторов внезапным подключением жидкостных сопротивлений к шинам генераторов. Revue Générale de L'électricité, Joie, 1947.
5. А. В. Богословский. О повышении динамической устойчивости посредством механического торможения гидрогенераторов. Электричество, № 12, 1954.

[12.2.1955]

входной лампы УН. Подобное включение контура $R_c C$ обеспечивает должную устойчивость при больших значениях коэффициента усиления системы [Л. 1] и позволяет легко осуществлять регулировку формы графика переходного процесса.

Основные аналитические зависимости. Для исследования процессов регулирования необходимо выразить аналитически законы, которым подчиняются в переходных режимах следующие величины: а) динамическое и статическое падение скорости вращения двигателя; б) вращающий момент двигателя M_d ; в) приращение петли металла.

Дифференциальное уравнение приращения угловой скорости двигателя. Приведем линеаризованные уравнения основных элементов системы, в которых переменные величины указаны в их приращениях по отношению к значениям, имеющим место при установившемся состоянии процесса прокатки:

уравнение ртутного выпрямителя РВ

$$u_{ps} = -k_1 \alpha; \quad (1)$$

уравнение устройства сеточного управления УСУ

$$\alpha = k_2 i_s; \quad (2)$$

уравнение лампового усилителя

$$(T_1 p^2 + T_2 p + 1) i_s = S (T_3 p + 1) u_{yp}; \quad (3)$$

уравнение тахометрической цепи

$$u_{yp} = k_3 \omega; \quad (4)$$

уравнение двигателя

$$(T_m T_a p^2 + T_m p + 1) \omega = k_4 u_{ps}, \quad (5)$$

где u_{ps} и α — приращение напряжения и приращение угла зажигания ртутного выпрямителя;

i_s — приращение тока в обмотке подмагничивания импульсного трансформатора устройства сеточного управления;

ω — приращение угловой скорости двигателя;

k_1, k_2, k_3 и k_4 — коэффициенты усиления;

S — крутизна усилителя.

Постоянные времени T_1, T_2 и T_3 в уравнении (3) определяются из равенств:

$$T_1 = C T_u (1 + S R_0) (R_c + \mu R_d), \quad (6)$$

$$T_2 = C \{ R_d [S R_0 + \mu (1 + S R_0)] + R_c \} + T_u (1 + S R_0), \quad (7)$$

$$T_3 = C (R_c - R_d), \quad (8)$$

где T_u — электромагнитная постоянная времени обмотки подмагничивания импульсного трансформатора;

μ — коэффициент усиления по напряжению входной лампы УН.

Электромагнитная постоянная времени T_a и электромеханическая T_m , входящие в уравнение (5), определяются из выражений

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}; \quad (9)$$

$$T_m = \frac{\theta R_a}{(c_d \Phi)^2}, \quad (10)$$

где L_a и R_a — индуктивность и эквивалентное сопротивление всей цепи якоря двигателя;

θ — момент инерции вращающихся частей привода, отнесенный к угловой скорости двигателя;

Φ и c_d — магнитный поток и конструктивная постоянная двигателя.

Если принять, что постоянное приращение m_c момента сопротивления при входе металла в валки возникает мгновенно, то закон изменения приращения угловой скорости двигателя выражается дифференциальным уравнением четвертого порядка

$$(p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4) \omega = b m_c \mathbf{1}(t). \quad (11)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{T_5}{T_6}; \quad a_2 = \frac{T_4 T_m + T_1}{T_6 T_m}; \\ a_3 &= \frac{T_m + T_2 + k T_3}{T_6 T_m}; \quad a_4 = \frac{1 + k}{T_6 T_m}, \\ b &= -\frac{1}{T_6 \theta}; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} T_4 &= T_a + T_2; \quad T_5 = T_a T_2 + T_1; \\ T_6 &= T_1 T_a; \quad k = k_1 k_2 k_3 k_4 S. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

При числовых значениях параметров, которые были использованы в рассмотренных ниже вариантах, характеристическое уравнение системы

$$p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0 \quad (14)$$

имеет два действительных корня p_1 и p_2 и два комплексных сопряженных корня $p_{3,4} = \alpha \pm j\gamma$.

Интеграл дифференциального уравнения (11)

$$\omega(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + A e^{\alpha t} \sin(\gamma t + \varphi) + \omega_y. \quad (15)$$

Статическая ошибка регулирования ω_y находится из равенства:

$$\omega_y = \frac{b}{a_4} m_c = -\frac{R_a}{(c_d \Phi)^2 (1 + k)} m_c. \quad (16)$$

Постоянные C_1, C_2 и A также прямо пропорциональны величине приращения момента сопротивления m_c .

Уравнение приращения момента двигателя.

Для получения зависимости, определяющей изменение в процессе регулирования величины момента двигателя $M_d(t)$ или его тока $I_a(t)$,

нет необходимости составлять новое дифференциальное уравнение.

Продифференцировав по времени уравнение (15) и умножив его на θ , можно найти величину динамического момента двигателя $M_{\text{дин}}(t)$. Далее просто получить уравнение для определения приращения момента двигателя:

$$m_{\theta}(t) = \theta \frac{d\omega}{dt} + m_c = \theta \{ p_1 C_1 e^{p_1 t} + p_2 C_2 e^{p_2 t} + A e^{\alpha t} [\alpha \sin(\nu t + \varphi) + \nu \cos(\nu t + \varphi)] \} + m_c. \quad (17)$$

Уравнение приращения петли металла. Величина приращения петли металла $l(t)$ пропорциональна разности площадей, описываемых графиками изменения приращений угловых скоростей ω_n и ω_{n+1} двух смежных двигателей непрерывного стана, т. е. пропорциональна величине рассогласования $\psi(t)$ угловых перемещений двигателей за некоторый отрезок времени t :

$$\psi(t) = \int_0^t \omega_n(t) dt - \int_0^t \omega_{n+1}(t) dt. \quad (18)$$

При работе без натяжения приращение петли металла между двумя смежными клетями может быть найдено из выражения

$$l(t) = \frac{r_a \psi(t) (1 + s_1)}{i_{n+1} \lambda_{n+1}}, \quad (19)$$

где r_a — катающий радиус валков;

i_{n+1} — передаточное отношение редуктора между двигателем и валками;

λ_{n+1} — обжатие металла;

s_1 — опережение металла, величиной которого в первом приближении можно пренебречь. Все величины равенства (19) относятся к последующей из двух смежных клеток.

Если в частном случае предположить, что к моменту входа металла в последующие валки двигатель предшествующей клетки имеет установившуюся скорость вращения, то на основании уравнения (18) величина рассогласования угловых перемещений определится из выражения

$$\psi(t) = (\omega_{y,n} - \omega_{y,n+1})t - \left(\frac{C_1}{p_1} e^{p_1 t} + \frac{C_2}{p_2} e^{p_2 t} - \left(\frac{C_1}{p_1} + \frac{C_2}{p_2} \right) + A \frac{\alpha}{\alpha^2 + \nu^2} \left[\int_0^t \sin(\nu t + \varphi) - \frac{\nu}{\alpha} \cos(\nu t + \varphi) \right] e^{\alpha t} - \left(\sin \varphi - \frac{\nu}{\alpha} \cos \varphi \right) \right\}. \quad (20)$$

Исходные значения параметров электропривода и их вариации. Рассмотрим зависимость процессов регулирования от изменения основных параметров электропривода: а) полного сопротивления якорной цепи R_a ; б) индуктивности якорной цепи L_a ; в) момента инерции привода θ ; г) потока возбуждения двигателя Φ . Установим также влияние на эти процессы параметров цепи стабилизации.

Электродвигатель и привод: $P_n = 870 \text{ кВт}$; $U_n = 600 \text{ в}$; $I_n = 1550 \text{ а}$; $n = 300 \dots 800 \text{ об/мин}$; полное сопротивление якорной цепи $R_a = 7\%_0$; $L_a = 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ гн}$; $\theta_n = 1110 \text{ дж} \cdot \text{сек}^2$; $r_a = 180 \text{ мм}$; $i_{n+1} = 1$; $\lambda_{n+1} = 1,2$.

Регулятор скорости вращения и устройство сеточного управления: общий коэффициент усиления $k = 2020$; $\mu = 325$. $T_a = 0,01 \text{ сек}$; $R_0 = 0,15 \cdot 10^6 \text{ ом}$; $R_0 = 0,4 \text{ ом}$; $R_c = 1 \cdot 10^6 \text{ ом}$; $C = 0,6 \text{ мкф}$.

Исходные значения величин будем варьировать следующим образом:

а) сопротивление якорной цепи R_a уменьшим вдвое; б) момент инерции привода θ увеличим вдвое; в) индуктивность якорной цепи L_a примем равной нулю; г) сопротивление контура стабилизации R_c уменьшим вдвое. Магнитный поток двигателя Φ для всех вариантов принимается соответственно для 300 об/мин и для 800 об/мин.

Зависимость процессов регулирования от величин параметров системы. Пользуясь уравнениями (15), (17), (19) и (20), были исследованы процессы регулирования для указанных выше значений параметров. Во всех случаях величины приращения момента сопротивления принимались равными номинальному моменту двигателя при 300 об/мин и половине его при 800 об/мин.

Влияние величины сопротивления якорной цепи R_a . На рис. 2 и 3 приведены кривые 1 и 2 изменения приращения угловой скорости двигателя $\omega(t)$ для двух значений сопротивления якорной цепи и двух заданных значений скорости вращения n_a , равных 300 и 800 об/мин.

В табл. 1 указаны наибольшие значения вычисленных величин. По условиям устойчивости сопротивление цепи стабилизации R_c было равно $1 \cdot 10^6 \text{ ом}$ при $R_a = 7\%_0$ и $0,5 \cdot 10^6 \text{ ом}$ при $R_a = 3,5\%_0$.

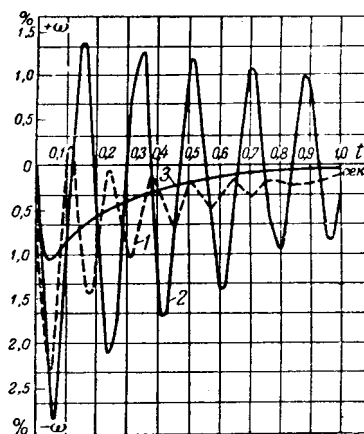
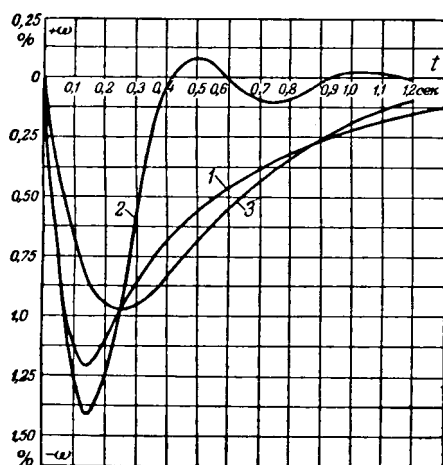


Рис. 2. Влияние сопротивления R_a и индуктивности L_a якорной цепи на приращение угловой скорости двигателя при $n_a = 300 \text{ об/мин}$.

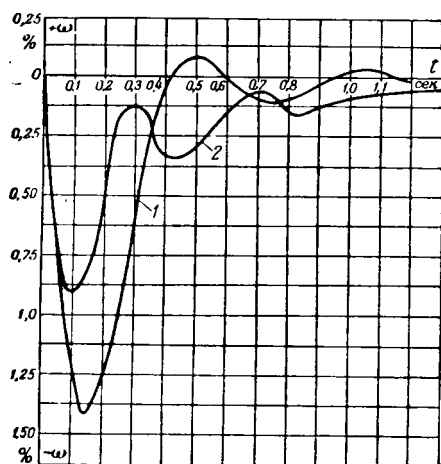
1 — при $R_a = 7\%$, $L_a = L_n$; 2 — при $R_a = 3,5\%$, $L_a = L_n$; 3 — при $R_a = 3,5\%$, $L_a = 0$.

Таблица 1

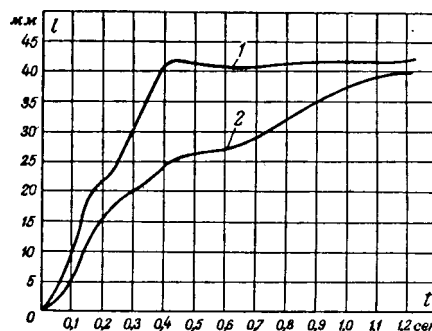
Рисунок	Кривая	Скорость вращения двигателя, об/мин	Сопротивление якорной цепи, %	Наибольшие значения величин		
				динамического падения скорости вращения, %	относительной загрузки двигателя $\frac{m_{\partial}}{m_c}$	приращение длины петли, мм
2	1	300	7	-2,26 +0,18	1,38	26,5
2	2	300	3,5	-2,88 +0,5	1,9	14,5
3	1	800	7	-1,2	1,19	87,6
3	2	800	3,5	-1,42	1,51	44

Рис. 3. Влияние сопротивления якорной цепи $R_{\text{я}}$ и момента инерции привода θ на приращение угловой скорости двигателя при $n_z = 800$ об/мин.

1 — при $R_{\text{я}} = 7\%$, $\theta = 0$; 2 — при $R_{\text{я}} = 3,5\%$, $\theta = 0$; 3 — при $R_{\text{я}} = 7\%$, $\theta = 20$.

Рис. 4. Влияние сопротивления контура стабилизации R_c на приращение угловой скорости двигателя при $n_z = 800$ об/мин.

1 — при $R_c = 0,5 \cdot 10^6$ ом; 2 — при $R_c = 1 \cdot 10^6$ ом.

Рис. 5. Влияние сопротивления контура стабилизации R_c на приращение длины металла $l(t)$.
1 — при $R_c = 0,5 \cdot 10^6$ ом; 2 — при $R_c = 1 \cdot 10^6$ ом.

Из рис. 2, 3 и табл. 1 видно, что с понижением величины сопротивления якорной цепи $R_{\text{я}}$ процесс изменения скорости вращения становится более колебательным, величины динамического падения скорости вращения и относительной загрузки двигателя $\frac{m_{\partial}}{m_c}$ возрастают; однако приращение длины петли при этом уменьшается. Лишь в течение первого полупериода колебаний приращение длины петли несколько больше при пониженной величине сопротивления $R_{\text{я}}$.

Следует отметить, что величина динамического падения скорости вращения существенно зависит от принятой величины сопротивления контура стабилизации R_c . На рис. 4 приведены графики приращений угловой скорости двигателя при $R_{\text{я}} = 3,5\%$ и $n_z = 800$ об/мин для двух значений сопротивления R_c : кривая 1 при $R_c = 0,5 \cdot 10^6$ ом; кривая 2 при $R_c = 1 \cdot 10^6$ ом.

Из рис. 5 видно, что каждой величине сопротивления R_c отвечает свой закон изменения приращения петли металла в переходном процессе. Важно подчеркнуть, что в обоих случаях приращение петли стремится к одному пределу, равному при данных условиях 44 мм (табл. 1). Однако иногда может быть использовано то обстоятельство, что при большей величине сопротивления R_c рост петли происходит медленнее.

Влияние величины момента инерции привода. Графики изменения приращения скорости вращения двигателя при двух значениях момента инерции привода θ приведены на рис. 6 и на рис. 3 для основной и высшей скорости вращения n_z , соответственно равных 300 и 800 об/мин. В табл. 2 указаны наибольшие значения вычисленных величин.

Из сопоставления кривых 1 и 2 на рис. 6, 1 и 3 на рис. 3 и по данным табл. 2 видно, что при увеличенном вдвое моменте инерции привода колебательность процесса уменьшилась, снизилась величина динамического падения скорости вращения, а также несколько уменьшилась величина относительной загрузки двига-

Таблица 2

Рисунок	Кривая	Скорость вращения двигателя, об/мин	Величина момента инерции	Наибольшие значения величин		
				динамическое падение скорости вращения, %	относительной нагрузки двигателя, $\frac{M_d}{M_c}$	приращение длины петли, мм
6	1	300	θ_n	-2,26 +0,18	1,38	26,5
6	2	300	$2\theta_n$	-1,68	1,25	23,6
3	1	800	θ_n	-1,2	1,19	87,6
3	2	800	$2\theta_n$	-0,98	1,18	84

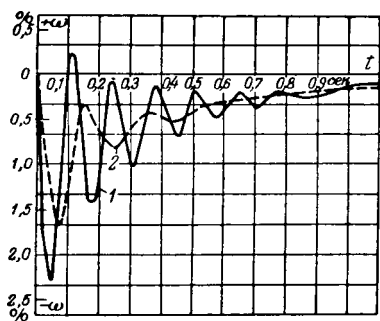


Рис. 6. Влияние момента инерции привода θ на приращение угловой скорости двигателя при $n_3 = 300$ об/мин.
— при $\theta = \theta_n$; 2 — при $\theta = 2\theta_n$.

теля. Однако при увеличении момента инерции привода вдвое приращение петли за время переходного процесса снижается незначительно — на $5 \dots 10\%$. Лишь в самой начальной стадии процесса ($0,05 \dots 0,15$ сек) рост петли более интенсивен при меньшей величине момента инерции.

Влияние индуктивности якорной цепи L_x . Для суждения о влиянии индуктивности якорной цепи сопоставлены процессы регулирования при идеальной безиндуктивной цепи с процессами при исходном значении индуктивности $L_x = L_n = 8,7 \cdot 10^{-4}$ гн.

Для идеальной безиндуктивной цепи закон изменения приращения угловой скорости при толчкообразном приложении момента сопротивления m_c постоянной величины выражается дифференциальным уравнением третьего порядка:

$$(p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3) \omega = b_1 m_c 1(t), \quad (21)$$

коэффициенты которого определяются из следующих равенств:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{T_1 + T_2 \cdot T_m}{T_1 T_m}; & a_2 &= \frac{T_2 + T_m + k T_3}{T_1 T_m}; \\ a_3 &= \frac{1+k}{T_1 T_m}; & b_1 &= -\frac{1}{T_1 \theta}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Графики изменения приращения скорости вращения двигателя при указанных значениях индуктивности якорной цепи L_x приведены на рис. 2 (кривые 2 и 3) для основной скорости вращения n_3 , равной 300 об/мин при величине полного сопротивления якорной цепи $R_x = 3,5\%$.

По условиям стабилизации сопротивление этого контура R_c принято равным $0,5 \cdot 10^6$ ом при полном потоке возбуждения двигателя ($n_3 = 300$ об/мин) и $1 \cdot 10^6$ ом при высшей скорости вращения $n_3 = 800$ об/мин.

В табл. 3 указаны наибольшие значения вычисленных величин также и для высшей скорости вращения $n_3 = 800$ об/мин.

Таблица 3

Рисунок	Кривая	Скорость вращения двигателя, об/мин	Величина индуктивности якорной цепи	Наибольшие значения величин		
				динамическое падение скорости вращения, %	относительной нагрузки двигателя, $\frac{M_d}{M_c}$	приращение длины петли, мм
2	2	300	$L_x = L_n$	-2,88 +0,5	1,9	14,5
2	3	300	$L_x = 0$	-1,12	1,08	14,3
Графики не приводятся		800	$L_x = L_n$	-1,42	1,51	44
		800	$L_x = 0$	-0,97	1,17	43,1

Из сопоставления кривых 2 и 3 на рис. 2 и по данным табл. 3 видно, что снижение величины индуктивности якорной цепи способствует уменьшению динамического падения скорости вращения, резко снижает величину относительной нагрузки двигателя и существенно уменьшает колебательность процесса установления скорости вращения двигателя. Однако приращение длины петли за время переходного процесса оказывается практически независимым от величины индуктивности якорной цепи.

Влияние величины потока возбуждения двигателя. Уменьшение относительной величины потока возбуждения двигателя приводит к возрастанию электромеханической постоянной времени [равенство (10)] и, как это видно, например, из сравнения кривых 1 рис. 2 и 3, сопровождается уменьшением колебательности процесса.

Данные экспериментального исследования. Экспериментальные исследования были проведены на следующей установке¹.

Двигатель и привод: $P_n = 6,6$ квт; $U_n = 440$ в; $n = 700 \dots 2100$ об/мин; $T_n = 0,02375$ сек; $T_m = 1,04$ сек при 1000 об/мин; $\theta_n = 2,65$ Дж сек². Номинальное выпрямленное напряжение было установлено $U_{pвн} = 312$ в, вследствие чего основная скорость вращения двигателя была не 700 об/мин, а 500 об/мин.

¹ Экспериментальное исследование было выполнено А. Б. Зеленовым под руководством автора.

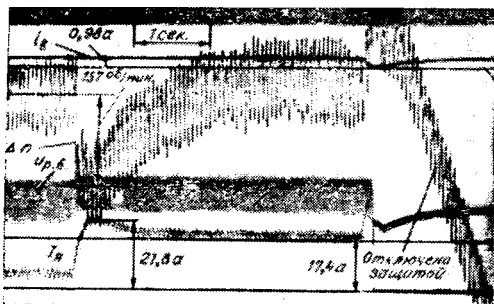


Рис. 7. Осциллограмма работы системы регулирования при толчкообразной нагрузке.

Регулятор скорости: $k = 977$; $\mu = 378$; $T_u = 0,01$ сек; $R_0 = 0,15 \cdot 10^6$ ом; $R_c = 1 \cdot 10^6$ ом; $R_0 = 0,18$ ом; $C = 0,6$ мкф.

При работе двигателя без регулятора с вдвое уменьшенным потоком возбуждения в случае быстрого приложения нагрузки скорость вращения изменялась аperiodически от величины 1065 об/мин при холостом ходе до 904 об/мин при моменте сопротивления на валу $M_c = 0,47 M_n$.

На рис. 7 приведена осциллограмма для тех же данных, но при работе двигателя с регулятором скорости. Для повышения точности на осциллограмме снята не полная величина скорости вращения n_z двигателя, а приращение ее Δn . Измерение Δn было произведено по специальной компенсационной схеме с точностью порядка 0,05% n_z . В данном случае изменение Δn при нагрузке также носило аperiodический характер, причем наибольшая величина динамического падения скорости вращения была равна всего 15,7 об/мин, т. е. составила 1,57% заданной величины $n_z = 1000$ об/мин. Остаточная ошибка не превосходила 0,23...0,3% n_z .

Характер расчетных кривых во всех случаях отвечал экспериментальным графикам осциллограмм, причем значения величин динамического падения на последних превышали расчетные в среднем на 20%. Это происходило потому, что

при расчете не вводились поправки, учитывающие влияние различных наводок и других помех. Последние сказываются более чувствительно на величине статической ошибки.

Выводы. 1. Оценка качества процессов регулирования должна производиться прежде всего, исходя из учета допустимого приращения петли металла, пропорционального площади, ограничиваемой графиками изменения скорости вращения двигателей.

2. Для получения минимума приращения петли выбор параметров прокатных двигателей и привода необходимо выполнять, руководствуясь только условием ограничения предельного значения вращающих моментов, развиваемых двигателями в процессе автоматического управления, а также требованием уменьшения статической ошибки регулирования.

3. Практика оценки качества процессов регулирования, исходя из минимума динамического падения скорости вращения, не может быть признана удовлетворительной, так как этот признак не адекватен основному критерию минимума петли металла. Величина динамического падения скорости вращения должна ограничиваться лишь в той мере, в какой это диктуется выполнением условий, указанных в п. 2.

4. Приращение петли металла почти не изменяется при уменьшении индуктивности якорной цепи; увеличение момента инерции привода вдвое приводит лишь к незначительному уменьшению величины петли. К изменению нормальных величин этих параметров целесообразно прибегать лишь в тех случаях, когда необходимо ограничить максимум вращающего момента двигателя, не увеличивая приращения петли металла.

Литература

1. Е. А. Шкабара. Прецизионная система регулирования скорости двигателя постоянного тока. Сборник научно-технических статей. Институт электротехники АН УССР, вып. 2, 1948.

[4.2 1955]



Расчет токов переходного процесса в трансформаторах тока

Инж. А. А. ВОСКРЕСЕНСКИЙ

Горький

Анализ работы многих современных быстродействующих защит невозможен без учета явлений, возникающих при переходных процессах в трансформаторах тока. В настоящей статье сделана попытка определить ток намагничивания при переходном процессе в трансформаторе тока в зависимости от параметров последнего и конкретных условий электрической сети.

Рассмотрение ведется для наиболее тяжелых из возможных на практике условий включения, когда фазный угол первичного тока равен $\frac{\pi}{2}$,

т. е. когда первичный ток имеет максимальную асимметрию, а вторичная обмотка трансформатора замкнута на чисто активную нагрузку. Индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора не учитывается. При рассмотрении вопроса в первом приближении не учитывается также затухание симметричной составляющей тока короткого замыкания.

Рассматривается широкий диапазон возможных индукций в сердечнике трансформатора с учетом нелинейности его магнитной характеристики.

Изменение потока в сердечнике при переходном процессе может быть выражено аналитически, если пренебречь намагничивающим током трансформатора. Это будет означать, что мы рассматриваем идеальный трансформатор, для создания потока в сердечнике которого не требуется намагничивающего тока.

Изменение первичного тока такого трансформатора может быть задано следующим уравнением:

$$i_1 = I_m \left[\sin(\omega t + \alpha) - \sin \alpha e^{-\frac{t}{T}} \right], \quad (1)$$

где I_m — амплитуда установившегося тока;

α — фазный угол установившегося тока в момент включения (при условиях, принятых нами, $\alpha = \frac{\pi}{2}$);

T — постоянная времени первичной цепи.

Ток его вторичной обмотки

$$i_2 = i_1 \frac{w_1}{w_2}, \quad (2)$$

где w_1 и w_2 — числа витков соответственно первичной и вторичной обмоток. При чисто активной нагрузке э. д. с. вторичной обмотки

$$e_2 = i_2 r_2 = i_1 \frac{w_1}{w_2} r_2. \quad (3)$$

Так как для всякой индуктивной катушки э. д. с.

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8},$$

то изменение потока во времени выразится следующим образом:

$$\Phi = -\frac{10^8}{w} \int_0^t e dt + C, \quad (4)$$

где C есть величина потока при $t = 0$.

После подстановки в выражение (4) тока i_1 из уравнения (1) и э. д. с. из уравнения (3) выражение потока для частного случая, когда включение производится при фазном угле тока $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и намагничивание начинается с нуля ($t = 0, \Phi = 0$), примет следующий вид:

$$\Phi = -10^8 \frac{w_1}{w_2} I_m \left[\frac{r_2}{\omega} \sin \omega t - r_2 T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right] \quad (5)$$

Кривые изменения потока в соответствии с выражением (5) и изменения первичного тока в соответствии с выражением (1) показаны на рис. 1.

Как следует из выражения (5), магнитный поток в сердечнике трансформатора при переходном процессе содержит две составляющие: периодическую с постоянной амплитудой, изменяющуюся по закону синуса, и постоянно направленную, возрастающую с момента возникновения процесса по закону экспоненты. Соответственно потоку ток намагничивания действительного трансформатора должен содержать также две составляющие: пе-

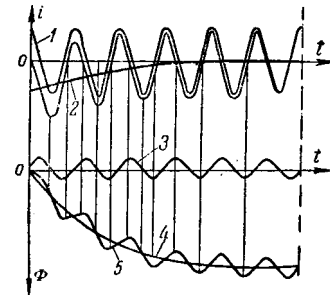


Рис. 1. Кривые изменения магнитного потока и первичного тока при переходном процессе в идеальном трансформаторе.

1 — установившийся ток; 2 — постоянная составляющая первичного тока; 3 — магнитный поток установившегося режима; 4 — магнитный поток, обусловленный своим происхождением несимметрии первичного тока; 5 — результирующий магнитный поток.

риодическую и постоянно направленную (апериодический ток).

При рассмотрении переходного процесса в действительном трансформаторе в первую очередь важно выяснить связь между апериодической составляющей тока первичной обмотки и током намагничивания.

Для каждого трансформатора обязательно соотношение токов

$$i_1 \frac{w_1}{w_2} - i_2 = i_\mu \frac{w_1}{w_2}, \quad (6)$$

в которое в отличие от уравнения (2) для идеального трансформатора входит намагничивающий ток i_μ , идущий на создание магнитного потока. Соотношение (6) будет справедливо и для апериодических составляющих токов.

Апериодическая составляющая тока в первичной обмотке не зависит от параметров трансформатора тока и затухает с постоянной времени первичной цепи:

$$i_{01} = I_m e^{-\frac{t}{T}} \quad (7)$$

Апериодическая составляющая тока намагничивания возрастает по мере возрастания постоянно направленной составляющей потока. Поэтому при любых параметрах процесса должен наступить момент, когда апериодическая составляющая тока намагничивания будет равна апериодической составляющей тока первичной цепи. Этот момент наступит тогда, когда апериодическая составляющая тока вторичной цепи трансформатора спадет до нуля и прекратится нарастание постоянно направленной составляющей потока в сердечнике трансформатора.

По мере дальнейшего затухания апериодической составляющей первичного тока постоянно направленной составляющей потока в сердечнике трансформатора вначале частично, а затем полностью становится свободной и затухает с временем, которое определяется параметрами магнитной характеристики трансформатора и его вторичной цепи. Уменьшение магнитного потока в сердечнике трансформатора вновь обусловит

возникновение тока постоянного направления во вторичной обмотке трансформатора. Направление этого тока будет обратным направлению аperiodической составляющей тока во вторичной обмотке в начальной части процесса. Изменение аperiodического тока вторичной обмотки во времени после перехода его через нуль вначале определяется постоянной времени первичной цепи, индуктивностью вторичной обмотки трансформатора, соответствующей переходному процессу, и сопротивлением вторичной цепи, а в дальнейшем, когда аperiodическая составляющая в первичном токе полностью затухнет, только двумя последними параметрами.

Таким образом, переходный процесс в трансформаторе тока характеризуется двумя различными процессами: а) процессом нарастания потока постоянного направления в сердечнике трансформатора и б) процессом сначала частичного, а затем полного спада свободного потока.

Наличие в трансформаторе со стальным сердечником потока постоянного направления, а также появление в токе намагничивания аperiodической составляющей, вследствие нелинейности магнитной характеристики трансформатора обуславливают изменение амплитуды периодической составляющей тока намагничивания. Последняя косвенным образом влияет на величину постоянной составляющей тока намагничивания. Являясь частью приведенного первичного тока, периодическая составляющая тока намагничивания уменьшает ток вторичной цепи. Соответственно изменяется амплитуда индукции периодической составляющей магнитного поля.

Как видно из уравнения (5), амплитуда периодической составляющей потока идеального трансформатора при переходном процессе не изменяет своей величины. В действительном же трансформаторе амплитуда этой составляющей потока по мере нарастания потока постоянного направления уменьшается и достигает минимальной величины в момент, когда указанный поток проходит через максимальное значение. Затем по мере затухания потока постоянного направления амплитуда периодической составляющей потока (при постоянстве периодической составляющей тока первичной цепи) возрастает и достигает начального значения в момент перехода к установившемуся режиму. Степень изменения амплитуды периодической составляющей потока определяется мощностью трансформатора тока и насыщением сердечника. Учитывать это изменение в практических расчетах необходимо тогда, когда величина тока намагничивания становится соизмеримой с приведенной величиной первичного тока.

Для вычисления поправки на долю приведенной величины аperiodической составляющей первичного тока, которая идет на создание магнитного потока в трансформаторе со стальным сердечником, необходимо выделить аperiodическую составляющую тока намагничивания. Эта задача нами решена аналитически в предполо-

жении, что магнитная характеристика трансформатора удовлетворяет выражению [Л. 2]

$$H = me^{aB}, \quad (8)$$

где m и a — постоянные стали.

Так как намагничивающая сила пропорциональна току, а магнитный поток Φ пропорционален индукции, уравнение (8) можно переписать в следующем виде:

$$i = me^{a\Phi}, \quad (9)$$

где m и a должны рассматриваться как постоянные, связанные с применением уравнения (8) к конкретной магнитной характеристике трансформатора. В дальнейшем произведение $a\Phi$ понимается как величина, характеризующая численное значение индукции.

Ранее при исследовании токов переходного процесса в электрических цепях со сталью [Л. 3] нами были даны аналитические выражения для вычисления составляющих тока намагничивания, когда на постоянный поток намагничивания накладывается циркулирующий магнитный поток, вызванный переменным напряжением на зажимах цепи. Эти выражения даны в предположении, что в расчетный момент времени величина потока постоянного направления остается неизменной, а циркулирующий переменный поток изменяется по закону косинуса. В общем виде задача сводится к разложению в гармонический ряд кривой тока при изменении потока по уравнению

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t + \Phi_0,$$

где Φ_m — амплитуда переменной составляющей потока;

Φ_0 — поток постоянного направления в магнитной цепи, удовлетворяющей выражению (9).

Выражения для составляющих тока при $\Phi_0 = \Phi_m$, т. е. при изменении потока по уравнению

$$\Phi = \Phi_m (1 - \cos \omega t),$$

имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= \frac{m}{\pi} (0,25 + 1,25e^{1,84a\Phi_m} + 1,5e^{0,61a\Phi_m}); \\ I_{1m} &= \frac{2m}{\pi} (0,25 + 0,68e^{0,35a\Phi_m} - 0,93e^{1,88a\Phi_m}); \\ I_{2m} &= \frac{2m}{\pi} (0,25 + 0,75e^{1,88a\Phi_m} - e^{1,4a\Phi_m}); \\ I_{3m} &= \frac{2m}{\pi} (0,262 + 0,524e^{1,5a\Phi_m} - \\ &\quad - 0,262e^{2a\Phi_m} - 0,524e^{0,5a\Phi_m}); \\ I_{4m} &= \frac{2m}{\pi} (0,25 + 0,75e^{1,73a\Phi_m} - e^{1,56a\Phi_m}); \\ &\dots \dots \dots \text{и т. д.} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

При $\Phi_0 > \Phi_m$ выражения составляющих будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= \frac{m}{\pi} e^{a(\Phi_0 - \Phi_m)} (0,25 + 1,25 e^{1,84a\Phi_m} + \\ &\quad + 1,5 e^{0,61a\Phi_m}); \\ I_{1m} &= \frac{2m}{\pi} e^{a(\Phi_0 - \Phi_m)} \times \\ &\quad \times (0,25 + 0,68 e^{0,35a\Phi_m} - 0,93 e^{1,88a\Phi_m}); \\ &\dots \dots \dots \text{и т. д.} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Характер изменения составляющих кривой тока показан на диаграмме рис. 2. Значения амплитуд составляющих I_k даны в относительных единицах. За единицу тока принята амплитуда сложной кривой $I_{\text{пук}}$. Численные значения амплитуд составляющих сложной кривой тока, определяемые на основании выражений (10) и (11), позволяют найти мгновенные значения гармоник кривой тока для данного значения потока постоянного направления в зависимости от фазного угла основной частоты.

Характер изменения магнитного потока в трансформаторе со стальным сердечником при переходном процессе можно установить, если время, в течение которого протекает переходный процесс, разбить на ряд последовательных интервалов и допустить, что в пределах малого интервала времени Δt апериодическая составляющая тока намагничивания следует линейному закону нарастания:

$$i_{0t_2} = i_{0t_1} + k\Delta t, \quad (12)$$

где

$$k = \frac{i_{0t_2} - i_{0t_1}}{\Delta t}.$$

Тогда на основании отдельно взятых величин апериодических составляющих первичного тока и тока намагничивания с учетом выражений (3), (4) и (6) можно написать уравнение для изменения потока постоянного направления в пределах расчетного интервала времени:

$$\Delta\Phi_0 = -10^8 \frac{\omega_1}{\omega_2^2} \int_{t_1}^{t_2} r(i_{0t_1} - i_{0\mu}) dt, \quad (13)$$

где i_{0t_1} — апериодическая составляющая первичного тока, определяемая выражением (7), а $i_{0\mu}$ — апериодическая составляющая тока намагничивания, определяемая выражением (12).

В результате вычисления интеграла в правой части выражения (13) получим:

а) для переменной i_{0t_1} , определяющей приращение потока постоянного направления в идеальном трансформаторе:

$$\Delta\Phi_{u\partial} = -10^8 \frac{\omega_1}{\omega_2^2} I_m r_2 T e^{-\frac{t_1}{T}} (1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}); \quad (14)$$

б) для переменной $i_{0\mu}$, определяющей поправку к приращению потока в идеальном трансформаторе на долю приведенной апериодической

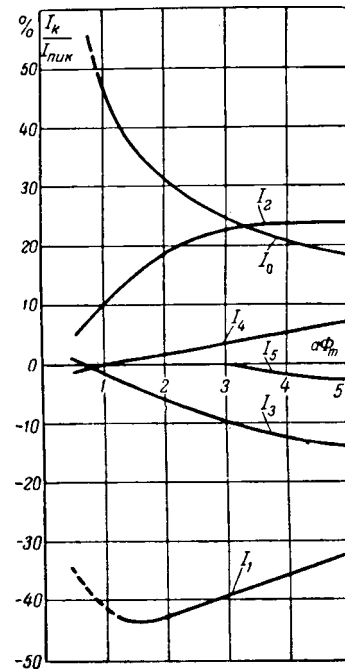


Рис. 2. Диаграмма изменения составляющих сложной кривой тока.

составляющей первичного тока, идущей на создание потока постоянного направления:

$$\Delta\Phi_{\mu} = 10^8 \frac{\omega_1}{\omega_2^2} r_2 \left(i_{0t_1} \Delta t + \frac{k\Delta t^2}{2} \right). \quad (15)$$

Если в выражении (11) для апериодической составляющей тока намагничивания положить:

$$\frac{m}{\pi} (0,25 + 1,25 e^{1,84a\Phi_m} + 1,5 e^{0,61a\Phi_m}) = k_{i\mu} \quad (16)$$

и считать, что в пределах расчетного интервала $\Delta\Phi_{u\partial} \gg \Delta\Phi_{\mu}$, то выражения для токов в начале и конце расчетного интервала: i_{0t_1} и i_{0t_2} можно записать следующим образом:

$$i_{0t_1} = k_{i\mu} e^{a(\Phi_0 - \Phi_m)};$$

$$i_{0t_2} = k_{i\mu} e^{a(\Phi_0 + \Delta\Phi_{u\partial} - \Phi_m)}.$$

Тогда с учетом выражения (12) будем иметь:

$$k = \frac{i_{0t_1} (e^{a\Delta\Phi_{u\partial}} - 1)}{\Delta t}$$

и

$$\Delta\Phi_{\mu} = 0,5 \cdot 10^8 \frac{\omega_1}{\omega_2^2} r i_{0t_1} \Delta t (e^{a\Delta\Phi_{u\partial}} + 1). \quad (17)$$

Выражения (14) и (17) являются расчетными.

Задавшись приращением времени Δt и определив соответствующие приращения потока, по заданной функции $i_1 = f(t)$ можно построить зависимость $\Phi_0 = f(t)$ от момента возникновения процесса ($t = 0$) до достижения потоком Φ_0 максимального значения (точка перегиба кривой потока). Момент достижения потоком Φ_0 максимального значения определяется равенством

величины $\Delta\Phi_{ad}$ и $\Delta\Phi_{\mu}$. Для точки перегиба кривой потока Φ_0 характерно также равенство аperiodических составляющих тока намагничивания и первичного тока:

$$i_{0\mu} = k_{i\mu} e^{a(\Phi_0 - \Phi_m)} = I_m e^{-\frac{t_{kp}}{T}}, \quad (18)$$

где t_{kp} — время, определяющее момент, соответствующий точке перегиба.

Равенство (18) позволяет проконтролировать правильность расчетов, произведенных методом последовательных интервалов.

Воспользовавшись аналитическим выражением магнитной характеристики трансформатора (9), по найденной величине потока легко определить ток намагничивания

$$i_{\mu} = m e^{a(\Phi_0 - \Phi_m \sin \omega t)}, \quad (19)$$

где

$$\Phi_m = 10^8 \frac{\omega_1}{\omega_2^2} I_m \frac{r_2}{\omega}. \quad (20)$$

При помощи уравнений (11) можно определить изменение гармоник всех кратностей сложной кривой тока намагничивания при переходном процессе. Для этого аналогично выражению (16) необходимо вычислить коэффициент $k_{i\mu k}$. Например, для первой гармоники тока

$$k_{i\mu 1} = \frac{2m}{\pi} (0,25 + 0,68e^{0,35a\Phi_m} - 0,93e^{1,88a\Phi_m}).$$

Постоянные m и a , входящие в формулы (10), (11), (16) и (17), определяются по произвольным точкам рабочей области магнитной характеристики, как показано в статье А. А. Воскресенского и Е. Ф. Воскресенской [Л. 2]. Для практических расчетов удобнее брать зависимость тока намагничивания от индукции: $i_{\mu} = f(B)$. Это не изменит структуры приведенных выше соотношений, в них необходимо лишь ввести сечение стали сердечника трансформатора Q . Для магнитной характеристики конкретного трансформатора постоянные a и m определяются следующим образом [Л. 2]:

$$a = 2,3 \frac{\lg i'' - \lg i'}{B'' - B'}; \quad (21)$$

$$m = \frac{i''}{e^{aB''}}, \quad (22)$$

где i' , B' и i'' , B'' — координаты двух произвольных точек магнитной характеристики.

Влияние гистерезиса, обуславливающее остаточную индукцию в сердечнике трансформатора, учитывается при расчете тем, что поток считается возрастающим не с нуля, а с некоторого значения, соответствующего остаточной индукции (согласно опытным данным 6 000... 7 000 гс). В дальнейшем расчет процесса ведется методом последовательных интервалов в соответствии с выражениями (14) и (17). Для точки перегиба кривой потока Φ_0 сохраняется условие

равенства аperiodических составляющих тока намагничивания и первичного тока (18).

Чтобы получить высокую точность расчета, следовало бы учесть влияние гистерезиса, обуславливающее отступление частотного цикла от основной кривой намагничивания. Кроме того, следовало бы учесть уменьшение амплитуды периодической составляющей индукции (aB_m), связанное с тем, что часть периодической составляющей первичного тока идет на создание периодической составляющей потока. При этом преобладающее влияние оказывает обусловленная током гистерезиса активная составляющая тока намагничивания, которая при активной нагрузке вторичной обмотки трансформатора находится в фазе со вторичным током. Таким образом, с одной стороны, учитывалось бы возрастание тока намагничивания за счет остаточного поля, пропорциональное $e^{a\Phi}$, а с другой, — уменьшение тока намагничивания, определяемое коэффициентом $k_{i\mu}$ и также пропорциональное $e^{a\Phi}$.

Однако, имея в виду приближенность расчетов, а также то, что влияния на результат расчета остаточного потока частотного цикла перемагничивания и уменьшения амплитуды периодической составляющей потока взаимно компенсируются, целесообразно отказаться от учета в расчетах двух указанных явлений. Корректировать величину периодической составляющей индукции aB_m следует лишь тогда, когда первая гармоника тока намагничивания достигнет 30% приведенной величины периодической составляющей первичного тока.

На основании выражения (5) максимальное значение индукции постоянного направления в сердечнике идеального трансформатора при $t = \infty$ определяется следующим образом:

$$B_{0un} = 10^8 \frac{\omega_1}{\omega_2^2 Q} I_m r_2 T. \quad (23)$$

В зависимости от параметров переходного процесса (I_m , r , T) для идеального трансформатора могут быть получены такие значения индукции, которые физически невозможны в действительном трансформаторе со стальным сердечником. Поэтому при расчете переходного процесса в действительном трансформаторе вводится поправка на величину токов намагничивания, величина которой, как следует из выражений (13)...(15) и (18), определяется теми же параметрами переходного процесса и магнитной характеристикой трансформатора.

В результате расчетов, охватывающих широкий диапазон индукций и различные сочетания параметров переходного процесса I_m , r , T , установлено, что соответствующее точке перегиба кривой потока максимальное значение индукции в стали сердечника трансформатора находится в строго определенном соотношении с величиной максимальной индукции, подсчитанной для идеального трансформатора. Это соотношение зависит от параметров переходного процесса. Максимальная индукция в стали

сердечника действительного трансформатора, подсчитанная методом последовательных интервалов на основании выражений (14), (16) и (17), удовлетворяет уравнению:

$$B_{0dm} = B_{0um} e^{-2I_{2m} r T} \left[1 + 0,125 I_{2m}^{1/2} \left(\frac{T}{r} \right)^{1/3} \right], \quad (24)$$

где B_{0um} — максимальное значение индукции постоянного направления для идеального трансформатора (23);

I_{2m} — амплитуда приведенного первичного тока;

r — сопротивление вторичной цепи трансформатора;

T — постоянная времени первичной цепи трансформатора.

Время t_{kp} (18) определяется по величине индукции в точке перегиба кривой потока

$$t_{kp} = T \left[\ln \frac{I_{2m}}{k_{ip}} - a(B_{0dm} - B_m) \right]. \quad (25)$$

Максимальный пик тока намагничивания при переходном процессе имеет место в момент совпадения направления полуволны периодической составляющей индукции B_m с индукцией постоянного направления. Этот момент относительно точки перегиба кривой потока постоянного направления может иметь произвольный (в пределах 360°) угол. Для вычисления амплитуды полуволны или гармоники кривой тока надо знать изменение потока во времени. Для упрощенных расчетов можно пользоваться закономерностью, аналогичной закономерности для идеального трансформатора с поправкой, определяющей окончание увеличения потока при $t = t_{kp}$:

$$B_{0t} = B_{0dm} \left(1 - e^{-\frac{t t_{kp}}{T(t - t_{kp})}} \right). \quad (26)$$

Если изменение индукции B_{0t} подсчитать при помощи уравнения (26) и методом последовательных интервалов, то результаты первого и второго подсчетов приблизительно будут совпадать.

Остаточная индукция в сердечнике трансформатора, обусловленная гистерезисом, достаточно точно учитывается путем упрощенного расчета при помощи выражения (24), которое

должно быть дополнено множителем $e^{\frac{B_{0cm}}{2B_{0um}}}$, определяющим поправку к максимальной индукции в точке перегиба кривой потока постоянного направления при отсутствии остаточной индукции.

Время, в течение которого поток нарастает до точки перегиба кривой, вычисляется на основании выражения (25). Индукция B_{0dm} подсчитывается при помощи выражения (24), дополненного указанным множителем.

Изменение потока во времени при наличии остаточной индукции вычисляется на основании

выражения (26) с введением в него поправки на величину остаточной индукции

$$B_{0t} = B_{0cm} + (B_{0dm} - B_{0cm}) \left(1 - e^{-\frac{t_{kp} t}{T(t_{kp} - t)}} \right). \quad (27)$$

Выражения (24) ... (27) дают общее решение для вычисления тока намагничивания трансформатора тока по заданным параметрам переходного процесса I_m , r , T и магнитной характеристике трансформатора.

Пример расчета для конкретного трансформатора дан в приложении.

Выводы. 1. Внесение в уравнение идеального трансформатора последовательных поправок на ту часть аperiodической составляющей полного тока, которая отвечает в ветвь намагничивания, позволяет установить математическую связь указанного уравнения с постоянными нелинейной магнитной характеристики и получить общее решение задачи расчета переходного процесса в трансформаторе тока.

2. Достаточно точное совпадение магнитной характеристики трансформатора с ее аналитическим выражением, а также достаточная точность связанных с характеристикой уравнений гармонического ряда кривой тока, в частности постоянной составляющей тока (суммарная погрешность по току 10 ... 15%), позволяет получить приемлемые для инженерной практики результаты расчета.

Допущение о неизменности амплитуды периодической составляющей потока при переходном процессе при условии, что симметричная составляющая тока короткого замыкания не затухает, не окажет существенного влияния на результаты расчета, если периодическая составляющая тока намагничивания (при активной нагрузке вторичной цепи) не превышает 20 ... 30% полного тока.

Общая погрешность, обусловленная собственной методикой расчета, будет, как правило, меньше погрешностей, связанных с неизбежной неточностью исходных данных, т. е. неточностью величин токов короткого замыкания, постоянной времени первичной цепи и остаточной индукции.

3. Неизбежная неточность в исходных данных не оправдывает затрат времени на точный расчет методом последовательных интервалов. В то же время вытекающий из метода последовательных интервалов упрощенный способ расчета достаточно точен. Его применение в практических расчетах избавит от необходимости пользоваться совершенно необоснованным коэффициентом 2 к току короткого замыкания, который обычно применяется в тех расчетах, где необходимо учитывать переходный процесс.

Приложение. Пример расчета тока трансформатора в процессе нарастания потока. Пусть требуется выполнить методом последовательных интервалов проверочный расчет тока намагничивания трансформатора тока, который осциллографировался в лаборатории им. Смурова Н. П. Поташевым [Л. 1].

Трансформатор имел следующие данные: сечение жезла $Q = 20 \text{ см}^2$; длина магнитного пути — 44,5 см; число

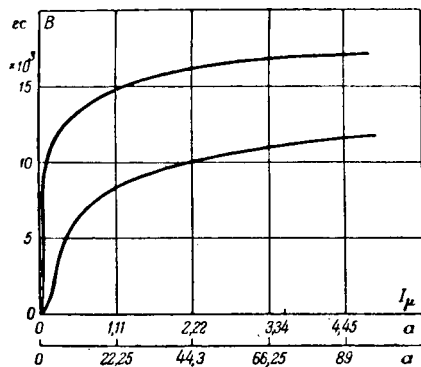


Рис. 3. Кривые намагничивания трансформатора тока

$$I_{\mu} = \frac{H \cdot 44,5}{100}.$$

витков обмоток $w_1 = w_2 = 100$; сопротивление вторичной цепи 0,3 ом. Магнитная характеристика трансформатора приведена на рис. 3. Установившееся значение первичного тока 25 а. Постоянная времени первичной цепи $T = 0,02$ сек.

1. Постоянные магнитной характеристики (рис. 3), полученные из выражений (21) и (22) по ее точкам, расположенным в области насыщения и имеющим следующие координаты:

$$B' = 11 \cdot 10^3; \quad I_{\mu}' = 3,5$$

и

$$B'' = 17 \cdot 10^3; \quad I_{\mu}'' = 75;$$

$$a = 2,3 \frac{\lg 75 - \lg 3,5}{17 \cdot 10^3 - 11 \cdot 10^3} = 0,5 \cdot 10^{-3};$$

$$m = \frac{75}{e^{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 17 \cdot 10^3}} = 0,015.$$

2. Амплитуда периодической составляющей индукции (20):

$$B_m = 10^8 \frac{100}{1002 \cdot 20} \cdot 25 \cdot \sqrt{2} \frac{0,3}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,68 \cdot 10^3 \text{ гс}.$$

3. Максимальное значение индукции постоянного направления для идеального трансформатора (23):

$$B_{0um} = -10^8 \frac{100}{1002 \cdot 20} \cdot 25 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,3 \cdot 0,02 = 10,5 \cdot 10^3 \text{ гс}.$$

4. Коэффициент для аperiodической составляющей в гармоническом ряде кривой тока намагничивания (16):

$$aB_m = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,68 \cdot 10^3 = 0,84;$$

$$k_{i\mu} = \frac{0,015}{3,14} (0,25 + 1,25e^{1,84 \cdot 0,84} + 1,5e^{0,61 \cdot 0,84}) = 0,041.$$

5. Поправка к приращению индукции в идеальном трансформаторе (17):

$$\Delta B_{\mu} = 0,5 \cdot 10^8 \frac{100}{1002 \cdot 20} \cdot 0,3 \cdot i_{01} \cdot \Delta t (e^{0,005 \cdot \Delta B_{u\partial}} + 1) = 7,5 \cdot 10^3 i_{01} \cdot \Delta t (e^{0,005 \Delta B_{u\partial}} + 1).$$

6. Приращение индукции в идеальном трансформаторе (14):

$$\Delta B_{u\partial} = 10,5 \cdot 10^3 e^{-\frac{t_1}{T}} (1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}).$$

7. Расчетная таблица.

8. Результаты расчета:

а) Момент, соответствующий точке перегиба кривой потока, наступает по истечении 0,06 сек с момента возникновения процесса. Индукция постоянного направления в точке перегиба равна 9130 гс. Этому значению индукции соответствует постоянная составляющая тока намагничивания 1,7 а. Соответствующая точке перегиба приведенная величина аperiodической составляющей первичного тока $i_0 = 25 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\frac{0,06}{0,02}} = 1,72$ а.

б) Ближайшее к точке перегиба совпадение полу волны переменной составляющей потока с кривой потока постоянного направления имеет место при $t = 0,055$ сек. Максимальное значение индукции 10790 гс. Амплитуда тока намагничивания 3,31 а. Результаты расчета хорошо совпадают с опытом: $B = 10700$ гс $I_{\mu} = 2,9$ а.

* *

Пусть требуется выполнить проверочный расчет тока намагничивания того же трансформатора тока упрощенным способом. Фазный угол установившегося тока в момент включения $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

1. Постоянные магнитной характеристики

$$a = 0,5 \cdot 10^{-3}, \quad m = 0,015.$$

2. Амплитуда периодической составляющей индукции

$$B_m = 1,68 \cdot 10^3 \text{ гс}.$$

Время от начала процесса t	0	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055	0,06
$\frac{t}{T}$	0	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
$e^{-\frac{t}{T}}$	1	0,606	0,472	0,368	0,286	0,223	0,174	0,135	0,105	0,082	0,064	0,049
$\Delta B_{u\partial}$	0	4140	1410	1088	855	665	517	405	315	234	190	147
ΔB_{μ}	0	10	16	29	45	64	83	100	115	122	125*	127*
$\Delta B_{u\partial} - \Delta B_{\mu}$	0	4130	1394	1059	810	601	434	305	200	112	65	20
B_0	0	4130	5524	6583	7393	7994	8428	8733	8933	9045	9110	9130
$B_0 - B_m$	—	2450	3844	4903	5713	6314	6748	7053	7253	7365	7430	7450
$e^a (B_0 - B_m)$	—	3,42	6,82	11,6	17,4	23,5	29,2	34	37,5	39,6	41	41,5
$i_{0\mu}$	—	0,14	0,28	0,47	0,715	0,965	1,2	1,39	1,54	1,62	1,68	1,7
$a (B_0 - B_m \sin \omega t)$	—	4130	7204	6583	5713	7994	10108	8733	7253	9045	10790	9130
i_{μ}	—	0,12	0,55	0,41	0,26	0,82	2,35	1,18	0,55	1,38	3,31	1,44

* В связи с тем, что величины $\Delta B_{u\partial}$ и ΔB_{μ} почти совпадают при подсчете $e^{a \Delta B_{u\partial}}$, принималась величина ΔB_{μ} .

3. Максимальное значение индукции постоянного направления для идеальной трансформатора

$$B_{\text{шт}} = 10,5 \cdot 10^3 \text{ гс.}$$

4. Коэффициент апериодической составляющей в гармоническом ряде сложной кривой тока намагничивания

$$k_{\text{ип}} = 0,041.$$

5. Максимальное значение индукции постоянного направления (24):

$$B_{\text{одт}} = 10,5 \cdot 10^3 e^{-2 \sqrt{2 \cdot 25 \cdot 0,3 \cdot 0,02}} \times \\ \times \left[1 + 0,125 (25 \sqrt{2})^{\frac{1}{2}} \left(\frac{0,02}{0,3} \right)^{\frac{1}{3}} \right] = 9050 \text{ гс.}$$

6. Время, соответствующее точке перегиба кривой индукции постоянного направления (25):

$$t_{\text{кр}} = 0,02 \left[\ln \frac{25 \cdot \sqrt{2}}{0,041} - 0,5 \cdot 10^{-3} (9050 - 1680) \right] = \\ = 0,062 \text{ сек.}$$

7. Амплитуды полуоволн тока намагничивания при $\frac{3\pi}{2}$, $\frac{7\pi}{2}$, $\frac{11\pi}{2}$ (19), (26):

$$B_{0,015} = 9050 \left[1 - e^{\frac{-0,015 \cdot 0,062}{0,02(0,062 - 0,015)}} \right] = 5650 \text{ гс;}$$

$$i_{\mu 0,015} = 0,015 e^{0,5 \cdot 10^{-3} (5650 + 1680)} = 0,58 \text{ а;}$$

$$B_{0,035} = 9050 \left[1 - e^{\frac{-0,035 \cdot 0,062}{0,02(0,062 - 0,035)}} \right] = 8850 \text{ гс;}$$

$$i_{\mu 0,035} = 0,015 e^{0,5 \cdot 10^{-3} (8850 + 1680)} = 2,87 \text{ а;}$$

$$B_{0,055} = 9050 \left[1 - e^{\frac{-0,055 \cdot 0,062}{0,02(0,062 - 0,055)}} \right] = 9050 \text{ гс;}$$

$$i_{\mu 0,055} = 0,015 e^{0,5 \cdot 10^{-3} (9050 + 1680)} = 3,19 \text{ а.}$$

8. Результаты расчета:

а) Момент, соответствующий точке перегиба кривой потока, наступает по истечении 0,062 сек с момента возникновения процесса, что точно совпадает с результатом расчета по методу последовательных интервалов.

б) Значение индукции постоянного направления в точке перегиба 9050 гс, что также хорошо совпадает с результатом предыдущего расчета.

в) Амплитуда токов намагничивания 0,58 а, 2,87 а и 3,19 а. Максимальное расхождение с результатом предыдущего расчета имеет амплитуда при $t = 0,035$ сек, что показывает неполное совпадение в изменении потока по времени.

г) Максимальная индукция 10730 гс и максимальный пик тока намагничивания $i_{\mu} = 3,19$ хорошо совпадают с опытом и предыдущим расчетом.

Литература

1. Н. П. Поташев. Работа трансформаторов тока при переходных процессах. Электрические станции, № 10, 1935.
2. А. А. Воскресенский и Е. Ф. Воскресенская. Уравнения кривых намагничивания трансформаторной стали. Электричество, № 4, 1946.
3. А. А. Воскресенский. Расчет токов переходного процесса в электрических цепях со сталью. Электричество, № 1, 1954.
4. Г. И. Атабеков. Релейная защита высоковольтных сетей (стр. 54...67). Госэнергоиздат, 1949.

[28.4.1954]



Упрощенный расчет переходных процессов в синхронной машине

Кандидат техн. наук, Б. П. МЕДВЕДЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В настоящей работе рассматриваются электромагнитные переходные процессы в синхронной машине, возникающие при изменении напряжений на зажимах статора (U) и на кольцах ротора (U_r). К ним можно отнести процессы при трехфазных коротких замыканиях, включая и автоматические повторные включения на неустраняющиеся повреждения, а также процессы при восстановлении напряжения, следующем за отключением короткого замыкания, гашении поля, самопуске электродвигателей и другие, при которых не нарушается симметрия трехфазной системы. В качестве общего случая рассматривается процесс при коротком замыкании при любых начальных условиях.

Основной недостаток известных простых методов расчета переходных процессов состоит в том, что они основаны на допущении

$$r_s \ll r_{yd},$$

где r_s и r_{yd} — приведенные к обмотке статора активные сопротивления соответственно контура возбуждения и продольных успокоительных кон-

туров. При расчетах процессов в турбогенераторах это допущение может приводить к грубым погрешностям, а в ряде случаев, например при исследовании процесса восстановления напряжения, полностью исказить представление о происходящих явлениях.

Известные простые методы расчета частных случаев рассматриваемых переходных процессов имеют и другие недостатки. Например, методы расчета токов короткого замыкания позволяют определить ток лишь в цепи статора и только при вполне определенных начальных условиях.

В настоящей работе общее решение задачи при любых начальных условиях получено путем приближенного решения системы уравнений А. А. Горева [Л. 1] применительно к тому случаю, когда эта система может рассматриваться в качестве линейной, т. е. когда насыщение магнитной системы и угловая скорость ротора ω могут считаться неизменными. Последняя может считаться неизменной или за все время процесса, или за малый промежуток времени Δt .

Полученные расчетные выражения могут при-

меняться также для расчета более сложных процессов, чем перечисленные выше, при помощи метода последовательных интервалов. Они позволяют построить расчетные кривые для облегчения расчетов в инженерной практике.

Одновременно в настоящей работе поясняется физический смысл переходных процессов, происходящих в синхронной машине. С этой целью для определения начальных условий и самого процесса изменения принужденных и свободных токов используются схемы замещения, отвечающие упрощенным уравнениям А. А. Горева.

Все рассматриваемые величины, приведены к обмотке статора и выражены в относительных единицах [Л.2] и [Л.3]. Реактивные сопротивления x_{ad} , x_{ayd} и x_{syd} , обусловленные взаимной индуктивностью соответственно между контурами статора и обмоткой возбуждения, контурами статора и продольными успокоительными контурами, обмоткой возбуждения и продольными успокоительными контурами считаются постоянными и равными друг другу, т. е.

$$x_{ad} = x_{ayd} = x_{syd} = \text{const.}$$

Угловая скорость ротора ω принимается неизменной и равной синхронной. Все уравнения записываются в осях координат Od и Oq , положительные направления которых принимаются по Гореву [Л. 1]. Как принято большинством авторов, индексами d обозначаются составляющие векторов токов и потокоцеплений, направленные по оси Od , а также соответствующие им составляющие векторов э. д. с. и напряжений, а индексом q — составляющие векторов токов и потокоцеплений, направленные по оси Oq , и соответствующие им векторы э. д. с. и напряжений. Величины, относящиеся к обмотке возбуждения и к успокоительным контурам, обозначаются соответственно индексами s и y . Остальные обозначения, как общепринятые, пояснений не требуют.

Принятые условия и обозначения позволяют записать систему уравнений Горева в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} x_d I_d + x_{ad} I_s + x_{ad} I_{yd} - r I_q - e_{mpd} &= U_d; \\ p x_{ad} I_d + (p x_s + r_s) I_s + p x_{ad} I_{yd} &= U_s; \\ p x_{ad} I_d + p x_{ad} I_s + (p x_{yd} + r_{yd}) I_{yd} &= 0; \\ -r I_d - e_{mpq} - x_q I_q - x_{aq} I_{yq} &= U_q; \\ p x_{aq} I_q + (p x_{yq} + r_{yq}) I_{yq} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где e_{mpd} и e_{mpq} — трансформаторные э. д. с., индуцирующиеся в контурах статора;

$$\left. \begin{aligned} e_{mpd} &= p(x_q I_q + x_{aq} I_{yq}) \\ e_{mpq} &= p(x_d I_d + x_{ad} I_s + x_{ad} I_{yd}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Система уравнений (1) является линейной и для ее решения можно применить метод наложения. Сначала определяются периодические

составляющие токов во всех контурах генератора с учетом действия всех входящих в систему уравнений (1) э. д. с. за исключением e_{mpd} и e_{mpq} . Затем приближенно определяются аperiodические составляющие тех же токов с учетом действия только э. д. с. e_{mpd} и e_{mpq} . Ток в каждом из контуров находится сложением его двух составляющих.

Решение поставленной задачи существенно упростится, если пренебречь сопротивлением r .

Положив в системе уравнений (1) $r = 0$ и исключив из рассмотрения э. д. с. e_{mpd} и e_{mpq} , получим две не связанные одна с другой системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_d I_d + x_{ad} I_s + x_{ad} I_{yd} &= U_d; \\ p x_{ad} I_d + (p x_s + r_s) I_s + p x_{ad} I_{yd} &= U_s; \\ p x_{ad} I_d + p x_{ad} I_s + (p x_{yd} + r_{yd}) I_{yd} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

и

$$\left. \begin{aligned} -x_q I_q - x_{aq} I_{yq} &= U_q; \\ p x_{aq} I_q + (p x_{yq} + r_{yq}) I_{yq} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Применительно к режиму короткого замыкания из первого уравнения системы (3) вытекает следующее соотношение, справедливое для любого момента времени:

$$I_d = -\frac{x_{ad}}{x_d} I_{pd}, \quad (5)$$

где I_{pd} — эквивалентный ток роторных цепей,

$$I_{pd} = I_s + I_{yd}.$$

При необходимости учитывать любые начальные условия процесса искомые токи проще всего определять при помощи схем замещения, отвечающих уравнениям (3) и (4).

На рис. 1 изображена известная схема замещения генератора по продольной оси; она полностью отвечает упрощенным уравнениям (3). Посредством x_s , x_{ss} и x_{syd} обозначены индуктивности рассеяния соответствующих контуров. Предполагается, что x_s вычислена с учетом x_{sk} — индуктивности внешней цепи генератора до точки короткого замыкания.

Заменим в схеме рис. 1 магнитные связи электрическими. Как известно, это можно сделать путем приведения всех контуров схемы к одной частоте. Приведем роторные цепи к частоте тока статора. Рассматривая I_s и I_{yd} как дей-

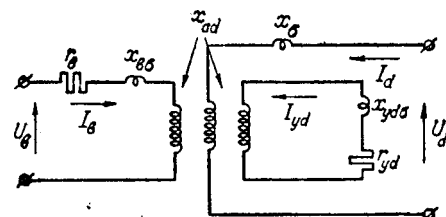


Рис. 1.

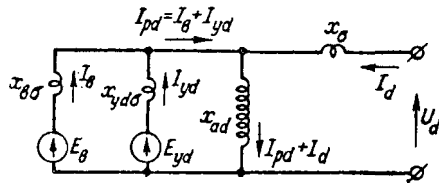


Рис. 2.

ствующие значения переменных токов той же частоты, что и ток статора, составим для схемы рис. 1 уравнения контурных токов. Для контура статора получим первое из уравнений (3). Для обмотки возбуждения и продольных успокоительных контуров получим соответственно:

$$\Psi_s = E_s = I_s x_s + I_{yd} x_{ad} + I_d x_{ad} \quad (6)$$

и

$$\Psi_{yd} = E_{yd} = I_{yd} x_{yd} + I_d x_{ad} + I_s x_{ad}, \quad (7)$$

где Ψ_s и Ψ_{yd} — потокосцепления рассматриваемых контуров;

E_s и E_{yd} — э. д. с., которые в принятой системе единиц численно равны этим потокосцеплениям.

Трем полученным уравнениям соответствует хорошо известная схема замещения рис. 2.

Схема рис. 2 справедлива для любого момента времени, однако ее нельзя использовать для определения изменения токов I_s , I_{yd} и I_d в переходном режиме, так как э. д. с. E_s и E_{yd} являются функциями этих токов и закон их изменения заранее не известен. Если положить, что значения токов $I_{s(0)}$, $I_{yd(0)}$ и $I_{d(0)}$ в момент, предшествовавший рассматриваемому изменению режима, которое может быть и внезапным, известны, а также учесть, что э. д. с. E_s и E_{yd} мгновенно (скачком) изменяться не могут, получим возможность использовать схему рис. 2 для определения начальных значений токов I_{s0} , I_{yd0} и I_{d0} в новом режиме, т. е. начальных условий процесса. Применение схемы рис. 2 для указанной цели известно [Л.2].

Для исследования процесса изменения токов за время переходного режима приведем схему рис. 1 к частоте токов роторных цепей. Полагая частоту тока статора I_d равной нулю, получим схему рис. 3, которая полностью отвечает второму и третьему уравнениям системы (3).

Отметим, что для определения процесса затухания свободных токов в контурах ротора при гашении поля генератора Н. Ф. Марголиным [Л.3] была применена схема замещения, являющаяся, по существу, частным случаем схемы рис. 3.

Схема рис. 3 пригодна для определения изменения во времени не только свободных, но и принужденных токов и позволяет учесть любые начальные условия процесса. Введем некоторые обозначения.

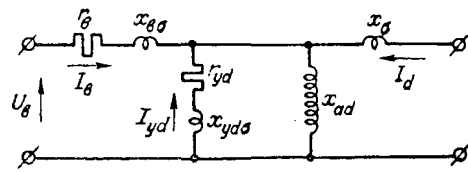


Рис. 3.

Рассматривая в качестве общего случая режим короткого замыкания, заменим ветви с индуктивностями x_s и x_{ad} одной эквивалентной с индуктивностью

$$x'_{ad} = \frac{x_s x_{ad}}{x_s + x_{ad}}. \quad (8)$$

Тогда постоянная времени первого контура схемы рис. 3 (при втором разомкнутом)

$$T'_s = \frac{x'_s}{r_s}$$

и второго (при первом разомкнутом) } (9)

$$T'_{yd} = \frac{x'_{yd}}{r_{yd}}$$

где

$$x'_s = x_{ss} + x'_{ad}; \quad x'_{yd} = x_{yd} + x'_{ad}.$$

Коэффициент рассеяния между указанными контурами

$$\sigma'_{syd} = 1 - \frac{(x'_{ad})^2}{x'_s x'_{yd}}. \quad (10)$$

Постоянные времени тех же контуров при отсутствии рассеяния:

$$\left. \begin{aligned} T'_{s6p} &= \frac{x'_{ad}}{r_s}; \\ T'_{yd6p} &= \frac{x'_{ad}}{r_{yd}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Значения T_s , T_{yd} , σ_{syd} , T_{s6p} и T_{yd6p} для режима холостого хода получим из соотношений (8) ... (11), полагая $x'_{ad} = x_{ad}$.

Уравнения контурных токов в операторной форме с учетом любых начальных условий для схемы рис. 3 можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} (px'_s + r_s)I_s + px'_{ad}I_{yd} &= U_s + p(x'_{s0}I_{s0} + x'_{ad}I_{yd0}) \\ px'_{ad}I_s + (px'_{yd} + r_{yd})I_{yd} &= p(x'_{yd0}I_{yd0} + x'_{ad}I_{s0}). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Напряжение на кольцах ротора U_s может изменяться в течение переходного процесса по любому закону, но аналитическое выражение

этого закона должно быть известно. Предположим, как это обычно делается при расчете токов короткого замыкания, что напряжение на кольцах ротора изменяется по экспоненциальному закону:

$$U_s(t) = r_s I_{sa}(t) = r_s \left[I_{s\infty} - (I_{s\infty} - I_{sa}(0)) e^{-\frac{t}{T_a}} \right]. \quad (13)$$

Если обозначить:

$$\Delta I_{sa} = I_{s\infty} - I_{sa}(0), \quad (14)$$

то изображение напряжения на кольцах ротора будет иметь следующий вид:

$$U_s = r_s \frac{p I_{sa}(0) + \alpha I_{s\infty}}{p + \alpha}, \quad (15)$$

где

$$\alpha = \frac{1}{T_a}.$$

Учитывая выражения (9) и (10), вычисляем определитель, составленный из коэффициентов при токах в левых частях уравнений (12):

$$D = r_s r_{yd} \sigma'_{syd} T'_s T'_{yd} \left(p^2 + p \frac{T'_s + T'_{yd}}{\sigma'_{syd} T'_s T'_{yd}} + \frac{1}{\sigma'_{syd} T'_s T'_{yd}} \right). \quad (16)$$

Корень уравнения $p + \alpha = 0$ есть $p_1 = -\alpha = -\frac{1}{T_a}$. Корни характеристического уравнения $D = 0$ обозначим:

$$\left. \begin{aligned} p_2 &= -\frac{1}{T'_d}; \\ p_3 &= -\frac{1}{T''_d}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где T'_d и T''_d — постоянные времени затухания переходной и сверхпереходной составляющих свободных токов.

Из теоремы Виета вытекают следующие соотношения между постоянными времени:

$$T'_d T''_d = \sigma'_{syd} T'_s T'_{yd}, \quad (18)$$

$$T'_d + T''_d = T'_s + T'_{yd}. \quad (19)$$

Полагая величины p_2 и p_3 вычисленными и учитывая соотношение (18), запишем уравнение (16) в следующем виде:

$$D = r_s r_{yd} T'_d T''_d (p - p_2)(p - p_3). \quad (20)$$

Решая систему уравнений (12) с учетом выражения (15), найдем изображения искомых токов:

$$I_s = \frac{p^2 I_{sa}(0) T'_{yd} + p (\alpha I_{s\infty} T'_{yd} + I_{sa}(0)) + \alpha I_{s\infty}}{T'_d T''_d (p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)} + \frac{p (p T'_d T''_d I_{s0} + T'_s I_{s0} + T'_{sd} p I_{yd0})}{T'_d T''_d (p - p_2)(p - p_3)}, \quad (21)$$

$$I_{yd} = -\frac{p T'_{yd} p (p I_{sa}(0) + \alpha I_{s\infty})}{T'_d T''_d (p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)} + \frac{p (p T'_d T''_d I_{yd0} + T'_{yd} I_{yd0} + T'_{sd} p I_{s0})}{T'_d T''_d (p - p_2)(p - p_3)}. \quad (22)$$

Оригиналы, изображения которых даны уравнениями (21) и (22), проще всего определить по методу О. М. Богатырева [Л. 4]. Выражения для этих оригиналов будут иметь следующий вид:

$$I_s(t) = I_{s\infty} - \frac{T_a(T_a - T'_{yd})}{(T_a - T'_d)(T_a - T''_d)} \Delta I_{sa} e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{(T'_s - T'_d) I_{scs0} + T'_{sd} p I_{ydc0}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{(T'_s - T'_d) I_{scs0} + T'_{sd} p I_{ydc0}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T''_d}}; \quad (23)$$

$$I_{yd}(t) = -\frac{T_a T'_{yd} p}{(T_a - T'_d)(T_a - T''_d)} \Delta I_{sa} e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{(T'_{yd} - T'_d) I_{ydc0} + T'_{yd} p I_{scs0}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{(T'_{yd} - T'_d) I_{ydc0} + T'_{yd} p I_{scs0}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T''_d}}. \quad (24)$$

Ток статора $I_d(t)$ определяется при помощи соотношения (5). Два первых слагаемых в выражении (23) и первое слагаемое в выражении (24) представляют собой принужденные токи, начальные значения которых I_{snp0} и I_{ydnp0} определяются путем приравнивания t нулю. Два последних слагаемых в каждом из этих уравнений суть свободные токи, начальные значения которых определяются по теореме коммутации.

При отсутствии устройства автоматического регулирования возбуждения следует положить $\Delta I_{sa} = 0$ и $T_a = \infty$. Если при форсировании возбуждения или при уменьшении возбуждения U_s мгновенно изменяется от $U_{s(0)}$ до $U_{s\infty}$, то следует T_a приравнять нулю. Для режима гашения поля следует приравнять нулю принужденные составляющие токов. В случае отсутствия у генератора успокоительных контуров следует положить $r_{yd} = \infty$.

Расчет переходного процесса в поперечных контурах при помощи уравнений (4) может быть выполнен тем же путем, как и в продольных.

Для нахождения аperiodических составляющих токов приближенно определяем токи в контурах генератора, вызываемые действием только э. д. с., определяемых уравнениями (2). В первом приближении контуры генератора рассматриваем в качестве сверхпроводников. Полагаем $r = r_s = r_{yd} = r_{yq} = 0$.

Из уравнений (1) находим выражения для потокосцеплений статора:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= x_d I_d + x_{ad}(I_s + I_{yd}) = U_d + e_{mpd}; \\ \Psi_q &= -x_q I_q - x_{aq} I_{yq} = U_q + e_{mpq}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Модуль изображающего вектора потокосцепления статора

$$\Psi_{cm} = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2} = \sqrt{(U_d + e_{mpd})^2 + (U_q + e_{mpq})^2}, \quad (26)$$

а его фазный угол

$$\beta = \arctg \frac{\Psi_q}{\Psi_d}. \quad (27)$$

Из выражения (26) следует, что исключение из уравнений (1) э. д. с. e_{mpd} и e_{mpq} равносильно допущению возможности скачкообразного изменения потокосцепления статора в момент короткого замыкания. Очевидно э. д. с. e_{mpd} и e_{mpq} вызовут токи, которые в процессе короткого замыкания будут поддерживать неизменным потокосцепление статора.

На рис. 4 изображена векторная диаграмма для момента короткого замыкания ($t=0$) генератора, работавшего до короткого в установившемся режиме с нагрузкой. В момент, предшествовавший короткому замыканию,

$$\Psi_{cm(0)} = \sqrt{U_d^2(0) + U_q^2(0)} = U_{cm(0)}.$$

В момент $t=0$ напряжение U_{cm0} становится равным нулю. При этом вектор $\Psi_{cm0} = \dot{\Psi}_{cm(0)}$, вращавшийся до короткого синхронно с ротором, становится неподвижным в пространстве и неизменным по величине, как вектор потокосцепления неподвижных в пространстве сверхпроводящих контуров фазных обмоток статора. Согласно выражению (26) в контурах статора при этом возникнут трансформаторные э. д. с., вектор которых $\dot{E}_{cm0} = \dot{U}_{cm(0)}$ также будет неизменным по величине и неподвижным в пространстве. Рассматривая оси ротора как неподвижные и проектируя на них вектор \dot{E}_{cm0} , который при этом следует считать вращающимся в отрицательном направлении, найдем э. д. с., индуцируемые в контурах статора:

$$e_d = U_{cm(0)} \cos\left(-\omega t - \beta + \frac{\pi}{2}\right)$$

(углы отсчитаны от оси $-Od$) и

$$e_q = U_{cm(0)} \cos(-\omega t - \beta)$$

(углы отсчитаны от оси $+Oq$). Входными сопротивлениями контуров статора будут x_d'' и x_q'' . Токи в контурах статора

$$I_{da} = \frac{U_{cm(0)}}{x_d''} \cos\left(-\omega t - \beta + \frac{\pi}{2}\right)$$

(углы отсчитаны от оси $+Oq$);

$$I_{qa} = \frac{U_{cm(0)}}{x_q''} \cos(-\omega t - \beta)$$

(углы отсчитаны от оси $+Od$).

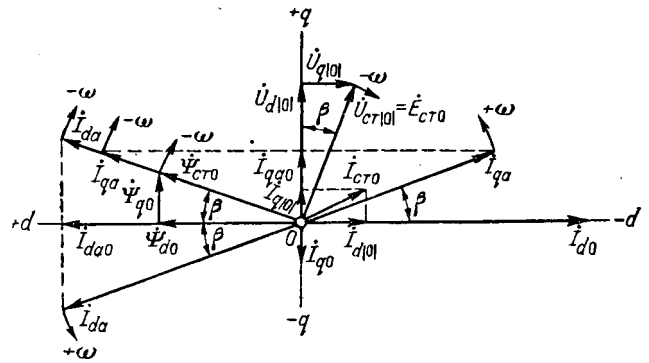


Рис. 4.

Учитывая, что косинус — функция четная, заменим на векторной диаграмме векторы токов, вращающиеся в отрицательном направлении, векторами тех же токов, но вращающимися в положительном направлении. Углы для вектора I_{da} будем отсчитывать от оси $+Od$, а для вектора I_{qa} — от оси $+Oq$. Тогда получим следующие выражения для искомых токов:

$$I_{da} = \frac{U_{cm(0)}}{x_q''} \cos(\omega t + \beta); \quad (28)$$

$$\begin{aligned} I_{qa} &= \frac{U_{cm(0)}}{x_q''} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \beta\right) = \\ &= \frac{U_{cm(0)}}{x_q''} \sin(\omega t + \beta). \end{aligned} \quad (29)$$

Апериодическим токам I_{da} и I_{qa} соответствуют также апериодические токи в остальных контурах генератора, которые можно определить из схем замещения, приведенных к частоте токов статора и рассматриваемых как пассивные двухполюсники.

Влияние активных сопротивлений контуров генератора прежде всего скажется в том, что свободные апериодические токи будут затухающими. Для приближенного учета этого можно принять расчетное значение постоянной времени затухания этих токов

$$T_a = \frac{x_2}{r}, \quad (30)$$

где x_2 — индуктивность обратной последовательности генератора, вычисляемая также с учетом x_{en} . При этом:

$$I_{da} = \frac{U_{cm(0)}}{x_d''} \cos(\omega t + \beta) e^{-\frac{t}{T_a}}; \quad (31)$$

$$I_{qa} = \frac{U_{cm(0)}}{x_q''} \sin(\omega t + \beta) e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (32)$$

Полученные расчетные выражения для токов в контурах генератора позволяют с учетом любых начальных условий рассчитывать переходные процессы, вызванные как возрастанием, так и уменьшением напряжений на зажимах

статора и на кольцах ротора; при этом следует только учитывать знаки приращений указанных напряжений.

Приложение. Пример расчета переходного процесса при трехфазном коротком замыкании на зажимах турбогенератора. Турбогенератор работал в установившемся режиме при $U_{(0)} = 1$, $I_{(0)} = 1$ и $\cos \varphi_{(0)} = 0,8$.

Параметры генератора [Л. 2, стр. 153, 91 и 50]: $x_d = x_q = 1,72$; $x'_d = 0,11$; $x'_q = 0,21$; $x''_d = 0,125$; $x''_q = 0,175$; $OKZ = 0,7$; $\cos \varphi = 0,8$; $T_d = 7,0$ сек; $T_{yd} = 3,0$ сек (принято нами); $T_a = 0,57$ сек; $T_a = 0,1$ сек; предельный ток возбуждения $I_{an} = 2,97$ (приведен к цепи статора); характеристика холостого хода ненасыщенного генератора проводится через точки с координатами (0; 0) и (1, 1, 2).

Расчет предшествовавшего режима выполнен путем построения векторной диаграммы. Результаты расчета следующие: $I_{d(0)} = -0,94$; $I_{q(0)} = 0,33$; $I_{e(0)} = 1,53$; $U_{d(0)} = 0,83$; $U_{q(0)} = -0,56$.

При помощи схемы рис. 2, рассматриваемой в качестве пассивного двухполюсника, найдены: $x_{ad} = 1,61$; $x_{eq} = 0,107$; $x_e = 1,717$; $x_{yda} = 0,018$; $x_{yq} = 1,628$. Для поперечных контуров аналогичным образом найдены: $x_{yqa} = 0,073$; $x_{yq} = 1,683$. При помощи соотношений (9), записанных для режима холостого хода, найдены: $r_a = 0,781 \times 10^{-3}$ и $r_{yd} \approx r_{yq} = 1,727 \cdot 10^{-3}$. При помощи соотношений (8)...(11) для режима короткого замыкания найдены: $x'_{ad} = 0,103$; $x'_e = 0,2096$; $x'_{yd} = 0,1206$; $x'_{yq} = 0,581$; $T'_e = 0,855$ сек; $T'_{yd} = 0,222$ сек; $T'_{a6p} = 0,42$ сек; $T'_{yda6p} = 0,19$ сек. Для поперечных контуров найдены: $x'_{aq} = 0,103$; $x'_{yq} = 0,176$; $T'_{q} = 0,324$ сек.

При помощи характеристического уравнения (16)

$$p^3 + 9,763p + 9,065 = 0$$

и выражений (17) находим: $T'_d = 0,962$ сек и $T''_d = 0,115$ сек.

Как результат включения схемы рис. 2, рассматриваемой в качестве пассивного двухполюсника, на напряжение $\Delta U_d = -U_{d(0)}$ найдены приращения периодических токов в момент короткого замыкания: $\Delta I_d = -6,64$; $\Delta I_e = 0,93$; $\Delta I_{yd} = 5,64$ и начальные значения периодических токов в продольных контурах: $I_{d0} = -7,58$; $I_{e0} = 2,46$; $I_{yda0} = 5,64$. Аналогичным путем найдены приращения периодических токов в момент короткого замыкания и начальные значения периодических токов в поперечных контурах: $\Delta I_q = -3,2$; $I_{yq0} = \Delta I_{yq} = 3,06$; $I_{q0} = -2,87$.

Приращение тока возбуждения при форсировании

$$\Delta I_{ea} = 2,97 - 1,53 = 1,44.$$

При помощи уравнений (23) и (24) находим принужденные токи:

$$\begin{aligned} I_{anp} &= 2,97 - \frac{0,57(0,57 - 0,222)}{(0,57 - 0,962)(0,57 - 0,115)} 1,44 e^{-\frac{t}{0,57}} = \\ &= 2,97 + 1,6 e^{-\frac{t}{0,57}}; \\ I_{ydanp} &= -\frac{0,57 \cdot 0,19 \cdot 1,44}{(0,57 - 0,962)(0,57 - 0,115)} e^{-\frac{t}{0,57}} = \\ &= 0,87 e^{-\frac{t}{0,57}}. \end{aligned}$$

Начальные значения принужденных токов

$$I_{anp0} = 2,97 + 1,6 = 4,57, I_{ydanp0} = 0,87.$$

Начальные значения свободных токов

$$I_{e0} = 2,46 - 4,57 = -2,11,$$

$$I_{yda0} = 5,64 - 0,87 = 4,77.$$

По выражениям (23) и (24) находим свободные токи:

$$\begin{aligned} I_{esa} &= \frac{-(0,855 - 0,115) \cdot 2,11 + 0,42 \cdot 4,77}{0,962 - 0,115} e^{-\frac{t}{0,962}} - \\ &- \frac{-(0,855 - 0,962) \cdot 2,11 + 0,42 \cdot 1,77}{0,962 - 0,115} e^{-\frac{t}{0,115}} = \\ &= 0,52 e^{-\frac{t}{0,962}} - 2,63 e^{-\frac{t}{0,115}}; \\ I_{yda} &= \frac{(0,222 - 0,115) \cdot 4,77 - 0,19 \cdot 2,11}{0,962 - 0,115} e^{-\frac{t}{0,962}} - \\ &- \frac{(0,222 - 0,962) \cdot 4,77 - 0,19 \cdot 2,11}{0,962 - 0,115} e^{-\frac{t}{0,115}} = \\ &= 0,13 e^{-\frac{t}{0,962}} + 4,64 e^{-\frac{t}{0,115}}. \end{aligned}$$

Сложив принужденные и свободные токи, получим:

$$\begin{aligned} I_e &= 2,97 + 1,6 e^{-\frac{t}{0,57}} + 0,52 e^{-\frac{t}{0,962}} - 2,63 e^{-\frac{t}{0,115}}; \\ I_{yd} &= 0,87 e^{-\frac{t}{0,57}} + 0,13 e^{-\frac{t}{0,962}} + 4,64 e^{-\frac{t}{0,115}}. \end{aligned}$$

При помощи соотношения (5) находим:

$$I_d = -2,78 - 2,31 e^{-\frac{t}{0,57}} - 0,61 e^{-\frac{t}{0,962}} - 1,88 e^{-\frac{t}{0,115}}.$$

Токи в поперечных контурах

$$I_q = -2,87 e^{-\frac{t}{0,324}} \text{ и } I_{yq} = 3,06 e^{-\frac{t}{0,324}}.$$

Находим аperiodические составляющие токов. По выражению (27) находим $\beta = \arctg \frac{0,56}{0,83} = 34^\circ$.

По выражениям (31) и (32)

$$\begin{aligned} I_{da} &= \frac{1}{0,125} \cos(\omega t + 34^\circ) e^{-\frac{t}{0,1}} = 8 \cos(\omega t + 34^\circ) e^{-\frac{t}{0,1}}; \\ I_{qa} &= \frac{1}{0,175} \sin(\omega t + 34^\circ) e^{-\frac{t}{0,1}} = 5,72 \sin(\omega t + 34^\circ) e^{-\frac{t}{0,1}}. \end{aligned}$$

При помощи схемы рис. 2, рассматриваемой в качестве пассивного двухполюсника, находим:

$$\begin{aligned} I_{ea} &= -1,12 \cos(\omega t + 34^\circ) e^{-\frac{t}{0,1}}; \\ I_{yda} &= -6,8 \cos(\omega t + 34^\circ) e^{-\frac{t}{0,1}}. \end{aligned}$$

Аналогичным путем находим ток в поперечных вспомогательных контурах:

$$I_{yqa} = -5,47 \sin(\omega t + 34^\circ) e^{-\frac{t}{0,1}}.$$

Полные выражения искомых токов определяются сложением периодических и аperiodических составляющих.

В рассмотренном примере величина r мала ($T_a = 0,1$ сек), и результаты точного решения системы пяти дифференциальных уравнений (1) полностью (в пределах точности счетной линейки) совпадают с полученными.

Литература

1. А. А. Горев. Переходные процессы синхронной машины. Госэнергоиздат, 1950.
2. С. А. Ульянов. Короткие замыкания в электрических системах. Госэнергоиздат, 1952.
3. Н. Ф. Марголин. Гашение поля. Труды Московского энергетического института им. Молотова, вып. 2, 1938.
4. О. М. Богатырев. Рационализация методов расчета переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными параметрами. Электричество, № 7, 1952.

К расчету массивного ротора

Инж. Р. Х. БАЛЪЯН

Ленинград

Постановка задачи. Конечной целью работы является получение пусковой характеристики синхронного (в частном случае асинхронного) двигателя с массивным ротором:

$$M = f(s).$$

Необходимо также определить величину пускового тока I_n .

Составим схему замещения для рассматриваемого случая. Намагничивающий контур вынесем на зажимы. Вторичный контур разобьем на два последовательных участка: массив полюсного башмака и немагнитное короткозамыкающее кольцо, если оно предусмотрено конструкцией. Параметры первого участка являются сложной функцией скольжения, так как здесь имеет место поверхностный эффект переменной интенсивности, параметры второго — постоянны. Определение переменных сопротивлений массива r_m и x_m и является основной задачей. Несимметрию вследствие явнополюсности учтем, пользуясь известным упрощенным методом, чтобы не вводить побочных трудностей, т. е. в качестве вторичных сопротивлений будем брать средние из значений по продольной d и поперечной q осям:

$$r_2 = \frac{r_{2d} + r_{2q}}{2}; \quad x_2 = \frac{x_{2d} + x_{2q}}{2}. \quad (1)$$

Сопротивление намагничивающего контура

$$x_0 = \frac{x_{ad} + x_{aq}}{2}, \quad (1a)$$

причем x_{ad} и x_{aq} — реактивности, эквивалентные реакциям якоря по осям d и q .

Ток обратного следования и соответствующий ему момент учитывать не будем. В целях дальнейших упрощений вторичный контур рассматриваем без ветви, эквивалентной обмотке возбуждения ротора. Токи высших гармоник также не учитываем. Все эти допущения практически не отразятся на точности подсчета моментов M , но скажутся при определении пускового тока I_n , который по расчету этим способом окажется заниженным на 20...30%.

При указанных оговорках приходим к схеме замещения, представленной на рис. 1. Как обычно, поправочный коэффициент (рис. 1)

$$\sigma \approx 1 + \frac{x_1}{x_0} = 1 + \frac{x_1}{\frac{x_{ad} + x_{aq}}{2}}. \quad (2)$$

На рис. 1 сопротивления ротора приведены к статору и их символы снабжены поэтому верхним штрихом. Заметим, что сопротивлением статора σr_1 можно пренебречь. Сопротивления r'_m и x'_m этой схемы — переменные величины, зависящие от s .

В соответствии со схемой рис. 1, имеем в относительных единицах: ток главной цепи

$$\frac{I'_2}{\sigma} = \frac{1}{Z}; \quad (3)$$

полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{\left(\frac{\sigma^2 r'_2}{s}\right)^2 + (\sigma x_1 + \sigma^2 x'_2)^2},$$

где

$$r'_2 = r'_m + r'_k; \quad x'_2 = x'_m + x'_k \quad (\text{полагаем } r_1 = 0);$$

момент вращения

$$M = \left(\frac{I'_2}{\sigma}\right)^2 \cdot \frac{\sigma^2 r'_2}{s} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_n} = \left(\frac{1}{Z}\right)^2 \cdot \frac{\sigma^2 r'_2}{s} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_n}. \quad (4)$$

Так как ток I'_2 при пуске практически реактивен, то можно положить, что пусковой ток

$$I_n \approx I'_2 + I_0 = \sigma \cdot \frac{1}{Z_{s=1}} + \frac{1}{x_1 + \frac{x_{ad} + x_{aq}}{2}}. \quad (5)$$

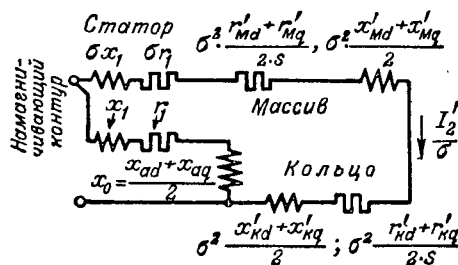


Рис. 1. Схема замещения.

При желании можно составить схемы замещения отдельно для осей d и q . Развиваемый ниже метод позволяет определить все сопротивления отдельно по этим осям. В работе использована система единиц МКС₁₀.

Теория массивного ротора. Электромагнитная волна, проникающая в ротор, постепенно затухает по глубине массива. Соответственно убывает и плотность наведенных токов.

Можно, однако, заменить эту реальную картину некоторой эквивалентной, считая, что на условной глубине Δ плотность тока остается неизменной и равной своему значению на поверхности, а затем скачком падает до нуля. Выделение энергии в массиве в обоих случаях должно быть одинаковым. Из этого условия выводится [Л. 1], что при $\mu = \text{const}$

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}}. \quad (6)$$

От этой эквивалентной глубины проникновения Δ и будет зависеть сопротивление массивного ротора.

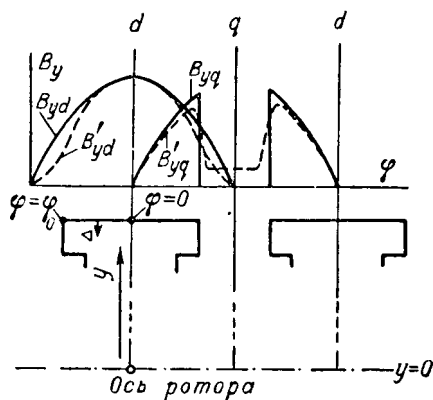


Рис. 2. Распределение индукций в зазоре.

Но величина μ в (6) на самом деле непостоянна. В рассматриваемой задаче она меняется, во-первых, вдоль направления проникновения волны y (рис. 2) в силу изменения ее интенсивности с глубиной. Во-вторых, она меняется вдоль полюсного деления τ , ибо вдоль τ меняется магнитная индукция.

Чтобы выяснить влияние обоих этих факторов, воспользуемся предложенным Л. Р. Нейманом уравнением основной кривой намагничивания [Л.1]:

$$B = kH^{\frac{1}{n}}. \quad (7)$$

Здесь k и n определяются материалом массива и легко находятся по кривой намагничивания, построенной в логарифмических координатах. При этом на указанной кривой выявятся две зоны, каждой из них соответствуют свои значения k и n . Первая зона нас не интересует, поскольку она соответствует слабым магнитным полям, не имеющим места в рассматриваемом случае. Для массивного ротора применяется, как правило, мягкая сталь. В интересующей нас второй зоне имеем для нее $k=0,634$; $n=9$.

Учет непостоянства μ вдоль направления проникновения y . С глубиной интенсивность электромагнитного процесса в массиве падает и μ при этом растет. Это приводит к уменьшению Δ по сравнению с тем его значением, которое дает (6) при $\mu = \mu_{\text{пост}} = \mu_e$ (величина μ на поверхности). Следовательно, в (6) должен быть введен поправочный коэффициент. Для случая плоской волны Л. Р. Нейман нашел [Л.1]:

$$\Delta = k_y \Delta_e, \quad (8)$$

где Δ_e — величина, определенная при μ_e ;

$$k_y = \frac{n-1}{2n} \cdot \frac{\sqrt{2n(3n+1)^2(n+1)}}{\sqrt{2(n-1)}}. \quad (9)$$

Волна, падающая на полюс электрической машины, не будет плоской, но можно показать, что затухание ее вдоль оси y практически подчиняется уравнениям плоской волны (приложение I). Поэтому вполне обоснованно применить выводы [Л.1] и в нашем случае. Тогда для каж-

дой данной точки поверхности полюса справедливо $\Delta = k_y \cdot \Delta_e$; вдоль же полюса Δ_e будет меняться.

Непостоянство μ вдоль τ . Чтобы найти закон изменения μ_e вдоль τ , надо знать соответствующий закон для напряженности H_e . В общем случае рассматривается явнополюсный ротор и

$$H_e = \sqrt{H_d^2 + H_q^2} \quad (10)$$

(здесь и ниже для величин H_e и B_e по осям d и q индекс e опускаем).

Так как на границе двух сред касательные составляющие напряженности равны, то распределение H_d и H_q в теле полюса независимо от постоянства μ будет таким же, как в зазоре. Положим, что $\mu_e = \text{пост}$ и рассмотрим картину индукций в зазоре (рис. 2), причем действительные кривые B'_{yd} и B'_{yq} (пунктир на рисунке) заменим близкими им расчетными кривыми B_{yd} и B_{yq} . Тогда картина поля в теле полюса будет такой, как она изображена на рис. 2а отдельно по осям. Распределение касательных индукций в полюсе B_d и B_q сдвинуто на 90° по отношению к распределению соответствующих нормальных индукций B_y в зазоре.

Например, индукция B_d достигнет максимального значения у края полюса ($\varphi = \varphi_0$), а B_q — в центре его ($\varphi = 0$) (рис. 2а).

Для сплошного ротора эти максимумы одинаковы:

$$B_{dm} = B_{qm} = B_{em}.$$

Для явнополюсного же ротора, как видно из рис. 2 и 2а,

$$B_d = B_{em} \sin \varphi; \quad B_{dm} = B_{em}; \quad (11)$$

$$B_q = B_{em} (\cos \varphi - \cos \varphi_0), \quad B_{qm} = B_{em} k_B, \quad (12)$$

где

$$k_B = 1 - \cos \varphi_0. \quad (13)$$

Запишем (12) в виде:

$$B_q = B_{qm} \cos a\varphi. \quad (14)$$

При $\varphi = \varphi_0$, $B_q = 0$ и, следовательно, из (14)

$$a = \frac{\pi/2}{\varphi_0} = \frac{1}{\alpha}. \quad (15)$$

Согласно (11) и (14)

$$H_d = H_{dm} \sin \varphi; \quad H_q = H_{qm} \cos a\varphi.$$

В соответствии же с (7), (11) и (12)

$$\frac{H_{qm}}{H_{dm}} = \frac{(B_{qm})^n}{(B_{dm})^n} = k_B^n$$

и по (10)

$$H_e = H_{dm} \sqrt{(\sin \varphi)^2 + (k_B^n \cos a\varphi)^2}. \quad (16)$$

Выше уже отмечалось, что такое же распределение H_e сохраняется и для реальных условий непостоянства μ вдоль τ . Характеризуемое

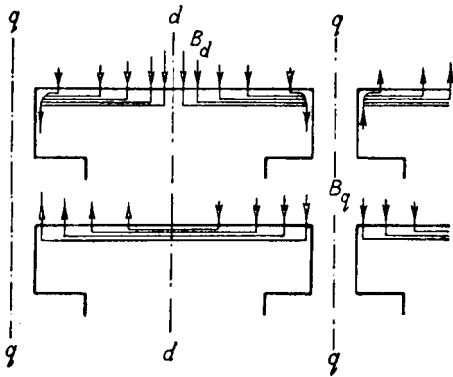


Рис. 2а. Распределение индукций в полюсе.

(16) уменьшение H_e по сравнению с H_{dm} приводит в случае ферромагнитного ротора к возрастанию μ_e по сравнению с той, которая соответствует H_{dm} .

В свою очередь, глубина токопроводящего слоя Δ не сохраняет своего максимального значения Δ_m , а уменьшается согласно (6). Поэтому изменение μ_e вдоль τ приводит к возрастанию сопротивления ротора. Это возрастание характеризуется коэффициентом $k_\varphi > 1$, зависящим от материала ротора и коэффициента полюсной дуги α (вывод k_φ см. в приложении II). Для $n=9$ он вычислен по (II,3) графическим интегрированием и представлен в функции α на

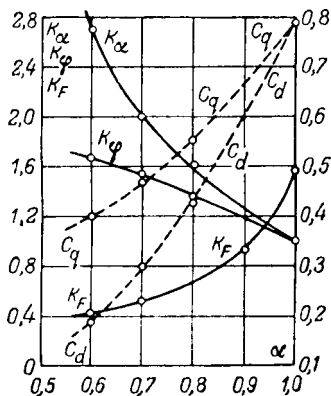


Рис. 3. Расчетные коэффициенты.

рис. 3. Введение k_φ и k_y позволяет переменную Δ заменить эквивалентной расчетной:

$$\Delta_s = \frac{\Delta_m \cdot k_y}{k_\varphi}, \text{ где } k_y < 1 \text{ [по (9)], } k_\varphi > 1. \quad (17)$$

Здесь под Δ_m мы понимаем величину, определенную при $\mu = \mu_e$, но индекс e опускаем.

Определение максимальной глубины проникновения Δ_m . Эта величина должна быть определена по (6), где μ соответствует максимальной индукции B_{em} . Из (7)

$$\mu = k^n B_{em}^{1-n}. \quad (18)$$

Поскольку речь идет о максимальной индукции на поверхности, то можно применить выводы, полученные без учета изменения μ . Тогда имеем по [Л. 3]:

$$B_{em} = B_{ym} \cdot \left| \frac{\dot{\beta} R}{p} \cdot \frac{J_{p-1}(\dot{\beta} R)}{J_p(\dot{\beta} R)} - 1 \right|, \quad (19)$$

где

$$\dot{\beta} = \sqrt{-j} \quad \beta = \sqrt{-j} \cdot \sqrt{2\pi f \mu \gamma}.$$

Представив $\dot{\beta} = \dot{\beta} e^{-j\frac{\pi}{4}}$; $J_p(\dot{\beta} R) = |J_p| \cdot e^{j\theta}$ и найдя в тригонометрической форме выражение искомого модуля разности в (19), видим, что при наших значениях $\dot{\beta} R$ (приложение I) практически точно получается:

$$B_{em} = \frac{R}{p} \cdot B_{ym} \cdot \sqrt{2\pi f \mu \gamma}. \quad (20)$$

Сравнивая (6), (18), (20) и учитывая, что $f = f_n s$, получаем:

$$\Delta_m = \frac{\left(\sqrt{2} \frac{R}{p} B_{ym} \right)^{\frac{n-1}{n+1}}}{k^{\frac{n}{n+1}} \cdot (\sqrt{\pi f_n \gamma})^{\frac{2}{n+1}} s^{\frac{1}{n+1}}}. \quad (21)$$

Чтобы по (21) правильно оценить степень зависимости Δ и, следовательно, сопротивления массива от скольжения, необходимо учесть совместное действие следующих трех факторов. С уменьшением s , т. е. и f , Δ растет в соответствии с (6). В свою очередь, рост Δ означает увеличение сечения магнитного пути в массиве, благодаря чему падает индукция B_{em} , а следовательно, растет μ . Это согласно (6) задерживает рост Δ и снижает эффективность применения массивного ротора. В то же время при уменьшении s падает ток главной цепи, значит, возрастает э. д. с. и индукция в зазоре B_{ym} . Это явление оказывает противоположный эффект, способствуя увеличению B_{em} по (20) и соответственно Δ по (21).

Величину B_{ym} в (21) можно подбирать методом последовательных приближений. Однако удастся выразить ее и аналитически (приложение III), получив вместо (21)

$$\Delta_m = \frac{1}{\sqrt{k}} \left(\frac{A}{2 \cdot k_F x_1} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \frac{1}{\sqrt{\pi f_n \gamma V s}}, \quad (22)$$

где

$$A = \frac{1,35}{\sqrt{2}} \cdot \frac{k_{об} \cdot \omega_1}{p} \cdot I_n, \quad (23)$$

k_F — коэффициент, зависящий по (III,4) от n и α . Для случая $n=9$ $k_F = f(\alpha)$ дан на рис. 3.

Определение сопротивлений ротора. Приведенное активное сопротивление ротора по оси

d или q можно выразить равенством (в относительных единицах):

$$r'_{2i} = \frac{1}{p} \cdot \frac{I_n}{U_n} \cdot \frac{m_1 (k_{05} \omega_1)^2}{m_2 (k_{05} \omega_2)^2} \left[r_c + 2t_i \frac{dr_{\kappa}}{\left(2 \sin \frac{d\varphi}{2}\right)^2} \right] \quad (24)$$

где r_c — сопротивление одного стержня ротора;
 $d\varphi$ — угол между ними в электрических градусах;
 dr_{κ} — сопротивление участка кольца, заключенного между соседними стержнями;
 $m_2 = \frac{N_2}{p}$ (где N_2 — число стержней ротора);
 $\omega_2 = 0,5$ — число витков на фазу ротора;
 t_i — коэффициент t_d или t_q , учитывающий неполноту клетки.

По [Л. 4] t_d и t_q зависят от числа стержней и уменьшаются с ростом этого числа, стремясь к некоторым пределам. У нас число стержней бесконечно велико, поэтому всегда $t_i = \text{const}$. Согласно [Л. 4] $t_d = 0,55$; $t_q = 0,95$. (24a)
 Для dr_{κ} имеем:

$$dr_{\kappa} = \frac{R \cdot d \cdot \frac{\varphi}{p}}{\gamma_{\kappa} q_{\kappa}},$$

где q_{κ} — сечение кольца.

В качестве r_c мы должны взять сопротивление дифференциального элемента полюса длиной l , шириной $R \cdot d \cdot \frac{\varphi}{p}$ и высотой, равной глубине проникновения, взятой с учетом (17).

Итак,

$$r_c = \frac{l}{\gamma_{ky} \frac{\Delta_m}{k_{\varphi}} \cdot R d \frac{\varphi}{p}} \quad (25)$$

Для неполного ротора

$$N_2 = 2p \cdot \frac{c'_i}{d\varphi},$$

где c'_i — некоторый коэффициент. Согласно [Л. 4], c'_i определяется отдельно для осей d и q (приложение IV). Получено, что c'_d и c'_q зависят от n и α (IV, 1). Для $n = 9$ эти коэффициенты представлены в функции α на рис. 3 (для удобства положено $c'_d = 4c_d$; $c'_q = 4c_q$).

Подставляя в (24) указанные выше значения ω_2 , m_2 , N_2 , r_c , dr_{κ} , полагая $k_{05} = 1$ и раскрывая получающуюся неопределенность $\frac{(d\varphi)^2}{\sin^2 d - \frac{\varphi}{2}}$

при $d\varphi \rightarrow 0$, находим, выделяя из (24) сопротивления массива r'_{2i} и кольца r'_{κ} :

$$\left. \begin{aligned} r'_{2i} &= \frac{I_n}{U_n} \cdot \frac{(k_{05} \omega_1)^2 m_1}{2pc_i} \cdot \frac{pl}{\gamma R k_{\varphi} \Delta_m} k_{\varphi}; \\ r'_{\kappa i} &= \frac{I_n}{U_n} \cdot \frac{(k_{05} \omega_1)^2 m_1}{2pc_i} \cdot \frac{2t_i R}{\gamma_{\kappa} q_{\kappa} p} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

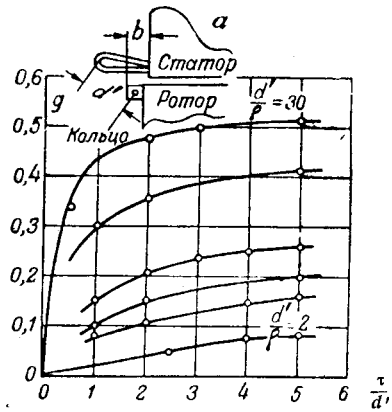


Рис. 4. Коэффициент g .

Здесь и ниже индекс i соответствует или индексу d , или q .

Из (26) и (22) следует, что сопротивление ферромагнитного ротора изменяется пропорционально \sqrt{s} — факт, подтверждаемый опытом, но не находивший пока строгого теоретического объяснения.

Найдем реактивные сопротивления.

По [Л. 1] $\frac{x_m}{r_m} = \frac{\sqrt{n(n+1)}}{n \sqrt{2}}$, что дает при $n=9$
 $x'_{mi} = 0,75 r'_{mi}$. (27)

По [Л. 8] для кольца имеем на пару полюсов:

$$x_{\kappa} = \frac{1,58}{2} \cdot \frac{N'_2}{f_n m_1} \tau g \cdot 10^{-5} [\text{ом}], \quad (28)$$

где $N'_2 = \frac{\alpha \pi}{d\varphi}$ — фактическое число пазов на полюс; g — коэффициент, зависящий от геометрии кольца. Он определяется по кривым в функции от $\frac{\tau}{d'}$ и $\frac{d'}{p}$, где d' — расстояние между центром кольца и крайней точкой лобовой части обмотки статора (рис. 4,а). Величина

$$p = 0,223 h, \quad (29)$$

где h — полупериметр кольца.

Кривые $g = f\left(\frac{\tau}{d'}, \frac{d'}{p}\right)$ воспроизведены по [Л. 8] на рис. 4.

Приводим x_{κ} к статору, используя коэффициент приведения $\frac{1}{p} \cdot \frac{I_n}{U_n} \cdot \frac{m_1 (k_{05} \omega_1)^2}{m_2 (k_{05} \omega_2)^2}$, раскрываемый тем же путем, что и при определении r'_2 . Получаем:

$$x_{\kappa i} = \frac{I_n}{U_n} \cdot \frac{m_1 (k_{05} \omega_1)^2}{2pc_i} \cdot \frac{0,79}{m_1} \cdot f_n \alpha \pi \tau g \cdot 10^{-5}. \quad (30)$$

Формулы (26), (27) и (30) позволяют определить все сопротивления для расчета.

Методика и пример расчета. Расчет производится весьма просто. Излагаем его порядок на примере расчета синхронного явнополюсного двигателя с массивными полюсными наконечниками типа ДСП16-4 1500 кВа завода „Уралэлектрораппарат“.

Выписываются необходимые для расчета параметры машины:

Параметр	U_H	I_H	$\cos \varphi_H$	p	m_1	w_1	k_{05}	α	τ	l	R	r_1	x_1	x_{ad}	x_{aq}	q_k	γ_k	h	d'
Значение	$\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 6000$	144	0,9	2	3	144	0,91	0,654	0,58	0,61	0,37	0,001 ≈ 0	0,134	1,74	0,734	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^7$	0,063	0,35
Размерность	v	a	—	—	—	—	—	—	m	m	m	—	oe	oe	oe	m^2	$ом^{-1}m^{-1}$	m	m

Здесь d' — по рис. 4,а; h — полупериметр кольца, обычно выполняемого из мягкой стали: $\gamma = 10^7 \cdot k = 0,634$; остальные символы — по списку обозначений. Ротор $n = 9$.

Находятся вспомогательные величины:

Величина	A	k_F	k_y	k_φ	C_d	C_q	t_d	t_q	ρ	g	Δm
Номер формулы	(23)	(III, 4)	(9)	(II, 3)	(IV, 1)	(IV, 1)	(24a)	(24a)	(28)	—	(22)
Номер рисунка	—	3	—	3	3	3	—	—	—	4	—
Значение	$9 \cdot 10^8$	0,51	0,755	1,59	0,25	0,43	0,55	0,95	0,014	0,45	$\frac{0,44}{100 \sqrt{s}} m$

Рассчитываются параметры схемы замещения:

Параметр	r'_{md}	r'_{mq}	r'_m	x'_m	r'_{kd}	r'_{kq}	r'_k	x'_{kd}	x'_{kq}	x'_k	x_0	σ
Номер формулы	(26)	(26)	(1)	(27)	(26)	(26)	(1)	(30)	(30)	(1)	(1a)	(2)
Значение	$0,338 \sqrt{s}$	$0,196 \sqrt{s}$	$0,267 \sqrt{s}$	$0,200 \sqrt{s}$	0,012	0,012	0,012	0,151	0,087	0,119	1,23	1,08

Производится расчет $M = f(s)$ по таблице.

Сопротивления схемы	Активное $\frac{1}{s} \sigma^2 r'_2$	Реактивное X	Полное сопротивление Z	Момент M
Формула	$\frac{1}{s} (\sigma^2 r'_m + r'_k \cdot \sigma^2)$	$\sigma x_1 + \sigma^2 x'_k + \sigma^2 x'_m$	$\sqrt{\left(\frac{\sigma^2 r'_2}{s}\right)^2 + X^2}$	(4)
Значение s	$\frac{1}{s} (0,312 \sqrt{s} + 0,014)$	$0,145 + 0,139 + 0,234 \sqrt{s}$	—	—
1	0,326	0,51	0,606	0,99
0,6	0,425	0,46	0,625	1,20
0,4	0,533	0,43	0,685	1,27
0,1	1,110	0,35	1,150	0,94
0,05	1,800	0,34	1,830	0,55

* При $s = 0,05$ r'_m подсчитано с поправкой B_{ym} по (III, 6).

Подсчитывается пусковой ток I_n по (5) при $s = 1$. Полученное значение следует считать заниженным на 20...30%.

Если рассчитывается асинхронный двигатель, то полагаем:

$$\alpha = 1, t_d = t_q = 1, r'_{2d} = r'_{2q} = r'_2, \\ x'_{2d} = x'_{2q} = x'_2.$$

В случае отсутствия замыкающего кольца вместо r'_k и x'_k следует ввести коэффициент торцевого эффекта k_m , приводящий к увеличению r'_m и x'_m . Согласно [Л. 7]

$$k_r = f\left(\frac{\tau}{l}, \frac{2b}{\tau}\right), \quad (31)$$

где b — длина края ротора (рис. 4,а). Так же поступаем в случае синхронного двигателя без замыкающего кольца, полагая здесь $Z'_2 = Z'_{2d}$.

Для проверки сделанных выводов была рассчитана характеристика $M = f(s)$ для синхронного двигателя ДСП116-4, 1500 кВа завода „Уралэлектрораппарат“. На рис. 5 расчетная кривая сопоставлена с опытной (по данным завода). Для наиболее важных точек погрешности

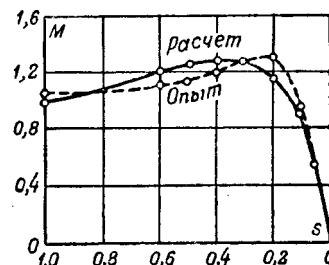


Рис. 5. $M = f(s)$ для синхронного двигателя.

составляют: в определении пускового момента 5%, максимального 2,5%, момента при $s = 0,05$ — 2% с корректи-

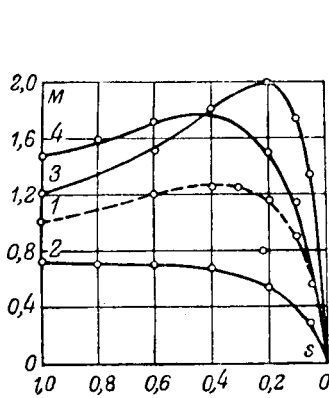


Рис. 6.
 $M = f(s)$ для различных вариантов.

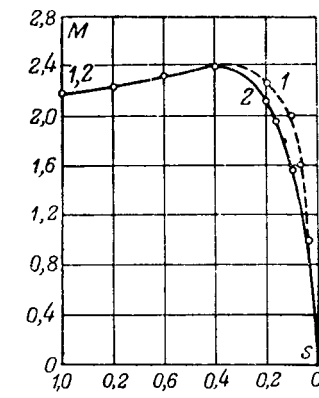


Рис. 7. $M = f(s)$ для асинхронного двигателя.

ровкой B_{ym} по (III,6). Без этой корректировки погрешность при подсчете момента при $s=0,05$ составит 14%. Расчетное значение пускового тока $I_n=2,53$, опытное 3,45, погрешность 27%.

Приведем также некоторые характерные величины, рассчитанные по выведенным формулам: Δ_m при $s=1$ составляет 3,3 мм и 14,7 мм при $s=0,05$; $B_{em}=2,19$ вб/м²; при пуске $\mu/\mu_0=25$. Минимальное значение βR , соответствующее $s=0,05$, будет 28,5.

На рис. 6 построена кривая 2 $M=f(s)$ для того же двигателя при отсутствии замыкающего кольца. Там же для сравнения с кривой 1 $M=f(s)$ синхронного двигателя даны те же характеристики для асинхронного двигателя, выполненного на базе этого синхронного, с кольцом (3) и без кольца (4). Наконец, на рис. 7 помещена кривая $M=f(s)$, рассчитанная для асинхронного двигателя меньшей мощности — 155 квт. Данные двигателя взяты из [Л. 5], коэффициент k_m был найден по [Л. 7] в соответствии с (31) и оказался равным 1,5. Для сравнения там же нанесена кривая 1, рассчитанная И. М. Постниковым [Л. 5] по предложенному им методу для асинхронных двигателей.

Выводы. 1. Параметры двигателей с массивным ротором можно рассчитать аналитически при помощи простых и удобных формул. Они, в частности, много проще предложенных в известной работе по расчету синхронных машин с массивными полюсными наконечниками [Л. 6] и обладают общностью, будучи пригодными для синхронных и асинхронных машин.

2. Для асинхронного пуска синхронных машин замыкающее кольцо необходимо, так как при этом значения пускового момента и момента при скольжении 5% резко возрастают (рис. 6).

3. Для повышения момента при $s=0,05$ следует увеличивать α , уменьшать $\frac{l}{\tau}$ и повышать линейную нагрузку. Результирующее влияние α на величину r'_{2m} показано коэффициентом k_α на рис. 3.

4. Для асинхронных двигателей с легкими условиями пуска применение кольца целесообразно, так как значение s_n резко уменьшается (рис. 6). Пусковой момент при отсутствии кольца выше, чем при его наличии (рис. 6 и 7), но повышение его происходит за счет ухудшения рабочих характеристик двигателя, ибо при этом возрастает s_n .

Приложение I. Для доказательства сравним соответствующие решения, не вводя пока в обоих случаях функциональной зависимости μ от y . Краевым эффектом пренебрегаем, ибо с торцов полюсов предполагается хорошо проводящее кольцо, вынесенное за пределы рабочей длины [Л. 2 и 3]. Тогда для условий реального ротора имеем по [Л. 3]:

$$\delta = \delta_e \left| \frac{J_p(\beta y)}{J_p(\beta R)} \right|. \quad (I,1)$$

Мы учитываем лишь первую пространственную гармоническую и применяем в записи наши обозначения.

Для случая плоской волны и когда начало координат помещено на оси ротора (рис. 2), как известно [Л. 1],

$$\delta = \delta_e e^{-\frac{R-y}{\Delta}}. \quad (I,2)$$

Сравнивая (I,1) и (I,2), видим, что относительное различие результатов в определении модуля $\delta = \delta(y)$ характеризуется отношением

$$\eta = \frac{|J_p(\beta y)|}{|J_p(\beta R)|} : e^{-\frac{R-y}{\Delta}}. \quad (I,3)$$

Из рис. 8, где дана зависимость $\eta = f(\beta R)$ при $p=1$ и $y=R-\Delta$, видно, что уже при $\beta R \geq 7$ расхождение не превосходит 10%. Погрешность же в токе $I = \int \delta(y) dy$ составит всего около 2%. Величина $\beta R \geq 7$ вплоть до скольжения $s=0,05$ обеспечивается уже при $R \geq 5$ см, т. е.

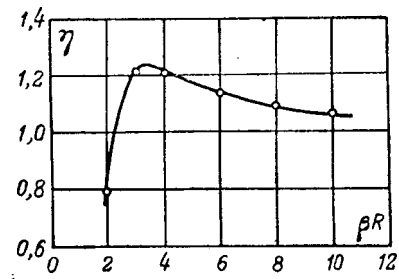


Рис. 8. $\eta = f(\beta R)$.

практически во всех случаях. Так как по свойствам бесселевых функций при таких значениях βR величина $\frac{|J_p(\beta R)|}{|J_{p+1}(\beta R)|} \approx 1$, то сказанное справедливо для любого p . Поэтому для учета непостоянства μ по глубине массива можно пользоваться выводами, полученными для плоской волны.

Приложение II. Определение коэффициента k_φ .

Из (7) и (16)

$$\mu = kH^{\frac{1-n}{n}} = k[H_{dm} \sqrt{\sin^2 \varphi + (k_B^n \cos \alpha \varphi)^2}]^{\frac{1-n}{n}} \quad (II,1)$$

Учитывая (6) и (II,1), зависимость Δ_e от φ отобразим равенством:

$$\Delta_e = \Delta_m [\sin^2 \varphi + (k_B^n \cos \alpha \varphi)^2]^{\frac{n-1}{4n}} = \Delta_m \phi(\varphi), \quad (II,2)$$

где Δ_m определено при H_{dm} .

Плотности же токов δ_d и δ_q синусоидальны вдоль полюса, как это показал В. М. Матюхин [Л. 4].

Поэтому

$$\delta_e = \sqrt{\delta_d^2 + \delta_q^2} = \delta_m \sqrt{\sin^2 \varphi + (k_B \cos \varphi)^2} = \delta_m \xi(\varphi).$$

Отсюда с учетом (II,2) и (25) находим выделенную в массиве мощность [в (25) вместо $\frac{\Delta_m}{k_F}$ взята переменная величина Δ_e]:

$$P_M = 2 \int_0^{\varphi_0} \left[\delta_m \xi(\varphi) \cdot \Delta_e \cdot k_y \cdot R d \frac{\varphi}{p} \right]^2 \cdot \frac{l}{\gamma k_y \Delta_e R d \frac{\varphi}{p}} =$$

$$= 2 \delta_m^2 \frac{l R}{\gamma p} k_y \Delta_m \int_0^{\varphi_0} [\xi(\varphi)]^2 \psi(\varphi) d\varphi.$$

Полный ток в массиве полюса

$$I_M = 2 \int_0^{\varphi_0} \delta_e k_y \Delta_e R d \frac{\varphi}{p} = 2 \delta_m \frac{R}{p} k_y \Delta_m \int_0^{\varphi_0} \xi(\varphi) \psi(\varphi) d\varphi.$$

Сопротивление массива

$$r_M = \frac{P_M}{I_M^2} = \frac{l p}{\gamma R k_y \Delta_m} \cdot \frac{2 \int_0^{\varphi_0} [\xi(\varphi)]^2 \psi(\varphi) d\varphi}{\left[2 \int_0^{\varphi_0} \xi(\varphi) \psi(\varphi) d\varphi \right]^2}.$$

Без учета изменения μ вдоль τ мы бы имели очевидное равенство:

$$r_{M_0} = \frac{l}{\gamma R \frac{\alpha p}{p} k_y \Delta_m}.$$

Следовательно, изменение μ привело к возрастанию сопротивления в отношении

$$k_F = \frac{r_M}{r_{M_0}} = \frac{1}{2 \cdot \alpha p} \times$$

$$\times \frac{\int_0^{\varphi_0} (\sin^2 \varphi + k_B^2 \cos^2 \varphi) (\sin^2 \varphi + k_B^{2n} \cos^2 \alpha \varphi)^{\frac{n-1}{4n}} \cdot d\varphi}{\left[\int_0^{\varphi_0} \sqrt{\sin^2 \varphi + k_B^2 \cos^2 \varphi} (\sin^2 \varphi + k_B^{2n} \cos^2 \alpha \varphi)^{\frac{n-1}{4n}} \cdot d\varphi \right]^2}. \quad (\text{II},3)$$

Приложение III. Аналитическое определение индукции в зазоре. Ток в процессе пуска практически реактивен, поэтому

$$B_{ym} \approx k_M \frac{\pi}{2 \sqrt{2} l} \cdot \frac{U_n (1 - I x_1)}{4,44 \cdot f_n \omega_1 k_{ob}}, \quad (\text{III},1)$$

где коэффициент магнитной несимметрии

$$k_M = \frac{1}{\frac{k_d + k_q}{2}} = \frac{2}{\frac{\pi \alpha + \sin \pi \alpha}{\pi} + \frac{\pi \alpha - \sin \pi \alpha}{\pi}} = \frac{1}{\alpha}.$$

Кроме этого, можно найти связь между B_{ym} и I из условия равновесия н. с.

Действующее значение пространственной амплитуды н. с. статора на один полюс

$$F_{am} = \frac{1,35}{\sqrt{2}} \cdot \frac{k_{ob} \omega_1}{p} \cdot I_n \cdot I = AI, \quad (\text{III},2)$$

где A введено для краткости.

С другой стороны,

$$F_{am} = 2 \int_0^{\varphi_0} H_e d\varphi = 2 k_F H_{dm}, \quad (\text{III},3)$$

где k_F определяется из (16):

$$k_F = \int_0^{\varphi_0} \sqrt{\sin^2 \varphi + (k_B^n \cos \alpha \varphi)^2} d\varphi. \quad (\text{III},4)$$

Совместным решением (7), (20), (III,2) и (III,3) находим:

$$AI = 2 k_F \cdot k^{-\frac{n}{n+1}} \left(\sqrt{2 \pi f_n \gamma} \cdot \frac{R}{p} B_{ym} \sqrt{s} \right)^{\frac{2n}{n+1}} =$$

$$= D (B_{ym} \sqrt{s})^{\frac{2n}{n+1}}, \quad (\text{III},5)$$

где D введено для краткости.

Решая полученную систему (III,1) и (III,5), находим:

$$\frac{L}{s^{\frac{n}{n+1}}} - \frac{T}{s^{\frac{n}{n+1}}} B_{ym} = B_{ym}^{\frac{2n}{n+1}}, \quad (\text{III},6)$$

где $L = \frac{A}{D x_1}$, $T = \frac{A(1 - I_0 x_1)}{x_1 D B_{y0}}$, а I_0 и B_{y0} — значения I_1 и B_{ym} при $s = 0$.

Практика расчета показывает, что вплоть до $s = 0,05$ $T B_{ym} \ll L$ и поэтому по (III,6)

$$B_{ym} = \frac{L}{\sqrt{s}}. \quad (\text{III},7)$$

В зоне скольжений от $s = 1$ до $s = 0,1$ вносимая погрешность ничтожна. Для $s < 0,1$ можно при желании уточнить B_{ym} по (III,6).

Подставляя (III,7) в (21) и раскрывая L , приходим к окончательному выражению (22).

Приложение IV. Определение коэффициентов c_d и c_q .

По [Л. 4] коэффициент c'_d равен отношению полной н. с. на пару полюсов F_{2p} к н. с. одного витка F_1 , расположенного по оси d или q . Рассматривая первую гармоническую н. с., имеем по оси d :

$$F_1 \equiv \delta_m \Delta_m; \quad F_{2p} \equiv 4 \int_0^{\varphi_0} (\delta_e \Delta_e) \sin \varphi d\varphi =$$

$$= 4 \int_0^{\varphi_0} \delta_m \sin^2 \varphi \cdot \Delta_m \psi(\varphi) d\varphi;$$

$$c'_d = \frac{F_{2p}}{F_1} = 4 \int_0^{\varphi_0} \sin^2 \varphi [\sin^2 \varphi + (k_B^n \cos \alpha \varphi)^2]^{\frac{n-1}{4n}} d\varphi = 4 c_d. \quad (\text{IV},1)$$

Аналогично

$$c'_q = 4 \cdot \int_0^{\varphi_0} \cos^2 \varphi [\sin^2 \varphi + (k_B^n \cos \alpha \varphi)^2]^{\frac{n-1}{4n}} d\varphi = 4 \cdot c_q.$$

Обозначения

- M — момент вращения;
- s — скольжение;
- B — модуль действующего значения индукции;
- H — то же напряженности;
- B_e, H_e — модули их касательных составляющих на поверхности ротора по осям;
- B_{em}, H_{em} — их пространственные амплитуды;
- B_y — нормальная индукция в зазоре;
- δ — модуль действующего значения плотности тока;
- f_n — частота номинальная;
- γ — удельная проводимость массива;
- Δ — глубина проникновения электромагнитной волны;

ϵ — основание логарифмов;
 $j = \sqrt{-1}$;
 $\beta = \sqrt{2\pi f \mu \gamma}$;
 f — знаки функциональной зависимости;
 J_p — бесселева функция 1-го рода порядка p ;
 $|J_p|$ и θ_p — ее модуль и аргумент;
 p — число пар полюсов;
 R, l — радиус и длина ротора;
 τ — полюсное деление;
 α — коэффициент полюсной дуги;
 φ — текущая координата вдоль τ в электрических градусах;
 $\varphi_0 = \alpha \frac{\pi}{2}$ — координата края полюса;
 y — ось координат вдоль радиуса ротора;
 q — поперечное сечение;
 U_n — номинальное фазное напряжение;
 I_n — то же ток;
 m — число фаз;
 w_1 — число витков обмотки статора;
 $k_{об}$ — обмоточный ее коэффициент;
 r — активное сопротивление;
 x — индуктивное сопротивление;
 x_1 — сопротивление рассеяния статора;
 x_a — реактивность реакции якоря;
 Z — полное сопротивление;

Индексы указывают:
 d, q — продольная или поперечная ось;
 m — массив;
 k — кольцо;
 e — поверхность ротора;
 t — пространственная амплитуда.

Литература

1. Л. Р. Нейман. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Госэнергоиздат, 1949.
2. К. И. Шенфер. Ротор асинхронного двигателя в виде массивного железного цилиндра. Электричество, № 2, 1926.
3. И. С. Брук. Теория асинхронного двигателя с массивным ротором. ВЭТЭ, № 2, 1928.
4. В. М. Матюхин. К теории неполной демпферной клетки. ВЭП, № 4, 1930.
5. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. ГИТЛ, УССР, 1952.
6. Gibbs. Асинхронные и синхронные двигатели с массивными роторами. Journ. of IAEЕ, т. 95, № 46, 1948.
7. Арешян. К теории асинхронного двигателя с массивным ротором. Автореферат, МЭИ, 1952.
8. М. Лившиц. Электрические машины, т. III, ОНТИ, 1936.

[23.10.1954]



Расчет средних величин в системе питания электрических железных дорог¹

Кандидат техн. наук, доц. С. Е. КУЗИН

Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Образцова

Обзор существующих методов расчета электроснабжения. Расчеты по электроснабжению электрических железных дорог включают определение средних и максимальных величин, необходимых для выбора числа и мощности тяговых подстанций и сечения проводов контактной сети.

Для расчета перечисленных величин известно несколько методов: 1) равномерно распределенной нагрузки; 2) подвижных нагрузок; 3) сечения графика движения; 4) метод, основанный на принципах теории вероятностей. Наиболее простой — метод равномерной нагрузки и метод подвижных нагрузок. Однако первый не учитывает сосредоточенности отдельных нагрузок, а второй — колебаний токов поездов, поэтому оба они дают значительные преуменьшения расчетных величин.

Поставленной задаче лучше всего отвечает метод сечения графика движения. Но применение его возможно только при одновременном проведении анализа эксплуатационных условий работы электрической дороги. Проектирование на основе графика движения вызывает сомнение в возможности достижения совпадения фактически введенного в практику графика с проектным графиком ввиду большого срока (3—5 лет), отделяющего проектирование от сдачи дороги в эксплуатацию. Кроме того, известно, что при

одном и том же грузопотоке можно составить различные варианты графиков движения. Между тем, как показали исследования, даже небольшое смещение поездов в графике движения дает значительные изменения в нагрузках подстанции и контактной сети.

При таком состоянии вопроса понятен тот интерес, который проявляется к разработанному в СССР за последнее время методу, основанному на принципе теории вероятностей. В этом методе учитывается как прерывность потребления тока, так и колебания тока во времени и, следовательно, он наиболее полно учитывает реальные условия. Однако принципы, положенные в основу этого метода, вызывают большое недоверие.

В теории вероятностей основным является условие случайности рассматриваемых явлений и независимость явлений друг от друга.

Чтобы использовать принципы теории вероятностей в расчете электроснабжения электрических железных дорог, В. Е. Розенфельду и К. Г. Марквардту пришлось ввести в рассмотрение ряд предположений, значительно отличающихся от реальных условий. Так, они вынуждены были предположить движение поездов неорганизованным, стихийным. В основу расчета были приняты предположения о распределении поездов по участку и в течение суток согласно теории вероятностей без учета реальных возможностей рациональной организации движения поездов.

¹ Печатается в порядке обсуждения.

Такой подход был бы обоснованным лишь в том случае, если бы движение осуществлялось без графика движения, что не соответствует, однако, реальному положению дела. Как известно, в основе работы советского транспорта лежит график движения. График движения является железным законом на транспорте.

Используя законы теории вероятностей, В. Е. Розенфельд и К. Г. Марквардт получили расчетные формулы для проектирования электроснабжения, дававшие достаточно удовлетворительные результаты. Но по существу теория вероятностей к расчету была привлечена искусственно, можно получить те же формулы и без применения теории вероятностей. Например, для определения средних токов поездов (среднеарифметического и среднеквадратичного) находится математическое ожидание от мгновенного тока поезда с учетом вероятностей потребления его по формуле

$$I = Mo[i]. \quad (1)$$

или

$$I = Mo[i_1 p_1 + i_2 p_2 + \dots], \quad (2)$$

где i_1, i_2 — мгновенные значения токов поезда, а p_1, p_2 и т. д. — вероятности, соответствующие этим токам. В свою очередь, эти вероятности определяются отношениями времен потребления токов t_1, t_2 и т. д. к общему времени работы поезда T :

$$p_1 = \frac{t_1}{T}; \quad p_2 = \frac{t_2}{T} \text{ и т. д.} \quad (3)$$

На самом же деле здесь совершенно не нужны понятия математического ожидания и вероятности. Как известно, среднее значение тока для любой колеблющейся нагрузки

$$I = \frac{\sum it}{\sum t} = \frac{\sum it}{T} \quad (4)$$

или в общем виде

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i dt, \quad (5)$$

что совпадает с результатом определения тока по формуле (2).

Для среднего квадратичного тока поезда также имеется соответствующее выражение

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt. \quad (6)$$

В технике давно широко используется величина „действующее значение переменного напряжения“, которая вычисляется по аналогичной формуле без ссылки на теорию вероятностей.

Применяемая теорема из теории вероятностей о математическом ожидании для суммы

переменных также должна быть заменена простым математическим соотношением: вместо

$$Mo(x_1 + x_2 + \dots) = Mo(x_1) + Mo(x_2) + \dots \quad (7)$$

следует написать:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T (x_1 + x_2 + x_3 + \dots) dt &= \frac{1}{T} \int_0^T x_1 dt + \\ &+ \frac{1}{T} \int_0^T x_2 dt + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

Особо следует отметить теорему о математическом ожидании для произведения: математическое ожидание от произведения нескольких переменных равно произведению математических ожиданий этих переменных:

$$Mo(x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \dots) = Mo(x_1) \cdot Mo(x_2) \cdot Mo(x_3) \dots \quad (9)$$

В теории вероятностей доказывается, что эта формула действительна только для независимых переменных.

Вместо этой формулы можно использовать выражение

$$\frac{1}{T^3} \iiint x_1 x_2 x_3 dt = \frac{1}{T} \int x_1 dt \cdot \frac{1}{T} \int x_2 dt \cdot \frac{1}{T} \int x_3 dt. \quad (10)$$

Однако такая замена возможна только в том случае, когда все значения функций X_1, X_2, X_3 и т. д. взаимно переставляются, и среднее от произведений всех этих перестановок и даст правую часть этой формулы. Таким образом, здесь имеется независимое существование функций X_1, X_2, X_3 и т. д., а связь между ними проявляется в виде всевозможных перестановок в произведениях. В случае, если функции X_1, X_2, X_3 и т. д. имеют какие-то определенные связи между собой, то вышеприведенное равенство дополняется еще слагаемым в виде $\mp M$. Когда рассматривается средний случай, то величина M равна нулю, в других случаях величину M и ее знак следует определить.

Таким образом, можно сказать, что для определения средних значений расчетных величин в электроснабжении электрических железных дорог нет необходимости применять теорию вероятностей. Далее, рассматривая математическую сторону вопроса, нетрудно убедиться в том, что все основные расчеты теории вероятностей в интересующем нас разрезе сами построены на использовании положений другой отрасли математики, а именно теории соединений.

Возникает естественное предложение о явной целесообразности обоснования теории расчетов электроснабжения электрических железных дорог непосредственно на теории соединений, без использования теории вероятностей². Можно предполагать, что собственно теория вероятностей найдет применение при определении мгновенных перегрузок и падений напряжений, а также в выявлении возможных аварийных отклю-

чений элементов оборудования с учетом опыта эксплуатации действующих дорог.

Основные расчетные соотношения. Для выявления методики аналитического определения средних значений расчетных величин рассмотрим взаимозависимости величин в простейших случаях — для однопутного участка электрической железной дороги при одностороннем и двустороннем питании.

Одностороннее питание. Рассмотрим участок длиной L' километров, питаемый от тяговой подстанции A . Пусть на участке находятся n поездов, из которых каждый потребляет различный ток, изменяющийся от нуля до максимума во времени и по длине участка и определяющийся тяговыми расчетами или по опытным измерениям.

Все поезда проходят участок от подстанции A до его конца и обратно, поэтому расстояние от подстанции до каждого поезда меняется от нуля до L' (рис. 1). Погонное сопротивление контактной сети принимаем постоянным на протяжении всего участка и равным r [ом/км].

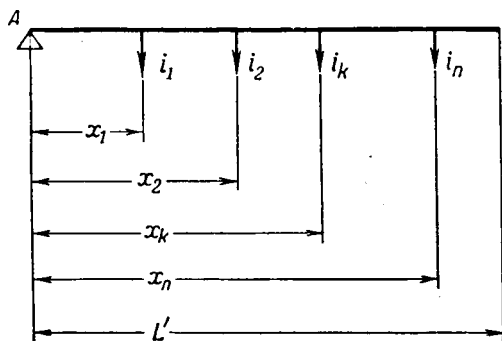


Рис. 1.

Выясним методику определения следующих средних величин: среднего арифметического тока подстанции, квадратичного тока подстанции, среднего падения напряжения до токоприемника поезда за все время работы поезда, среднего падения напряжения до токоприемника поезда за время работы под током, средней потери мощности в контактной сети.

Рассмотрим мгновенное токораспределение, потерю напряжения и потерю мощности для размещения поездов, представленного на рис. 1.

² Мысль об отказе от теории вероятностей для расчета средних значений в системе электроснабжения электрических железных дорог не является новой. Так, в 1937 г. В. Е. Розенфельд в книге «Расчет тяговых сетей» на стр. 218 указывал, что «При определении средних значений нагрузок, падений напряжения и потерь мощности можно принять нагрузки всех поездов (кроме того поезда, для которого определяются падения напряжения и потери мощности) распределенными по линии, а нагрузку расчетного поезда — сосредоточенной и движущейся».

С подобным предложением также выступал на ряде конференций в 1947 г. и К. Г. Марквардт. Однако до настоящего времени эти предложения не были реализованы и, как указано было выше, последующие работы данных авторов все же основываются на принципах теории вероятностей.

При одностороннем питании мгновенное значение тока нагрузки подстанции определяется как сумма токов, потребляемых отдельными поездами в данный момент времени:

$$I_{Am} = i_1 + i_2 + \dots + i_n = \sum_1^n i_k. \quad (11)$$

Мгновенное падение напряжения до поезда любого типа определяется как сумма падений напряжения от токов поездов, находящихся между подстанцией A и рассматриваемым поездом, и падения напряжения от токов поездов, находящихся за рассматриваемым поездом:

$$\Delta U_k = r \left(\sum_1^k i x + x_k \sum_{k+1}^n i \right). \quad (12)$$

В данное мгновение потеря мощности в контактной сети определяется в виде суммы произведений из падений напряжения до отдельных поездов на их токи:

$$\Delta P_m = \Delta U_{1m} i_1 + \Delta U_{2m} i_2 + \dots + \Delta U_n i_n = \sum_1^n \Delta U i. \quad (13)$$

Для определения средних значений этих величин необходимо их интегрировать по времени и пути и затем отнести результат к полной длине участка L' и к полному времени хода поезда по участку T . Тогда средний ток подстанции

$$I_o = \frac{1}{T} \int_0^T I_{Am} dt = \frac{1}{T} \int_0^T (i_1 + i_2 + \dots + i_n) dt. \quad (14)$$

Средний квадратичный ток подстанции (квадрат значения)

$$I_s^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (I_{Am})^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T (i_1 + i_2 + \dots + i_n)^2 dt. \quad (15)$$

Средняя потеря напряжения в контактной сети до конца линии

$$\begin{aligned} \Delta U_0 &= \frac{1}{T} \cdot \frac{r}{L'} \int_0^T \int_0^{L'} (i_1 x_1 + i_2 x_2 + \dots + i_n x_n) dt dx = \\ &= \sum_1^n \frac{1}{T} \cdot \frac{r}{L'} \int_0^T \int_0^{L'} i x dt dx. \end{aligned}$$

Среднее падение напряжения до токоприемника поезда

$$\Delta U_1 = \frac{1}{T} \cdot \frac{r}{L'} \int_0^T \int_0^{L'} \Delta U_{1m} dt dx. \quad (16)$$

Среднее падение напряжения до токоприемника за время хода под током

$$\Delta U_{T1} = \frac{1}{T_m} \cdot \frac{r}{L'} \int_0^{T_m} \int_0^{L'} \Delta U_{1m} dt dx. \quad (17)$$

Средняя потеря мощности в контактной сети

$$\Delta P = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{L} \int_0^T \int_0^L \Delta P_{\text{ж}} dx dt. \quad (18)$$

Решение этих интегралов будет дано дальше.

Двустороннее питание. Рассмотрим участок длиной L , питаемый от двух подстанций A и B , на котором находятся n поездов на расстояниях x от подстанции A и на расстояниях y от подстанции B (рис. 2).

Расстояния от поездов до подстанций могут изменяться от нуля до полной длины участка L . Поезда потребляют токи в соответствии с режимом работы электроподвижного состава.

Мгновенные значения токов нагрузки подстанций A и B составят:

$$\begin{aligned} I_{A\text{ж}} &= i_1 \left(1 - \frac{x_1}{L}\right) + i_2 \left(1 - \frac{x_2}{L}\right) + \dots + \\ &+ i_n \left(1 - \frac{x_n}{L}\right) = i_1 \frac{y_1}{L} + i_2 \frac{y_2}{L} + \dots + \\ &+ i_n \frac{y_n}{L} = \sum_1^n i \frac{y}{L}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$I_{B\text{ж}} = i_1 \frac{x_1}{L} + i_2 \frac{x_2}{L} + \dots + i_n \frac{x_n}{L} = \sum_1^n i \frac{x}{L}. \quad (20)$$

Мгновенное падение напряжения до любого поезда

$$\Delta U_k = r \sum_0^k \frac{iy}{L} \cdot x + rx \sum_{k+1}^n \frac{iy}{L}. \quad (21)$$

Мгновенная потеря мощности

$$\Delta P_{\text{ж}} = \sum_1^n \Delta U_i. \quad (22)$$

Средние значения для расчетных величин получаются следующим образом:

средние токи подстанций

$$I_{oA} = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{L} \int_0^T \int_0^L I_{A\text{ж}} dt dx = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{L} \int_0^T \int_0^L \sum \frac{iy}{L} dt dx; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} I_{oB} &= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{L} \int_0^T \int_0^L I_{B\text{ж}} dt dx = \\ &= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{L} \int_0^T \int_0^L \sum \frac{ix}{L} dt dx; \end{aligned} \quad (24)$$

средняя потеря напряжения за все время работы поезда

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{L} \int_0^T \int_0^L \Delta U_{\text{ж}} dt dx = \\ &= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{L} \int_0^T \int_0^L \left(r \sum \frac{iy}{L} \cdot x + rx \sum \frac{iy}{L} \right) dt dx; \end{aligned} \quad (25)$$

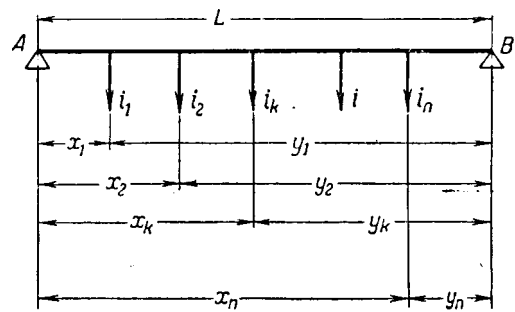


Рис. 2.

средняя потеря напряжения до токоприемника поезда за время хода под током

$$\Delta U_m = \frac{1}{T_m} \cdot \frac{1}{L} \int_0^{T_m} \int_0^L \Delta U_{\text{ж}} dt dx; \quad (26)$$

средняя потеря мощности

$$\Delta P = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{L} \int_0^T \int_0^L \Delta P_{\text{ж}} dt dx. \quad (27)$$

Особенности интегрирования полученных формул. В полученные интегралы входят мгновенные значения переменных величин, зависящих как от времени, так и от расстояний. Произведение мгновенных значений тока и расстояния может давать различный результат — от нуля (при $i=0$ или $x=0$) до максимального значения (при $i=\text{макс}$ и $x=L$) в зависимости от положения поезда на участке и режима потребления тока. Полагая, что ток, потребляемый поездом, связан с профилем пути и режимом ведения и меняется во времени, а расстояния x и y зависят от скорости движения и также связаны со временем, можно предполагать изменение этих двух величин взаимосвязанным. Токи разных поездов могут считаться независимыми друг от друга.

При интегрировании полученных выражений необходимо принять во внимание, что интеграл от произведения нескольких переменных равен произведению интегралов, взятых по каждой из них в отдельности. Следовательно, среднее значение от произведения нескольких переменных равно произведению средних значений этих переменных. Это предположение действительно только в случае рассмотрения всей совокупности взаимных сочетаний мгновенных значений для независимых переменных, т. е. в случае определения среднего из средних значений для всех возможных графиков движения поездов.

Для доказательства возможности такой замены рассмотрим пример.

Пусть имеются три переменные и каждая из них имеет два значения a и b . Положим, что эти значения чередуются. Тогда возможны следующие сочетания величин:

Переменная	Варианты размещения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Первая	$a b$	$a b$	$a b$	$b a$	$b a$	$b a$	$a b$	$b a$
Вторая	$a b$	$b a$	$b a$	$a b$	$b a$	$b a$	$a b$	$a b$
Третья	$a b$	$a b$	$b a$	$a b$	$a b$	$b a$	$b a$	$b a$
Произведе- ния пере- менных	$a^3 b^3$	$a^2 b$ $a b^2$	$a b^2$ $b^2 a$	$a^2 b$ $b^2 a$	$a b^2$ $a^2 b$	$b^3 a^3$ a^3	$a^2 b$ $a b^2$	$a b^2$ $a^2 b$

Среднее значение произведений по всем вариантам составит:

$$\frac{a^3 + b^3 + a^2b + ab^2 + ab^2 + a^2b + a^2b + ab^2 + a^3 + b^3}{2 \cdot 8} +$$

$$+ \frac{a^2b + ab^2 + ab^2 + a^2b}{2 \cdot 8} = \frac{2(a^3 + b^3) + 6(a^2b + ab^2)}{16} =$$

$$= \frac{a^3 + b^3 + 3a^2b + 3ab^2}{8}. \quad (29)$$

Эта величина должна совпадать с произведением средних значений для отдельных переменных:

$$\frac{a+b}{2} \cdot \frac{a+b}{2} \cdot \frac{a+b}{2} = \frac{(a+b)^3}{8} \quad (30)$$

или

$$\frac{(a+b)^3}{8} = \frac{a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3}{8}, \quad (31)$$

что полностью совпадает с полученной нами ранее величиной (29).

В теории вероятностей имеется аналогичная теорема о математическом ожидании произведения нескольких величин. Однако там в качестве условия правильности замены математического ожидания произведения переменных на произведение математических ожиданий от них требуется полная независимость всех переменных друг от друга.

На первый взгляд может показаться, что предлагаемое доказательство не отличается от того, которое дается в теории вероятностей. На самом деле нужно отметить следующие три основные особенности излагаемого доказательства.

1. Доказательство справедливо для любого числа переменных, в том числе для двух, трех и т. д. при условии рассмотрения всей совокупности возможных сочетаний, количество которых может быть легко установлено на основе теории сочетаний и поэтому является вполне определенным.

2. Доказательство справедливо для зависимых переменных.

3. Не требуется делать предположения о бесконечно большом числе рассматриваемых сочетаний.

Указанные особенности позволяют ввести в расчеты реальные данные и определять не только их средние, но также максимальные и минимальные значения в рассматриваемом про-

цессе. Этим мы освобождаемся³ от необходимости использования теории вероятностей для аналитического расчета средних величин.

Помимо изложенного, следует отметить возможность дополнительного уточнения расчетов путем рассмотрения в них, если это необходимо, в качестве переменной произведения из тока поезда на расстояние (момент тока). Это дает учет фактического расположения токовых диаграмм поезда по участку и уточняет как распределение энергии между подстанциями, так и значение потерь напряжения и мощности в контактной сети.

Колебания средних значений расчетных величин. Для характеристики возможных колебаний средних значений рассмотрим определение потери напряжения и среднего квадратичного тока при одностороннем питании.

Для потери напряжения до конца линии имеем:

$$\Delta U_0 = \sum_1^n \frac{1}{T} \cdot \frac{r}{L} \int_0^T \int_0^L i x dt dx = \sum \frac{1}{T} \int_0^T idt \cdot \frac{r}{L} \int_0^L x dx. \quad (32)$$

Формула дает среднее значение потери напряжения для всех возможных графиков движения поездов. По причине колебаний токов поездов и различного положения поездов на участке при ходе эта величина может быть как несколько больше вышеприведенного среднего, так и меньше его. Для выяснения количественных соотношений заменим мгновенное значение тока i через среднее значение I и мгновенное его отклонение Δ :

$$i = I \pm \Delta, \quad (33)$$

где

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T idt.$$

Заменим также расстояние от подстанции до любого поезда на разность x между средним расстоянием l_0 и мгновенным отклонением λ :

$$x = l_0 \mp \lambda, \quad (34)$$

где

$$l_0 = \frac{1}{L} \int_0^L x dx = \frac{L'}{2}.$$

Подставив эти значения в (32), получим:

$$\Delta U_0 = \sum \frac{1}{T} \cdot \frac{r}{L} \int_0^T \int_0^{L'} [(I \mp \Delta)(l_0 \mp \lambda)] r dt dx =$$

$$= \sum \frac{1}{T} \cdot \frac{r}{L} \int_0^T \int_0^L [Il_0 \mp I\lambda \mp \Delta l_0 \mp \Delta\lambda] dt dx. \quad (35)$$

³ Положение 2 было высказано и доказано А. М. Шнейдером в 1937 г. для частного случая одинаковых поездов. Для общего случая любого числа поездов доказательство было дано им же позднее — в 1940 г. К тому же результату пришел автор на основе анализа большого числа графиков движения (20 графиков при семи поездах) в 1940 г.

Рассмотрим слагаемые подинтегрального выражения. Величина I_0 является постоянной, поэтому она может быть вынесена за знак интегрирования; λ и Δ — знакопеременные величины, поэтому их интегралы будут равны нулю. Это также следует из приведенной выше формулы:

$$i = I \mp \Delta,$$

но

$$\frac{1}{T} \int idt = I,$$

поэтому

$$\frac{1}{T} \int idt = \frac{1}{T} \int Idt + \frac{1}{T} \int (\mp \Delta) dt,$$

откуда

$$\frac{1}{T} \int_0^T (\mp \Delta) dt = 0. \quad (36)$$

Поэтому формула (35) принимает следующий вид:

$$\Delta U_0 = \sum r I I_0 + \sum \frac{1}{T} \cdot \frac{r}{L} \int_0^T \int_0^{L'} (\mp \Delta \lambda) dt dx. \quad (37)$$

Подинтегральная функция может быть как отрицательной, так и положительной: отрицательной при $(-\Delta)(+\lambda)$ и $(+\Delta)(-\lambda)$ и положи-

тельной при $(-\Delta)(-\lambda)$ и $(+\Delta)(+\lambda)$. При рассмотрении всех возможных графиков этот интеграл обращается в нуль, но для отдельного, конкретного графика значение его может отличаться от нуля, будучи как положительным, так и отрицательным. Эта величина определяет возможность некоторого колебания среднего значения для ΔU_0 от ее среднего значения для всех графиков движения.

В работах В. Е. Розенфельда и К. Г. Марквардта этими изменениями пренебрегали и полученные ими формулы давали среднее значение для расчетных величин для всех возможных случаев графика движения поездов. Однако примерно половина случаев любых графиков движения будет давать расчетные значения, несколько меньшие этой средней, а другая половина случаев (графиков) даст расчетные значения, несколько превышающие среднее.

Литература

1. С. Н. Бернштейн. Теория вероятностей. М.—Л., стр. 7, 1934.
 2. Г. П. Боев. Теория вероятностей. М.—Л., стр. 9, 11, 1950.
 3. В. Е. Розенфельд. Расчет тяговых сетей, стр. 30—31, 1937.
 4. К. Г. Марквардт. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог, стр. 320, 1948.
- [19.10.1954]



Новые разработки в области керамических конденсаторов низкого напряжения

Доктор техн. наук, проф. Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ, кандидат техн. наук И. Д. ФРИДБЕРГ
Ленинград

В современной высокочастотной аппаратуре с характерным для нее разнообразием режимов используется широкая номенклатура конденсаторов — керамических, слюдяных, пленочных и др. В этой большой номенклатуре выделяются керамические конденсаторы рядом своих особенностей.

По значению температурного коэффициента керамические конденсаторы представляют возможность широкого выбора. Удельная емкость ряда типов очень велика, что достигается за счет большой диэлектрической проницаемости керамики. Керамические конденсаторы могут быть выполнены весьма малых размеров — порядка нескольких миллиметров, и сравнительно большой стабильности по основному их параметру — емкости. Технология их изготовления позволяет осуществить массовое производство дешевых изделий.

Стабильность электрических характеристик керамических конденсаторов зависит от ряда эксплуатационных условий: а) температуры; б) влажности; в) механических воздействий; г) атмосферного давления; д) значения рабочего напряжения; е) частоты тока. Требование о повы-

шении стабильности характеристик конденсаторов тесно связано с вопросом о расширении их предельных эксплуатационных параметров: диапазона рабочей температуры, частоты, допускаемой влажности и др. Климатические условия существенно важны для применения конденсаторов в радиоприемниках высокого класса, в телевизионных приемниках, в промышленных высокочастотных установках, в особенности если эта аппаратура предусмотрена для работы в южных или приморских районах Советского Союза.

Одной из основных особенностей керамических конденсаторов является их высокая цикличность. Изменение емкости этих конденсаторов находится в пределах погрешности определения малых изменений емкости, а потому в отличие от слюдяных и ряда других конструкций трудно говорить о необратимом изменении емкости конденсаторов этого типа.

Температурный коэффициент емкости керамических конденсаторов в широком интервале температур не остается строго постоянным (рис. 1). Путем специального подбора компонентов керамики, в частности путем применения керамики, не содержащей соединений титана или содержа-

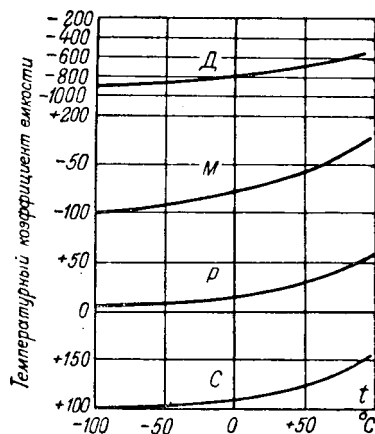


Рис. 1. Температурный коэффициент емкости керамических конденсаторов типа КТК групп D, M, P, C в зависимости от температуры (дифференциальные значения).

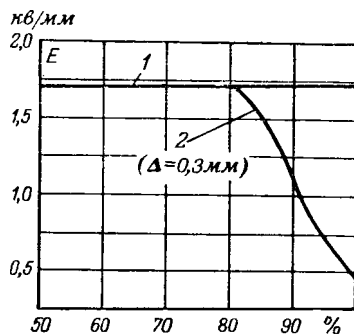


Рис. 2. Допустимая напряженность поля в зависимости от относительной влажности для конденсаторов типа КТК из цирконатовой (1) и рутиловой (2) керамики.

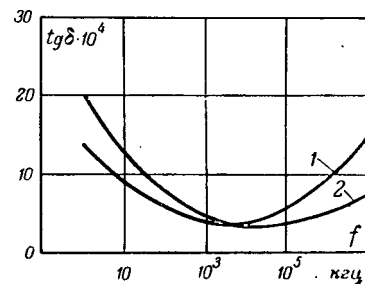


Рис. 3. Частотная зависимость tg δ корундовой (1) и титаново-циркониевой керамики (2).

щей пониженное их количество, удастся обеспечить зависимость от температуры, более благоприятную, чем приведенная на рис. 1.

При высокой влажности воздуха увеличивается тангенс угла потерь, снижается сопротивление изоляции и изменяется емкость керамического конденсатора. Если межэлектродные промежутки конденсатора не покрыты эмаль-лаком, то изменение электрических характеристик при высокой влажности особенно заметно.

Особую важность имеет вопрос об электрической прочности конденсаторов из титаносодержащей керамики, когда они используются для работы в условиях высокой влажности воздуха при постоянном напряжении. При повышенной влажности наблюдается снижение электрической прочности тонкостенных изделий вследствие процесса электровосстановления двуокиси титана. Еще недавно считали, что только герметизация конденсаторов позволяет избежать электрического пробоя изделий при длительной эксплуатации. Однако ряд исследований показал, что правильный выбор допустимой напряженности поля обеспечивает надежную работу конденсаторов даже в этих жестких условиях (рис. 2).

Частотный предел многих видов керамических конденсаторов низкого напряжения не превышает 10 мГц.

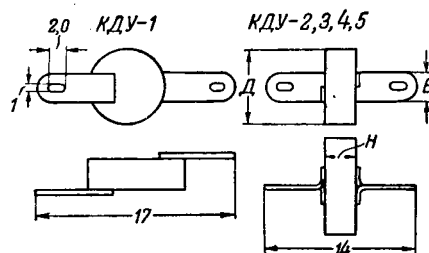
Предел рабочей частоты определяется tg δ керамического материала при сверхвысокой частоте, а также индуктивным сопротивлением выводов согласно общеизвестным соотношениям для частоты, емкости и индуктивности.

На рис. 3 показана зависимость tg δ некоторых видов радиокерамики от частоты, а на рис. 4,а и 4,б приведена зависимость кажущейся емкости трубчатых и дисковых конденсаторов низкого напряжения от частоты. При частотах выше 10⁷ гц кажущаяся емкость конденсаторов возрастает вместе с частотой в соответствии с увеличением индуктивного сопротивления конденсатора, в особенности при большой емкости. Для частот до 500 мГц рекомендуется применение

конденсаторов с особо малой индуктивностью специальной конструкции типа КДУ — дисковые, с плоскими укороченными выводами (табл. 1).

Таблица 1

Конденсаторы керамические дисковые вида КДУ (для ультракоротковолновой аппаратуры); f до 500 мГц, $U_{\text{раб}} = 500 \text{ в}$



Видоразмер конденсатора	Размеры, мм			Группа по температурно-му коэффициенту емкости	Пределы номинальной емкости, пф	Наибольшая реактивная мощность, ва
	D	H	B			
КДУ-1	8	4,5	2,5	P	1—2	25
КДУ-2	8	3,5	2,5	P	3—5	25
КДУ-3	8	3,5	4	C	1—2	25
КДУ-4	10	3,0	4	M	3—7	25
				D	27—51	
				M	8—15	25
				P	8—12	
КДУ-5	16	3,5	8	M, P	7—27	75

Особого внимания заслуживает такой эксплуатационный режим керамических конденсаторов, когда они длительное время находятся под воздействием предельного рабочего напряжения постоянного тока при повышенной температуре. Последние исследования показывают, что керамика на основе двуокиси титана обнаруживает в этом случае явление старения — необратимое изменение электрических свойств, в известной степени подобное рассмотренному выше эффекту старения в условиях высокой влажности. Каждому значению рабочей температуры отвечает критическое значение напряженности поля, превы-

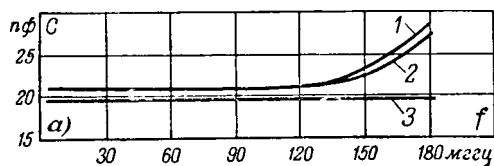
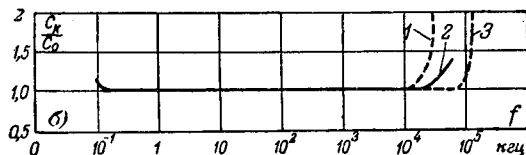


Рис. 4а. Емкость конденсатора в зависимости от частоты.

1 — трубчатый конденсатор при длине выводов 5 мм; 2 — трубчатый при длине выводов 1,5 мм; 3 — дисковый конденсатор при длине выводов 5 мм.

Рис. 4б. Относительная кажущаяся емкость C_k конденсаторов типа КТК в зависимости от частоты при длине проводного вывода 10...12 мм.

1 — емкость конденсатора при частоте 10^5 кГц составляет 100 пФ; 2 — 36 пФ; 3 — 12 пФ.

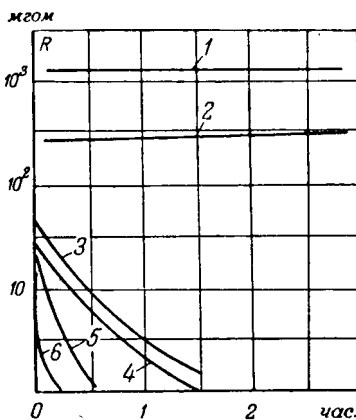


Рис. 5. Сопротивление изоляции дисковых керамических конденсаторов в зависимости от времени выдержки под напряжением постоянного тока 1000 в (толщина стенки конденсатора 0,7 мм, температура 400° С).

1 — цирконатовая керамика; 2 — станнатная; 3 — титанат кальция; 4 — титанат никеля; 5 — керамика Т-20; 6 — керамика Т-80.

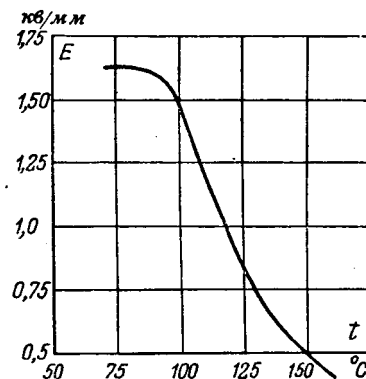


Рис. 6. Допустимая напряженность поля для конденсаторов на низкие напряжения из титанокальциевой керамики в зависимости от температуры (при напряжении постоянного тока).

шение которого приводит к прогрессирующему уменьшению сопротивления изоляции, увеличению $\text{tg } \delta$ и пробоем конденсатора.

На рис. 5 показана зависимость сопротивления изоляции конденсаторов из титаносодержащей керамики и некоторых новых видов конденсаторной керамики от длительности воздействия напряжения. Из рисунка следует, что материалы, содержащие свободную двуокись титана, например тиконд Т-80, мало пригодны для применения в условиях повышенных температур. Несколько лучше характеристики керамики на основе химических соединений двуокиси титана — титаната кальция и титаната никеля.

С рассматриваемой точки зрения особым классом материалов является беститановая конденсаторная керамика — станнатная, цирконатовая, алюмосиликатная и др., у которой явление старения практически не наблюдается.

Из рис. 6 видно, что чем выше рабочая температура конденсатора, тем ниже допустимая напряженность поля. На рис. 7 изображена зависимость рабочей температуры конденсатора от толщины стенки при напряжении постоянного тока.

Старение титаносодержащей керамики под действием постоянного электрического поля в условиях повышенных температур или влажности связано с поливалентностью титана и обусловлено процессами восстановления двуокиси титана до более низких степеней окисления. Однако титаносодержащая керамика вполне успешно используется в области относительно слабых электрических полей и при ограниченных рабочих температурах. Беститановые конденсаторные материалы рассчитаны на значительно более жесткие эксплуатационные режимы.

Область применения керамического конденсатора определяется особенностями диэлектрика,

конструкцией конденсатора, а также характеристиками вспомогательных конструктивных материалов. Одним из важнейших вспомогательных материалов, обеспечивающих возможность армировки конденсатора, является припой, который предопределяет механическую прочность крепления выводов конденсатора и сохранность его герметичности. С увеличением рабочей температуры прочность выводов конденсатора резко снижается, главным образом вследствие рекристаллизации мягких припоев. Особенно неблагоприятны в этом отношении обычные свинцово-оловянные припои ПОС-40, ПОС-60 и др. Пайка герметизированных конденсаторов, а также конденсаторов с укороченными выводами или предназначенных для рабочих температур до 125...150° С, производится новыми видами мягких припоев, содержащих серебро (№ 25 и 27).

Стабильность емкости низковольтных керамических конденсаторов до последнего времени принято было проверять по температурной зависимости (ТКЕ), после вибрации, после температурных циклов и в отдельных случаях после длительного воздействия напряжения в тропических условиях. Опыт широкого применения керамических конденсаторов в радиоаппаратуре новых

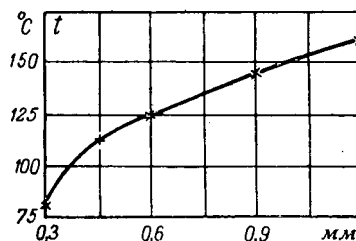


Рис. 7. Допустимая рабочая температура конденсаторов типа КП (керамика класса 1, группы А, ГОСТ 5458-50) в зависимости от толщины стенки конденсатора при напряжении постоянного тока 500 в.

видов показал, что конденсаторы, вполне удовлетворяющие требованиям в отношении цикличности, могут обнаруживать внезапное, казалось бы, ничем не вызванное изменение полного сопротивления. Явление, вызывающее указанный дефект конденсаторов, получило наименование *эффекта мерцания*. Эффект мерцания конденсатора проявляется в том, что в приемной аппаратуре высокого класса возникают шумы и трески, а в генераторе, в контур которого включен мерцающий конденсатор, возникают неожиданные скачки частоты, достигающие 10...100 гц и даже более. Явлению мерцания в последнее время уделяется большое внимание, трудность его изучения связана с хаотичностью этого явления и кажущейся незакономерностью.

Можно считать вполне доказанным, что явление мерцания не связано с процессами в диэлектрике и обусловлено дефектами тонкого серебряного слоя, образующего электроды и наносимого методом вжигания или распыления. Эффект мерцания наблюдается в конденсаторах самых различных типов — слюдяных, стеклоэмалевых и других, с использованием в качестве электродов металлического слоя, нанесенного методом вжигания или распыления металла.

Роль металлических электродов в эффекте мерцания особенно хорошо выявляется в том, что дефект может быть устранен при помощи дополнительной металлизации и вновь воспроизведен путем нарушения целостности металлического слоя зачисткой абразивом. Таким образом, процесс улучшения и ухудшения качества конденсатора в отношении эффекта мерцания может быть экспериментально повторен сколько угодно раз.

При помещении мерцающего конденсатора в высокий вакуум, в автоклав высокого давления, в трансформаторное масло эффект мерцания обычно не исчезает. Это показывает, что ионизационные процессы при мерцании не имеют основного значения. Включение последовательно с заведомо немерцающим конденсатором электрода явно дефектного мерцающего конденсатора не приводит к появлению эффекта мерцания такой модели. Отсюда можно сделать вывод, что изменение электропроводности металлического слоя само по себе нельзя рассматривать как причину мерцания.

При осмотре посеребренной поверхности керамики под микроскопом, а в ряде случаев и невооруженным глазом, обнаруживаются участки малой толщины с обособленными частицами металла. В связи с процессами автоэлектронной эмиссии электрическое сопротивление этих участков не постоянно. Это является причиной хаотичности явления в целом. При процессах подключения обособленных частиц несколько увеличивается общая площадь электрода.

Суть эффекта мерцания может быть иллюстрирована упрощенной эквивалентной схемой, показанной на рис. 8. Дефектный участок электрода с сопротивлением R' включен последовательно с емкостью диэлектрика C_0' , и это предопределяет все те закономерности, с которыми практически сталкиваются при эксплуатации низ-

ковольтных конденсаторов. Чем меньше диэлектрическая проницаемость керамики и чем больше толщина диэлектрика, тем больше падение напряжения E'' приходится на участок C_0' , тем меньше падение напряжения E' приходится на участок R' дефектного электрода и тем менее вероятны процессы автоэлектронной эмиссии в нем.

Последовательное включение в мерцающем конденсаторе сопротивления и емкости обязательно обуславливают хаотическое изменение не только реактивной, но и активной составляющей полного сопротивления конденсатора и вызывает увеличение $\lg \delta$.

Детальный расчет эквивалентной схемы мерцающего конденсатора был сделан К. С. Полуляхом и Б. А. Куликом.

Так как в условиях резонанса

$$C = \frac{1}{L\omega^2}, \quad (1)$$

то в случае скачкообразного изменения емкости

$$C + \Delta C = \frac{1}{L(\omega + \Delta\omega)^2}. \quad (2)$$

После вычитания (1) из (2) получаем:

$$\Delta C = -\frac{2\omega\Delta\omega + \Delta\omega^2}{L(\omega + \Delta\omega)^2\omega^2}.$$

Если частота тока $f = 2 \cdot 10^6$ гц, индуктивность $L = 85$ мкн, а изменение угловой частоты контура в результате мерцания конденсатора $\Delta\omega = 350$, то ΔC составляет 0,0043 нф.

Если принять толщину стенки плоского конденсатора равной $d = 0,03$ см, а диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 80$, то такое изменение емкости может быть вызвано ничтожно малым изменением площади электрода конденсатора

$$S = \frac{4 \cdot \pi d C}{\epsilon} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2.$$

Для изучения эффекта мерцания сперва был предложен метод, основанный на биении частот двух гетеродинов. В настоящее время разбраковка конденсаторов по стабильности емкости производится на приборе типа ИСК, принцип действия которого сводится к преобразованию импульсов тока в импульсы напряжения тональной частоты (амплитудная модуляция). Прибор типа ИСК снабжен реле времени и реле для фиксации выбросов стрелочного индикатора.

Как отмечалось выше, особенностью эффекта мерцания является его кажущаяся незакономерность. Заводская практика показывает, что конденсатор, прошедший испытание на мерцание, при повторном испытании может оказаться дефектным. Наоборот, конденсатор, мерцающий при повторном испытании, может вести себя как стабильный.

Исследования показывают, что в отношении эффекта мерцания конденсаторы следует разделить на две категории: свободные от эффекта мерцания при любых условиях испытаний, и конденсаторы, нестабиль-

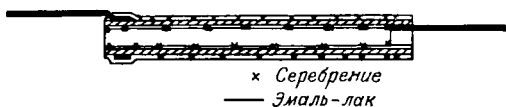
ные в той или иной степени, с неустойчивыми значениями эффекта мерцания во времени. Для полного исключения возможности мерцания следует ввести новые методы металлизации, а также особые конструкции конденсаторов. Прежде всего необходима механизация процесса серебрения конденсаторов, так как при ручном способе качество изделий зависит от квалификации, внимательности и ряда случайных факторов.

Уже давно было рекомендовано использовать дисковые конденсаторы взамен трубчатых при малых значениях емкостей. Металлизация с четким ровным краем может быть осуществлена в этом случае сравнительно просто, а напряжение на зазоре будет меньше вследствие большой толщины диэлектрика.

Рис. 8 показывает, что при существующем способе серебрения трубчатых керамических конденсаторов процесс мерцания имеет место при очень малой напряженности поля. Сообразуясь с этим, необходимо применять специальные конструкции конденсаторов, рассчитанные на напряженности поля, отвечающие данным рис. 8, т. е. порядка 200 ... 400 в/мм. Параметры конструкции конденсатора высокой стабильности представлены в табл. 2. Особенностью ее является сквозное

Таблица 2

Низковольтные керамические трубчатые конденсаторы высокой стабильности (КТН)



Вид конденсатора	Пределы номинальных емкостей (нф) для различных групп по температурному коэффициенту емкости			
	Д	М	Р	С
КТН-1	2 — 100	2 — 30	2 — 27	2 — 15
КТН-2	100 — 220	30 — 62	27 — 47	15 — 30
КТН-3	220 — 330	62 — 100	47 — 75	30 — 51
КТН-4	330 — 470	100 — 130	75 — 100	51 — 68
КТН-5	470 — 560	130 — 180	100 — 130	68 — 91
КТН-6	560 — 680	180 — 240	130 — 150	91 — 113

серебрение внутренней поверхности трубки, что обеспечивает более качественное покрытие. Оба межэлектродных промежутка вынесены на наружную поверхность трубки. Ввиду большой толщины стенки трубки существенную роль в части электрической изоляции приобретает торцевая поверхность.

Таким образом, требования, в отношении допустимой напряженности поля из условий: а) отсутствия мерцания конденсаторов, б) увеличения их рабочей температуры и в) надежной работы при высокой влажности — совпадают. Новый тип керамических конденсаторов КТН — конденсатор трубчатый незащищенный — по габаритам приблизительно соответствует герметизированым конденсаторам КГК, однако он проще по

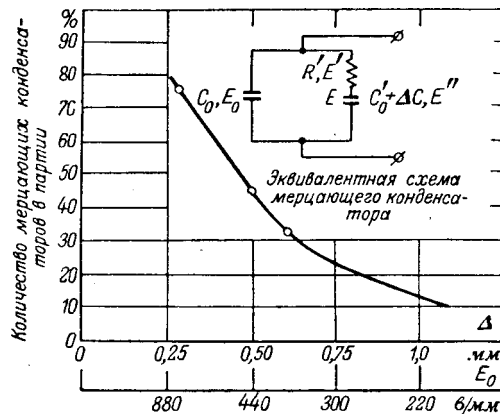


Рис. 8. Мерцание керамических конденсаторов типа КТК группы Д в зависимости от толщины стенки конденсатора Δ и напряженности поля (напряжение высокой частоты $U = 220$ в).

технологии, а в отношении ряда важнейших показателей выше качеством.

Удельная емкость плоского конденсатора определяется толщиной стенки, установленной не только с точки зрения технологических возможностей и электрической прочности материала, но и из рассмотренных выше рабочих условий конденсатора.

$$C_v = \frac{C}{V} = \frac{\epsilon S}{4 \cdot \pi \Delta S} = 8,85 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\epsilon}{\Delta^2} [n\phi/cm^3],$$

где C — емкость конденсатора; V — объем; Δ — толщина стенки.

Из формулы следует, что изменение толщины диэлектрика в большей степени сказывается на удельном значении емкости пластинчатых конденсаторов, чем трубчатых.

Если рабочее напряжение конденсаторов достаточно велико и приходится считаться с возможностью его электрического пробоя, то в выражении для удельной емкости должна войти толщина стенки, которая определяется рабочим напряжением и рабочим значением напряженности электрического поля для данного вида керамики:

$$\Delta = \frac{U}{E} [\phi/cm]; \quad C_v = 8,85 \cdot 10^{-2} \frac{\epsilon E^2}{V^2} [n\phi/cm^3].$$

Выражение для удельной реактивной мощности высокочастотного конденсатора можно представить в следующем виде:

$$p_v = \frac{P_p}{V} = \frac{4,5 \cdot 10^{11}}{k^2 U^2 f \epsilon \lg^2 \delta} [\phi a/cm^3],$$

где U — напряжение высокой частоты действующего значения, в;

f — частота, гц;

ϵ — диэлектрическая проницаемость;

k — коэффициент, зависящий от допустимой температуры нагрева конденсатора, теплоотдачи и конфигурации конденсатора:

$$k = \frac{S_a}{2\sigma(t_2 - t_1)S} = \frac{1}{2 \cdot \sigma(t_2 - t_1)k'},$$

где σ — коэффициент теплоотдачи;

t_2, t_1 — соответственно температура поверхности конденсатора и окружающей среды;

k' — отношение активной поверхности охлаждения к поверхности, определяющей электрическую емкость (площадь одного из электродов).

Удельная емкость выпускаемых промышленностью трубчатых конденсаторов типа КТК невелика и составляет для группы Д до $1\,600\text{ нф/см}^3$, а для группы М до 160 нф/см^3 . Казалось бы, что удельная емкость дисковых конденсаторов КДК должна быть больше по причине отсутствия канала, незаполненного диэлектриком. Однако значительная толщина стенки конденсаторов КДК определяет в 2...3 раза меньшее значение их удельной емкости, чем для конденсаторов КТК. Тем не менее перспективными оказались не трубчатые керамические конденсаторы, а плоские, что обусловлено особенностями технологии трубчатых конденсаторов, толщина стенки которых должна быть тем больше, чем больше их диаметр. Поэтому изготовление концентрически расположенных трубчатых конденсаторов невыгодно по получаемому значению удельной емкости. Наоборот, многослойные плоские конденсаторы выполняются из одинаковых элементов очень малой толщины, подобно слоудным конденсаторам.

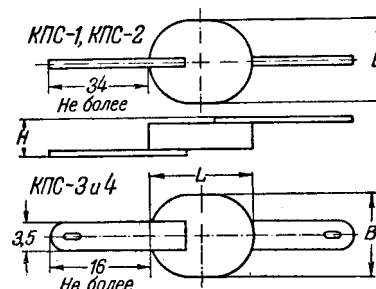
Рядом исследований было установлено, что плоские многослойные керамические конденсаторы с толщиной стенки элемента до $0,3 \dots 0,4\text{ мм}$ можно получить обычными методами прессования.

Дальнейшее уменьшение толщины пластин плоского конденсатора до $0,1 \dots 0,2\text{ мм}$ потребовало создания особой технологии их изготовления и такие конденсаторы получили название «пленочных».

Высокочастотные пластинчатые и пленочные конденсаторы, выполненные из керамики по группам Д, М, Р, С, и из керамики Т-150, обозначаются КП — керамические пластинчатые (пленочные). Низкочастотные пластинчатые и пленочные конденсаторы, выполняемые из сегнетокерамики, обозначаются КПС — керамические пластинчатые (или пленочные) сегнетоэлектрические. Конфигурация конденсаторов КП и КПС не дисковая, а эллиптическая, что упрощает операцию серебрения заготовок в массовом производстве.

Таблица 3

Малогабаритные сегнетокерамические конденсаторы для цепей низкой частоты типа КПС ($U_{раб} = 250\text{ в}$)



Вид конденсатора	Номинальная емкость, пф	Допускаемое отклонение емкости, %	Размеры, мм, не более			
			L	B	H	d
КПС-1	510... 3 600	- 40 + 100	7	5,5	6	0,51
КПС-2	3 900... 7 500		10	8	7	0,59
КПС-3	8 200... 15 000		13,5	11	7	—
КПС-4	18 000... 40 000		17,5	14,5	8	—

Таблица 4

Основные характеристики однослойных и многослойных керамических конденсаторов низкого напряжения

Тип конденсатора	Конструктивные особенности	Группа по температурному коэффициенту емкости и диэлектрическая проницаемость	Предельная емкость, пф	Количество элементов, шт.	Толщина стенки элемента (минимальная), мм	Рабочее напряжение, в	Рабочая напряженность поля, кв/мм	Предельная удельная емкость, пф/см ³	Назначение
КДК	Дисковый Одинарный	С; $\epsilon = 7$ Д; $\epsilon = 75$	10 130	1	1	500	0,5	50 650	Высокочастотные
КТК	Трубчатый Одинарный	С; $\epsilon = 7$ Д; $\epsilon = 75$	100 1 000	1	0,3	500	1,7	160 1 600	
КП	Пластинчатый многослойный	$\epsilon = 140$	1 500	До 5	0,3	250	0,85	10 000	
	Пленочный многослойный	М; $\epsilon = 25$ Д; $\epsilon = 75$	1 500 5 000	До 5 До 5	0,2 0,2	120 120	0,6 0,6	3 000 8 000	
КПС	Пластинчатый многослойный	$\epsilon \approx 4\,000$ (сегнетокерамика)	40 000	До 5	0,3	250	0,85	78 000	Низко- частотные
	Пленочный многослойный		1 000 000	До 10	0,15	60	0,46	300 000	

Примечание: КДК, КТК, КП — высокочастотные, КПС — низкочастотные конденсаторы.

Схема для одновременного испытания аппаратов импульсным напряжением и напряжением промышленной частоты

Кандидат техн. наук А. В. СТУКАЧЕВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

В практике часто испытывают высоковольтную аппаратуру на одновременное воздействие импульсного напряжения и напряжения промышленной частоты. Таким испытаниям подвергаются, например, искровые промежутки вентильных и трубчатых разрядников при исследовании их дугогасящей способности, изоляционные конструкции для определения вероятности возникновения силовой дуги.

В настоящей работе описывается принцип действия и основные элементы схем для исследования дугогасящих свойств искровых промежутков вентильных разрядников. При помощи таких схем были определены в лабораторных условиях и в сетях действующих энергетических систем предельные значения токов, обрываемых искровыми промежутками вентильных разрядников различных типов. Схемы также пригодны для испытаний высоковольтной аппаратуры другого типа.

Основные требования, предъявляемые к подобному рода схемам, следующие:

1. Должна быть обеспечена возможность широкого и устойчивого регулирования во времени момента подачи зажигающего импульса в пределах периода напряжения промышленной частоты.

2. В заданных условиях зажигание силовой дуги должно быть вполне устойчивым и дуга должна возникать каждый раз вслед за перекрытием испытуемого объекта импульсным напряжением.

3. Должна быть обеспечена возможность осциллографирования изучаемого процесса магнитным или электронным осциллографом. Поэтому должно быть предусмотрено соответствующее автоматическое устройство, позволяющее реги-

стрировать кратковременные переходные процессы без опасения того, что исследуемый процесс произойдет до пуска светочувствительной пленки или после ее остановки.

4. Должны быть предусмотрены меры, предохраняющие испытуемый объект от разрушающего воздействия силовой дуги в случае затяжки ее гашения, а также меры, защищающие генератор напряжения промышленной частоты от возможности проникновения в его обмотки импульсных волн с амплитудой, опасной для изоляции.

Принципиальная структурная схема испытаний, удовлетворяющая этим требованиям, представлена на рис. 1. Пуск в действие магнитного осциллографа *I* вызывает замыкание цепи, соединяющей устройство для подачи синхронизирующего импульса *II* с зажигающим импульсным генератором. Момент подачи этого импульса на запальный промежуток зажигающего импульсного генератора *III* определяется связью, существующей между источником напряжения промышленной частоты *V* и устройством *II*. Устройство в нужный момент времени зажигает основ-

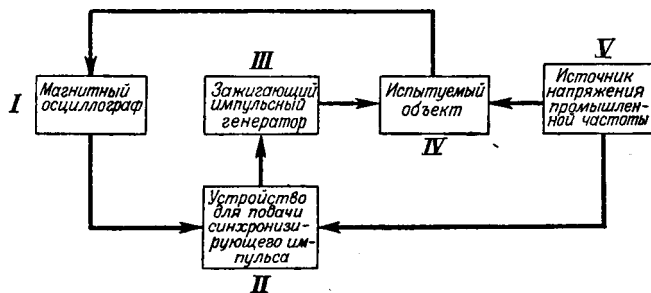


Рис. 1. Блок-схема установки для одновременного испытания аппаратуры импульсным напряжением и напряжением промышленной частоты.

Предельная емкость в единице выпускаемых в производстве конденсаторов КП — 1 500 нф при удельной емкости до 10 000 нф/см³, а пластинчатых конденсаторов КПС — 40 000 нф при удельной емкости до 78 000 нф/см³. Пленочные конденсаторы из сегнетокерамики разработаны также емкостью до 1 000 000 нф в единице при удельной емкости до 300 000 нф/см³. Спецификация конденсаторов КПС дана в табл. 3.

Малая толщина стенки новых видов многослойных керамических конденсаторов, предопределяющая их высокую удельную емкость, одновременно требует снижения рабочих напряжений. Это вызвано не только соображениями об электрической прочности тонкостенного диэлектрика, но также условием напряжения поверхностного разряда элемента конденсатора, межэлектродные промежутки которого гораздо меньше, чем в случае конденсаторов КТК и КДК.

В табл. 4 приведены основные характеристики однослойных и многослойных керамических конденсаторов низкого напряжения.

Новые виды керамических материалов и конденсаторов разработал коллектив исследователей в составе: В. И. Жуковского, Д. Г. Дыкман, Н. Е. Зарембы, И. Е. Зеленковой, Б. А. Кулика, К. Е. Лискер, М. И. Неймана, О. К. Орфинской, Н. П. Трухиной, А. А. Тюльпанова, Н. А. Фрязиновской, Я. К. Хаханкиной, Н. М. Цветкова.

Литература

1. Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг. Конструирование и расчет высокочастотных конденсаторов. Электричество, № 11, 1946.
2. W. A. Weyl and N. A. Terhune. Crystal chemistry applied to „foreign atoms“ in titanate ceramics, август, 1953.

[11.1.1955]

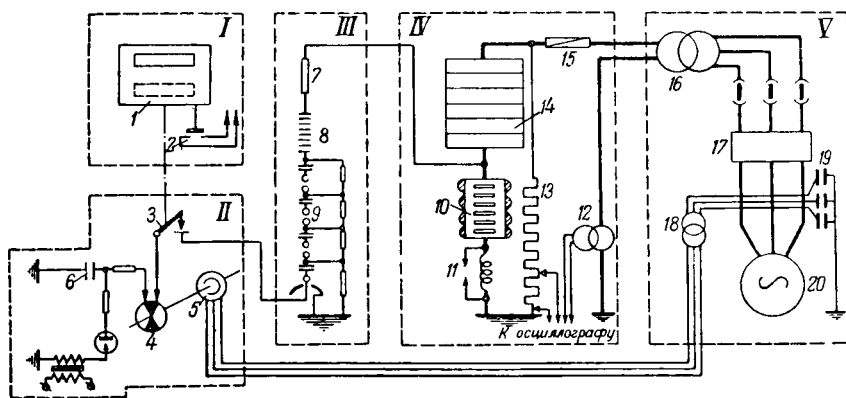


Рис. 2. Схема установки для одновременного испытания аппаратуры импульсным напряжением и напряжением промышленной частоты.

1 — падающий затвор кассеты осциллографа; 2 — контакты на выключение масляного выключателя; 3 — высоковольтный контактор; 4 — синхронный коммутатор; 5 — двигатель синхронного коммутатора; 6 — конденсатор; 7 — омическое сопротивление; 8 — защитный искровой промежуток; 9 — импульсный генератор; 10 — испытываемый искровой промежуток; 11 — индикатор импульсного разряда; 12 — измерительный трансформатор тока; 13 — делитель напряжения; 14 — тиритовые диски; 15 — стреляющий предохранитель; 16 — силовой трансформатор; 17 — масляный выключатель; 18 — понижающий трансформатор для питания двигателя синхронного коммутатора; 19 — защитные конденсаторы; 20 — синхронный генератор.

ной импульсный генератор III, что приводит к перекрытию испытуемого объекта IV и возникновению силовой дуги под воздействием источника напряжения промышленной частоты V. Изменения тока в цепи и напряжения на испытуемом объекте регистрируются магнитным или электронным осциллографом. Таким образом, цикл операций замыкается.

Принципиальная схема установки для испытаний дана на рис. 2. Взаимодействие отдельных элементов следующее: открытие затвора барабанной кассеты магнитного осциллографа 1 приводит к замыканию высоковольтного контактора 3 и потенциал емкости 6, заряженной до напряжения 3...5 кВ, сообщается контактам синхронного коммутатора 4. При набегании щетки коммутатора на его контакты замыкается разрядная цепь емкости 6 и подается синхронизирующий импульс на запальный шар зажигающего импульсного генератора 9, что приводит к его разряду через защитный промежуток 8 и активное сопротивление 7 на испытуемый объект 10, находящийся под напряжением источника промышленной частоты. Амплитуда сопровождающего тока промышленной частоты может регулироваться числом последовательно включенных тиритовых дисков, а в том случае, если по условиям проведения эксперимента допускается изменение питающего напряжения, также и этим способом.

Процессы зажигания силовой дуги после импульсного перекрытия носят статистический характер и на каждой ступени сопровождающего тока следует поэтому давать не менее десяти зажиганий.

Типичная осциллограмма возникновения дуги сопровождающего тока, полученная при испытаниях тиритовых разрядников в сети 6 кВ, показана на рис. 3. Момент зажигания отмечается на синусоиде напряжения промышленной частоты небольшими колебаниями, затем видна посадка напряжения, соответствующая значению тока, протекающего через разрядник.

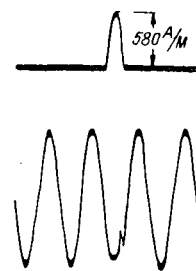


Рис. 3. Осциллограмма дуги сопровождающего тока.

Рассмотрим отдельные элементы схемы, от надлежащего выбора параметров которых зависит правильная и надежная ее работа.

Зажигающий импульсный генератор. Для зажигания испытуемых искровых промежутков применяется импульсный генератор. С учетом коэффициента использования порядка 0,75...0,85 напряжение на его выходе следует устанавливать примерно вдвое выше пробивного напряжения испытуемого объекта. Длительность волны импульсного генератора регулируется сопротивлением 7, значение которого сильно влияет на вероятность возникновения силовой дуги. Чрезмерная величина этого сопротивления снижает значение импульсного тока через искровой промежуток, в результате остаточная ионизация может оказаться недостаточной для возникновения силовой дуги. Вместе с тем, если это сопротивление будет чрезмерно мало, то остаточная проводимость ствола импульсного разряда хотя и будет по своей абсолютной величине велика, но вследствие недостаточного времени ее существования переход в силовую дугу будет маловероятен.

Обычно емкость импульсного генератора задана и практически приходится подбирать значение сопротивления в каждом отдельном случае экспериментально. При исследовании дугогасящих свойств вентильных разрядников были установлены оптимальные, для данных условий проведения экспериментов, значения параметров разрядной цепи импульсного генератора, данные в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что с ростом числа мест разрыва дуги и разрядного напряжения (действующее значение) испытуемого искрового промежутка возрастает также и энергия импульсной волны, обеспечивающей последующее возникновение силовой дуги. Влияние значения разрядного сопротивления было особенно велико при испытаниях вентильных разрядников на номинальное напряжение 110 кВ, где изменение его в пределах 25% приводило к нарушению устойчивости зажигания.

Для возможности визуального наблюдения за пробоем в том случае, если исследуемый объект заключен в изолирующий кожух, как, например,

Таблица 1

Параметры испы- туемого промежутка	Емкость им- пульсного генератора, мкф	Разрядное сопротивле- ние, ом	Амплитуда импульсного тока, а	Длительность полуспада волны, мксек
6 кв 6 мест разрыва дуги; разрядное напря- жение 18 кв (дей- ствующее значение)	0,0187	600	40...60	10...12
35 кв 40 мест разрыва ду- ги; разрядное на- пряжение 80 кв . .	0,0187	1 100	130...150	20...22
110 кв 96 мест разрыва ду- ги; разрядное на- пряжение 250 кв	0,013	1 500	320...350	22...24

искровые промежутки вентильных разрядников, следует пользоваться индикатором импульсного разряда. Индикатор включается в рассечку заземляющего провода между объектом испытаний и землей и состоит из спирали, имеющей 6... 10 витков диаметром 15... 20 мм, свернутой из провода сечением 1,5... 2,5 мм², зашунтированных открытым искровым промежутком с разрядным расстоянием около 10 мм. Малая индуктивность индикатора практически не оказывает влияния на протекание токов промышленной частоты, однако при перекрытии испытуемого объекта импульсной волной с крутым фронтом падения напряжения на индуктивности индикатора оказывается достаточно для возникновения разряда между электродами искрового промежутка, шунтирующего спираль. Появление искры в промежутке индикатора свидетельствует о пробое испытуемого объекта.

Для защиты импульсного генератора от проникновения в него напряжения промышленной частоты, а также для уверенности, что его емкость не влияет на процессы гашения дуги — на характер восстановления напряжения после

прохождения сопровождающего тока через нуль, — испытуемый искровой промежуток следует отделить от импульсного генератора защитным искровым промежутком 8, число мест разрыва дуги и разрядное напряжение которого должно быть не меньше соответствующих параметров испытуемого объекта.

Представленная на рис. 2 схема соединения зажигающего импульсного генератора с объектом испытаний может быть применена лишь в том случае, если при испытании одна из фаз или нейтраль источника напряжения промышленной частоты может быть заземлена. Обычно это условие выполнимо лишь в лабораторных установках. В том случае, если испытания аппаратуры проводятся в условиях действующей энергетической системы с изолированной нейтралью (на шинах подстанции), надлежит применять симметричную схему импульсного генератора, представленную на рис. 4.

Синхронный коммутатор. После длительных исследований было установлено, что перекрытие испытуемого объекта импульсным напряжением с наибольшей вероятностью приводит к возникновению сопровождающего тока силовой дуги при обязательном соблюдении двух условий:

1) полярность зажигающего импульса должна совпадать с полярностью полупериода напряжения промышленной частоты, в течение которого подается импульс;

2) подача зажигающего импульса должна происходить на возрастающей части синусоиды напряжения, т. е. момент разряда импульсного генератора должен быть определенным образом синхронизирован с синусоидой напряжения промышленной частоты.

Для этой цели служит синхронный коммутатор 2 (рис. 2), приводимый во вращение трехфазным синхронным двигателем, статор которого питается от того же источника напряжения, что и испытуемый объект. При проведении исследований следует подавать зажигающий импульс вскоре после перехода через нуль напряжения промышленной частоты. Влияние угла зажигания φ на амплитуду сопровождающего тока показана на рис. 5. Из рисунка следует, что для надлежащего использования мощности имеющейся установки необходимо производить перекрытие испытуемого объекта импульсным напряжением вскоре после прохождения напряжения через нуль.

Двигатель, вращающий синхронный коммутатор, следует включать между оперативным выключателем и генератором, в противном случае после каждого отключения выключателя двигателя будет останавливаться, что приведет к нарушению синхронизации и необходимости заново регулировать схему.

Для вращения коммутатора должен быть применен синхронный двигатель. Не всегда легко достать синхронный двигатель надлежащего типа. Реактивный синхронный двигатель можно получить из любого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором путем незначительной переделки. Переделка заключается в выточке в теле ротора впадин глубиной не более 10 мм, благо-

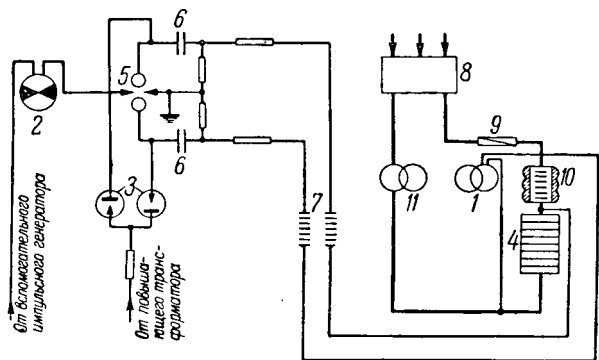


Рис. 4. Схема зажигания дуги сопровождающего тока при помощи симметричного импульсного генератора.

1 — измерительный трансформатор напряжения; 2 — синхронный коммутатор; 3 — конденсаторы импульсного генератора; 4 — тиритовые диски; 5 — запальный искровой промежуток импульсного генератора; 6 — его емкости; 7 — защитные искровые промежутки; 8 — оперативный масляный выключатель; 9 — стреляющий предохранитель; 10 — испытуемый искровой промежуток; 11 — измерительный трансформатор тока.

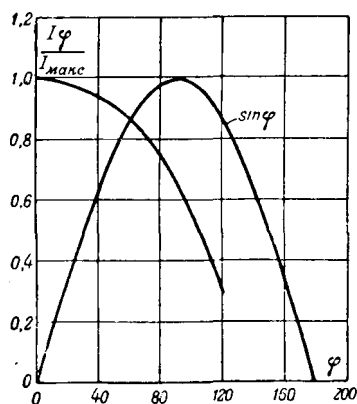


Рис. 5. Влияние момента зажигания на амплитуду сопровождающего тока (по осциллограммам).

даря чему у ротора появляются явно выраженные полюса. Количество выточек должно соответствовать числу пар полюсов обмотки статора. Принцип действия такого двигателя следующий: при подаче в обмотку статора трехфазного напряжения в ней создается вращающееся магнитное поле; сопротивление магнитному потоку будет наименьшим против полюсов ротора, так как в этом месте зазор между статором и ротором минимален. Вращающийся магнитный поток, стремясь сохранить свое значение, будет увлекать за собой выступающие полюса ротора, вращение которого будет, таким образом, синхронным. Мощность трехфазного реактивного синхронного двигателя [Л. 1]

$$P = 1,5 \cdot U_{\phi}^2 \frac{(X_a - X_q) \sin \theta}{(X_a + X_q)(X_q + X_s)},$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение;

X_a и X_q — продольная и поперечная реактивности;

X_s — реактивность рассеяния;

θ — угол между вектором напряжения и осью полюса.

Мощность P зависит от разности X_a и X_q , которая в свою очередь определяется отношением ширины полюсной дуги к полюсному делению α . Наибольшая мощность имеет место при $\alpha = 0,5$; в этом случае $X_q/X_a = 0,22$. Практически синхронная мощность переделанного таким образом двигателя не превышает 20...25% мощности нормального асинхронного двигателя тех же габаритов. В наших работах был использован переделанный указанным способом трехфазный двигатель типа И мощностью 0,52 кВт. Глубина и ширина выточек¹ в роторе не превышала 10...12 мм.

Синхронность вращения двигателя легче всего проверить, используя стробоскопический эффект. На шкив двигателя приклеивают полоску белой бумаги шириной 3...5 мм и в затемненном помещении освещают вращающийся шкив светом нео-

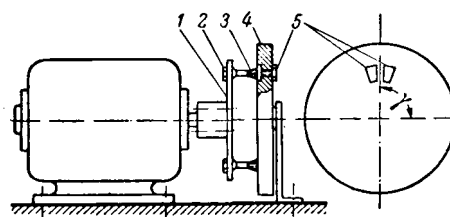


Рис. 6. Конструктивная схема синхронного коммутатора.

новой лампы, питаемой тем же напряжением, что и статор двигателя. В случае синхронного вращения полоска бумаги будет казаться в некотором положении неподвижной, а в случае наличия скольжения она будет медленно вращаться со скоростью, соответствующей разности между синхронным и асинхронным режимами в сторону, обратную вращению ротора.

Конструктивная схема двигателя синхронного коммутатора представлена на рис. 6. На шкив двигателя двумя болтами прикреплена текстолитовая или гетинаксовая пластинка 1 толщиной 5...6 мм, в которой диаметрально противоположно крепятся два телефонных гнезда 2. Из медной проволоки толщиной 0,05...0,1 мм набираются две кисточки 3, которые впаиваются в гнезда. Поворачивающаяся часть коммутатора состоит из текстолитовой шайбы 4 толщиной 15...20 мм, в которой заподлицо вделаны два контакта 5, периодически замыкаемые кисточками.

При изменении угла поворота шайбы γ от 0 до 90° и при синхронной скорости вращения коммутатора, равной 1500 об/мин, момент подачи импульса может быть перемещен в пределах полупериода синусоиды промышленной частоты.

Защитные мероприятия. При проведении испытаний импульс напряжения, предназначенный для зажигания дуги в испытуемом объекте, подается также и на силовой трансформатор, подвергая его обмотку кратковременным перенапряжениям. Поэтому необходимо заранее согласовать амплитуду зажигающей волны с импульсной прочностью обмоток трансформатора. Необходимо также иметь в виду, что возможен переход импульса с обмотки высшего напряжения на обмотку низшего напряжения, а следовательно, появление опасных перенапряжений на изоляции генератора (подробно см. [Л. 2]). Например, при испытаниях вентильных разрядников 110 кВ амплитуда зажигающего импульса была порядка 650...700 кВ. Волна, падая на одну из фаз обмотки высшего напряжения трансформатора мощностью 7500 кВА, 121/6,6 кВ, возбуждала на низкой стороне импульсы напряжения, проникновение которых в питающий генератор безусловно опасно для его изоляции. Снижение этих перенапряжений было достигнуто путем заземления каждой из фаз кабеля, соединяющего повышающий трансформатор с генератором через конденсатор емкостью 1,92 мкФ; результаты измерений²

¹ Выточки следует выбирать дисковой фрезой осторожно, чтобы не перерезать кольца, связывающие стержни короткозамкнутой обмотки ротора.

² Для измерения был использован прецизионный шаровой разрядник с шарами 20 мм, освещаемыми светом ртутно-кварцевой лампы.

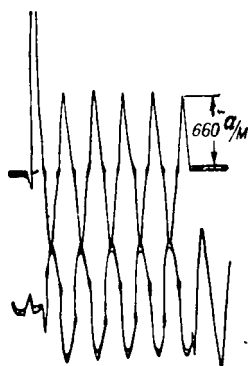


Рис. 7. Осциллограмма затажного гашения дуги сопровождающего тока.

разности потенциалов, возникающих между фазами кабеля, приведены в табл. 2. Как следует из таблицы, применение специальных защитных мероприятий было совершенно необходимо, в противном случае изоляция генератора подвергалась бы многократному воздействию импульсов с амплитудой порядка 30 кв.

Таблица 2

Фазы, между которыми (или относительно которой) измерено напряжение	Амплитуда напряжения, кв	
	без конденсаторов	с конденсаторами
1—2	4,6	0
1—3	4,7	0
2—3	8,2	1,2
1—земля	16,4	0
2—земля	29,4	1,6
3—земля	30,2	1,4

В случае длительного существования силовой дуги для защиты испытуемого объекта от разрушающего ее действия следует применять стреляющий предохранитель, плавкую вставку которого надлежит выбирать такого диаметра, чтобы она перегорала в случае затажной дуги через 15...20 периодов ее существования³. Диаметр плавкой вставки зависит от параметра применяемой трубки предохранителя, амплитуды тока и пр., в каждом отдельном случае его надлежит подбирать путем эксперимента, начиная с минимального диаметра проволоки (0,1...0,15 мм). Стреляющий предохранитель можно заменить оперативным силовым выключателем, заблокированным с магнитным осциллографом таким образом, чтобы одновременно с открытием затвора кассеты подавался импульс через регулируемое реле времени на выключение. Выдержка реле времени в этом случае должна быть достаточной для того, чтобы силовой выключатель не прерывал цепи до окончания записи исследуемого процесса.

³ Время горения дуги определяется путем осциллографирования.

На рис. 7 представлена одна из осциллограмм сопровождающего тока с амплитудой первого полупериода 660 а. Благодаря отрицательному температурному коэффициенту тирита сопровождающий ток возрастал с каждым полупериодом, что привело к перекрытию тиритовых дисков и глухому короткому замыканию, которое в течение полупериода было отключено стреляющим предохранителем, и тем самым испытуемый искровой промежуток был сохранен для дальнейших исследований.

Измерительные цепи. Для регистрации сопровождающего тока, протекающего в цепи, надлежит пользоваться прецизионными трансформаторами тока или омическим шунтом, включенными так, как это указано на рис. 2. Обращаем внимание на недопустимость включения трансформатора тока последовательно с испытуемым объектом в цепи разряда зажигающего импульсного генератора, так как это может привести к пробое изоляции вибраторов магнитного осциллографа и перегоранию их нитей.

Для регистрации изменения напряжения на испытуемом объекте удобнее всего пользоваться специальным омическим делителем напряжения, собранным из остеклованных проволочных сопротивлений, включенным на то же напряжение, что и испытуемый объект. В случае отсутствия подобного делителя можно использовать также трансформатор напряжения, включенный на стороне низшего напряжения питающего трансформатора. В этом случае при расшифровке осциллограмм необходимо учитывать поворот вектора напряжения, обусловленный группами включения силового и измерительного трансформаторов. Соединение магнитного осциллографа с трансформатором тока и делителем напряжения следует выполнять обязательно двухжильным экранированным (освинцованным) проводом, экран которого надо заземлять, однако по возможности дальше от места заземления зажигающего импульсного генератора.

Заключение. Описанная в настоящей работе схема для испытания высоковольтных аппаратов совместным воздействием импульсного напряжения и напряжения промышленной частоты вся в целом, а равно отдельные ее элементы ряд лет подвергалась совершенствованию. Схема в том виде, как она описана в настоящей работе, хорошо себя зарекомендовала и вполне пригодна для разнообразных исследований, связанных с изучением возникновения силовой дуги после перекрытия изоляции импульсным напряжением.

Литература

1. Е. М. Голдовский. Реактивные двигатели для звукового кино. Советское кино, 1935.
2. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений. Госэнергоиздат, вып. III, 1945.

[29.11.1954]



Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110...220 кВ

Кандидат техн. наук Е. Д. САПИР

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Высокочастотные защиты широко применяются на линиях электропередачи 110...220 кВ. До последнего времени в СССР и за границей использовались главным образом направленные защиты с высокочастотной блокировкой, в которых при помощи токов высокой частоты сравниваются направления мощности, имеющие место на концах защищаемой линии. В дифференциально-фазной же защите сравниваются не направления мощности, а фазы токов короткого замыкания на концах защищаемой линии.

Ниже рассматривается разработанная Центральной научно-исследовательской электротехнической лабораторией МЭС и серийно выпускаемая одним из заводов Министерства электротехнической промышленности дифференциально-фазная высокочастотная защита типа ДФЗ-2. Защита обладает высокой чувствительностью ко всем видам коротких замыканий и предназначена для применения на линиях 110...220 кВ как большой, так и малой протяженности. В защите применен стандартный высокочастотный приемо-передатчик типа ПВЗ-К с кварцевой стабилизацией несущей частоты [Л. 1]. Общий вид панели защиты показан на рис. 1.

Опыт эксплуатации защиты типа ДФЗ-2 дал положительные результаты.

По своему принципу защита не действует при перегрузках, качаниях в системе и может быть использована при неполнофазных режимах. Время срабатывания защиты составляет 0,07...0,09 сек. Потребление в токовых цепях не превышает 20 вА на наиболее нагруженной фазе при токе 5 А.

Схема защиты. Основные принципы сравнения фаз токов на концах линии при помощи токов высокой частоты и выполнения защиты типа ДФЗ-2 рассмотрены в литературе [Л. 1...3]. В защите сравниваются фазы токов прямой и обратной последовательностей, выделяемых комбинированным фильтром типа $I_1 + kI_2$. Схема цепей постоянного тока защиты показана на рис. 2, а цепей переменного тока на рис. 3.

Все элементы защиты могут быть подразделены на три основные группы: пуска, управления

высокочастотным передатчиком и сравнения фаз токов.

Так называемая манипуляция высокочастотного передатчика, которая обеспечивает его работу с интервалами в полпериода промышленной частоты, осуществляется при коротких замыканиях напряжением на выходе органа управления. Где находится место повреждения (в зоне действия защиты или вне ее), определяет орган сравнения фаз токов по смещению во времени высокочастотных импульсов передатчиков обоих концов линии.

Зона блокировки, определяющая зону нечувствительности защиты к погрешностям в измерении сдвига фаз между векторами токов $I_1 + kI_2$ обоих концов линии, имеет три уставки: 45°, 52° и 60°. Изменение уставки производится при помощи дополнительной обмотки $ПР4_{доп}$ реле $ПР4$ за счет ее согласного или встречного включения с основной обмоткой $ПР4_{осн}$, а также полного ее отключения. Наиболее часто используются первые две уставки. Уставку 60° следует использовать на линиях большой протяженности, когда становится необходимым учитывать погрешность в передаче фазы токов с одного конца линии на другой. Эта погрешность, равная 6° на 100 км, связана с тем, что скорость распространения высокочастотных сигналов является конечной.

При всех видах коротких замыканий схема пуска защиты выполняет следующие функции: пускает высокочастотный передатчик от реле $КР1$, присоединяет реле $ПР4$ к схеме сравнения фаз токов при помощи реле $КР5$, непосредственно от реагирующих органов подает плюс на контакты реле $ПР4$.

Пуск защиты при несимметричных коротких замыканиях производится от поляризованных реле $ПР1$ и $ПР2$, включенных на проходной трансформаторный фильтр тока обратной последовательности. Трансформатор $ТК$ введен для компенсации э. д. с. нулевой последовательности на выходе фильтра. При включенной тормозной обмотке $ПР2_7$, ток срабатывания реле $ПР2$ в 2 раза выше тока срабатывания реле $ПР1$, а при отключенной обмотке соотношение этих токов составляет 1,4. Разница в чувствительностях реле обеспечивает пуск передатчиков на обоих концах линии при внешних коротких замыканиях, сопровождающихся действием реле $ПР2$ хотя бы на одном конце линии.

По току обратной последовательности защита имеет три уставки: 1; 1,5 и 2 А, соответствующие току обратной последовательности, при которых срабатывает реле $ПР2$ с включенной тормозной обмоткой. Регулировка чувствительности производится изменением числа витков первичной обмотки насыщающегося трансформатора $ТН2$. Конденсатор $С_2$ введен для уменьшения тока небаланса в обмотках реле от пятых гармоник,

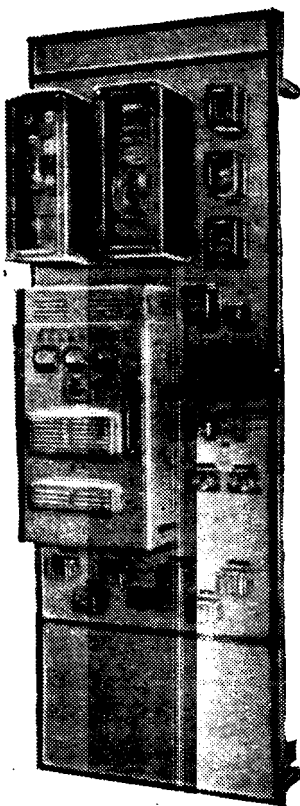


Рис. 1. Общий вид панели защиты типа ДФЗ-2 с приемо-передатчиком типа ПВЗ-К.

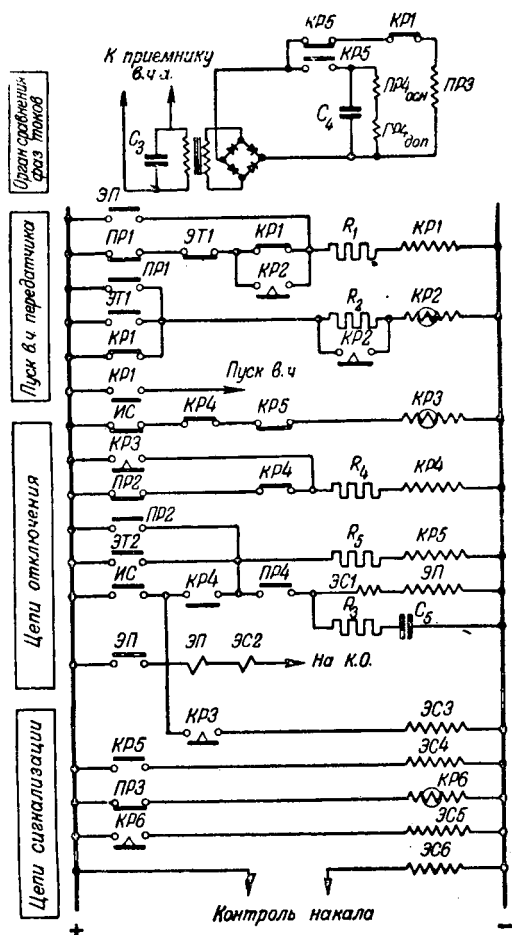


Рис. 2. Схема цепей постоянного тока защиты типа ДФЗ-2.

которые обычно имеются в сетях высокого напряжения при нормальном режиме [Л. 4]. Конденсатор C_1 уменьшает пульсацию выпрямленного тока, что улучшает работу контактных систем реле $ПР1$ и $ПР2$.

Выбор уставок пускового органа производится по однофазному или двухфазному короткому замыканию на землю на одном из концов линии. В тех случаях, когда уставки по току обратной последовательности не обеспечивают требуемой чувствительности защиты, используется устройство, состоящее из насыщающегося трансформатора $ТНО$ и меднозакисного выпрямителя. При использовании этого устройства реле $ПР1$ и $ПР2$ реагируют на сумму выпрямленных токов обратной и нулевой последовательностей. По утроенному току нулевой последовательности защита имеет также три уставки: 1; 1,5 и 2 а.

Зависимость тока в обмотках реле $ПР1$ и $ПР2$ от токов обратной и нулевой последовательностей определяется сложной математической функцией. Поэтому для определения коэффициентов чувствительности следует пользоваться экспериментально снятыми характеристиками чувствительности пускового органа, которые дают зависимость между отношениями тока в обмотке реле $ПР2$ к току его срабатывания (при включенной тормозной обмотке $ПР2$) и токами обратной

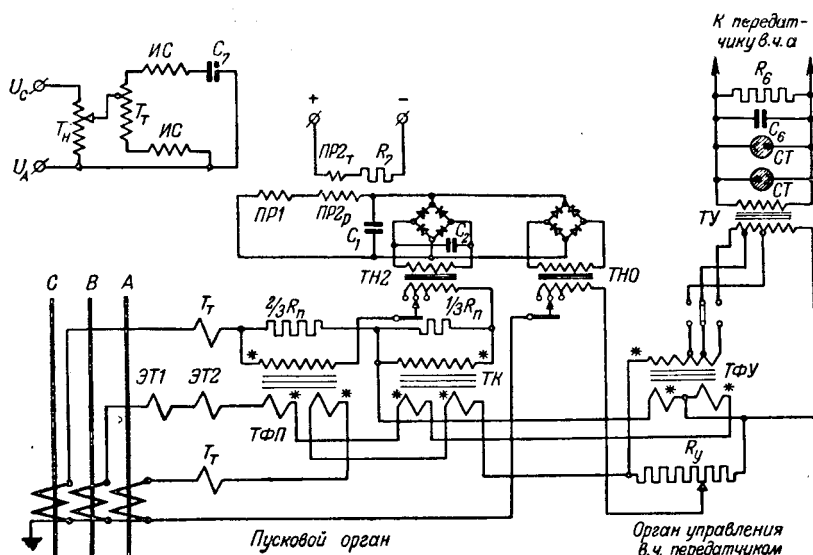


Рис. 3. Схема цепей переменного тока защиты типа ДФЗ-2.

и нулевой последовательностей для различных уставок.

На рис. 4 приведено семейство таких характеристик при уставках $I_2 = 1$ а и $3I_0 = 2$ а. Каждая из характеристик соответствует току $I_2 = \text{пост}$. На этих характеристиках отыскивается точка, соответствующая токам обратной и нулевой последовательностей, полученным в результате расчета токов короткого замыкания. Коэффициент чувствительности для найденной точки отсчитывается на оси ординат.

Пуск защиты при симметричных коротких замыканиях производится от реле $ПР1$ и $ПР2$ и реле сопротивления $ИС$, круговая характеристика которого смещена относительно начала координат для устранения мертвой зоны. Уставка реле $ИС$ должна быть меньше полного сопротивления на его зажимах при нормальном режиме и должна обеспечивать надежное срабатывание реле при коротком замыкании в конце линии.

Схема выполнена таким образом, что для пуска защиты при симметричных коротких замыканиях достаточно кратковременного размыкания контактов реле $ПР1$ и $ПР2$, которое возможно при длительности предшествующего несимметричного режима, равной 0,003 ... 0,005 сек. Для обеспечения селективности защиты при длительных симметричных коротких замыканиях вне защищаемой зоны пуск защиты от реле $ИС$ осуществляется на время 0,2 ... 0,25 сек, определяемое временем отпадания якоря реле $КР3$, а пуск высокочастотного передатчика на время 0,5 ... 0,6 сек, определяемое временем отпадания якоря реле $КР2$.

При нарушениях в цепях напряжения, сопровождающихся срабатыванием реле сопротивления, чувствительный пуск при удаленных симметричных коротких замыканиях блокируется. Блокировка осуществляется размыканием цепи обмотки реле $КР3$, так как после замыкания нормально открытых контактов последнего срабаты-

вание реле *ПР2* не может вызвать действия реле *КР4*. Действие защиты при несимметричных коротких замыканиях при этом полностью сохраняется. Нормально замкнутым контактом реле *ИС* предотвращается также повторный пуск реле *КР4* в момент отключения симметричного короткого замыкания вне защищаемой зоны, когда возможно кратковременное появление токов обратной последовательности.

При помощи реле *ЭТ1*, включенного на полный ток фазы, обеспечивается пуск высокочастотных передатчиков на обоих концах линии при внешних симметричных коротких замыканиях, сопровождающихся протеканием по линии больших токов. Благодаря этому обеспечивается блокировка защиты в случае, если при внешнем симметричном коротком замыкании на одном из концов линии сработают реле *ПР1* и *ПР2* под влиянием токов небаланса.

Ток срабатывания реле *ЭТ1* отстраивается от максимального тока нагрузки линии. При симметричном режиме, сопровождающемся протеканием тока, меньшего тока срабатывания реле *ЭТ1*, токи небаланса достигают незначительных величин и не могут поэтому вызвать срабатывания реле *ПР1* и *ПР2*.

Благодаря наличию в схеме реле *ЭТ2*, ток срабатывания которого принимается равным 1,5 тока срабатывания реле *ЭТ1*, защита при нарушениях в цепях напряжения только загроубляется по отношению к симметричным коротким замыканиям. Наличие этого реле позволяет также во многих случаях применять вместо реле сопротивления *ИС* реле минимального напряжения. Допустимость такой замены легко может быть проверена по остаточному напряжению на шинах при симметричном коротком замыкании в конце линии, которое сопровождается протеканием тока, достаточного для надежного действия защиты от реле *ЭТ2*. Принимая уставку равной 0,65 номинального напряжения, получаем следующее выражение для проверки допустимости применения реле минимального напряжения:

$$\sqrt{3} I_{cp} z_A \leq \frac{0,65 U_n}{1,5},$$

где U_n — номинальное линейное напряжение;

I_{cp} — ток срабатывания реле *ЭТ2*;

z_A — полное сопротивление линии;

1,5 — коэффициент надежности.

Применение реле минимального напряжения недопустимо при присоединении трансформаторов напряжения непосредственно к линии, так как после отключения линии реле сработает и к моменту ее включения чувствительный пуск защиты при симметричных коротких замыканиях будет блокироваться.

Ряд преимуществ дает примененное в схеме прекращение работы высокочастотного передатчика при срабатывании защиты путем воздействия на реле *КР1* от контактов выходного промежуточного реле *ЭП*, имеющего обмотку самодерживания в цепи отключающей катушки выключателя. Благодаря этому после срабатывания на одном

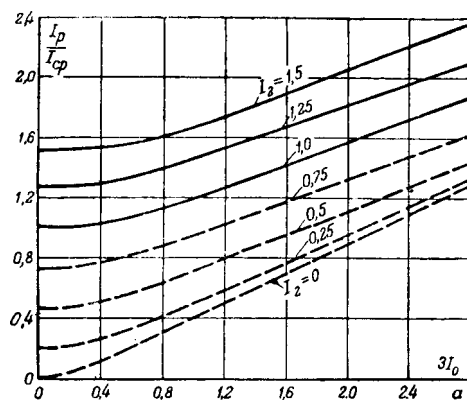


Рис. 4. Характеристики чувствительности пускового органа токов обратной и нулевой последовательностей. Уставка: $I_2 = 1 \text{ а}$, $3I_0 = 2 \text{ а}$.

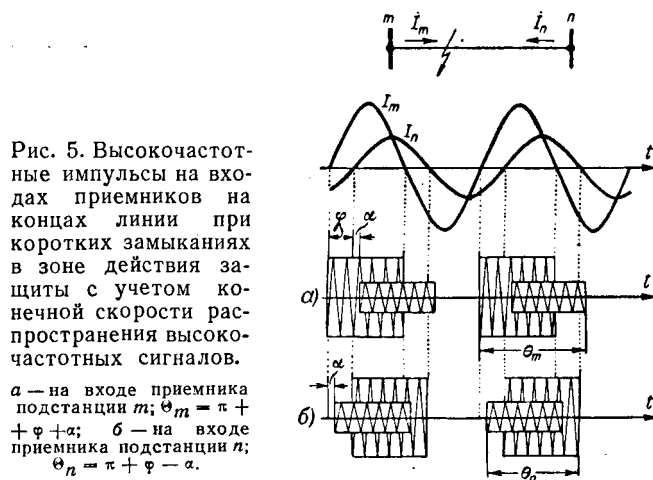


Рис. 5. Высокочастотные импульсы на входах приемников на концах линии при коротких замыканиях в зоне действия защиты с учетом конечной скорости распространения высокочастотных сигналов.

a — на входе приемника подстанции m ; $\theta_m = \pi + \varphi + \alpha$; b — на входе приемника подстанции n ; $\theta_n = \pi + \varphi - \alpha$.

конце линии защита перестает сравнивать фазы токов на противоположном конце и действует на отключение от высокочастотных импульсов своего передатчика. Можно показать, что это позволяет использовать запаздывание в передаче фазы тока с одного конца линии на другой для повышения надежности действия защиты при коротких замыканиях в защищаемой зоне, что важно для длинных линий. Последнее поясняется рис. 5, где показано, что на том конце линии, где ток имеет отстающую фазу, смещение высокочастотных импульсов будет меньше сдвига фаз φ между токами на концах линии; наоборот, на другом конце линии, где ток имеет опережающую фазу, это смещение будет больше. Разница в смещениях высокочастотных импульсов на входах приемников будет в связи с этим определяться удвоенным значением погрешности запаздывания α , т. е. будет составлять 12° на 100 км длины линии.

При принятой схеме высокочастотный передатчик не работает после отключения выключателя линии, что дает возможность защите действовать каскадно. В противном случае высокочастотный передатчик посылал бы после отключения выключателя блокирующий (неманипулируемый) высокочастотный сигнал, что могло бы приводить при каскадном действии к срабатыванию защиты на противоположном конце линии с временем 0,5...0,6 сек.

Комбинированный фильтр тока. Применение для управления высокочастотным передатчиком комбинированного фильтра тока типа $I_1 + kI_2$ позволило значительно повысить надежность действия дифференциально-фазной защиты при коротких замыканиях в защищаемой зоне [Л. 5].

Коэффициент k регулируется изменением числа витков вторичной обмотки трансформатора фильтра, т. е. изменением сопротивления взаимной индукции между первичными и вторичной обмотками. При повреждениях в защищаемой зоне и полнофазном режиме работы токи обратной последовательности на концах линии, как известно, близко совпадают по фазе. Для надежного действия защиты при несимметричных коротких замыканиях необходимо поэтому обеспечить преимущественное сравнение фаз токов обратной последовательности, для чего в местах установки защиты должно быть выполнено условие

$$kI_2 \geq k_n I_1,$$

где коэффициент надежности k_n принимается равным 1,5.

Требуемая величина коэффициента k фильтра для каждого полуконтакта защиты определяется по двухфазному короткому замыканию на землю на противоположном конце защищаемой линии. Из полученных коэффициентов k принимается больший.

В защите приняты три значения для коэффициента k , равные 4, 6 и 8. С точки зрения поведения защиты при несимметричных коротких замыканиях в защищаемой зоне выгоднее применять большие значения k , так как при этом обеспечиваются более правильные фазные соотношения между напряжениями на выходных зажимах комбинированных фильтров обоих концов линии за счет большего преобладания в этих напряжениях составляющих обратной последовательности. С точки зрения поведения защиты при внешних симметричных коротких замыканиях выгоднее применять меньшие значения k , так как при этом будет меньше искажение фазы напряжения на выходе фильтра от небалансов, вызванных погрешностями трансформаторов тока.

Однако проведенные ЦНИЭЛ теоретические и экспериментальные исследования показывают, что в этом случае, благодаря малой постоянной времени цепи короткого замыкания при повреждениях вне зоны действия защиты, погрешности трансформаторов тока достигают небольших величин.

При принятых уставках зоны блокировки рассматриваемая защита гораздо менее чувствительна к погрешностям трансформаторов тока при внешних коротких замыканиях, чем самые грубые дифференциально-токовые защиты. Она надежно блокируется при всех принятых значениях коэффициента k , что подтверждается опытом эксплуатации. В связи с этим обычно используются только уставки k , равные 6 и 8. Применение коэффициента $k = 4$ может оказаться целесообразным только при наличии недостаточно качественных трансформаторов тока.

Особенности применения защиты на линиях с однофазным автоматическим повторным включением. Дифференциально-фазная защита может оставаться в действии при работе линии двумя фазами, что является ее преимуществом перед направленными высокочастотными защитами обратной и нулевой последовательностей, которые в этом режиме должны блокироваться [Л. 2]. Имеется, однако, ряд особенностей, которые необходимо учитывать при использовании защиты на линиях с однофазным автоматическим повторным включением (ОАПВ).

Ток обратной последовательности, появляющийся при работе линии двумя фазами, ухудшает условия работы защиты, так как он вызывает увеличение сдвига фаз между векторами токов $I_1 + kI_2$ обоих концов линии при коротких замыканиях в защищаемой зоне. Проведенные исследования показывают, что при замыканиях между двумя фазами и при двухфазных коротких замыканиях на землю в цикле однофазного автоматического повторного включения все же всегда обеспечивается четкое действие защиты. Это позволяет отказаться от ускорения действия резервной защиты от междуфазных повреждений на время указанного цикла, которое могло бы ограничивать предел передаваемой мощности, так как после ускорения резервная защита может ложно действовать при качаниях.

При однофазных коротких замыканиях на концах длинной линии, работающей двумя фазами в режиме большой нагрузки, сдвиг фаз между векторами токов $I_1 + kI_2$ обоих ее концов может быть больше $120 \dots 130^\circ$, и защита поэтому будет блокироваться. Принимая ток нагрузки близко совпадающим по фазе с напряжением, что имеет место при передаче большой мощности, можно показать, что защита может блокироваться при повреждении вблизи приемного конца линии на фазе, отстающей по отношению к отключенной, или при повреждении на противоположном конце линии на опережающей фазе. Как правило, блокировка возможна только при однофазных коротких замыканиях в зоне действия токовых отсеков, поэтому быстрое отключение линии будет все же обеспечено с одного конца от отсеки, а с другого — от дифференциально-фазной защиты.

Отдельно следует рассмотреть вопрос о поведении защиты при автоматическом повторном включении поврежденной фазы с одной стороны на устойчивое короткое замыкание, что равносильно обрыву фазы с односторонним замыканием на землю. При обычных схемах за повторным автоматическим включением фазы на неустранившееся короткое замыкание следует отключение всех трех фаз, поэтому указанный вид повреждения рассматривается применительно к случаю отказа во включении выключателя с одной стороны линии. Высокочастотными защитами, применяемыми в сетях 110...220 кВ, указанное короткое замыкание, как повреждение в защищаемой зоне, воспринимается недостаточно четко. В большей мере это относится к диффе-

ренциально-фазной защите. Направленные высокочастотные защиты обратной или нулевой последовательности могут, например, при этом блокироваться из-за пуска передатчика от реле тока или напряжения и недостаточной мощности на одном из концов линии для срабатывания реле направления, останавливающего работу передатчика. Дифференциально-фазная защита при указанном повреждении может блокироваться из-за неблагоприятных фазных соотношений между токами на концах защищаемой линии. В работе Теплоэлектропроекта, выполненной Г. И. Атабековым в 1941 г., показано, что при обрыве фазы с односторонним замыканием на землю поведение дифференциально-фазной защиты зависит от соотношения между сопротивлениями прямой и нулевой последовательностей z_1 и z_0 участка электропередачи со стороны места заземления фазы. Защита, сравнивающая фазы токов прямой и обратной последовательностей, может блокироваться при выполнении условия неравенства $z_0 > z_1$.

Из-за более быстрого возрастания сопротивления z_0 при перемещении по линии точки короткого замыкания от места установки защиты более вероятно, что защита может блокироваться при обрывах фазы вблизи концов защищаемого участка с замыканием на землю в сторону шин удаленной подстанции.

Учитывая изложенное в отношении поведения защиты при однофазных коротких замыканиях во время цикла однофазного автоматического повторного включения и при включении фазы с одной стороны на неустранившееся повреждение, сопровождающееся отказом во включении выключателя с другой стороны линии, в схемах обычно предусматривается самостоятельное неселективное действие избирателей после отключения поврежденной фазы. Вопрос о необходимости такого действия избирателей при рассмотренных однофазных повреждениях целесообразно уточнять в каждом отдельном случае на основании расчета токов короткого замыкания с учетом предшествующего режима нагрузки и действия токовых отсеков.

Специфической особенностью дифференциально-фазной защиты является то, что после отключения поврежденной фазы с одной стороны оба полукомплекта защиты могут продолжать действовать так же, как при повреждении в защищаемой зоне, до отключения выключателя на другой стороне линии. Поэтому перевод действия защиты на отключение двух оставшихся в работе фаз помимо избирателей должен производиться с выдержкой времени, учитывающей разницу во временах отключения выключателей и во времени срабатывания защиты на концах линии. При использовании в качестве избирателей реле сопротивления необходимо также считаться с возможностью их каскадного действия при коротких замыканиях через переходное сопротивление. В схемах однофазного автоматического повторного включения эта выдержка времени обычно отсчитывается с момента срабатывания защиты и составляет 0,25 ... 0,5 сек.

В случае применения защиты на линиях с ОАПВ реле ЭП не может быть использовано для прекращения работы высокочастотного передатчика при действии защиты на отключение одной фазы, так как в этом случае последовательная обмотка реле ЭП не используется. Поэтому нельзя допустить возврата реле ПР4 до срабатывания специальных реле с удерживающими обмотками в цепях отключающих катушек выключателей, которое произойдет при прекращении работы высокочастотных передатчиков. Указанную функцию могут выполнять эти специальные реле. При этом необходимо, однако, обеспечить контроль действия защиты токами высокой частоты до того, как она будет переведена на действие помимо избирателей во время цикла однофазного автоматического повторного включения, что требует увеличения выдержки времени этого перевода защиты. Поэтому при действии защиты на отключение одной фазы остановка работы высокочастотного передатчика обычно не предусматривается.

Выключатели на концах поврежденной фазы при автоматическом повторном включении могут включаться одновременно. Поэтому при отключении всех трех фаз после включения на неустранившееся короткое замыкание необходимо прекращать работу высокочастотного передатчика от промежуточного реле устройства ОАПВ. В противном случае может произойти замедление действия защиты с другой стороны линии из-за посылки неманипулируемого тока высокой частоты в течение 0,5 ... 0,6 сек [Л. 6].

Применение защиты на линиях с ответвлениями. Применение дифференциально-фазной защиты на линиях с ответвлениями вызывает ряд затруднений, обусловленных как требованиями селективности при внешних коротких замыканиях, так и требованиями надежности действия при повреждениях в защищаемой зоне. Ниже рассмотрены требования, которым должна удовлетворять защита типа ДФЗ-2 при ее использовании на линии с одним ответвлением.

На ответвлении линии обычно должен устанавливаться отдельный комплект защиты. При внешнем повреждении, сопровождающемся срабатыванием пусковых органов в цепях отключения защиты хотя бы на одном конце линии, необходимо обеспечить пуск высокочастотных передатчиков не менее чем на двух концах линии. При этом следует учитывать, что при наличии ответвления ток на конце линии, ближайшем к месту повреждения, равен сумме токов, протекающих в ответвлении и в другом конце линии. Поэтому отношение токов срабатывания реле ПР2 и ЭТ2 к токам срабатывания реле ПР1 и ЭТ1 должно быть увеличено до 2,5 ... 3. Загрубление уставки реле ПР2 может быть выполнено за счет уменьшения добавочного сопротивления R_7 в цепи его тормозной обмотки.

При внешних повреждениях, сопровождающихся пуском высокочастотных передатчиков только на двух выводах линии, сравниваемые токи, а следовательно, и высокочастотные импульсы

могут из-за наличия ответвления быть сдвинуты на угол, несколько отличный от 180° . Последнее имеет место в том случае, если токи в удаленных от места короткого замыкания выводах линии сдвинуты по фазе друг относительно друга.

Из рассмотрения комплексных схем замещения для расчета токов короткого замыкания, а также векторных диаграмм следует, что при использовании для пуска реле *ПР1* и *ПР2* только составляющих обратной последовательности погрешность, вносимая сдвигом фаз между токами этой последовательности, всегда будет меньше половины угла между векторами токов двух удаленных выводов линии. Наихудшие условия будут при протекании на концах линии, удаленных от места короткого замыкания, токов, близких к току срабатывания реле *ПР1*. Наличие указанной погрешности, которая, как правило, достаточно мала, требует применения наибольшей уставки угла блокировки, т. е. 60° .

Отдельно следует рассмотреть вопрос о поведении защиты при повреждениях в защищаемой зоне.

В случае присоединения к ответвлению достаточно большой генерирующей мощности нет необходимости предъявлять к защите какие-либо дополнительные требования. При отсутствии генерирующей мощности и наличии на ответвлении трансформаторов с заземленными нейтралями пуск реле *ПР1* и *ПР2* должен осуществляться только от составляющих тока обратной последовательности. Использование токов нулевой последовательности для повышения чувствительности пуска при этом недопустимо из-за возможности отказов защиты при однофазных и двухфазных замыканиях на землю, обусловленных тем, что при пуске высокочастотного передатчика на ответвлении от токов нулевой последовательности величина тока обратной последовательности может оказаться недостаточной для манипуляции.

Должны быть приняты меры для предупреждения отказов защиты при симметричных коротких замыканиях в защищаемой зоне. Возможность таких отказов обусловлена фиксацией пуска высокочастотного передатчика на комплексе защиты, установленном на ответвлении. После появления симметричного короткого замыкания протекание тока в ответвлении прекращается, а следовательно, прекращается и манипуляция передатчика. С целью предотвращения отказов необходимо исключить фиксацию пуска высокочастотного передатчика на ответвлении после возврата реле *ПР1*, что может быть сделано при помощи реле сопротивления *ИС*. Нормально закрытый контакт этого реле должен быть включен параллельно контакту реле *КР2*, шунтирующему контакт реле *КР1*. Действие реле *ИС* на отключение должно быть исключено.

Такое использование реле сопротивления *ИС* может приводить к ложным действиям защиты при симметричных коротких замыканиях вне защищаемой зоны. Для их предупреждения действие реле *ИС* на ответвлении должно быть на-

правлено в сторону внешних повреждений, а характеристики реле сопротивлений на двух других выводах линии должны проходить через начало координат. Первое из этих мероприятий позволяет обеспечить блокировку защиты при симметричных повреждениях за ответвлением, а второе — при внешних симметричных повреждениях вблизи основных выводов линии, сопровождающихся пуском высокочастотных передатчиков только у вывода, который ближе к месту короткого замыкания, и на ответвлении, где фиксация пуска высокочастотного передатчика снимается.

Выводы. 1. Дифференциально-фазная защита типа ДФЗ-2 обладает высокой чувствительностью ко всем видам коротких замыканий и предназначена для применения на линиях 110...220 кв как большой, так и малой протяженности. Защита может быть также использована на линиях, имеющих одно ответвление для отбора мощности или присоединения генерирующих станций.

2. Защита не действует при перегрузках и качаниях в системе и может быть использована при неполнофазных режимах.

3. При принятых уставках зоны блокировки защита менее чувствительна к погрешностям трансформаторов тока при внешних коротких замыканиях, чем грубые дифференциально-токовые защиты.

4. Комбинированный фильтр типа $I_1 \rightarrow KI_2$ обеспечивает правильные фазные соотношения между сравниваемыми токами на концах линии и позволяет использовать чувствительные пусковые органы тока обратной последовательности как на линиях с двусторонним, так и с односторонним питанием.

5. Реле сопротивления защиты выполняет ряд вспомогательных функций. При нарушениях в цепях напряжения реле сопротивления блокирует чувствительный пуск при удаленных симметричных коротких замыканиях. При этом защита остается в работе, сохраняя свою чувствительность по отношению к несимметричным повреждениям.

6. Положительный опыт применения защиты типа ДФЗ-2 указывает на целесообразность ее дальнейшего широкого внедрения в эксплуатацию.

Литература

1. Г. В. Микучкий. Применение токов высокой частоты для защиты линий электропередачи. Госэнергоиздат, 1953.
2. А. М. Федосеев. Релейная защита электрических систем. Госэнергоиздат, 1952.
3. В. В. Кочетов, Е. Д. Сапир и Г. Г. Якубовсон. Дифференциально-фазные высокочастотные защиты ЦНИЭЛ. Труды ЦНИЭЛ, вып. I, 1953.
4. А. Ф. Березовский. О небалансах в фильтрах напряжения отрицательной последовательности. Электрические станции, № 7, 1953.
5. Е. Д. Сапир. Комбинированные фильтры тока и их применение в дифференциально-фазной высокочастотной защите. Труды ЦНИЭЛ, вып. I, 1953.
6. Е. Д. Сапир. Об одной особенности защиты типа ДФЗ-2. Электрические станции, № 5, 1955.

[4.12.1954]

Исследование вихревых магнитных полей в электролитической ванне

Ижж. П. М. ЕГОРОВ

Харьков

Существующие методы. Моделирование вихревого магнитного поля в электролитической ванне основано на аналогии дифференциальных уравнений, описывающих вихревое магнитное поле и стационарное электрическое поле в проводящей среде.

Основным уравнением вихревого магнитного поля будет:

$$\Delta A = -\mu \delta, \quad (1)$$

где A — вектор-потенциал магнитного поля;

δ — вектор плотности тока, создающего это магнитное поле;

μ — магнитная проницаемость;

Δ — лапласиан.

Вследствие векторной его формы уравнение не имеет аналогов в уравнениях стационарного поля электролитической ванны. Но в частном случае двухмерного параллельно-плоского вихревого поля выражение (1) существенно изменяется. Вектор-потенциал A и вектор плотности тока δ совпадают по направлению. Это дает право рассматривать их как скалярные величины. Если векторы A и δ направить вдоль оси z прямоугольной системы координат, то уравнение (1) примет вид:

$$\Delta A_z = -\mu \delta_z, \quad (2)$$

а в развернутой форме

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu \delta_z. \quad (3)$$

Уравнение (3) совершенно аналогично уравнению Пуассона для потенциала электролитической ванны с распределенными источниками тока:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\frac{\text{div } \delta_0}{\gamma}, \quad (4)$$

где φ — потенциал электрического поля ванны;

δ_0 — плотность тока в электролите;

γ — удельная проводимость электролита.

Сопоставление между собой уравнений (3) и (4) приводит к системе аналогий, представленной в табл. 1.

Нетрудно показать, что линии $A_z = \text{const}$ будут совпадать с линиями вектора B индукции магнитного поля.

Действительно, для случая двухмерного поля индукция связана с вектор-потенциалом следующим соотношением:

$$B = \text{rot } A = i^0 \frac{\partial A_z}{\partial y} - j^0 \frac{\partial A_z}{\partial x}. \quad (5)$$

С другой стороны, рассматривая A_z как скаляр, можно написать:

$$\text{grad } A_z = i^0 \frac{\partial A_z}{\partial x} + j^0 \frac{\partial A_z}{\partial y}. \quad (6)$$

Из сопоставления уравнений (5) и (6) следует, что вектор B всегда перпендикулярен

вектору $\text{grad } A_z$. Но последний в свою очередь нормален к линии $A_z = \text{const}$. Следовательно, силовые линии вектора B совпадают с эквипотенциальными линиями $A_z = \text{const}$ и соответственно с $\varphi = \text{const}$.

Особенностью построения моделей вихревых магнитных полей является осуществление в электролитической ванне областей с распределенным подводом тока. В практике моделирования известны различные пути решения этой задачи.

Первый метод [Л. 1 и 2] заключается в том, что в электролит погружается система цилиндрических металлических электродов (проволок), которые размещаются по всей вихревой зоне и стекание тока с них регулируется соответственно заданному распределению плотности источников.

Второй метод [Л. 3 и 4] напоминает первый, только вместо большого числа электродов применяется один тонкий электрод — в виде иглы, который переносится последовательно в различные точки вихревой зоны. Результирующее поле получалось путем наложения полей, снятых для отдельных положений электрода.

Третий метод был предложен В. А. Карасевым [Л. 5]. При этом методе полупроводящий электрод выполняется по форме вихревой зоны и устанавливается так, чтобы он только касался поверхности электролита, не погружаясь в него.

Основной недостаток первого метода заключается в том, что при малом диаметре электродов увеличивается сопротивление ванны и потенциалы вихревой зоны получаются завышенными. При увеличении же диаметра электродов нарушается однородность среды ванны, так как значительный объем заполняется металлическими

Таблица 1

Вихревое магнитное поле	Стационарное электрическое поле
Вектор-потенциал A_z	Потенциал электрического поля φ
Линия $A_z = \text{const}$	Линия $\varphi = \text{const}$
Плотность тока в обмотках δ_z	Расхождение вектора плотности тока в ванне $\text{div } \delta_0$
Магнитная проницаемость μ	Величина, обратная удельной проводимости $1/\gamma$
Ферромагнитная среда μ — велико	Изолирующая среда γ — мало
Среда — воздух μ — мало	Проводящая среда (электролит ванны) γ — велико

проводниками, что в свою очередь искажает получаемый результат. Второй метод вследствие малого диаметра электрода — иглы — также приводит к значительному искажению результатов. В третьем методе, предложенном В. А. Карасевым, нельзя отметить методических неправильностей, но тем не менее он не всегда бывает применим. При сложной геометрической конфигурации вихревой зоны изготовление графитокерамических сопротивлений становится уже затруднительным. Но самое главное этот метод вовсе неприменим, если источники тока распределены по вихревой зоне с непостоянной плотностью.

В нашей работе [Л. 6] были показаны преимущества моделирования посредством конформно преобразованных моделей, но, применяя этот метод к моделированию вихревых полей, мы почти всегда получаем зону источников тока, распределенных в пространстве с различной плотностью.

Исходя из всего вышеизложенного, был разработан новый метод моделирования, свободный от перечисленных недостатков.

Метод эквивалентных электродов. Сущность предлагаемого метода заключается в следующем. Вся зона источников разбивается на ряд участков. Результирующее поле может быть получено как сумма полей, создаваемых каждым из участков в отдельности. При измерении этих составляющих полей ввиду малых размеров участка источников бывает вполне достаточно произвести одно измерение потенциала в центре этого участка, а остальные в окружающем пространстве, где источники отсутствуют. При этих условиях источники, распределенные по всей площади участка, могут быть заменены одним эквивалентным электродом, расположенным в его центре. Размеры этого электрода должны быть подобраны так, чтобы потенциалы отдельных точек как вне участка, так и в центре его, где теперь помещен электрод, сохранили свои исходные значения. При этом ток, стекающий с эквивалентного электрода, должен равняться суммарному току распределенных источников участка.

При малых размерах участка потенциалы точек, расположенных вне его, определяются только суммарным током, вытекающим из участка. Потенциал же центральной точки зависит не

только от значения вытекающего тока, но и от характера растекания его в пространстве поля.

Рассмотрим определение размеров эквивалентных электродов для некоторых характерных случаев растекания тока. В качестве

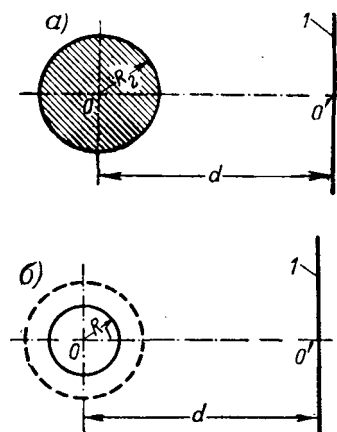


Рис. 1. Схема к расчету эквивалентных электродов.

а — цилиндрический участок распределенных источников; б — эквивалентный электрод.

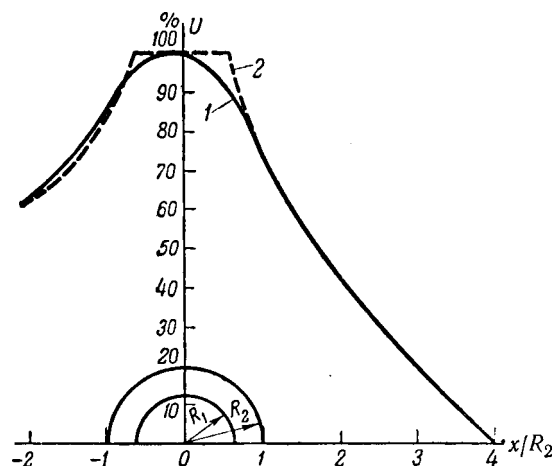


Рис. 2. Изменение потенциала в поле распределенных источников (1) и в поле эквивалентного электрода (2).

расчетной схемы была принята система, изображенная на рис. 1, а. Цилиндрический участок радиуса R_2 с распределенными источниками тока располагался против проводящей плоскости 1. Эквивалентный электрод изготавливался также в виде цилиндра радиуса R_1 (рис. 1, б) и размещался в центре исходного участка с распределенными источниками.

Разность потенциалов между центром зоны распределенных источников (рис. 1, а) и плоскостью 1 определяется выражением

$$u_{Od} = \frac{i}{2 \cdot \pi \gamma h} \left(\frac{1}{2} + \ln \frac{2d}{R_2} \right), \quad (7)$$

где i — суммарный ток участка источников; γ — удельная проводимость среды; h — глубина электролита в ванне.

Разность же потенциалов между эквивалентным электродом (рис. 1, б) и той же плоскостью 1 соответственно

$$u_{Od} = \frac{i}{2 \cdot \pi \gamma h} \ln \left[\frac{d}{R_1} + \sqrt{\left(\frac{d}{R_1} \right)^2 - 1} \right]. \quad (8)$$

Приравняв правые части уравнений (7) и (8), получим относительную величину эквивалентного электрода:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{4e^{\frac{1}{2}}}{4e + \left(\frac{R_2}{d} \right)^2}. \quad (9)$$

В табл. 2 приведены размеры эквивалентных электродов, рассчитанные по уравнению (9) для различных значений отношения R_2/d .

Таблица 2

R_2/d	0	0,25	0,5	1
R_1/R_2	0,6065	0,6031	0,5929	0,5554

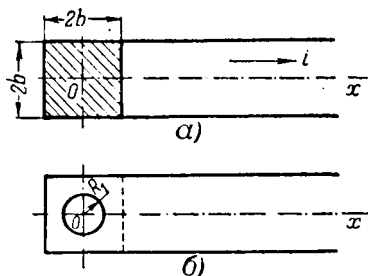


Рис. 3. Схема к расчету эквивалентных электродов при одностороннем стекании тока.

а — участок источников в прямоугольной проводящей полосе; б — эквивалентный электрод.

Предельное значение отношения $R_2/d \rightarrow 0$ соответствует радиальному растеканию тока по всем направлениям от оси цилиндра. Другие же конечные значения этого отношения характеризуют различные степени одностороннего стекания тока.

На рис. 2 кривая 1 изображает изменение потенциала вдоль линии oo' , создаваемое распределенными источниками, а кривая 2 — изменение потенциала в поле эквивалентного электрода. Обозначения рис. 2 соответствуют рис. 1. Расчет произведен для соотношения $R_2/d = 0,25$.

Для полноты освещения данного вопроса рассмотрим еще предельный случай одностороннего стекания тока из зоны распределенных источников, когда линии тока представляют собой систему параллельных прямых. На рис. 3, а изображен элемент такого поля в виде прямоугольной полосы шириной $2b$. Источники тока равномерно распределены в пределах квадрата со стороной $2b$. Разность потенциалов между центром o участка и точками, лежащими на оси ox вне зоны источников, выражается следующей зависимостью:

$$u_{ox} = \frac{i}{2 \cdot \gamma h} \left(\frac{x}{b} - \frac{1}{4} \right). \quad (10)$$

Эквивалентному электроду для этого случая также придается форма цилиндра и он располагается в центре квадратного участка источников (рис. 3, б). Расчет поля цилиндрического электрода, помещенного в прямоугольную проводящую полосу, известен [Л. 7].

Радиус R_1 эквивалентного электрода подбирается так, чтобы разности потенциалов между центром участка o и какой-либо точкой на оси ox для обоих случаев а и б рис. 3 получились бы одинаковыми. Расстояние от этой точки до центра участка берется в несколько раз большим ширины полосы $2b$. В результате расчета получено: $\frac{R_1}{b} = 0,455$.

Если b выразить через радиус R_2 круга, равновеликого квадрату со стороной $2b$:

$$b = \frac{\sqrt{\pi} R_2}{2},$$

то отношение $\frac{R_1}{R_2} = 0,4032$.

Определим теперь порядок погрешностей, которые возникнут в случае, если диаметр эквивалентного электрода подобран не в полном соответствии с характером растекания тока. Очевидно, потенциалы точек, лежащих вне границ участка с распределенными источниками, практически не будут зависеть от диаметра эквивалентного электрода, но потенциал самого электрода может существенно измениться.

На рис. 4 построена кривая относительных погрешностей потенциала эквивалентного электрода в функции относительных отклонений величины его диаметра. Расчет произведен по (8) для отношения $R_2/d = 0,25$. При этом предполагалось, что во всех случаях ток, стекающий с электрода, остается неизменным. Как видно из рис. 4, отклонение диаметра электрода от его оптимального значения на $\pm 20\%$ вызывает изменение его потенциала соответственно на $-7,13\%$ и $+8,78\%$. Но результирующее значение потенциала в отдельной точке получается как сумма потенциалов, измеряемых при переносе электрода во все участки зоны источников. В этой сумме только одно слагаемое, определенное при установке электрода в эту точку, может иметь погрешность порядка приведенной выше. Следовательно, результирующая ошибка должна быть меньше этого значения в число раз, соизмеримое с числом участков, на которые разбивалась вся зона источников. Например, если число участков равно 5 и диаметр эквивалентного электрода отличается от оптимального своего значения на 20% , то, согласно рис. 4, результирующую погрешность в определении потенциала можно оценить в $\frac{8,78}{5} = 1,76\%$.

Малое значение погрешности позволяет упростить эксперимент и в ряде случаев пользоваться одним электродом для всех равновеликих участков зоны источников.

На основании изложенного выбор размеров эквивалентных электродов можно осуществить следующим упрощенным путем. Вся зона распределенных источников разбивается на отдельные участки, которые по возможности следует выбирать одинаковыми. Для отдельного участка

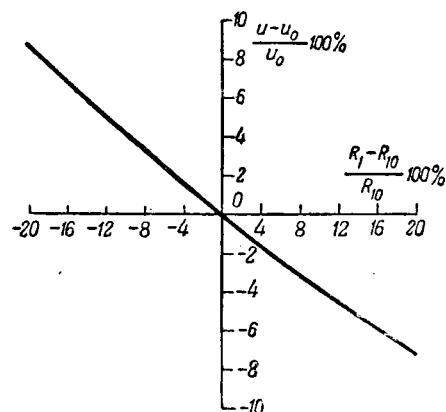


Рис. 4. Кривая относительных погрешностей потенциала эквивалентного электрода.

определяется радиус R_2 равновеликого круга. Тогда радиус эквивалентного цилиндрического электрода будет $R_1 = 0,6 \cdot R_2$. В случае строго одностороннего стекания тока из зоны источников, что встречается, например, при моделировании магнитного поля в пазах электрических машин, радиус электрода следует уменьшить до значения $R_1 = 0,4 \cdot R_2$.

Практическое применение метода эквивалентных электродов. В качестве проверки предлагаемого метода проведено экспериментальное исследование поля системы, изображенной на рис. 5. В прямоугольной ванне $ABCD$, ограниченной с одной стороны плоским металлическим электродом AD , область $FBCG$ является зоной распределенных источников тока. Такая система может служить моделью паза электрической машины, в которой область $FBCG$ соответствует сечению обмотки. Нижняя часть рис. 5 иллюстрирует разбивку зоны источников на четыре участка и расположение в них эквивалентных электродов. На графике, в верхней части рисунка, кривая изображает теоретически рассчитанное изменение потенциала вдоль ванны. Кружки на кривой соответствуют экспериментальным данным, полученным путем наложения четырех полей эквивалентных электродов. Как видно, совпадение опыта с теорией получилось удовлетворительным. Расхождения не превышали 3...3,5%.

Для сравнения тот же опыт был проведен с электродом, выполненным в виде иглы диаметром 0,6 мм. Результаты нанесены на том же графике крестиками. Погрешности в этом случае достигают 25 ÷ 30%, что говорит о явной непригодности этого метода.

На рис. 6 изображена схема постановки эксперимента для исследования вихревого магнитного поля в пазе компенсационной обмотки электрической машины.

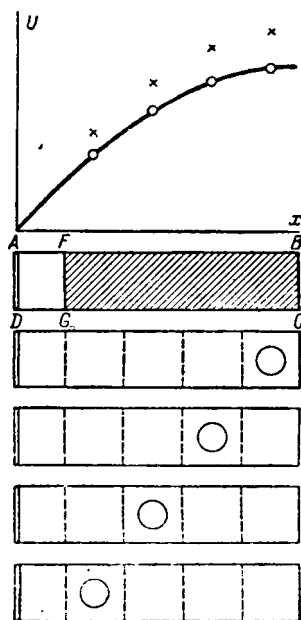


Рис. 5. Схема экспериментальной проверки метода эквивалентных электродов.

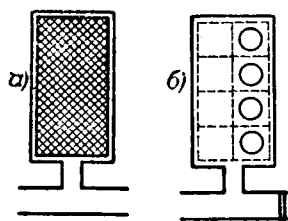


Рис. 6. Моделирование вихревого магнитного поля в пазе компенсационной обмотки электрической машины.

а — сечение паза машины; б — схема расположения эквивалентных электродов.

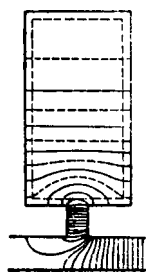


Рис. 7. Магнитное поле в пазу машины.

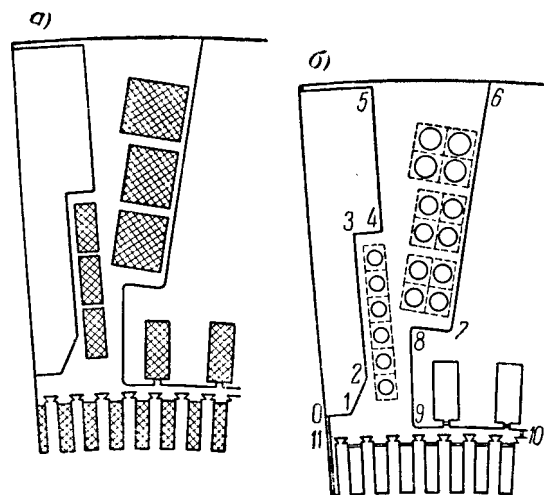


Рис. 8. Моделирование магнитного поля в междуполусном пространстве электрической машины.

а — сечения обмоток и магнитная цепь машины; б — схема модели с расположением эквивалентных электродов.

трической машины. В силу симметрии можно было ограничиться установкой эквивалентных электродов только в одной половине модели. На рис. 7 изображена картина магнитного поля, полученная в результате этого опыта.

В ряде практических случаев трудоемкая работа по наложению нескольких полей может быть существенно сокращена. В качестве примера можно привести определение коэффициентов рассеяния для магнитной цепи электрической машины постоянного тока. На рис. 8, а изображены магнитная цепь и сечения обмоток, соответствующие половине полюсного шага машины. Для решения поставленной задачи совершенно не требуется исследование магнитного поля во всем пространстве, достаточно определить распределение магнитного потока по поверхности стальных частей магнитопровода (полюса, станина, якорь), являющихся границами потоков рассеяния. На рис. 8, б приведена схема модели. Вихревые зоны (сечения обмоток) разбиты на отдельные участки, в центрах которых устанавливались эквивалентные цилиндрические электроды. Измерение потенциала в ванне велось только по линии 0, 1, 2, 3, ..., 11, соответствующей граничной поверхности стальных частей магнитной цепи. Невысокая степень насыщения стальных частей позволила не учитывать его в первом приближении и использовать методику исследования, построенную на методе наложения.

Для иллюстрации применения предлагаемого метода, в случае конформно преобразованных моделей рассмотрим исследование магнитного поля в области, прилегающей к поверхности якоря четырехполюсной машины, связанное с изучением в ней процесса коммутации. На рис. 9, а изображена половина полюсного деления машины с нанесенными на сечениях обмоток эквивалентными электродами. Конформное преобразование:

$$Z = \frac{k_1}{w^k}, \quad (11)$$

где W и Z — комплексы, определяющие соответственные точки в исходной и преобразованной системах, позволило без увеличения габаритов модели значительно расширить области главных воздушных зазоров машины (рис. 9, б). К пазам якоря был применен метод частичного преобразования [Л. 6]. Модели 1...5 изготавливались подобно исходным сечениям пазов и соединялись с преобразованной моделью системой контактных решеток — барьеров.

Данный пример наглядно показывает преимущества применения метода наложения. Согласно этому методу экспериментально исследуются магнитные поля, создаваемые только отдельными обмотками машины, а результирующее поле получается путем наложения их друг на друга. Это дает следующий эффект:

1. Поля, создаваемые в отдельности взятыми обмотками, симметричны относительно осей главных и вспомогательных полюсов, что позволяет строить модель не целого полюсного деления, а только его половины.

2. При наложении составляющих полей потенциалы, создаваемые отдельными обмотками, могут пересчитываться в различных соотношениях. Это позволяет, не производя добавочных экспериментов, получить результирующие поля при любых соотношениях ампервитков обмоток, т. е. в различных режимах работы машины.

3. Меняя при суммировании соответственно знаки составляющих потенциалов, можно получить две несимметричные картины полей для областей, лежащих по обе стороны от оси главного полюса.

На рис. 10, а, б, в приведены картины полей, создаваемых обмотками главного полюса, якоря и вспомогательного полюса. Рис. 10, г и д изображают несимметричные результирующие поля двух половин области полюсного деления, полученные из предыдущих полей путем наложения.

Рассмотренные выше два исследования магнитных полей электрических машин были проведены на заводе ХЭМЗ имени Сталина по проекту

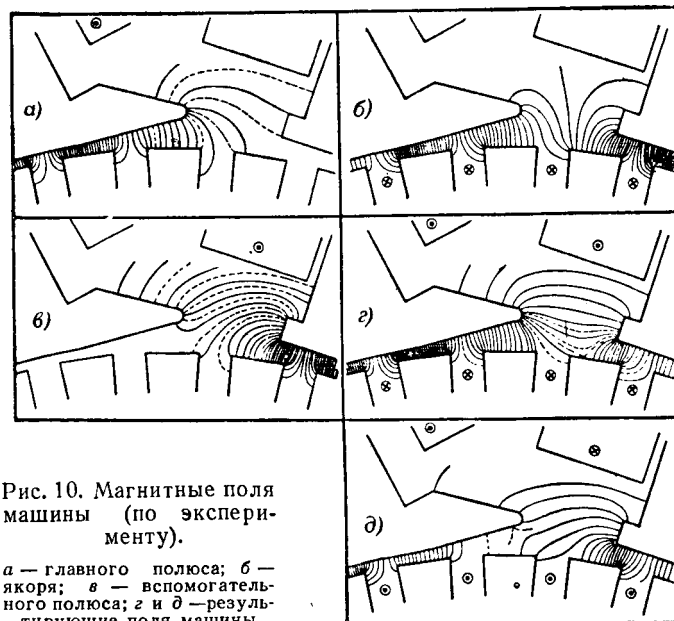


Рис. 10. Магнитные поля машины (по эксперименту).

а — главного полюса; б — якоря; в — вспомогательного полюса; г и д — результирующие поля машины.

и под руководством автора. Экспериментальная часть этих работ была выполнена инж. О. И. Богдановым и Я. И. Каган.

Методика измерений. Определение потенциалов различных точек модели должно быть произведено при строго определенном значении тока, стекающего с электрода. Если используется метод наложения, необходимо определять абсолютные значения потенциалов. Наиболее рационально задача измерения при этих условиях решалась следующим путем.

Сначала посредством обычной мостовой схемы (рис. 11, а) производятся измерения потенциалов для всех составляющих полей. Потенциалы получаются как относительные величины.

Затем определяются коэффициенты пересчета, на которые необходимо умножить относительные значения потенциалов, соответственно каждому положению электрода. Для этой цели служит схема рис. 11, б. При неизменном напряжении U на входе схемы сопротивление r подбирается таким образом, чтобы при любой установке электрода ток, стекающий с него, сохранял неизменное значение. Относительное значение напряжения на ванне

$$k_1 = \frac{U_1}{U} \quad (12)$$

и дает значение коэффициента пересчета. Тогда искомые потенциалы точек находятся из следующего выражения:

$$\varphi = \varphi_0 k_1 k_2. \quad (13)$$

Здесь φ_0 — относительное значение потенциала, измеренное по схеме рис. 11, а;
 k_1 — коэффициент пересчета из (12);
 k_2 — коэффициент, выражающий относительное значение полного тока (ампервитков) рассматриваемого участка вихревой зоны.

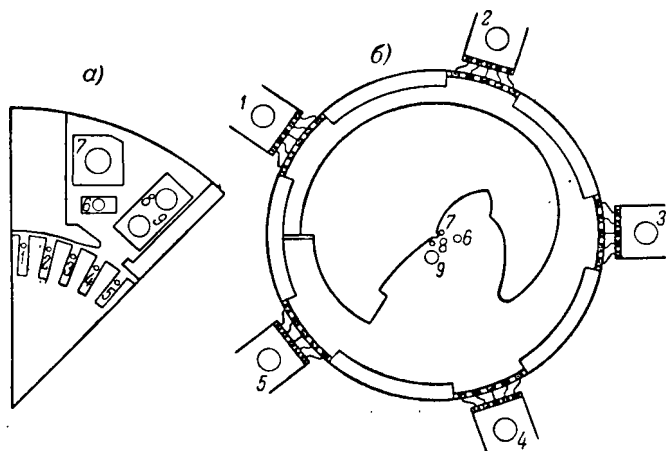


Рис. 9. Схема построения конформно преобразованной модели электрической машины.

а — магнитная цепь и сечения обмоток машины; б — схема модели с расположением эквивалентных электродов.

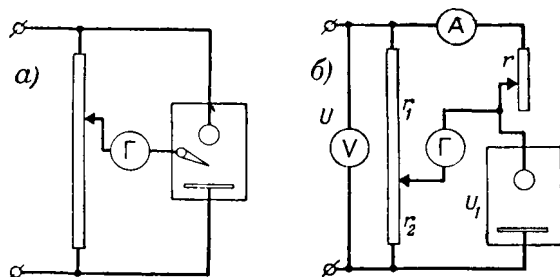


Рис. 11. Схемы измерения при моделировании вихревых магнитных полей.

а — измерение относительных значений потенциала;
б — определение коэффициентов пересчета.

Главным преимуществом такой методики является то, что кропотливое и трудоемкое исследование полей производится при любом значении сопротивления ванны (уровня электролита) и тока в ней. Значения тока выбираются из условий наибольшей чувствительности схемы. Кроме того, в этом случае эталонный делитель напряжения $r_1 r_2$ (рис. 11, а) используется на всю длину.

Второй эксперимент (по схеме рис. 11, б), требующий строгого постоянства сопротивления ванны (уровень и проводимость электролита), занимает мало времени, так как для каждого положения электрода необходимо произвести только одно измерение.

При работе по методу наложения очень важно, чтобы потенциалы составляющих полей измерялись в одних и тех же точках. Практически это обеспечивается шаблонным методом установки зонда. На модели закрепляется тонкий лист-шаблон из изолирующего материала. По предварительной разметке в шаблоне просверлены тонкие отверстия по диаметру иглы зонда. На том же шаблоне предусматриваются отверстия для эквивалентных электродов. При измерении зонд переносится из одного отверстия в другое. При этом полностью отпадает необходимость каких-либо механизмов для переноса зонда и измерения его координат.

В случае экспериментирования с конформно преобразованными моделями этот метод пол-

ностью исключает необходимость каких-либо построений картин полей в преобразованных координатах, так как каждой точке модели соответствует заранее известная точка исходной исследуемой системы, а потенциалы их всегда совпадают.

Выводы. 1. Предлагаемый метод обеспечивает при достаточной точности моделирование вихревых полей с любым распределением источников в вихревой зоне.

2. При данном методе модели возможно изготовлять подобными оригинальной системе, а также конформно преобразованными.

3. Диаметр эквивалентных цилиндрических электродов выбирается в зависимости от характера растекания тока, в пределах от 0,4 до 0,6 диаметра участка зоны источников.

4. При моделировании сложных систем с большим числом источников существенные преимущества дает применение метода наложения.

5. Методика измерения относительных значений потенциала и коэффициента пересчета позволяет производить эксперимент в наиболее простых условиях, обеспечивающих высокую его точность.

6. Изложенная методика моделирования вихревых магнитных полей целиком применима к моделированию любых физических явлений, описываемых уравнением Пуассона.

Литература

1. R. E. Peierls. Использование электролитической ванны для исследования магнитных полей. *Nature*, т. 158, № 4023, 1946.
2. J. K. Mickelsen. Автоматическое устройство для исследования полей. *GER*, № 11, 1949.
3. A. Kingsbury. К вопросу теории трения в жидкостных пленках и экспериментальные методы его исследования. *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, т. 53, стр. 59, 1931.
4. M. Shaw, F. Marks. Исследование трения в подшипниках, 1949.
5. В. А. Карасев. Моделирование вихревого магнитного поля. *Электричество*, № 5, 1949.
6. П. М. Егоров. Экспериментальное исследование потенциальных полей посредством конформно преобразованных моделей. *Электричество*, № 3, 1954.
7. В. Смайт. Электростатика и электродинамика. Иностранная литература, стр. 106, 1954.

[28.12.1954]



Расчет блуждающих токов в подземных сооружениях

Кандидат техн. наук, доц. Г. Г. МАРКВАРДТ

Московский институт инженеров железнодорожного транспорта

Блуждающие токи электрических железных дорог постоянного тока являются серьезным источником повреждений металлических подземных сооружений. Этим объясняется то внимание, которое уделяется экспериментальному и теоретическому изучению вопросов, связанных с протеканием блуждающих токов и влиянием их на подземные сооружения. Однако до сего времени в этой области еще многие вопросы, имеющие

большое практическое значение, остались нерешенными.

Задача изучения блуждающих токов может быть разделена на две части. К первой части можно отнести исследование распределения токов между рельсовым путем и землей, а ко второй — исследование картины протекания тока в земле и подземных сооружениях. Первая часть задачи в настоящее время разработана достаточ-

по детально. Имеется большое количество работ, дающих точное решение ее для некоторых схем [Л. 1], и ряд приближенных исследований, которые с достаточной степенью точности дают решение почти для всех схем [Л. 2 и 3]. Значительно хуже обстоит дело со второй частью задачи, которая представляет наибольший интерес.

Точное решение второй части задачи даже для самого простого случая [Л. 4 и 5] приводит к столь сложным выражениям, что они в практических инженерных расчетах использованы быть не могут. Поэтому наибольшее распространение получил упрощенный метод расчета блуждающих токов [Л. 6], который основан на предположении, что рельсы, подземное сооружение и земля связаны друг с другом переходными сопротивлениями. Такой метод, однако, не дает возможности оценить влияние отдельных факторов на ток утечки из сооружения, поскольку в этом методе действительная картина распределения блуждающих токов заменена условной схемой. Кроме того, при его использовании встречаются затруднения, связанные с неопределенностью переходного сопротивления рельсы — сооружение, которое может быть определено только экспериментально и для уже построенных сооружений, так как зависит от их взаимного расположения.

Наличие подземных сооружений, изменяя проводимость массы грунта, влияет на общую величину тока утечки из рельсов в землю. Однако, как показывают измерения [Л. 7, 8] и теоретические исследования [Л. 4], только небольшая часть блуждающих токов затекает в подземные сооружения. Поэтому обратное влияние подземного сооружения на потенциалы и токи в рельсах совершенно незначительно и им можно пренебречь. Это позволяет отдельно рассматривать утечку токов из рельсов в землю и затекание их в подземное сооружение. Рассмотрим общую схему электрической железной дороги с несколькими подстанциями и нагрузками (рис. 1).

Пользуясь тем, что блуждающие токи оказывают ничтожное влияние на токораспределение, между подстанциями, можно обычными способами найти нагрузки всех подстанций и перейти к схеме рис. 2, где I_{n1} , I_{n2} и I_{n3} — нагрузки отсасывающих проводов. Линейная зависимость всех искомых величин от внешних нагрузок позволяет применить в данном случае метод суперпозиции. Тогда задача сведется к

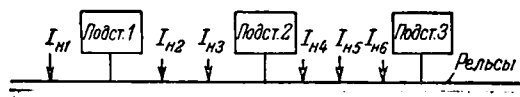


Рис. 1. Схема расположения подстанций и нагрузок электрической железной дороги.

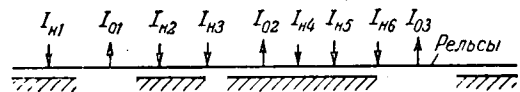


Рис. 2. Схема рельсовой сети, в которой отсасывающие пункты заменены их нагрузками.

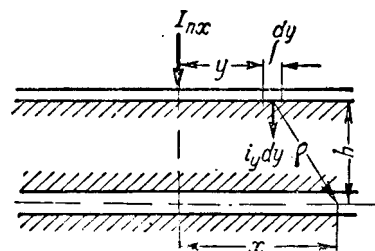


Рис. 3. Расчетная схема для определения токов и потенциалов подземного сооружения при одной нагрузке.

рассмотрению схемы с одной нагрузкой (рис. 3) при заземлителе, удаленном в бесконечность и представляющем второй полюс цепи тока I_{nx} . Нагрузка I_{nx} может представлять любую из указанных на рис. 2, включая и нагрузки отсасывающих проводов.

Рассмотрим вначале распределение потенциала и тока в рельсах, не считаясь с наличием подземного сооружения. Такая задача решается с достаточной точностью методом, применяемым в случае линии с распределенными постоянными. При этом считается, что рельсы соединены с землей через переходное сопротивление, величина которого на единицу длины равна r_{np} . В это сопротивление включается и сопротивление растеканию. Сопротивление земли принимается равным нулю. В результате приходим к схеме

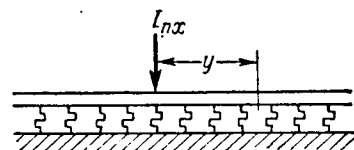


Рис. 4. Расчетная схема для определения токов утечки из рельсов в землю.

рис. 4, рассмотрение которой приводит к дифференциальному уравнению [Л. 3]:

$$\frac{d^2 \varphi_y}{dy^2} - k_p^2 \varphi_y = 0, \quad (1)$$

где φ_y — потенциал рельса на расстоянии y от нагрузки,

$$k_p^2 = \frac{r_p}{r_{np}}, \quad (2)$$

r_p — сопротивление 1 км рельсового пути.

Участки рельсового пути, лежащие по обе стороны от нагрузки, можно считать равными бесконечности. Тогда решение уравнения (1) дает следующее выражение для тока утечки на единицу длины рельса:

$$i_y = \frac{\varphi_y}{r_{np}} = \frac{k_p I_{nx}}{2} e^{-k_p y} \quad (3)$$

Переходя к основной задаче — определению потенциалов и токов в подземном сооружении, мы, таким образом, можем рассматривать рельс как источник протекающих в земле токов, в поле которых находится подземное сооружение.

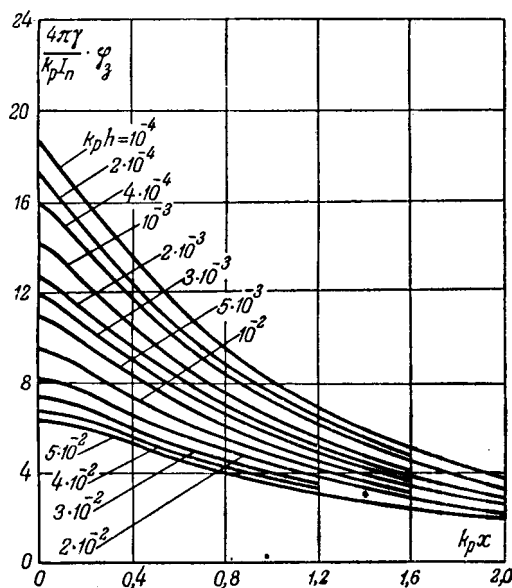


Рис. 5. Изменение потенциала грунта вдоль подземного сооружения.

Незначительно влияя на общий ток утечки из рельсов, подземное сооружение вносит изменение в поле протекающих в земле токов и в распределение потенциалов вблизи себя. Однако в целях упрощения решения задачи допустим, что оно не влияет на распределение потенциалов в земле. Это допущение не вызовет существенной погрешности, если подземное сооружение, как это обычно имеет место, изолировано от грунта и не имеет с ним непосредственного контакта. В общем же случае решение поставленной задачи с таким допущением должно рассматриваться как приближенное.

Выражение для плотности тока в земле около подземного сооружения при протекании в ней элементарного тока утечки $i_y dy$ можно записать следующим образом [Л. 1]:

$$di_x = \frac{i_y dy}{2\pi\rho^2},$$

где ρ — расстояние от элемента dy рельсового пути до точки подземного сооружения с абсциссой x (рис. 3).

Потенциал в точке с абсциссой x поля элементарного тока $i_y dy$ будет равен:

$$d\varphi_{3x} = - \int_{\infty}^{\rho} \frac{di_x}{\gamma} = \frac{i_y dy}{2\pi\gamma\rho} = \frac{k_p I_{nx}}{4\pi\gamma} \frac{e^{-k_p y}}{\rho} dy,$$

где γ — проводимость грунта, или

$$d\varphi_{3x} = \frac{k_p I_{nx}}{4\pi\gamma} \frac{e^{-k_p y}}{\sqrt{(x-y)^2 + h^2}},$$

так как

$$\rho = \sqrt{(x-y)^2 + h^2}.$$

Полагая участки рельсового пути по обе стороны от нагрузки равными бесконечности, получим потенциал рассматриваемой точки поля всех протекающих в земле токов:

$$\varphi_{3x} = \frac{k_p I_{nx}}{4\pi\gamma} \left[-e^{-k_p x} \int_x^{\infty} \frac{e^{k_p z}}{\sqrt{z^2 + h^2}} dz + e^{k_p x} \int_x^{\infty} \frac{e^{-k_p z}}{\sqrt{z^2 + h^2}} dz \right], \quad (4)$$

где $z = x - y$ — для первого интеграла и $z = x + y$ — для второго интеграла.

Интегралы, стоящие в правой части выражения (4), не берутся в литературе не табулированы. Однако в рассматриваемом случае может быть найдено их приближенное значение с достаточной точностью (приложение). При этом получим:

$$\varphi_{3x} = \frac{k_p I_{nx}}{4\pi\gamma} \left[e^{-k_p x} Ei_1(k_p x) - e^{k_p x} Ei(-k_p x) - 2e^{-k_p x} \left(C + \ln \frac{k_p h}{2} \right) \right]. \quad (5)$$

Кривые $\varphi_{3x} = \varphi(k_p x)$ для различных значений $k_p h$ приведены на рис. 5.

Для подземного сооружения можно написать уравнение, аналогичное уравнению (1) для рельсового пути:

$$\frac{d^2 \varphi_{xx}}{dx^2} - k_{\kappa}^2 (\varphi_{xx} - \varphi_{3x}), \quad (6)$$

где φ_{xx} — потенциал подземного сооружения,

$$k_{\kappa}^2 = \frac{r_{\kappa}}{r_{nx}}, \quad (7)$$

r_{κ} — сопротивление 1 км подземного сооружения;

r_{nx} — переходное сопротивление между грунтом и подземным сооружением на 1 км его длины. В это сопротивление не должно включаться сопротивление растеканию.

Общим интегралом уравнения (6) будет:

$$\varphi_{xx} = Ae^{k_{\kappa} x} + Be^{-k_{\kappa} x} - \frac{k_{\kappa}}{2} \left[e^{k_{\kappa} x} \int_{\infty}^x \varphi_{3x}(t) e^{-k_{\kappa} t} dt - e^{-k_{\kappa} x} \int_{-\infty}^x \varphi_{3x}(t) e^{k_{\kappa} t} dt \right]. \quad (8)$$

После интегрирования по частям выражения в квадратных скобках получим:

$$\varphi_{xx} = Ae^{k_{\kappa} x} + Be^{-k_{\kappa} x} + \frac{k_{\kappa} k_p I_{nx}}{4\pi\gamma (k_p^2 - k_{\kappa}^2)} \left[k_p Z_1(k_{\kappa} x) - k_{\kappa} Z_1(k_p x) + 2k_{\kappa} e^{-k_p x} \left(C + \ln \frac{k_p h}{2} \right) \right]. \quad (9)$$

Ток в подземном сооружении может быть найден из выражения

$$I_{\kappa x} = -\frac{1}{r_{\kappa}} \frac{d\varphi_{\kappa}}{dx} = -\frac{k_{\kappa}}{r_{\kappa}} (Ae^{k_{\kappa}x} - Be^{-k_{\kappa}x}) + \frac{k_p^2 k_{\kappa}^2 I_{nx}}{4\pi\gamma r_{\kappa} (k_p^2 - k_{\kappa}^2)} \left[Z_2(k_{\kappa}x) - Z_2(k_p x) + 2e^{-k_p x} \left(C + \ln \frac{k_p h}{2} \right) \right]. \quad (10)$$

Разность потенциалов между подземным сооружением и грунтом определится из выражения

$$u_{\kappa x} = \varphi_{\kappa x} - \varphi_{zx} = Ae^{k_{\kappa}x} + Be^{-k_{\kappa}x} + \frac{k_p^2 I_{nx}}{4\pi\gamma (k_p^2 - k_{\kappa}^2)} \times \left[k_{\kappa} Z_1(k_{\kappa}x) - k_p Z_1(k_p x) + 2k_p e^{-k_p x} \left(C + \ln \frac{k_p h}{2} \right) \right], \quad (11)$$

где

$$Z_1(v) = e^{-v} Ei_1(v) - e^v Ei(-v);$$

$$Z_2(v) = e^{-v} Ei_1(v) + e^v Ei(-v).$$

Выражения (9), (10) и (11) являются общими уравнениями для потенциалов, тока и напряжения подземного сооружения. Постоянные A и B должны определяться по граничным условиям на концах всего сооружения или отдельных его секций, если сооружение имеет изолированные стыки или дренажные устройства. В последнем случае для каждой секции эти постоянные будут иметь особые значения.

Рассмотрим подземное сооружение большой протяженности без стыков и дренажных устройств. Определим постоянные для этого случая. При $x \rightarrow \infty$ $u_{\kappa x} = 0$. Тогда из выражения (11) находим, что $A = 0$. При $x = 0$ $I_{\kappa x} = 0$. Тогда после раскрытия неопределенности из выражения (9) получим:

$$B = -\frac{k_p^2 k_{\kappa}^2 I_{nx}}{2\pi\gamma (k_p^2 - k_{\kappa}^2)} \left(C + \ln \frac{k_p h}{2} \right).$$

Подставляя в выражения (9), (10) и (11) полученные значения постоянных и $C = 0,577$, найдем:

$$\varphi_{\kappa x} = \frac{k_p k_{\kappa} I_{nx}}{4\pi\gamma (k_p^2 - k_{\kappa}^2)} \left[k_p Z_1(k_{\kappa}x) - k_{\kappa} Z_1(k_p x) + 2k_{\kappa} e^{-k_p x} \left(0,577 + \ln \frac{k_p h}{2} \right) - 2k_p e^{-k_{\kappa} x} \left(0,577 + \ln \frac{k_{\kappa} h}{2} \right) \right]; \quad (12)$$

$$I_{\kappa x} = \frac{k_p^2 k_{\kappa}^2 I_{nx}}{4\pi\gamma r_{\kappa} (k_p^2 - k_{\kappa}^2)} \left[Z_2(k_{\kappa}x) - Z_2(k_p x) + 2e^{-k_p x} \left(0,577 + \ln \frac{k_p h}{2} \right) - 2e^{-k_{\kappa} x} \left(0,577 + \ln \frac{k_{\kappa} h}{2} \right) \right]; \quad (13)$$

$$u_{\kappa x} = -\frac{k_p^2 I_{nx}}{4\pi\gamma (k_p^2 - k_{\kappa}^2)} \left[k_{\kappa} Z_1(k_{\kappa}x) - k_p Z_1(k_p x) + 2k_p e^{-k_p x} \left(0,577 + \ln \frac{k_p h}{2} \right) - 2k_{\kappa} e^{-k_{\kappa} x} \left(0,577 + \ln \frac{k_{\kappa} h}{2} \right) \right]. \quad (14)$$

Особый интерес при расчете блуждающих токов представляет плотность тока утечки из подземного сооружения. Эта величина находится по формуле

$$i_x = \frac{u_{\kappa x}}{r_{\kappa} P} 10^{-4}, \quad (15)$$

где P — периметр поперечного сечения подземного сооружения, $дцм$.

Положительные значения i_x будут отвечать анодной зоне, а отрицательные — катодной. Величина r_{κ} зависит от рода защитного покрытия, но она не может быть меньше поперечной проводимости единицы длины подземного сооружения от его периферии к центру.

Для облегчения пользования формулами (12) и (15) на рис. 6 приведены кривые $Z_1(v)$ и $Z_2(v)$. При значениях $v \leq 0,6$ функции $Z_1(v)$ и $Z_2(v)$ с достаточной точностью могут быть определены по приводимым ниже формулам, которые получены в результате разложения этих функций в ряд:

$$Z_1(v) = -2v \left(\ln v - \frac{v^2}{4} - 0,423 \right); \quad (16)$$

$$Z_2(v) = (0,577 + \ln v)(2 + v^2) - \frac{3}{2}v^2. \quad (17)$$

Непосредственно у нагрузки в точке с абсциссой $x=0$ будем иметь:

$$\varphi_{\kappa 0} = -\frac{k_p k_{\kappa} I_{nx}}{2\pi\gamma (k_p + k_{\kappa})} \left(0,577 + \ln \frac{k_p h}{2} + \frac{k_p}{k_p - k_{\kappa}} \ln \frac{k_{\kappa}}{k_p} \right); \quad (12')$$

$$I_{\kappa 0} = 0; \quad (13')$$

$$u_{\kappa 0} = \frac{k_p^2 I_{nx}}{2\pi\gamma (k_p + k_{\kappa})} \left(0,577 + \ln \frac{k_p h}{2} - \frac{k_{\kappa}}{k_p - k_{\kappa}} \ln \frac{k_{\kappa}}{k_p} \right). \quad (14')$$

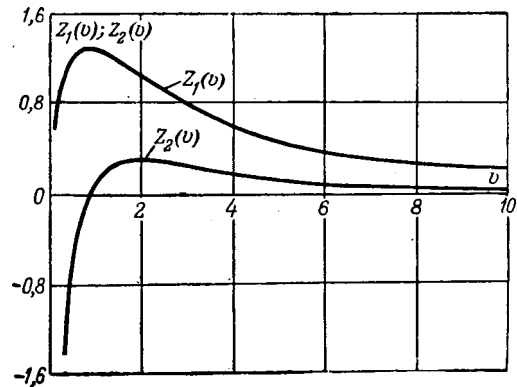


Рис. 6. Кривые функций $Z_1(v)$ и $Z_2(v)$.

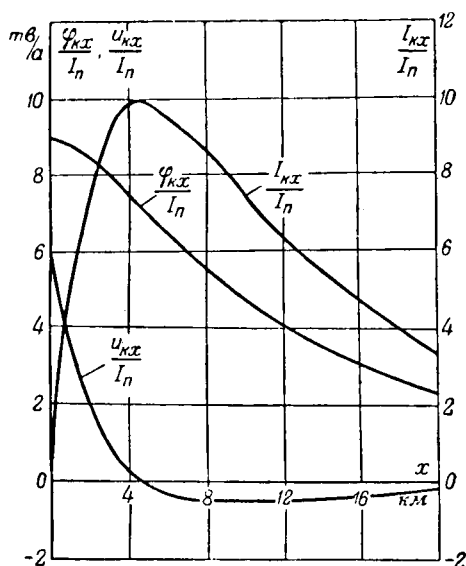


Рис. 7. Кривые изменения по длине сооружения потенциалов, напряжений между сооружением и землей и токов, отнесенных к 1 а нагрузки.

Характер изменения величин φ_{kx} , I_{nx} и u_{kx} приведен на рис. 7.

При расчете воздействия блуждающих токов на подземные сооружения наибольший интерес представляет среднее значение плотности тока утечки и, следовательно, средняя разность потенциалов между сооружением и грунтом u_k за определенный промежуток времени T .

Среднее значение u_{kx} при проходе одного поезда может быть найдено из выражения

$$u_{kN} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{kx} dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{L_1} u'_{kx} \frac{dx}{v_x} + \int_0^{L_2} u''_{kx} \frac{dx}{v_x} \right),$$

где u_{kx} — разность потенциалов между сооружением и грунтом для рассматриваемой точки подземного сооружения при расположении нагрузки справа от нее;

u''_{kx} — то же, слева от нее;

v_x — скорость движения поезда в точке с абсциссой x ;

L_1 и L_2 — расстояния от рассматриваемой точки до концов электрифицированного участка.

Запишем u_{kx} в виде:

$$u_{kx} = I_{nx} f(x),$$

где

$$f(x) = \frac{k_p^2}{4\pi\gamma(k_p^2 - k_k^2)} \left[k_k Z_1(k_k x) - k_p Z_1(k_p x) + \right. \\ \left. + 2e^{-k_p x} \left(0,577 + \ln \frac{k_p h}{2} \right) - \right. \\ \left. - 2k_k e^{-k_k x} \left(0,577 + \ln \frac{k_k h}{2} \right) \right]. \quad (18)$$

Нагрузку I_{nx} выразим следующим образом:

$$I_{nx} = \frac{A_{nx}}{U} v_x,$$

где U — напряжение контактной сети;

A_{nx} — расход энергии при продвижении поезда n на 1 км для точки x .

Тогда получим:

$$u_{kN} = \frac{1}{TU} \left(\int_0^{L_1} A_{nx} f(x) dx + \int_0^{L_2} A_{nx} f(x) dx \right).$$

Если за время T проходит N поездов, то среднее значение разности потенциалов за счет поездных токов будет равно:

$$u'_{kN} = \sum_{n=1}^N u_{kN} = \frac{1}{TU} \left(\int_0^{L_1} A_x f(x) dx + \int_0^{L_2} A_x f(x) dx \right),$$

где A_x — полный расход энергии на продвижение всех поездов на 1 км для точки x .

Мгновенное значение разности потенциалов между сооружением и грунтом за счет тока в отсасывающем проводе в соответствии с выражением (14) будет равно:

$$u_{kv} = I_v f(l_v),$$

где I_v — мгновенное значение нагрузки отсасывающего провода;

l_v — расстояние от рассматриваемой точки подземного сооружения до отсасывающего пункта.

Среднее значение разности потенциалов между сооружением и грунтом запишется в следующем виде:

$$u_{kv} = f(l_v) \frac{1}{T} \int_0^T I_v dt = \frac{A_v}{TU} f(l_v),$$

где A_v — энергия, передаваемая отсасывающим пунктом.

Результирующее значение средней за время T разности потенциалов между подземным сооружением и грунтом будет равно:

$$u_k = u_{kN} - \sum_{v=1}^M u_{kv}$$

или

$$u_k = \frac{1}{TU} \left[\int_0^{L_1} f(x) dA_x + \int_0^{L_2} f(x) dA_x - \sum_{v=1}^M A_v f(l_v) \right], \quad (19)$$

где $dA_x = A_x dx$ — энергия, снимаемая за время T с элемента пути dx ; $f(x)$ и $f(l_v)$ определяются из выражения (18).

Распределение расхода энергии вдоль линии и между отсасывающими пунктами может быть найдено обычными методами, применяющимися при расчетах электрических железных дорог. Поскольку зависимость расхода энергии от пути задается в виде диаграмм, первые

два члена выражения (19) определяются путем графического интегрирования.

Среднее значение тока утечки определяется при помощи выражения (15), в котором $u_{\kappa x}$ заменяется на u_{κ} .

При неизменном расходе энергии вместо выражения (19) получим:

$$u_{\kappa} = -\frac{1}{TU} \sum_{i=1}^M A f(l_i), \quad (20)$$

Из выражения (20) видно, что при этих условиях среднее значение потенциалов зависит только от нагрузок и расположения отсасывающих пунктов.

Приложение. Представим первый интеграл первой части выражения (4) в следующем виде:

$$N_1 = \int_x^{\infty} \frac{e^{k_p z} dz}{z^2 + h^2} = \int_x^{\lambda_1} \frac{e^{k_p z} dz}{\sqrt{z^2 + h^2}} + \int_{\lambda_1}^{-\lambda_2} \frac{e^{k_p z} dz}{\sqrt{z^2 + h^2}} + \int_{-\lambda_2}^{\infty} \frac{e^{k_p z} dz}{\sqrt{z^2 + h^2}}. \quad (1, 1)$$

Пусть при $x > \lambda$ $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, а при $x < \lambda$ $\lambda_1 = x$ и $\lambda_2 = \lambda$, при этом λ значительно больше h , но одного с ним порядка.

Воспользовавшись тем, что $\lambda \gg h$, можно в первом и третьем интегралах правой части выражения (1, 1) отбросить члены h^2 . Во втором интеграле:

$$e^{k_p z} \approx 1 + k_p z,$$

так как при z , лежащем в пределах от λ_1 до λ_2 , $k_p z$ много меньше единицы.

Следовательно, будем иметь:

$$N_1 = \int_x^{\lambda} \frac{e^{k_p z} dz}{z} + \int_{\lambda_1}^{-\lambda_2} \frac{1 + k_p z}{\sqrt{z^2 + h^2}} dz - \int_{-\infty}^{-\lambda_2} \frac{e^{k_p z} dz}{z} =$$

$$= Ei_1(k_p \lambda_1) - Ei_1(k_p x) - \ln \frac{\sqrt{\lambda_1^2 + h^2} + \lambda_1}{\sqrt{\lambda_2^2 + h^2} - \lambda_2} +$$

$$+ Ei(-k_p \lambda_2) + k_p \left(\sqrt{\lambda_2^2 + h^2} - \sqrt{\lambda_1^2 + h^2} \right), \quad (1, 2)$$

где Ei и Ei_1 — интегральные показательные функции.

Второй интеграл выражения (4) представим в следующем виде:

$$N_2 = \int_x^{\infty} \frac{e^{-k_p z} dz}{\sqrt{z^2 + h^2}} = \int_x^{\lambda_3} \frac{e^{-k_p z} dz}{\sqrt{z^2 + h^2}} + \int_{\lambda_3}^{\infty} \frac{e^{-k_p z} dz}{\sqrt{z^2 + h^2}}, \quad (1, 3)$$

где $\lambda_3 = x$ при $x > \lambda$, $\lambda_3 = \lambda$ при $x < \lambda$, а λ имеет то же значение, что и выше.

При принятых приближениях получим:

$$N_2 = \int_x^{\lambda_3} \frac{1 - k_p z}{\sqrt{z^2 + h^2}} dz + \int_{\lambda_3}^{\infty} \frac{e^{-k_p z} dz}{z} = \ln \frac{\sqrt{\lambda_3^2 + h^2} + \lambda_3}{\sqrt{x^2 + h^2} + x} -$$

$$- k_p \left(\sqrt{\lambda_3^2 + h^2} - \sqrt{x^2 + h^2} \right) - Ei(-k_p \lambda_3). \quad (1, 4)$$

Следовательно, выражение (4) можно записать в виде:

$$\varphi_{\Sigma x} = \frac{k_p I_{nx}}{4\pi\gamma} \left\{ e^{-k_p x} Ei_1(k_p x) - e^{-k_p x} [Ei_1(k_p \lambda) + Ei(-k_p \lambda)] + \right.$$

$$+ e^{-k_p x} \ln \frac{\sqrt{\lambda_1^2 + h^2} + \lambda_1}{\sqrt{\lambda_2^2 + h^2} - \lambda_2} + e^{k_p x} \ln \frac{\sqrt{\lambda_3^2 + h^2} + \lambda_3}{\sqrt{x^2 + h^2} + x} -$$

$$- k_p e^{k_p x} \left(\sqrt{\lambda_3^2 + h^2} - \sqrt{x^2 + h^2} \right) - e^{k_p x} Ei(-k_p \lambda_3) -$$

$$\left. - k_p e^{-k_p x} \left(\sqrt{\lambda_2^2 + h^2} - \sqrt{\lambda_1^2 + h^2} \right) \right\}. \quad (1, 5)$$

При $x > \lambda$ $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, а $\lambda_3 = x$. Тогда

$$\varphi_{\Sigma x} = \frac{k_p I_{nx}}{4\pi\gamma} \left\{ e^{-k_p x} Ei_1(k_p x) - e^{-k_p x} [Ei_1(k_p \lambda) + Ei(-k_p \lambda)] + \right.$$

$$\left. + e^{-k_p x} \ln \frac{\sqrt{\lambda^2 + h^2} + \lambda}{\sqrt{x^2 + h^2} - \lambda} - e^{k_p x} Ei(-k_p x) \right\}. \quad (1, 6)$$

Но если учесть, что $Ei_1(k_p \lambda) + Ei(-k_p \lambda) \approx 2C + 2 \ln k_p \lambda$, где C — постоянная Эйлера; $C \approx 0,577$, и что при $\lambda \gg h$ достаточной точностью можно считать:

$$\ln \frac{\sqrt{\lambda^2 + h^2} + \lambda}{\sqrt{\lambda^2 + h^2} - \lambda} \approx 2 \ln k_p \lambda - 2 \ln \frac{k_p h}{2},$$

то получим выражение (5).

Приняв во внимание, что при $x < \lambda$ $\lambda_1 = x$ и $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$, после соответствующих преобразований выражения (1, 5) получим:

$$\varphi_{\Sigma x} = \frac{k_p I_{nx}}{4\pi\gamma} (D_1 + D_2),$$

где

$$D_1 = (e^{-k_p x} - e^{k_p x}) \ln k_p (\sqrt{x^2 + h^2} + x) -$$

$$- k_p \lambda (e^{-k_p x} + e^{k_p x}) \left(\sqrt{1 + \frac{h^2}{\lambda^2}} - \sqrt{\frac{x^2 + h^2}{\lambda^2}} \right),$$

$$D_2 = e^{k_p x} \ln k_p (\sqrt{\lambda^2 + h^2} + \lambda) -$$

$$- e^{-k_p x} \ln (\sqrt{\lambda^2 + h^2} - \lambda) - (e^{-k_p x} + e^{k_p x}) Ei(-k_p \lambda).$$

При $x < \lambda$ с достаточной точностью можно принять, что

$$e^{-k_p x} \approx 1 - k_p x, \text{ а } e^{k_p x} \approx 1 + k_p x.$$

Тогда

$$D_1 = -2k_p x \ln k_p (\sqrt{x^2 + h^2} + x) -$$

$$- 2k_p \lambda \left(\sqrt{1 + \frac{h^2}{\lambda^2}} - \sqrt{\frac{x^2 + h^2}{\lambda^2}} \right).$$

Эта величина относительно ничтожна и ею можно пренебречь.

Учтя, что $h \ll \lambda$, и приняв во внимание, что

$$\ln k_p (\sqrt{\lambda^2 + h^2} + \lambda) \approx \ln 2k_p \lambda; \ln k_p (\sqrt{\lambda^2 + h^2} - \lambda) \approx$$

$$\approx \ln \frac{k_p h^2}{2\lambda}, \text{ а } Ei(-k_p \lambda) \approx C + \ln k_p \lambda,$$

получим:

$$D_2 = (e^{k_p x} + e^{-k_p x}) (\ln 2k_p \lambda - C - \ln k_p \lambda) -$$

$$- 2e^{-k_p x} \ln k_p h.$$

Так как $e^{k_p x} + e^{-k_p x} \approx 2$ и $e^{-k_p x} \approx 1$, то

$$D_2 \approx 2 \ln 2 - 2C - 2 \ln k_p h =$$

$$= -2 \left(C + \ln \frac{k_p h}{2} \right).$$

Внедрение синхронного электропривода в морском разведочном бурении

Инж. Е. Б. ДАЕНЗОН

Баку

Развитие техники бурения и особенно широкое внедрение турбинного способа бурения привели к значительному росту установленной электрической мощности буровой установки.

Для турбинного способа бурения используются грязевые насосы У-8-3 с двигателем ФАМСО мощностью 320...380 кВт, 6 кв, 735 об/мин. В каждой буровой устанавливаются два-три таких насоса. Привод подъемной лебедки осуществляется от двух двигателей МАД мощностью 160 кВт каждый, 0,525 кв, 735 об/мин. Таким образом, установленная мощность буровой достигает 1 200...1 500 кВт.

Из-за тяжелого технологического режима работы буровой (резко выраженная переменная нагрузка) двигатели значительную часть времени работают с недогрузкой, и $\cos \varphi$ буровой в целом обычно не превышает 0,6...0,65. Отдаленность морских буровых от питающих подстанций и низкое значение $\cos \varphi$ обуславливают значительное снижение напряжения на шинах распределительного устройства буровой.

Для улучшения энергетических показателей электрохозяйства и повышения напряжения в сетях представлялось целесообразным установить синхронные двигатели для привода грязевых насосов. Нефтяная промышленность располагала синхронными двигателями СМ-540 мощностью 401 кВт, 6 кв, 750 об/мин в незащищенном исполнении с принудительным охлаждением.

Для привода же грязевых насосов по существующим нормам требовались двигатели защищенного исполнения. Указанное особенно важно

для двигателей, работающих в море, в условиях повышенной влажности и большого выделения из влаги солей. Несмотря на это, было решено впервые установить синхронные двигатели на морских разведочных буровых.

Разведочное бурение осуществляется со специально сооружаемых металлических оснований, устанавливаемых в открытом море. Основание, на котором смонтировано технологическое и энергетическое оборудование, в процессе бурения подвергается вибрационным колебаниям. Для усиления фундаментов под синхронные двигатели в насосной был установлен усиленный блок металлической конструкции. Для защиты двигателей от прямого попадания брызг воды и глинистого раствора — в случае пробивки сальников насоса — была сооружена специальная насосная со сплошной перегородкой между технологическим и энергетическим оборудованием. В перегородке были сделаны только два окна для прохода тексропных ремней от двигателей к насосу.

Вентиляционные установки, необходимые для охлаждения двигателей, заводом «Электросила» комплектно не были поставлены. Поэтому для улучшения условий охлаждения двигателей были сняты боковые кожухи и верхние листы, прикрывающие статорные окна. Получилась открытая незащищенная машина.

Синхронные двигатели СМ-540 выпускаются заводом «Электросила» комплектно с магнитными станциями управления. Это усложняет монтаж и эксплуатацию двигателей, требует квалифицированного обслуживающего персонала. На-

Следовательно, при $x < \lambda$

$$\varphi_{3x} \approx -\frac{k_p I_{nx}}{4\pi\gamma} 2 \left(C + \ln \frac{k_p h}{2} \right). \quad (1, 7)$$

Но при $x < \lambda$ выражение (1, 7) может быть получено и из выражения (5). Следовательно, выражение (5) является общим для φ_{3x} при любых значениях x .

Литература

1. Оллендорф. Токи в земле. 1932.
2. Б. Г. Лорткипанидзе. Сообщение Академии наук Грузинской ССР, т. IX, № 4, 1948.
3. К. Г. Марквардт. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог. Трансжелдориздат, 1948.
4. Gibrat. Обобщение методов вычисления утечки тока из канализации в землю. Доклад на Всесоюзном тех-

ническом съезде Французского союза железнодорожного и автомобильного транспорта. Страсбург, 1933.

5. Collet. Аналитическое исследование некоторых проблем блуждающих токов. Технический отчет французского исследовательского центра по дальней связи, 1945.

6. М. И. Михайлов и П. А. Азбукин. Воздушные и кабельные линии связи и их защита, ч. III. Связьиздат, 1940.

7. Блуждающие токи электрических железных дорог. Труды научно-исследовательского института электрификации железных дорог НКПС, вып. VIII. Трансжелдориздат, 1934.

8. И. М. Ершов. Защита подземных сооружений от коррозии, вызываемой блуждающими токами. Трансжелдориздат, 1948.

[10. 12. 1954]



личие в станции таких аппаратов, как реле и контакторы, при работе в условиях морских буровых, сооружаемых на свайных основаниях, могло привести к различным аварийным отключениям из-за возникающих неисправностей. Для бурения требуются наиболее простые аппараты, без слабых узлов, что важно для бесперебойной работы двигателей насосов, в особенности при турбинном способе бурения, где насос является основным движущим агрегатом. Поэтому особое значение имело применение синхронных двигателей с глухо подключенными возбудителями без магнитных станций управления. Этот вопрос был поставлен перед заводом «Электросила», который положительно его не разрешил. Пришлось его решить на месте.

На одной морской буровой был произведен опыт пуска двух двигателей СМ-540 с глухо подключенными возбудителями. Двигатели были пущены вхолостую и свободно вошли в синхронизм. Пуск насосов в основном производится вхолостую, но рассчитывать на это нельзя, так как не исключены случаи более тяжелых режимов пуска. Было проведено испытание на пуск синхронных двигателей с глухо подключенными возбудителями под нагрузкой. При этом оба насоса вели закачку глинистого раствора непосредственно в буровую скважину. При достижении рабочего давления 100 ат один насос был отключен, а второй оставался в работе. Давление на общей линии стало снижаться. После снижения давления до 60 ат на это противодавление был включен второй насос. Двигатель свободно вошел в синхронизм. Опыты проводились неоднократно для различных режимов работы насосов, причем пуск осуществлялся вполне удовлетворительно. После установки защиты от длительного асинхронного пуска при помощи реле ИТ-80 машины были переведены на нормальную работу с глухо подключенными возбудителями.

Так как из-за характера технологических работ на буровой насосы часто простаивают, то для

использования синхронных двигателей при остановках насосов в качестве синхронных компенсаторов применяются приспособления, отключающие двигатели от насосов. Это дает возможность поддерживать напряжение сети на нормальном уровне при спуско-подъемных операциях.

На одном участке бурения внедрение синхронного привода наряду с асинхронным позволило при нормальном возбуждении синхронных двигателей поднять величину $\cos \varphi$ с 0,65 почти до 1. Удалось также обеспечить снабжение электроэнергией при напряжении 6 кв буровую, удаленную на 12...14 км от источника питания. Указанное мероприятие имеет важное значение для морских буровых ввиду высокой стоимости и большой трудоемкости сооружения линий электропередачи и подстанции 35 кв в море, особенно для одиночных сверхглубоких разведочных скважин.

На морском участке треста разведочного бурения в Баку внедрено 13 синхронных двигателей общей мощностью 5213 квт, заменивших привод насосов от асинхронных двигателей. За почти двухлетний период эксплуатации двигателей, несмотря на их совершенно незащищенное исполнение и отсутствие принудительной вентиляции, не наблюдалось ни одного случая выхода их из строя.

Выводы. Синхронные двигатели СМ-540 с глухо подключенными возбудителями на морских буровых работают вполне удовлетворительно и могут быть рекомендованы для привода грязевых насосов повсеместно.

Сделанный вывод не снимает требования, предъявляемого к электропромышленности: для бурения необходимо наладить выпуск синхронных двигателей в защищенном исполнении с естественной вентиляцией для пуска с глухо подключенными возбудителями с учетом условий эксплуатации их на морских буровых.

[21.12.1954]

Всесоюзное совещание работников промышленности призывает руководителей министерств, главков, трестов, комбинатов, предприятий по-настоящему возглавить дело внедрения в промышленность новой техники, организовать изучение и широкое распространение передового опыта.

Мы обращаемся к рабочим, инженерам, техникам и служащим промышленных предприятий с призывом — объявить беспощадную борьбу рутине и косности, быстрее осваивать в производстве все то новое, передовое, что создается в наших научно-исследовательских институтах, конструкторских бюро и на предприятиях; добиваться такого положения, чтобы внедрение новой техники обязательно сопровождалось совершенствованием организации труда и производства, улучшением методов управления предприятиями. Только при этом условии новая техника будет использована полностью.

(Из Обращения участников Всесоюзного совещания работников промышленности 18 мая 1955 г.).

О новом Государственном стандарте на синхронные компенсаторы

Кандидат техн. наук Г. С. ПЛИС

До настоящего времени синхронные компенсаторы с воздушным охлаждением выпускались по Государственному стандарту 609-41. В октябре 1954 г. Комитет стандартов, мер и измерительных приборов утвердил новый государственный стандарт на синхронные компенсаторы (ГОСТ 609-54), который начнет действовать с 1 июля 1955 г.

В отличие от ГОСТ 609-41 в новом стандарте уточнен и сокращен ряд номинальных мощностей компенсаторов при опережающем токе, снижены потери мощности при номинальном режиме, повышены требования в отношении удобства эксплуатации и надежности работы компенсаторов.

В соответствии с требованиями нового стандарта компенсаторы должны работать в автоматизированных агрегатах на подстанциях без постоянного дежурного персонала. В настоящее время разработан ряд типовых схем автоматического управления, защиты и контроля работы синхронных компенсаторов, а также ряд типовых комплектных устройств (например, устройство КУ28АС). В стандарте указывается, что схемы автоматизированных агрегатов должны быть согласованы между заводом-поставщиком и заказчиком компенсатора.

Предусмотренные стандартом основные данные компенсаторов при температуре охлаждающего воздуха $+40^{\circ}\text{C}$ (вместо 35°C по прежнему стандарту) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номинальная мощность при опережающем токе, кВа	Мощность при отстающем токе, кВа	Номинальное напряжение, В	Номинальная скорость вращения, об/мин
5 000	2 500	6 300 и 10 500	1 000
7 500	3 750	6 600 и 11 000	1 000
10 000	5 000	6 600 и 11 000	750
15 000	7 500	6 600 и 11 000	750
30 000	16 000	11 000	750

В отличие от ГОСТ 609-41 в новом стандарте (ГОСТ 609-54) произведены значительное сокращение и унификация мощностей синхронных компенсаторов.

Если в прежнем стандарте в диапазоне от 5 000 до 30 000 кВа было десять ступеней, то в новом, в этом же диапазоне, их оставлено всего пять. Вместо двух близких ступеней (6 500 и 7 500 кВа, 9 000 и 10 000 кВа, 13 500 и 15 000 кВа) оставлена одна ступень (соответственно 7 500, 10 000 и 15 000 кВа). Мощности компенсаторов

согласованы со стандартом на силовые трансформаторы (ГОСТ 401-41).

В стандарте впервые предусмотрена мощность компенсатора при отстающем токе (табл. 1), составляющая 0,5 ... 0,54 номинальной мощности (при опережающем токе). Максимальная мощность компенсатора при отстающем токе определена, исходя из условия снижения тока возбуждения до значения, близкого к нулю, и является гарантированной величиной реактивной мощности при регулировании напряжения в сетях.

В новом стандарте впервые установлены нормы на скорости вращения компенсаторов, отсутствовавшие в замененном стандарте. Эти нормы установлены для вновь сконструированных компенсаторов с повышенной скоростью вращения, на изготовление которых будет расходоваться значительно меньшее количество активных и конструктивных материалов. Как видно из табл. 2,

Таблица 2

Номинальная мощность комп. лентаторов, кВа	Скорость вращения, об/мин	Снижение веса, кг			Снижение веса всей машины	
		меди	активной стали	конструктивных материалов	кг	%
7 500	1 000 вместо 750	1 420	1 400	6 345	9 165	26
30 000	750 вместо 600	3 730	1 730	21 000	26 460	21

вновь сконструированные компенсаторы мощностью 7 500 и 30 000 кВа оказались значительно легче по весу. Нормы скоростей, установленные стандартом, должны обеспечить современный технико-экономический уровень производства синхронных компенсаторов.

Как видно из табл. 3, в новом стандарте предусмотрено снижение потерь в синхронном компенсаторе при номинальном режиме его работы в сравнении с потерями, которые допускались в прежнем стандарте.

Таблица 3

Номиналь- ная мощ- ность, <i>квa</i>	Потери при номинальном режиме работы				Снижение погерь, %
	по ГОСТ 609-41		по ГОСТ 609-54		
	<i>квa</i>	% номи- нальной мощности	<i>квa</i>	% номи- нальной мощности	
5 000	160	3,20	160	3,20	—
7 500	200	2,65	185	2,45	7,5
10 000	235	2,35	225	2,25	4,5
15 000	340	2,25	300	2,00	11,8
30 000	600	2,00	580	1,93	3,3

Снижение потерь позволит получить значительную экономию электроэнергии. Если принять, что компенсатор ежегодно в среднем работает 7 000 час, то годовая экономия электроэнергии на один компенсатор мощностью 15 000 *кВА*, являющийся наиболее распространенным, составит 280 тыс. *кВтч* или в денежном выражении 42 тыс. руб. Из табл. 3 следует также, что потери, если их выразить в процентах номинальной мощности компенсатора, растут довольно быстро с уменьшением последней. Поэтому синхронные компенсаторы малых мощностей экономически не выгодны, в связи с чем в стандарте не предусмотрены компенсаторы номинальной мощностью ниже 5 000 *кВА*.

Для дальнейшего снижения потерь в компенсаторе применяется водородное охлаждение, при котором потери на 30...40% меньше, чем при воздушном охлаждении. Однако первоначальные затраты на устройство водородного охлаждения довольно велики, его применение экономически выгодно лишь для компенсаторов большой мощности.

В ГОСТ 609-54 предусматриваются компенсаторы только с воздушным охлаждением. Имевшиеся в прежнем стандарте компенсаторы номинальной мощностью 50 000 *кВА* новым стандартом не предусматриваются, так как их целесообразно изготавливать с водородным охлаждением.

Компенсаторы с водородным охлаждением нашей промышленностью уже выпускаются. В будущем целесообразно дополнить стандарт такими компенсаторами и требованиями к ним.

Следует отметить, что допустимые потери энергии в компенсаторах, предусмотренных новым стандартом, значительно меньше потерь в синхронных компенсаторах американских фирм. Например, по рекламным данным одной ведущей американской фирмы потери в наиболее распространенных компенсаторах мощностью 15 000 *кВА* составляют 320 *кВт*.

Как видно из табл. 4, в новом стандарте увеличены допустимые перегрузки синхронных компенсаторов при температуре охлаждающего воздуха, меньшей номинальной, и уменьшены снижения нагрузки при температуре, большей номинальной.

Таблица 4

Температура охлаждающего воздуха, °C	Мощность, % номинальной	
	по ГОСТ 609-41	по ГОСТ 609-54
+20 и ниже	107,5	108,6
+25	105,0	107,5
+30	—	106,0
+35	100	104,0
+40	92,5	100
+45	85	95
+50	—	88

Новым стандартом установлено, что компенсаторы номинальной мощностью до 15 000 *кВА* включительно должны изготавливаться как с замкнутым циклом вентиляции (с воздухоохладителями), так и с разомкнутым (без воздухоохладителей), компенсаторы же мощностью 30 000 *кВА* — только с замкнутым циклом (с воздухоохладителями), что исключает попадание пыли и грязи в машину большой мощности.

Согласно новому стандарту возбуждение компенсаторов мощностью от 5 до 10 тыс. *кВА* включительно должно осуществляться от одного возбуждателя. Возбуждение компенсаторов мощностью 15 000 и 30 000 *кВА* допускается осуществлять от возбуждателя и подвозбудителя. Возбудители должны быть соединены непосредственно с валом компенсатора. В предусматриваемых стандартом режимах работы компенсатора возбуждатель должен полностью обеспечивать возбуждение компенсатора. Регулирование тока возбуждения компенсатора должно производиться реостатом в цепи возбуждения возбуждателя.

Если в старом стандарте отношение верхнего предела «потолка» напряжения возбуждателя к напряжению на контактных кольцах компенсатора при номинальном режиме не должно быть менее 1,4, то в новом стандарте оно не должно быть менее 2. В новый стандарт введено требование о том, чтобы скорость нарастания напряжения возбуждателя на контактных кольцах компенсатора или на зажимах обмотки возбуждения возбуждателя была не менее двукратного номинального напряжения компенсатора в 1 сек. При форсировании напряжения возбуждения должен быть обеспечен двойной номинальный ток возбуждения компенсатора.

Приведенные требования к возбуждению синхронных компенсаторов весьма важны в отношении повышения устойчивости системы путем кратковременного быстродействующего перевозбуждения синхронного компенсатора при помощи автоматических регуляторов возбуждения. Отсутствие возможности указанного перевозбуждения потребовало бы в ряде случаев значительного увеличения мощности компенсаторов.

Новым стандартом предусмотрен прямой пуск компенсаторов при полном напряжении сети. Предусматривавшийся старым стандартом автотрансформаторный пуск в новый стандарт не включен, как устаревший. Прямой пуск при полном напряжении сети требует меньшего количества оборудования. Например, при автотрансформаторном пуске требуется три выключателя, а при прямом — только один.

В стандарте установлено, что по требованию заказчика компенсаторы должны изготавливаться с пусковым электродвигателем. Пусковой электродвигатель должен применяться только в тех случаях, когда по условиям потери напряжения реакторный пуск не может быть применен. Независимо от способа пуска синхронные компенсаторы в соответствии с требованиями стандарта должны изготавливаться с пусковой обмоткой, обеспечивающей возможность асинхронного пуска.

Допускаемые превышения температуры обмоток статора и ротора компенсатора и обмоток возбуждателя в новом стандарте снижены по сравнению с ранее принятыми. Это повысит надежность работы и срок службы компенсаторов.

Допускаемые превышения температуры обмоток статора и ротора компенсатора и обмоток возбуждателя в новом стандарте снижены по сравнению с ранее принятыми. Это повысит надежность работы и срок службы компенсаторов.

и их возбудителей. Для изоляции обмоток статора и ротора компенсатора должны применяться изолирующие материалы класса В.

В соответствии с новым стандартом номинальная нагрузка компенсаторов и их возбудителей должна обеспечиваться при температуре поступающей в охладители воды не $+28^{\circ}\text{C}$, как это предусматривалось прежним стандартом, а $+30^{\circ}\text{C}$. По требованию заказчика эта температура может быть повышена до $+33^{\circ}\text{C}$. Установленная температура соответствует температуре воды, наблюдаемой в течение преобладающей части года в большинстве районов страны. В новом стандарте температура поступающей воды приведена к температуре охлаждающей воды, установленной для турбогенераторов (ГОСТ 533-51).

В новом стандарте предусмотрено, что при номинальной скорости вращения и всех допустимых режимах амплитуда вибрации (удвоенная амплитуда колебания) подшипников компенсатора и возбудителя на месте их установки не должна превышать 0,1 мм. Измерение вибрации подшипников должно производиться в вертикальном, горизонтально-осевом и горизонтально-поперечном направлениях. Измерение в последних двух направлениях должно производиться на уровне оси вала. Требование к вибрации имеет важнейшее значение для обеспечения надежной работы компенсатора и длительного срока его службы.

Новым стандартом установлено, что подшипник компенсатора, находящийся со стороны, про-

тивоположной возбудителю, а в случае необходимости также подшипники возбудителя и пускового электродвигателя должны быть электрически изолированы от фундаментных плит и маслопровода. Сопротивление изоляции подшипника с трубопроводом (без воды) относительно земли должно быть не менее 1 мгом.

Новым стандартом определено, что нормальным направлением вращения компенсаторов считается вращение по часовой стрелке, если на компенсатор смотреть не со стороны выводов, а с противоположной.

Стандартом предъявляется ряд конструктивных требований. Например, должна быть обеспечена возможность вынимать ротор без подъема статора; воздухоохладители компенсатора должны быть рассчитаны на давление воды, не меньшее 2 кг/см^2 , и др. В стандарте установлены правила приемки, программа испытаний, требования к маркировке и упаковке.

Стандартом установлена гарантийная ответственность завода-изготовителя за качество изготовленного им компенсатора.

В отдельных приложениях к стандарту дан перечень основных частей машин, аппаратов, приборов, приспособлений, поставляемых комплектно с компенсатором, а также перечень запасных частей и документов (чертежей, инструкции, протоколы испытаний и измерений), поставляемых заводом-изготовителем заказчику одновременно с компенсатором.

[13.11. 1954]

Нормы, требующие доработки

Инж. П. С. ЖЕЛЕЗНЯКОВ

Днепропетровск

Проектирование складских предприятий и хозяйств для хранения легковоспламеняющихся жидкостей до октября 1953 г. выполнялось согласно ОСТ 90039-39. Стандарт содержал раздел «Заземления» (§ 85—89, 118), который предписывал применение специальных мероприятий для отвода зарядов статического электричества на предприятиях по хранению легковоспламеняющихся жидкостей.

Целесообразность и необходимость применения таких мероприятий по условиям безопасности ни у одного проектанта, монтажника или эксплуатационного работника не вызвали сомнения.

В октябре 1953 г. ОСТ 90039-39 был аннулирован и заменен «Нормами и техническими условиями проектирования складских предприятий и хозяйств для хранения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (Н-108-53)», представленными Министерством нефтяной промышленности и утвержденными Государственным комитетом по строительству для обязательного применения. В этих нормах и технических условиях отсутствуют какие-либо указания на необходимость выполнения мероприятий по отводу зарядов ста-

тического электричества, что дает формальное право не предусматривать этих мероприятий. Однако исключение специальных мер по отводу зарядов статического электричества может иметь тяжелые последствия в виде взрывов или пожаров и вызывает, следовательно, естественное недоумение.

Запрошенный по поводу этих обстоятельств Государственный комитет по строительству подтвердил необходимость выполнения мероприятий по отводу зарядов статического электричества, но, однако, дал следующую формулировку своему указанию: «при проектировании устройств для хранения и транспортирования легковоспламеняющихся и горючих жидкостей мероприятия по отводу статического электричества устанавливаются в каждом отдельном случае с учетом конкретных особенностей устройств», которая позволяет произвольно трактовать объем и способы подлежащих выполнению мероприятий. Кроме того, этот ответ, явившийся результатом частного запроса, не может служить нормативным указанием для всех проектных организаций Советского Союза.

Запрошенное нами по этому же вопросу Главное управление «Энергонефть» Министерства нефтяной промышленности считает, что отсутствие в новых нормах и технических условиях на проектирование Н-108-53 раздела по заземлению, нормирующего мероприятия по отводу зарядов статического электричества, является недостатком этих документов. Главэнергонефть считает необходимым предусматривать защитные мероприятия и предлагает пользоваться для их выполнения указаниями, приведенными в аннулированном ОСТ 90039-39. Это мнение Главэнергонефти,

являясь правильным по существу, также не может служить общеобязательным нормативным указанием и не исключает возможности ошибок при проектировании сооружений такого типа.

Исходя из изложенного, мы считаем необходимым, чтобы Государственный комитет по строительству переиздал нормы на проектирование Н-108-53, дополнив их разделом «Заземление», заимствовав его из аннулированного стандарта 90039-39.

12.2.1954]

Изменения в правилах безопасности

3. П. РОДИОНОВА

Ввиду того, что в большинстве современных фильтров присоединения разрядник смонтирован внутри кожуха фильтра, Техническое управление МЭС СССР и ЦК профсоюза рабочих электростанций внесли следующие изменения в «Правила безопасности при эксплуатации высокочастотных установок связи, телемеханики и защиты по линиям электропередачи» (Решение № 9/Э от 5 марта 1955 г.).

К п. 21 добавляется: «При применении фильтров присоединения, имеющих внутренний разрядник, с данными, удовлетворяющими п. 14 настоящих Правил, наружный разрядник не устанавливается».

В п. 15 3-й абзац излагается в новой редакции: «Ошиновка должна быть выполнена таким образом, чтобы при отключении фильтра присоединения не нарушалось соединение конденсатора с внешне установленным разрядником и заземляющим ножом, а в случае применения разрядника внутри кожуха фильтра не нарушалось соединение конденсатора с заземляющим ножом».

В п. 33 после слов «с помощью заземляющего ножа» добавляется: «Измерения следует производить только внутри фильтра присоединения, не отключая разрядника».

Работники промышленности обязаны постоянно и внимательно изучать и широко использовать достижения науки и техники в нашей стране и за рубежом, всеми силами ускорять технический прогресс, непрестанно обогащать Родину новыми открытиями.

Мы призываем деятелей науки и техники, научных работников вузов, работников научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, инженеров и техников промышленных предприятий, изобретателей и рационализаторов усилить работу над созданием новых машин, усовершенствованием и модернизацией действующего оборудования, изысканием новых материалов и методов их производства, активно внедрять в производство научные открытия и технические достижения, помня, что новое не внедряется быстро в жизнь без борьбы со старым. Особенно важно быстрее решать задачи комплексной механизации и автоматизации производственных процессов.

(Из Обращения участников Всесоюзного совещания работников промышленности 18 мая 1955 г.)

Академик К. И. Шенфер

К 70-летию со дня рождения

В июне 1955 г. исполняется 70 лет со дня рождения Клавдия Ипполитовича Шенфера (7.6.1885 — 18.5.1946) — выдающегося советского ученого электротехника, академика.

К. И. Шенфер начал свою инженерную и научную деятельность в первые годы XX столетия, которые характеризовались быстрым развитием электротехники.

По окончании в 1903 г. Екатеринодарской гимназии, К. И. Шенфер работал машинистом на железной дороге и разметчиком при постройке железнодорожного моста близ города Ставрополя, а спустя год поступил в Варшавский политехнический институт.

Усиление реакции в конце 1905 г. принудило К. И. Шенфера покинуть Варшаву. Он переехал в Москву, где в 1906 г. поступил на механическое отделение Технического училища, в котором в 1905 г. была организована специализация по электротехнике.

В 1910 г. К. И. Шенфер окончил училище со званием инженера-механика. Областью своей инженерной работы он избрал электромашиностроение.

С момента создания М. О. Доливо-Добровольским первых промышленных установок трехфазного тока, прошло сравнительно мало времени. Однако за это время многие области электротехники развились очень сильно. Трехфазный ток получил господствующее применение во всех областях электрификации промышленности. Начали развиваться дальние передачи электрической энергии при напряжении 110 кв. Началось широкое строительство тепловых и гидравлических электрических станций. Правда, в условиях царской России масштабы электрификации были невелики.

Слабо была развита отечественная электротехническая промышленность. Ощущался острый недостаток в инженерных кадрах, владеющих техникой переменного тока.

Интерес К. И. Шенфера к электрическим машинам во многом определялся ведущим значе-



нием электромашиностроения в развитии электрификации промышленности и транспорта. Пытливая техническая фантазия молодого инженера видела в этой отрасли электротехники широкие возможности для своих творческих исканий.

С сентября 1910 г. К. И. Шенфер начал работать в качестве лаборанта электротехнической лаборатории И. Т. У. Большие экспериментальные способности молодого инженера обратили на себя внимание его старших товарищей — организаторов электротехнического образования в Москве — К. А. Круга и Б. И. Угрюмова. По их рекомендации молодой лаборант получил годовую научную командировку в Германию; там в Карлсруэ он работал в лаборатории профессора Э. Арнольда.

В 1911 и в 1912 гг. К. И. Шенфер закончил первые свои научные работы, касающиеся коммутации коллекторных машин переменного тока. Эти работы были опубликованы в журнале «Электричество» (№ 10, 1912 г.). Не случайно темой исследований был взят один из наиболее сложных вопросов теории электрических машин.

Эти годы характерны были повышенным интересом к коллекторной машине переменного тока. Многие считали, что этот тип машины, в сочетании с бесколлекторной асинхронной машиной, откроет широкие возможности для дальнейшего развития электрификации промышленности и транспорта на переменном токе.

Творческим итогом работ К. И. Шенфера в области коллекторных машин переменного тока был выход в 1916 г. первой его монографии «Коллекторные двигатели переменного тока». Сравнительно бедная в то время отечественная научная литература по электротехнике пополнилась фундаментальной работой, которая в последующие годы выдержала четыре издания и являлась ценным учебным пособием для молодых советских инженеров, изучающих электрические машины.

В первых же научных работах К. И. Шенфера

ярко проявились его любовь и исключительные способности к экспериментальным исследованиям, к стремлению критически и глубоко изучить материал и найти новые, более совершенные пути для достижения поставленных им целей.

За годы своей творческой жизни К. И. Шенфер, в результате глубоких исследований, сделал ряд интересных и важных для развития электромашиностроения изобретений. Однако он никогда не был изобретателем в узком понимании этого слова. Касаясь этой стороны своей работы, он не раз указывал на то, что существуют превратные представления об изобретателях, как о какой-то особой категории людей, наделенных этой способностью от природы. Он советовал студентам и своим молодым ученикам при чтении новых научных статей развивать в себе привычку критического подхода к вопросу в смысле нахождения других возможных вариантов решения задач. Он говорил, что когда изучается какой-либо новый вопрос, новое предложение или новая схема машины или аппарата, должно возникать желание дать вариант другого решения вопроса, стремление предложить другую схему или конструкцию машины, разработать другой ее тип и т. д. Он считал, что изобретательская способность в этом смысле нужна не только инженеру, занимающемуся разрешением узких технических задач, но она необходима также исследователю, занятому решением теоретических вопросов. В связи с этим, К. И. Шенфер не раз говорил, что творческая фантазия побуждает ученого создавать новые научные образы, дает толчок к новым исследованиям и открытиям. В доказательство этого, он приводил слова Ленина:

«Напрасно думают, что она (фантазия — Г. П.) нужна только поэту. Это глупый предрассудок! Даже в математике она нужна, даже открытие дифференциального и интегрального исчисления невозможно было бы без фантазии.»¹

Великую Октябрьскую социалистическую революцию К. И. Шенфер встретил, как представитель передовой русской интеллигенции. В 1917 г. он был избран профессором по кафедре электротехники МВТУ и принял деятельное участие в организации нового Электротехнического факультета. В течение 1918—1919 гг. он работал в качестве заместителя декана факультета и совместно с профессором К. А. Кругом, занимавшим пост декана, организовал преподавание электротехнических дисциплин, уделяя внимание в первую очередь курсу проектирования электрических машин, по которому он начал в это время читать лекции.

К. И. Шенфер оказывал также непосредственную помощь профессору К. А. Кругу в организации первого научно-исследовательского института в области электротехники, названного Государственным экспериментальным электротехническим институтом (ГЭЭИ). В период с 1921—1930 гг. К. И. Шенфер работал в качестве заместителя директора института по научной части, руководя одновременно машинно-аппаратным отделом.

Педагогическую деятельность в МВТУ и научную деятельность в ГЭЭИ К. И. Шенфер совмещал с работой в промышленности. В период 1917—1918 гг. он участвовал в разработках проектов электрификации Донецкого каменно-угольного бассейна. С 1917—1926 гг. он работал в качестве инженера-консультанта в проектно-бюро электромашиностроительного завода «Динамо» и участвовал в разработке новых типов и конструкций электрических машин.

В период 1918—1921 гг. он руководил электротехнической секцией Технического комитета НКПС, проводил ряд консультаций и организовал испытания нового электротехнического оборудования для электрифицированных железных дорог Советского Союза.

В период 1922—1923 гг. К. И. Шенфер выезжал за границу, где знакомился с постановкой работы в исследовательских институтах и лабораториях ряда электротехнических заводов Германии и Англии.

Несмотря на тяжелую болезнь, которую перенес К. И. Шенфер, период 20-х и начала 30-х годов характеризуется его большой творческой работой в различных областях электромашиностроения. В эти годы он провел фундаментальные исследования в области коммутации машин постоянного тока, разработал новый тип асинхронного двигателя с безреостатным пуском и улучшенными пусковыми характеристиками, предложил ряд новых схем: синхронной работы двигателей постоянного тока, синхронно-индукционного двигателя с автоматическим регулированием тока возбуждения, исследовал процессы короткого замыкания однофазных преобразователей, работающих на тяговых подстанциях, и предложил новую конструкцию дополнительных полюсов большого магнитного сопротивления для преобразователей, установленных на тяговых подстанциях в Баку и Сталинграде.

Вокруг К. И. Шенфера в этот период сгруппировалась значительная группа молодых научных работников, окончивших Электротехнический факультет МВТУ, которые помогали К. И. Шенферу в его научных исследованиях. Среди них были: Б. П. Апаров, И. С. Брук, А. Н. Ларионов, А. И. Москвитин, Е. В. Нитусов, Г. Н. Петров, С. А. Погожев, Ю. С. Чечет и др.

Плодотворная творческая научная работа К. И. Шенфера получила общее признание. В 1931 г. он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, а в 1932 г. — ее действительным членом.

Будучи блестящим ученым-экспериментатором, К. И. Шенфер неоднократно подчеркивал в беседе со своими молодыми учениками, что ученый должен всегда сам непосредственно участвовать в опытах. Нельзя всю экспериментальную работу поручать помощникам, так как при этом многие интересные явления могут оказаться незамеченными. Он считал, что кабинетные ученые, проводящие работу вдали от лабораторий, редко бывают свидетелями новых физических явлений. Как широко образованный человек К. И. Шенфер часто прибегал к примерам из смежных областей

¹ В. И. Ленин. Соч., т. 33, стр. 284.

науки и культуры. Указывая на необходимость живого и самого тесного контакта между руководителем и помощниками, он приводил примеры из жизни художников эпохи возрождения, которые умели хорошо учитывать особенности характера каждого из своих учеников, знали их личную жизнь и все их заботы; чувствуя слабые и сильные стороны своих учеников и передавая им свое мастерство, художники могли влиять на формирование будущих мастеров. Совместная работа старого мастера науки и начинающих ученых требует, как указывал К. И. Шенфер, известной теплоты отношений между ними, облегчающей формирование молодых научных работников.

В постоянном общении со своими помощниками ученый должен прививать им любовь к науке, должен развивать настойчивость и щепетильную добросовестность в научной работе. Работа помощников-аспирантов должна стать как бы частью научной работы самого руководителя. Одной из ответственных задач ученого, говорил К. И. Шенфер, является забота о своей научной смене. Научный работник должен развивать в себе умение работать в коллективе и должен радоваться каждому успеху не только в своей работе, но и в работе своих товарищей, уважая их труд и стремясь принести максимальную пользу общей работе.

К. И. Шенфер не ограничивался в своей научной деятельности экспериментальными исследованиями новых явлений и созданием новых более совершенных схем электрических машин. Он уделял большое внимание также и педагогической работе в высшей школе. Он являлся автором многократно переиздававшихся учебников по машинам постоянного тока, асинхронным и коллекторным двигателям. Он всегда стремился к предельно ясному и доходчивому изложению материала.

«Когда я пишу книгу», — не раз говорил Клавдий Ипполитович, — «я представляю себя выступающим перед огромной аудиторией советских инженеров, техников и студентов и я стараюсь писать так, чтобы эта аудитория меня хорошо понимала».

Лекции, которые К. И. Шенфер читал перед студенческой аудиторией всегда с большим увлечением и подъемом, отличались стройностью и ясностью изложения.

В 1938 г. К. И. Шенфер принужден был из-за плохого состояния здоровья прекратить преподавание в высшей школе. С этого времени он сосредоточил свою работу главным образом в Энергетическом институте Академии наук СССР.

В годы Великой Отечественной войны К. И. Шенфер проводил большую работу, связан-

ную с усилением обороноспособности Советского государства. До последних дней своей жизни он был пламенным патриотом нашей великой Родины.

Тяжелая болезнь прервала жизнь К. И. Шенфера на 61-м году в расцвете его творческих сил; он умер 18 мая 1946 г.²

Заслуги К. И. Шенфера как ученого и гражданина были высоко оценены Правительством. Он был награжден Орденом Ленина и Орденом Трудового Красного Знамени. Ему была присуждена Сталинская премия первой степени за многолетнюю выдающуюся работу в области электротехники.

Больше 80 научных работ были опубликованы К. И. Шенфером по различным вопросам электротехники в русских и зарубежных электротехнических журналах. Он был автором многих десятков изобретений. Основной чертой деятельности К. И. Шенфера была тесная связь с практикой, стремление дать в результате исследования конкретное улучшение конструкции. Он не раз напоминал о трех знаменитых фарадеевских требованиях: работать, кончать, публиковать! К этим трем этапам научной работы он считал необходимым добавлять четвертый: **в н е д р я т ь!** — доводить работу до практического ее применения.

«Мы, советские ученые, — говорил К. И. Шенфер, — постоянно чувствуем кровную связь с нашим трудовым народом. Это сознание должно заставлять нас относиться с еще большей требовательностью к нашей работе и должно в еще большей степени поднимать напряженность этой работы. Руководящим лозунгом советского ученого должно быть: **все для народа!** Достижение этой высокой цели возможно только при условии тесной связи между научной теорией и практикой».

Выступая в Москве, в Доме Ученых незадолго до смерти, К. И. Шенфер привел слова президента Академии наук СССР В. Л. Комарова: «Товарищи! Будем достойны наших предшественников, великих русских ученых, завещавших нам служение народу, истине и прогрессу до последней минуты жизни».

Именно таким ученым и был академик К. И. Шенфер. Он был выдающимся учителем первого поколения советских электротехников и электромашиностроителей и его имя прочно вошло в историю советской науки и электротехники. Те же, кому довелось лично знать К. И. Шенфера, всегда сохраняют память о нем, как о человеке исключительных душевных качеств, человеке глубоко принципиальном и беззаветно преданном науке.

**Заслуженный деятель науки и техники
проф. Г. Н. Петров**

² См. Электричество, № 5, 1951.

Московский энергетический институт им. Молотова

Чешский ученый Франтишек Петжина

К столетию со дня смерти

Франтишек Адам Петжина родился 24 декабря 1799 г. в Семилях, небольшом чешском городке нынешней Либерецкой области. Отец его был небогатым ремесленником-ткачом, в мастерской которого Петжина, получив начальное образование в местной школе, работал. В 1817 г. ему удалось поступить в Йичинскую гимназию, по окончании которой он переехал в Прагу, где в 1823 г. поступил на физико-математическое отделение философского факультета Пражского университета. В конце 1836 г. он защитил диссертацию и, получив степень доктора философии, уехал в Вену, где слушал лекции венского электрика Эттинггаузена и прошел практику в его физическом кабинете. Работа у самого авторитетного в тогдашней Австрии электрофизика, по-видимому, содействовала влечению Петжины к изучению электромагнетизма. В 1837 г. он получил назначение на должность преподавателя физико-математических дисциплин в Линцском лицее. Там начались первые самостоятельные опыты и теоретические изыскания молодого ученого, касающиеся злободневных проблем тогдашней электротехники. Труды Петжины стали печататься в австрийских и немецких периодических изданиях, в том числе и в «Анналах Поггендорфа». Позже он помещал свои статьи в чешском научном органе «Часописе чешского музея». В 1844 г. Петжина был приглашен заведывать кафедрой физики Пражского университета, где он продолжал заниматься исследованиями по электричеству. В 1845 г. его избрали членом Чешского королевского научного общества, а в феврале 1848 г. — членом-корреспондентом Венской академии наук. Умер Петжина 27 июня 1855 г.

Научная и инженерная деятельность Франтишека Петжины протекала в эпоху поисков наилучших путей и форм генерирования и утилизации новой силы — электрического тока. Естественно, что Петжина, посвятивший себя изучению явлений электромагнетизма, не мог остаться в стороне от участия в развитии электротехники. В 1847 г. он писал: «Ни один раздел физики новейшего времени не принесет столько пользы науке и промышленности, сколько гальванизм. Меня увлекает идея передачи речи на большие расстояния, а также мысль о том, что близок час, когда с помощью этой же силы поезда на железных дорогах будут лететь со скоростью ветра» [Л. 1].

Первые работы Петжины, относящиеся к началу 40-х годов, касались разработки теории гальванических элементов. В этих изысканиях он хотя и придерживался устарелой контактной теории, однако подверг ревизии взгляды наиболее



рьяных противников химической теории Фехнера и Пфаффа. Петжина, придя к выводу, что разность потенциалов между пластинами появляется вследствие перехода заряженных частиц из металла в жидкость, выдвинул идею первичности электростатических сил в химических процессах. Труды Петжины в области гальванических элементов тесно примыкали к его исследованиям законов электрической цепи. В статье «Сомнения в достоверности закона Ома для гальванического тока» [Л. 1] он отмечал, что формула Ома справедлива только для уста-

новившейся цепи и неприменима для проводников, обладающих нелинейными свойствами.

Работая Петжина и над совершенствованием существующих типов магнитоэлектрических машин. По своим конструктивным особенностям генератор Петжины представлял развитие моделей Кларка и Сакстона.

Практическая деятельность Петжины была посвящена в основном электромагнитному телеграфу. Вначале он занялся улучшением звонкового телеграфа, который обслуживал в то время железные дороги. В этом телеграфе, работавшем на изобретенном Шиллингом принципе, функции мультипликаторов выполняли два электрических звонка, «правый» и «левый», которые в зависимости от положения переключателя на передающей станции и длительности включения тока попеременно издавали то длительные, то короткие звонки. На комбинации долгих и коротких звуков этих сигналов Петжина придумал несложный цифровой код. В дальнейшем с появлением аппаратов Морзе и расширением телеграфной сети Петжина уделял большое внимание разработке и широкому внедрению на важнейших телеграфных магистралях страны передовых по тому времени средств и приемов телеграфирования (применение реле, местных батарей).

В чешских учебниках физики известна «спираль Петжины» — наглядное пособие, служащее для наблюдения притяжения параллельных токов.

Петжина постоянно проявлял глубокий интерес к тому, что происходило в современной ему русской науке. Хорошо известные Петжине труды Шиллинга, Ленца и Якоби во многом способствовали расширению научного кругозора пражского ученого и служили стимулом для большинства его исследований и изобретений.

Литература

1. F. Petřina. Pochybnost o pravosti Ohmovy theorie galvanického proudu. Časopis českého Musea. I ser., t. 2, 1847.

Инж. Г. К. Цвєрєва
Бокситогорск

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СЛЕДЯЩИХ ПРИВодОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

(Статья Е. И. Баранчука, *Электричество*, № 6, 1953)

Кандидат техн. наук В. А. БЕСЕКЕРСКИЙ

Ленинград

Описываемая схема не может быть использована на практике ввиду серьезных упущений, сделанных автором при ее составлении.

Теоретические исследования автора либо не имеют отношения к предлагаемой схеме, либо основаны на недоразумениях.

В предлагаемой автором схеме (рис. 2) предусмотрена отрицательная обратная связь. Однако все выводы, относящиеся к теории работы схемы, сделаны в предположении положительной обратной связи (приложение I). Остается неизвестным, на что же должен ориентироваться читатель. Данные для подсчета величины x_c (табл. 2) неправильны и не относятся ни к положительной, ни к отрицательной обратной связи.

В теории работы фазовращательного моста (приложение II) автор использует понятие активной составляющей проводимости конденсатора y_u , заимствованное в [Л. 5], но при этом путает напряжение на конденсаторе и напряжение на входе моста. В результате формулы автора являются неверными, в чем нетрудно убедиться на элементарных примерах.

Так, при постоянстве амплитуды сигнала на входе моста $y_u = 0$ (согласно автору) и угол сдвига выходного напряжения оказывается равным 90° [формулы (II-3), (II-4) и (II-5)].

Если же амплитуда входного напряжения медленно проходит через нуль (т. е. меняется знак сигнала погрешности), то $y_u \rightarrow \alpha$ и угол сдвига по тем же формулам оказывается равным нулю. Этот результат указывает на ошибочность расчетов автора и приводимые им в приложении II величины изменения фазового угла $1...1,3^\circ$, якобы подсчитанные по выведенным формулам, не вызывают сомнения.

Идея построения дифференцирующей схемы для огибающей модулированного сигнала на основе вычитания из выходного напряжения результата дифференцирования несущей частоты не нова, так как все существующие для этой цели схемы (мостовые, резонансные и др.) в конце концов работают на этом принципе. Однако применение автором для этой цели балансного электронного усилителя является неудачным. Так как несущая частота больше частоты огибающей в сотни и тысячи раз, то второе «вредное» слагаемое (3) в сотни и тысячи раз больше первого «полезного» слагаемого и компенсация «вредного» слагаемого на балансом электронном усилителе практически невозможна. Так, например, в следящей системе, работающей на морской качке с периодом 12 сек. при обычно используемой несущей частоте 500 μ ц, отношение частот, а следовательно, и отношение амплитуды «вредного» слагаемого (3) к амплитуде «полезного» составит 6000. Если допустить погрешность определения производной в 10%, то требуемая точность поворота фазы фазовращательным мостом составит при этом $\frac{0,1}{6000} \text{ рад} \approx 3,5$ угловых секунды,

требуемая стабильность несущей частоты $5,5 \cdot 10^{-4}\%$, а требуемая стабильность коэффициента усиления 0,015%. Добиться же этого в схеме автора, конечно, невозможно. Если отношение частот будет не 6000, а 600 или даже 60, то и при этом осуществление схемы невозможно.

Выводы автора в приложении III о том, что в предлагаемой им схеме допускается отклонение несущей частоты на 3...5%, не обоснованы.

В рассматриваемой статье содержится ряд неверных утверждений. Так, на стр. 43 он пишет: «Только при очень глубокой модуляции ($M > 0,8$) ...Подобные случаи нереальны и не имеют места на практике». И далее: «...рассматриваемый случай соответствует очень глубокой модуляции $M = 7/8$ ».

Известно, что в следящих системах применяется в подавляющем большинстве случаев амплитудная модуляция с подавлением несущей, которая принята и автором [формула (1)]. Понятие глубины модуляции в этом случае не имеет смысла, так как коэффициент M , с которым оперирует автор, равен бесконечности.

Подобные примеры можно умножить.

БОГУМИЛ МИРТЕЗ

г. Прага, Чехословакия

По утверждению автора, рассматриваемые им электронные устройства лучше и надежнее всех других применяемых стабилизирующих устройств и при помощи их можно производить все виды интегро-дифференцирующих операций для стабилизации следящих приводов переменного тока.

Нетрудно показать, что эти утверждения автора неверны. Допустим, что сигнал ошибки имеет следующее значение:

$$\delta(t) = [\delta_0(t)] \sin \omega_0 t, \quad (1)$$

где $\delta_0(t)$ — амплитуда ошибки; ω_0 — несущая частота.

Предположим, что для стабилизации следящего привода переменного тока требуется выполнить дифференциальную операцию над амплитудой сигнала ошибки.

Требуемый выходной сигнал:

$$\delta_a(t) = k_{1M} \left\{ \delta_0(t) + T_a \frac{d}{dt} [\delta_0(t)] \right\} \sin \omega_0 t, \quad (2)$$

где k_{1M} — коэффициент усиления устройства; T_a — постоянная времени.

Примем согласно табл. 1 автора (строка 2, столбец 3)

$$k_{1M} = k_1 \frac{C_1}{C_2} \text{ и } T_a = R_2 C_2.$$

Выходной сигнал дифференцирующего устройства

$$\delta'_a(t) = k_{1M} \left\{ \delta_0(t) + T_a \frac{d}{dt} [\delta_0(t)] \right\} \sin \omega_0 t + k_{1M} T_a \omega_0 \delta_0(t) \cos \omega_0 t. \quad (3)$$

Нарушающей слагающей, опережающей по фазе основную слагающую на 90° , является второй член выражения (3). Наличие этой нарушающей слагающей будет вредно сказываться на работе следящего привода. Тем не менее будем считать допустимым наличие остаточной нарушающей слагающей с модулем, не превышающим модуля основной слагающей. Указанное примем за первое условие правильной работы стабилизирующего устройства.

Далее, если у вычитаемого вспомогательного сигнала фаза отличается от фазы нарушающей слагающей, то после их вычитания в выходном сигнале остается положительным или отрицательным дополнительный нарушающий сигнал той же фазы, что и основной. Считая допустимым величину модуля этого дополнительного нарушающего сигнала в пределах до 30% от модуля основного, как второе условие правильной работы стабилизирующего устройства, выясним, каковы будут величины действительных нарушающих слагающих при применении данных устройств в реальных следящих приводах переменного тока.

Необходимый сигнал стабилизирующего устройства для привода, работающего с постоянной скоростью,

$$[\delta_a(t)]_0 = k_{1M} \sin \omega_0 t. \quad (4)$$

Действительный выходной сигнал дифференцирующего устройства

$$[\delta'_a(t)] = k_{1M} \sin \omega_0 t + k_{1M} T_a \omega_0 \cos \omega_0 t. \quad (5)$$

Отношение модулей нарушающей и основной слагающих

$$\frac{k_{1M} T_a \omega_0}{k_{1M}} = T_a \omega_0. \quad (6)$$

Если для реальных систем взять $T_a \approx 0,05$ сек, то при несущей частоте в 500 гц это отношение равно приблизительно 150.

Устранить нарушающую слагающую до такой степени, чтобы выполнить оба принятых нами условия, не представляется возможным.

При несущей частоте в 50 гц отношение модулей нарушающей и основной слагающих равно 15. Однако и здесь применение электронного стабилизирующего устройства Е. И. Баранчука невозможно. Действительно, если применить схему, приведенную автором на рис. 2, то значение модуля нарушающей слагающей следующее: $k_{1M} C_1 R_2 \omega_0$. Модуль дополнительного сигнала определен усилением входного, выходного и дифференциального трансформаторов, усилителя и фазовращателя, т. е. пятью параметрами p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 . Для выполнения первого поставленного условия необходимо

$$1 - \frac{1}{15} \leq \frac{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5}{k_1 C_1 R_2 \omega_0} \leq 1 + \frac{1}{15}. \quad (7)$$

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СХЕМ КОММУТАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ

(Статья Н. Н. Крачковского, *Электричество*, № 7, 1951; № 6, 1952; № 3, 1953).

Кандидат техн. наук Н. Н. КРАЧКОВСКИЙ
Москва

Я. С. Шнейдман в своих замечаниях почему-то упускает из виду основное принятое мною положение — соответствие схемы электрических соединений подстанции требованиям надежности ее питания. С этим положением связано разделение подстанций на три группы. Игнорируя это важное обстоятельство, автор замечаний делает ряд неверных выводов. Секционирование выключатели на подстанции Б (первой категории) являются неотъемлемой принадлежностью схемы сети, представленной на рис. 6 моей статьи.

При отключении одной из четырех питающих линий сохраняется питание подстанций Б по трем линиям. Подстанции же А и В в случае отключения одной из параллельных линий продолжают питаться по второй линии, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к надежности питания этих подстанций (второй и третьей категорий). Поэтому предложение Я. С. Шнейдмана ввести дополнительные секционирующие выключатели в данном случае ничем не обосновано.

Утверждения Я. С. Шнейдмана о неправильности высказанных мною положений относительно релейной защиты для схемы «мостика» на подстанции В (схема представлена на рис. 6 моей статьи) также ничем не обоснованы.

Как указано в моей статье, на подстанции В предусматривается применение устройства автоматического включения резерва. Это устройство имеет орган, который при аварии на линии с некоторой выдержкой времени производит отключение соответствующего трансформаторного выключателя. Для ограничения выдержки времени уставка по напряжению отключающего органа принимается минимально возможной — порядка 15% номинального напряжения, а не 70%, как указывает Я. С. Шнейдман. Затем от устройства автоматического включения резерва производится включение выключателя в перемычке и оба трансформатора остаются в работе. Таким образом, все устройство действует вполне автоматически и обеспечивает надежную работу подстанции при нормально разомкнутом выключателе в перемычке; держать последний нормально замкнутым совершенно не требуется, хотя такой режим и возможен.

Из сказанного ясно, что утверждения Я. С. Шнейдмана основаны, повидимому, на недостаточно внимательном ознакомлении с моей статьей.

Значительная часть соображений Ф. П. Левина касается общих вопросов проектирования электрических сетей, тогда как в моей статье рассматривался частный случай схем электрических соединений подстанций, питае-

мых от одноцепной или двухцепной линии электропередачи. Выполнить это условие при существующих точностях каждого из пяти элементов схемы не представляется возможным. Нужно учесть, что здесь не приняты во внимание другие важные обстоятельства (влияние высших гармоник несущей частоты и т. д.).

Что касается интегральной стабилизации, то Е. И. Баранчуком допущены принципиальные ошибки в приведенном им уравнении (4).

Правильная форма этого уравнения:

$$\int \delta_0(t) \sin \omega_0 t dt = [\int \delta_0(t) dt] \sin \omega_0 t - \omega_0 \int \cos \omega_0 t [\int \delta_0(t) dt] dt. \quad (8)$$

Член $\omega_0 \int \cos \omega_0 t [\int \delta_0(t) dt] dt$ нельзя заменить членом $\omega_0 \iint [\delta_0(t) \cos \omega_0 t] dt dt$, как это сделал автор.

Из уравнения (8) следует, что дополнительная нарушающая слагающая сложнее по форме основной слагающей. Чтобы добиться требуемого результата, необходимо воспроизвести дополнительный сигнал сложнее желаемого, а это уже принципиально неприемлемый метод.

Таким образом, электронные стабилизирующие устройства не только не лучше других стабилизирующих устройств, а вообще не могут быть применены для стабилизации следящих приводов переменного тока.

мых от одноцепной или двухцепной линии электропередачи.

Некоторые его замечания непонятны. Например, неясно, что конкретно подразумевается под «простой и надежной аппаратурой, недорогой по стоимости и недефицитной по изготовлению».

Конкретные замечания Ф. П. Левина касаются схем, представленных на рис. 5 и 6 моей статьи. Непонятно и ничем не обосновывается утверждение, что при двукратной связи обеих цепей в пределах подстанции имеется вероятность перехода аварий с одной цепи на другую. Что касается надежности схемы при планово-предупредительных ремонтах, то схема рис. 6 и обладает тем достоинством, что при выводе из работы на период ремонта или ревизии любого участка линии или выключателя все трансформаторы остаются в работе и подстанция работает на полную мощность.

Значительная часть возражений Ф. П. Левина основана, повидимому, на предположении, что в схемах подстанций, представленных на рис. 5 и 6, отсутствуют разъединители. На всех рисунках моей статьи, за исключением рис. 2 (подстанции А и В), разъединители для упрощения действия не показаны. Но на самом деле разъединители должны быть установлены всюду, где это необходимо для производства ремонта оборудования. При наличии разъединителей не потребуется для ремонта какого-либо выключателя отключать выключатели в других частях сети. Следовательно, схемы, представленные на рис. 5 и 6 моей статьи, не имеют тех дефектов, которые им приписывает Ф. П. Левин.

Конструктивное осуществление подстанций по схемам рис. 5 и 6 не встретит каких-либо затруднений, а размеры площадок подстанций будут меньше, чем при обычной (европейской) схеме.

Схемы, показанные на рис. 6, в настоящее время уже применены на двух подстанциях.

М. М. Лебедев в основном рассматривает схемы подстанций с односторонним питанием по одноцепной или двухцепной линии электропередачи; поэтому его замечания являются дополнением к моей статье. Содержащиеся в них принципиальные положения существенно не отличаются от принятых мною.

Подводя итог дискуссии, можно констатировать, что предложение об отказе от обычной схемы с двойной системой шин и применении схем с меньшим количеством выключателей («мостиковых», «колышевых» и т. п.) и в то же время более надежных, отвечающих требованиям телеуправления, в той или иной мере встречает поддержку со стороны высказавшихся авторов. Эти схемы за последние годы получили у нас достаточное распространение, поэтому возражения об их неприменимости с точки зрения эксплуатации, которые делались раньше, отпадают.

ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ С ВНУТРЕННИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ АКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ

За последние 25 лет произошло значительное укрупнение турбогенераторных единиц. Номинальная мощность агрегатов возросла с 35 до 200 тыс. кВт за счет прогресса в конструкциях машин, улучшения качества применяемых активных и изоляционных материалов, а также систем охлаждения машин.

Улучшение механических и магнитных свойств роторных поковок было достигнуто применением присадок к стали (никеля с добавкой хрома и молибдена, а иногда и ванадия) и тщательной двукратной термической обработкой. В целях повышения механической прочности роторных обмоток начали также применять холоднокатаную медь с присадкой серебра. Электрические свойства обмоток при этом сохраняются. Применение же нового проводникового сплава алюминия (кондал) позволило увеличить диаметр ротора быстроходных машин, повысив их мощность.

Внедрение водорода в качестве охлаждающей среды благодаря его лучшим, чем у воздуха, физическим и термодинамическим свойствам позволило повысить номинальную мощность генераторов на 25...30% при сохранении тех же затрат активных материалов.

Следующим шагом явилось повышение рабочего давления водорода в корпусе генератора, что дало возможность еще более увеличить номинальную мощность генератора. Так, при $\cos \varphi = 0,85$ и рабочем давлении водорода в кожухе генератора 1,1 ати это увеличение мощности составляет примерно 15%, а при рабочем давлении 2,2 ати — примерно 25% сверх получаемой мощности при обычно применяемом давлении 0,03...0,04 ати (рис. 1).

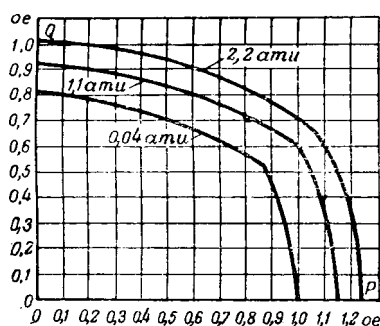


Рис. 1. Кривые соотношения активной и реактивной составляющих мощности при различных давлениях водорода в корпусе генератора с обычным (наружным) водородным охлаждением.

P — активная мощность (в относительных единицах); Q — реактивная мощность (в относительных единицах).

Повышение плотности газа увеличивает его теплоемкость и теплопередачу от поверхности к газу. Это способствует выравниванию температуры обмоток вдоль оси ротора и снижению температуры обмоток, что позволяет значительно повысить токовую нагрузку ротора генератора.

Появляющиеся при этом дополнительные вентиляционные потери и потери от трения о бочку ротора весьма незначительно влияют на к. п. д. генератора. Увеличение же утечки водорода при повышении его давления требует лишь более тщательного изготовления корпуса статора и более совершенных уплотнений вала, а также достаточной вентиляции окружающего воздуха в местах возможных скоплений взрывоопасных газовых смесей.

Внутреннее охлаждение обмоток. Дальнейшее повышение давления водорода в корпусе генератора не приводит к большому выигрышу в его мощности, так как доля температурного перепада от меди к охлаждающей среде, не зависящая от давления водорода, составляет для изоляции роторных катушек примерно 45...50% и статорных катушек — примерно 75...80%. Для устранения температурного перепада в изоляции обмоток охлаждающая среда

пропускается сквозь внутреннюю полость медных стержней, чем достигается ее непосредственное соприкосновение с медью обмоток.

В настоящее время благодаря достигнутому прогрессу в турбогенеростроении внутреннее охлаждение обмоток стало особо эффективным. Высокие давления охлаждающего водорода, а также высокие скорости струй охлаждающего газа во внутренних каналах медных стержней способствуют применению этой системы охлаждения генераторов. В США вопросом внутреннего охлаждения обмоток занято несколько фирм.

Фирма Аллис-Чалмерс изготовила свой первый турбогенератор с продуваемым ротором в 1951 г. В настоящее время фирмой изготовлен турбогенератор мощностью 40 тыс. кВт при давлении газа 2,2 ати с полной продувкой активных частей ротора и статора. Выдача мощности этого генератора в сеть ограничивается мощностью спаренной с ним турбины, а также величиной возбудителя.

Циркуляция водорода создается насаженным на вал генератора одноступенчатым компрессором, продувающим водород сквозь продольные внутренние каналы катушек роторной и статорной обмоток, а также стали статора (рис. 2).

Охлаждающие трубки согнуты так, что обе водяные камеры газоохладителя располагаются вне корпуса машины; поэтому не требуется никаких компенсирующих устройств против термических деформаций трубок, а для их чистки не требуется опорожнения машины от водорода. Благодаря высоким скоростям газа через охладители и большому перепаду давления достигнуто снижение их размеров и уменьшение расхода охлаждающей воды.

Фирма Вестингауз недавно выпустила первый турбогенератор мощностью 80 тыс. кВт при давлении водорода 2,2 ати или 100 тыс. кВт при давлении 3,3 ати, осуществив вентиляцию машины при помощи трехступенчатого компрессора типа воздуходувки. Компрессор продувает водород через внутренние продольные каналы обмоток ротора и статора, но в отличие от предыдущей конструкции генератор имеет обычные радиальные каналы между пакетами стали статора (рис. 3). Путь водорода в роторе укорочен вдвое за счет поступления его под бандаж у торцов ротора и в каналы стержней обмотки возбуждения через радиальные отверстия и выхода газа через такие же отверстия в зазор между статором и ротором в середине. Туда же выходит охлаждающий газ из радиальных кана-

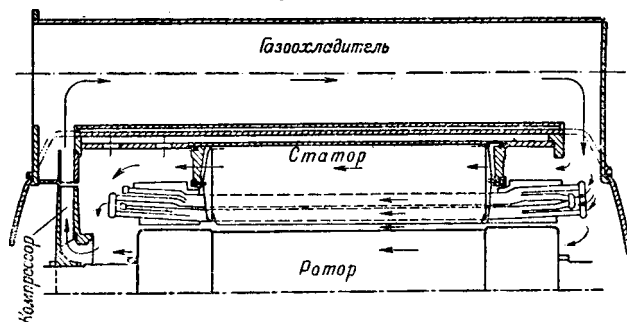


Рис. 2. Схема циркуляции водорода в генераторах фирмы Аллис-Чалмерс.

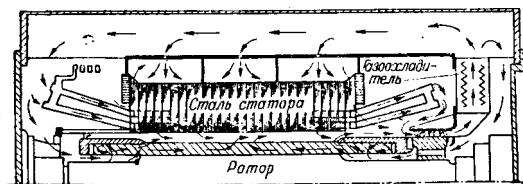


Рис. 3. Схема циркуляции водорода в генераторах фирмы Вестингауз.

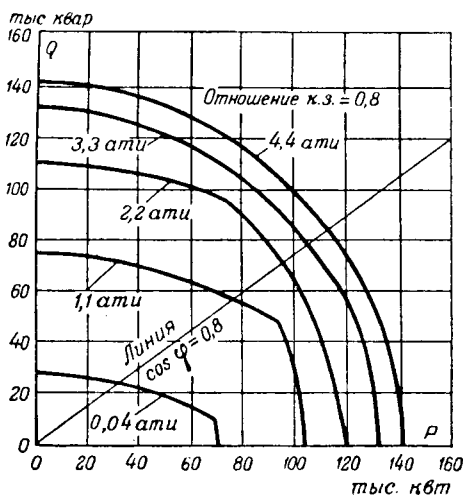


Рис. 4. Кривые мощности, развиваемой при различных давлениях водорода генератором фирмы Вестингауз с внутренним охлаждением обмоток.

P — активная мощность; Q — реактивная мощность.

лов в стали статора. Зазор между статором и ротором используется в качестве газового канала, откуда водород отсасывается компрессором.

Статорные катушки продуваются газом аналогично конструкции фирмы Аллис-Чалмерс. Газоохладители применены горизонтальные с объемом, равным 40% объема обычных газоохладителей.

На рис. 4 показаны кривые развиваемой генератором мощности при разных давлениях водорода. Температура обмоток допущена 130° С, а перепад температур между медью и газом 85° С. Изломы кривых показывают переход от ограничения мощности по статору (нижняя часть кривой) к ограничению мощности по ротору (верхняя часть кривой). Изломы кривых исчезают при давлении водорода 3,3 атм и выше.

Фирма Джeneral Электрик изготовила свой первый турбогенератор мощностью 125 тыс. кВт при давлении водорода 2,2 атм. В нем внутренняя вентиляция катушек применена только для ротора. Заводские испытания показали, что нагрев обмоток составил 25% от нагрева, получаемого в машинах обычной конструкции, и, следовательно, ротор может быть загружен на мощность машины до 250 тыс. ква.

Основой конструкции вентиляционной системы ротора служит рассеивание пути циркуляции водорода вдоль стержней возбуждения на ряд коротких путей. Газ забирается ротором из зазора между ротором и статором через ковшобразные отверстия, направленные в направлении вращения ротора. Пройдя через каналы в стержнях обмотки в продольном направлении, газ отсасывается в зазор через отверстия, расположенные на бочке ротора и направленные против направления вращения ротора.

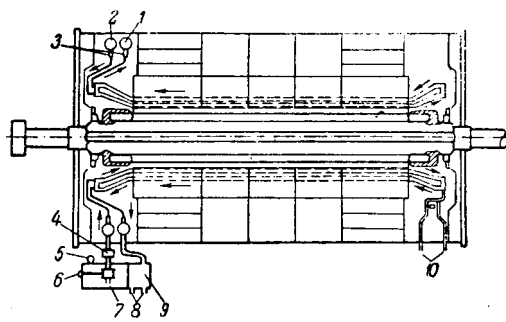
Линия входных роторных ковшиков противостоит примерно входным радиальным охлаждающим каналам в статорной стали, обеспечивая необходимую циркуляцию газа.

Охлаждение обмоток генератора жидкостью. Жидкостное, в основном масляное, охлаждение обмоток ротора и статора с точки зрения термодинамической является самым эффективным. Сечение охлаждающих каналов в обмотках получается на 10...20% меньше, чем при продуваемых газом обмотках. За этот счет возможно увеличить сечение меди и соответственно получить добавочный выигрыш в мощности генератора.

Однако конструктивное выполнение циркуляции жидкости сквозь обмотку ротора получается сложным, так как необходимо осуществить последовательное движение жидкости сквозь все роторные катушки, требуется установка насоса высокого давления, возникают затруднения в выполнении уплотнения цепи циркуляции жидкости, возможна утечка жидкости и проникновение ее внутрь генератора и пр.

Рис. 5. Схема внутреннего жидкостного охлаждения обмотки статора в генераторе фирмы Джeneral Электрик.

1 — коллектор нагретой жидкости; 2 — коллектор холодной жидкости; 3 — проходные изоляторы; 4 — насос; 5 — камера расширения; 6 — электрическое подключение насоса; 7 — резервуар; 8 — подсоединение воды; 9 — охладитель; 10 — электрические выводы генератора.



Применение жидкостного охлаждения обмоток ротора и статора не исключает также необходимости водородного охлаждения лобовых частей обмоток, статорной стали и ее зубцов, а также отвода потерь трения ротора о газовую среду.

Поэтому жидкостное охлаждение более приемлемо для обмотки статора и лишь в случае невозможности достижения того же эффекта при охлаждении водородом. По данным фирмы Вестингауз равнозначный эффект по перепаду температур достигается при давлении водорода 6,6 атм и скорости 300 м/сек и скорости циркуляции масла 0,65 м/сек.

Для недавно выпущенного фирмой Джeneral Электрик турбогенератора 208 тыс. кВт, 3600 об/мин применено, по видимому, масляное охлаждение статорной обмотки (рис. 5). Охлаждающая жидкость здесь поступает со стороны турбинного торца генератора в кольцевой коллектор холодного масла и, пройдя каналы катушки вдоль машины в прямом и обратном направлениях, попадает в такой же коллектор нагретого масла.

Коллекторы смонтированы на проходных изоляторах, к которым трубками присоединяются каналы стержней статорных катушек. С обратной стороны изоляторы присоединены к соответствующему коллектору. Внешняя цепь состоит из бачка охладителя жидкости и насоса, обеспечивающих необходимое давление для циркуляции жидкости через обмотку.

Мощность двигателя насоса составляет всего лишь несколько киловатт, в то время как мощность водородного компрессора на валу была бы примерно равна нескольким сотням киловатт. Ведутся также работы по усовершенствованию и дальнейшей герметизации цепи охлаждающей жидкости внутри генератора, являющейся слабым местом этой конструкции.

Некоторые особенности машин с внутренним охлаждением обмоток. Для роторных стержней применяется профилированная медь, образующая внутренние вентиляционные каналы. Каждая пара стержней при этом составляет две параллельные цепи одного и того же витка, и поэтому между этими стержнями не требуется никакой изоляции. Тонкий слой изоляции прокладывается между последовательными витками катушки, но он не участвует в теплопередаче от меди к газу.

Пазы ротора делают конусообразными, а зубцы с параллельными стенками. Пазы уширены против обычных конструкций, что дает возможность в их сечении разместить охлаждающие каналы.

Статорные катушки состоят из мелких прямоугольных стержней, расположенных у стенок паза, и металлических немагнитных трубок, расположенных в середине паза и изготовленных из высокоомного материала для уменьшения потерь от вихревых токов. Между трубками и витками катушек проложен тонкий слой изоляции из кремнийорганической смолы, обладающей хорошими теплопередающими свойствами. Для уменьшения потерь от вихревых токов в зависимости от ширины паза стержни катушек имеют одинарную или двойную транспозицию. На концы лобовых соединений обмоток фирма Вестингауз насаживает специальные футляры (гильзы) из кремнийорганической смолы, которые служат для направления струй газа в каналы катушек и повышения уровня изоляции концов катушек. Высокие скорости охлаждающего газа препятствуют засорению вентиляционных каналов меди и стали.

Допускаемая более низкая температура меди и более высокая температура стали статора уравнивает их темпе-

ратурную деформацию, создавая более выгодные условия работы генератора.

По данным испытания фирмы Вестингауз синхронная реактивность не отличается от синхронной реактивности генератора с обычным водородным охлаждением, сверхпереходная же реактивность больше в 2 раза, а переходная реактивность — немного менее чем в 2 раза. В связи с этим величины токов короткого замыкания значительно снижаются.

Для сохранения отношения короткого замыкания генератора в пределах 0,8 увеличен воздушный зазор машины. Необходимость в этом диктуется увеличением удельной мощности генератора в киловаттах на килограмм.

Применение внутреннего охлаждения меди обмоток и стали в турбогенераторе конструкции фирмы Аллис-Чалмерс позволило уменьшить длину ротора примерно вдвое. При установке агрегатов поперек машинного зала это дает значительное сокращение его пролета. Вес машины фирмы Вестингауз уменьшается на 25%, вес ротора на 50% против турбогенераторов обычных конструкций; в конструкции фирмы Аллис-Чалмерс уменьшение веса еще больше, что позволяет снизить грузоподъемность крана.

По данным фирмы Аллис-Чалмерс объем циркулирующего газа уменьшается в 5 раз, а малые по размеру подшипники и уплотнения вала в связи с сокращением размеров ротора снижают потребность в смазочном масле до минимума. Значительное уменьшение размеров и веса позволяет производить перевозку и монтаж турбогенераторов в неразобранном виде.

По данным фирмы Вестингауз ее новый турбогенератор 100 тыс. кВт будет нормально работать при давлении водорода 3,3 атм. Дальнейшее улучшение конструкции лабиринтовых уплотнений и соединительных элементов водородной схемы позволило уже работать во время заводских испытаний этого генератора при давлении 7,7 атм с теми же утечками газа, что и в машинах последних конструкций при давлении 2,2 атм.

Литература

1. Power Eng., стр. 98, № 8, 1954.
2. J. W. Batchelor. El. Light and Power, т. 31 стр. 84, № 3, 1953.
3. C. M. Lafoon. El. Eng., стр. 1013, № 11, 1951.
4. K. Fechheimer. El. World, т. 126, стр. 91, № 1, 1946.
5. R. A. Baudry, P. R. Heller, H. K. Reamay. Tr. AIEE, т. 71, стр. 214, 1952.
6. C. H. Holley, H. D. Taylor. El. Eng., стр. 120, № 2, 1953.
7. R. A. Baudry, P. R. Heller. El. Eng., стр. 508, № 6, 1954.
8. J. Moses. El. Eng., стр. 532, № 6, 1954.
9. W. C. Brenner, P. R. Heller. El. Eng., № 7, 1954.
10. S. Beckwith, L. T. Rosenberg. El. Eng., стр. 435, № 5, 1954.
11. El. Eng., стр. 120, № 2, 1954.
12. Power Eng., стр. 46, № 6, 1954.

Инж. А. М. Берковский

ЗАЩИТА ЛИНИЙ СВЯЗИ ОТ ВЛИЯНИЙ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ В ШВЕЦИИ

На значительной части территории Швеции залегают скалистые породы, покрытые относительно тонким слоем земли. Вследствие этого проводимость земли низка, а взаимная индуктивность между параллельными линиями велика. Поэтому защита линий связи от опасного электромагнитного влияния при замыканиях на землю в линиях электропередачи является серьезной проблемой.

Первоначально в шведских сетях высокого напряжения (вплоть до 220 кВ) применялось заземление нейтрали через дугогасящие катушки. Пока протяженность сетей была небольшой, опыт эксплуатации был успешным и большую часть однофазных замыканий удавалось ликвидировать без отключения линий. Рост протяженности сетей вызвал увеличение значений остаточного тока при замыканиях на землю, что снижало эффективность применения дугогасящих катушек и приводило в некоторых случаях к тяжелым

авариям. Практически предел суммарной протяженности электрических связанных сетей 150...220 кВ с компенсированной нейтралью составляет примерно 2 500 км.

После длительной разработки защитных мероприятий от влияний, осуществляемых на самих линиях связи, осенью 1950 г. шведская сеть 220 кВ была переведена на работу с глухим заземлением нейтрали. В целях ограничения токов замыкания на землю было заземлено только 8 из 30 нулевых точек. В отношении сети 380 кВ было принято решение о глухом заземлении нейтралей всех трансформаторов. Это позволило сконструировать транспортные трансформаторы значительной мощности, так как оказалось возможным заметно облегчить изоляцию обмоток.

Исследования показали также выгодность применения автотрансформаторов 380 кВ для связи с сетями 130 и 220 кВ. Эта выгода обусловлена уменьшением размеров трансформаторов, снижением потерь в них и прежде всего уменьшением реактивности, что привело к увеличению пропускной способности сети. Принятие этого решения повлекло за собой необходимость глухого заземления сети 130 кВ. Глухое заземление нейтрали в сетях 130 кВ и выше привело к увеличению токов нулевой последовательности и мощности при коротких замыканиях. Для ограничения продольных э. д. с., наводимых в линиях связи при коротких замыканиях на сближающихся с ними линиях электропередачи, в ряде случаев потребовалось принятие специальных мер.

Обычно снижение взаимной индуктивности между линиями электропередачи и связи достигается путем увеличения расстояния между ними или подвеской тросов и экранирующих проводов на линиях связи. Вследствие высокой стоимости сооружения изменение трассы проектируемой линии высокого напряжения для снижения влияний на линии связи нецелесообразно, так как дешевле обходится принятие защитных мер, осуществляемых на самих линиях связи. Подвеска двух стальных тросов на порталных опорах стандартного типа позволяет снизить наводимое напряжение на 10%. Замена стальных тросов медными или алюминиевыми может снизить индукцию вдвое. Однако вследствие значительного удорожания установки тросы из цветных металлов не нашли широкого применения. Незначительное влияние, оказываемое стальными тросами на величину э. д. с., индуцируемой в проводах связи, не может иметь серьезного значения при решении вопроса о целесообразности подвески тросов на линии. В этом случае определяющим фактором являются условия грозозащиты.

В Швеции на линиях 380 кВ и на магистральных линиях 220 кВ подвешиваются два троса по всей длине линии. Большая часть линий 130 кВ и линии 220 кВ второстепенного значения снабжаются тросами только на подходах к подстанциям.

Индуктированная э. д. с. может быть снижена также в случае применения на линиях электропередачи противовесов с хорошей проводимостью. Мелкий противовес сечением 25 мм² снижает индуктированную в параллельно идущих проводах связи э. д. с. примерно на 20%. Следует при этом отметить, что применение таких противовесов вызывает некоторое увеличение токов нулевой последовательности при коротких замыканиях на землю.

Частичное разземление нейтралей трансформаторов вызывает изменение распределения токов нулевой последовательности. При этом в некоторых случаях может быть достигнуто снижение значений токов, приводящих к появлению чрезмерных значений индуктированных э. д. с. Недостатком частичного разземления нейтралей является необходимость повышения уровня изоляции обмоток трансформаторов, предназначенных для работы с изолированной нейтралью. При частичном разземлении нейтралей возможно появление трудностей, связанных с созданием надежной релейной защиты.

Снижение влияющих токов может быть достигнуто также путем секционирования сети высокого напряжения. Однако в этом случае возрастает вероятность нарушения устойчивости передачи при авариях. Секционирование сетей связано также с увеличением потерь в сетях. Поэтому рекомендуется секционировать сети 130 кВ и ниже, питающиеся от линий более высокого напряжения.

Ограничение токов нулевой последовательности может быть достигнуто также при помощи сопротивлений, вводимых в цепь нейтралей трансформаторов. Величина этих сопротивлений определяется из условия, что ток нулевой последовательности при коротком замыкании на землю не должен превышать допустимых значений. При этом сопротивление не должно быть настолько велико, чтобы были потеряны преимущества глухого заземления нейтрали. На практике выполнение этих требований редко осуществимо.

Важным преимуществом глухого заземления нейтрали является возможность применения быстродействующей релейной защиты и ограничения длительности короткого замыкания до 0,1...0,2 сек. Это приводит к уменьшению длительности воздействия опасных для жизни людей и для изоляции напряжений на линиях связи, проходящих вблизи линии электропередачи.

Произведенные исследования показали, что проблема мешающих влияний имеет практическое значение только для воздушных линий связи. Заметное воздействие могут оказывать третьи гармоники токов нулевой последовательности, возникающие в том случае, когда рабочее напряжение линии электропередачи превышает критическое напряжение короны.

Длины циклов транспозиции на линиях 30...130 км в Швеции осуществляются в соответствии с нормами Международного консультативного комитета по телефонии, т. е. 18...36 км. Линии 20 км и более низких напряжений большей частью не транспонированы. Линии 220 и 380 км сооружаются с циклами транспозиции длиной до 200 км. При этом между соседними подстанциями должен быть по крайней мере один цикл транспозиции. Меры защиты, ко-

торые надлежит выбрать в этом случае, определяются в зависимости от взаимного расположения обеих линий и других факторов. Обычно устранение мешающих влияний не представляет серьезных трудностей.

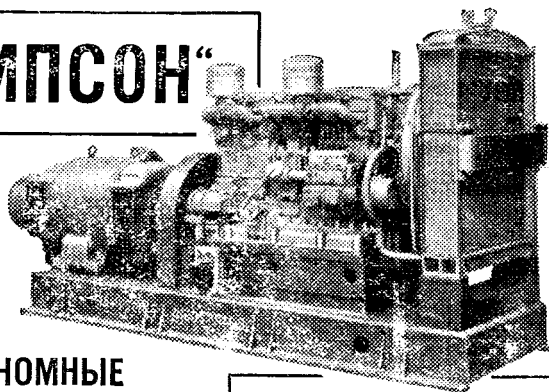
Перемещение линий, как мера снижения опасного влияния, неприемлемо, так как при частоте 50 гц электромагнитная индукция мало заметно снижается при увеличении расстояния между линиями. Поэтому для защиты воздушных линий связи обычно устанавливаются разрядники. Расстояние между разрядниками определяется условием, чтобы э. д. с., наводимая на проводе связи между двумя соседними точками установки разрядников, не превышала 430 в. Установка разрядников для защиты многожильных кабелей нежелательна. Поэтому для защиты ранее проложенных кабелей вдоль них прокладываются противовесы. Сечение противовесов определяется необходимой величиной коэффициента защитного действия.

Защитное действие кабельных оболочек можно значительно увеличить, снабжая кабель броней из специальной стали и закладывая под свинцовую оболочку медную жилу. Целесообразность применения таких кабелей решается экономикой, так как кабели этого типа дороже кабелей с обычной броней. В некоторых случаях может оказаться целесообразным взамен установки разрядников использование кабелей с более высоким уровнем изоляции. При этом аппаратура, присоединяемая к этим кабелям, также должна обладать повышенным уровнем изоляции.

(G. Jancke, B. Holmgren, G. A. Pettersson, P. Akerlind. CIGRE, доклад № 338, 1954).

Инж. А. И. Гершенгорн

„ХАМПСОН“



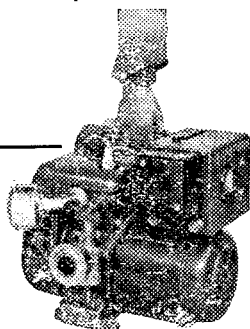
АВТОНОМНЫЕ ГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

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.

Ст $\frac{1}{2}$ до 500 квт.

На фотографии внизу агрегат портативного типа



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 РЕДАКЦИИ

В связи с запросами некоторых читателей о значении применяемой в реферативных карточках классификационной индексации, редакция ниже напоминает о пояснении, данном в № 1, 1955 г., стр. 79.

Проставляемая в верхнем правом углу каждой карточки цифра является классификационным индексом, соответствующим определенному тематическому разделу электротехнической литературы. Индексы облегчают читателям, ведущим картотеку, определять карточки:

1. Теоретическая электротехника.
2. Производство и распределение электроэнергии.
3. Машины, трансформаторы.
4. Аппараты, приборы, измерения.
5. Применение электроэнергии.
6. Электротехнические материалы и кабели.
7. История электротехники.

О РАЗВИТИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БИБЛИОГРАФИИ

Одним из важных источников, содействующих научным и инженерно-техническим работникам в выполнении ими задач по внедрению в производство новой техники, является отечественная и иностранная техническая литература. Одной из действенных форм научно-технической пропаганды и средств облегчения читателям соответствующих поисков литературы служит библиография. Известно, что на выявление необходимой литературы и предварительное ознакомление с ней научные и инженерно-технические работники и особенно учащиеся и аспиранты затрачивают много времени. В связи с быстрым развитием современной науки и техники жизнь настоятельно предъявляет все более высокие требования к библиографии и, в частности, к информационной библиографии. И, несмотря на это, приходится констатировать, что в данное время мы все еще не имеем хорошо поставленной информации об энергетической и электротехнической литературе в целом. Институт научной информации Академии наук СССР до сего времени еще не выпустил ни одного номера реферативного журнала по электротехнике, а издающиеся этим Институтом рефераты по смежной с техникой литературе (физика, механика и т. д.) недопустимо запаздывают (в среднем разрыв между публикацией литературы и рефератов достигает года).

В области электротехники, начиная с 1945 г., ЦБТИ Министерства электротехнической промышленности издается совершенно незначительным тиражом ежемесячный информационный бюллетень «Указатель технической литературы (аннотации)», в котором далеко неполно учитывается соответствующая отечественная и зарубежная литература. Электротехнические научно-исследовательские институты, электротехнические кафедры вузов (за исключением ВЭИ), ВНИТО энергетиков, отраслевые библиотеки почти совсем не занимаются вопросами библиографической информации по электротехнике и ее отдельным отраслям.

Всесоюзный заочный энергетический институт издает информационно-библиографические указатели, составленные кафедрой электротехнических материалов и кабельной техники (под ред. Б. М. Тареева) и кафедрой электрификации промышленных предприятий (под ред. И. И. Пет-

рова). Эти указатели выходят 2 раза в год и рассчитаны на студентов, слушателей факультета усовершенствования инженеров и аспирантов ВЭИ, научных и инженерно-технических работников предприятий и научно-исследовательских институтов, связанных с ВЭИ договорами о творческом содружестве; они могут быть полезны также для всех, интересующихся указанными отраслями техники. Особенно ценны такие указатели для читателей, проживающих на периферии и учащихся-заочников. В указателях ВЭИ даны либо описательные аннотации, определяющие тему книги или статьи, либо так называемые реферативные аннотации, которые раскрывают содержание наиболее ценных и интересных работ. Точность научных и технических определений или формулировок в аннотациях обеспечивается тем, что аннотирование производится научными работниками кафедр, т. е. непосредственно специалистами данных отраслей техники. Очень ценно, что в ряде случаев аннотации содержат элементы критики или оценки, указания читателям о назначении работы и отмечают наличие библиографии. Эти в целом хорошо составленные указатели не лишены и некоторых недостатков. Основным является отсутствие в них информации о зарубежной литературе.

В передовой статье газеты «Правда» от 20 января 1955 г. было отмечено, что «...ученый не может не обогащать свое творчество опытом зарубежной науки, критически осваивая и подвергая дальнейшей разработке все ценное, что создано современной наукой». В связи с этим исключительное значение имеет хорошо организованная информация о достижениях науки и техники». Надо полагать, что составители и издатели рассмотренных и других библиографических указателей учтут это.

Примеру ВЭИ должны последовать многие научно-исследовательские и учебные заведения, а также ЦБТИ министерств электростанций и электротехнической промышленности; с учетом приведенных выше замечаний они должны активнее развивать службу библиографической информации.

*Главный библиограф Центральной
политехнической библиотеки*

М. А. Раевская



Хроника

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЮ ПРОМПРЕДПРИЯТИЙ

В феврале 1955 г. ВНИТОЭ было проведено в Ленинграде всесоюзное научно-техническое совещание по вопросам электроснабжения промпредприятий. На совещании присутствовало 455 представителей министерств, предприятий, энергосистем, проектных и монтажных организаций, учебных заведений, научно-исследовательских институтов из различных городов страны.

Во вступном докладе «Современное состояние и основные задачи в области электроснабжения промышленных предприятий» инж. Г. В. Сербиновский (Госинспекция по промэнергетике и энергонадзору МЭС) проанализировал существующие схемы электроснабжения, осветил вопросы магистрального питания, внедрения автоматики и телемеханики, применения глубоких вводов 35...110 кВ, вопросы эксплуатации сетей и подстанций промпредприятий.

Инж. А. А. Ермилов (ГПИ Тяжпромэлектропроект) посвятил свой доклад рассмотрению категорий потребителей электроэнергии с точки зрения обеспечения бесперебойности электроснабжения их в связи с пересмотром Правил устройства. Докладчик считает возможным большее использование перегрузочной способности электрооборудования в аварийных режимах; он обратил внимание на необходимость сочетания степени резервирования электрического и технологического оборудования и введения автоматической разгрузки при авариях.

Современные рациональные схемы электроснабжения промпредприятий были рассмотрены в докладе кандидата техн. наук М. К. Харчева (Ленинградское отделение ГПИ Тяжпромэлектропроект). Для электроснабжения предприятий со значительными нагрузками, ориентированными по одному или небольшому числу направлений, докладчик рекомендовал распределение энергии шинпроводами, что упрощает схемы электроснабжения, увеличивает их надежность и позволяет заменить медь в кабелях голыми алюминиевыми проводниками.

Делегаты, выступавшие в прениях по вопросам схем электроснабжения, указывали на ряд недочетов в этой области: затяжку с разработкой ГОСТ на номинальные напряжения, отсутствие типовых схем электроснабжения и конструкций подстанций и сетей промышленных установок, задержку выпуска новой редакции раздела Правил «Электроснабжение промышленных предприятий». Указывалось на необходимость разработки нормативов перегрузки оборудования и кабелей. Ряд делегатов указывал, что Правила устройства и инструктивные материалы рассчитаны в основном на крупные предприятия и не учитывают особенностей большого количества предприятий малой и даже средней мощности.

Вопросам внедрения автоматики в системе электроснабжения промпредприятий, в частности в сетях низкого напряжения, был посвящен доклад инж. Г. Р. Миллера (Ленинградское отделение ГПИ Тяжпромэлектропроект), который рассмотрел

вопросы самопуска электродвигателей в связи с увязкой по времени действия релейной защиты с АВР и АПВ.

Инж. Ю. М. Захаров (Харьковское отделение ГПИ Тяжпромэлектропроект) и инж. М. Н. Левин (Киевское отделение ГПИ Электропроект) поделились опытом внедрения телемеханики в системы электроснабжения промпредприятий. При этом указывалось на необходимость промышленного освоения многоканальных систем телеуправления, имеющих ряд преимуществ при ограниченных расстояниях на площадках промпредприятий.

Большое внимание совещанием было уделено вопросам анализа и расчета нагрузок электрических сетей промпредприятий. Был заслушан доклад кандидата техн. наук Г. М. Каялова (Новочеркасский политехнический институт) и выступления ряда делегатов. Подвергались критике применяемые в настоящее время двучленные формулы, предложенные Д. С. Лившицем. Однако предложенный Г. М. Каяловым метод расчета нагрузок¹ не был рекомендован совещанием для практического применения впредь до его доработки. Делегаты отмечали необходимость усиления работы по обследованию нагрузок промпредприятий, дающим основной материал для доработки методов их подсчета.

Инж. С. М. Лившиц (ГПИ Тяжпромэлектропроект) сделал сообщение о применении кольцевых ящиков (КЯ) в магистральных системах электроснабжения. Ящики КЯ подготавливаются к выпуску заводами МЭП СССР.

Вопросам повышения надежности электроснабжения промпредприятий и опыту противоаварийной работы были посвящены доклады и сообщения кандидата техн. наук А. А. Тайца (Центроэнергочермет), инж. Н. Ф. Пшеничного (Автозавод им. В. М. Молотова), инж. Я. О. Эпштейна (Запорожсталь) и инж. Н. Ф. Тихонова (Челябинский тракторный завод).

Вопросы улучшения эксплуатации были затронуты в ряде выступлений делегатов. При этом резкой критике были подвергнуты отдельные предприятия электропромышленности за недостаточный выпуск ряда изделий: синхронных двигателей, статических конденсаторов, автоматов, контакторов, кабельной гарнитуры, комплектных РУ и КТП, грузовых и пружинных приводов и приводов на переменном токе, выключателей для электропечей, оборудования телемеханики и др., а также за неудовлетворительное качество некоторых изделий (приводов к выключателям, предохранителей и др.).

В докладе «Пути использования электрической мощности промпредприятий в целях мобилизации внутренних энергетических ресурсов» председатель Комитета электроснабжения ВНИТОЭ инж. А. А. Принцев (Энергосбыт Ленэнерго) сообщил о результатах обследования ряда предприятий. Обследования имели целью выявление основных показателей: средневзвешенного коэффициента мощности, коэффициента неравномерности суточных графиков электрической нагрузки предприятий и степени неравномерности суточного потребления электроэнергии в течение месяца, связанной с недостаточной ритмичностью работы. Обследование и анализ показали, что при тех же трансформаторных мощностях за счет улучшения со стороны предприятий может быть дополнительно введен в действие ряд новых приемников электроэнергии значительной мощности. Снижение же потребления энергии только на 1% в дневную и вечернюю смены с соответствующим увеличением потребления энергии в ночную смену на 2% дает возможность существенно снизить максимум нагрузки в энергосистеме.

На совещании были заслушаны также сообщения Министерства электротехнической промышленности о выпуске низковольтных аппаратов (инж. П. В. Сахаров) и синхронных двигателей (инж. С. Г. Артанов), сообщение инж. Ю. Л. Мукосеева (Горьковское отделение ГПИ Электропроект) о шинопроводах с уравновешенным магнитным полем и сообщение М. И. Киреева (Госэнергонадзор МЭС) о ходе переработки Правил устройства и Правил технической эксплуатации промпредприятий.

В решении совещания отмечено, что в проектировании

и осуществлении электроснабжения промышленных предприятий имеется еще ряд недостатков и нерешенных вопросов. Совещание постановило обратиться в Комитет по делам строительства с просьбой дать указания о разработке и утверждении типовых схем и конструкций в области электроснабжения промпредприятий с учетом особенностей различных отраслей промышленности и внедрения экономичных и индустриальных решений. Совещание решило обратить внимание Комитета на то, что промышленные министерства при реконструкции существующих энергоустановок и строительстве новых не обращают должного внимания на правильный выбор энергоносителей.

Совещание признало необходимым дальнейшее внедрение автоматизации и телемеханики в системы электроснабжения промпредприятий. Решено просить Главэлектро-монтаж Минметаллургомстрой провести экспериментальные работы по исследованию самопуска синхронных и асинхронных электродвигателей в условиях последовательного действия релейной защиты, АПВ и АВР разных ступеней и разработку на их основе руководящих указаний.

С целью ускорения выпуска указаний по расчету нагрузок признано необходимым наряду с теоретической доработкой расширить производство обследований нагрузок действующих предприятий (МЭС, Главэлектро-монтаж и производственные министерства).

В решении указано на необходимость организации районных пуско-наладочных лабораторий на хозрасчете, главным образом для обслуживания предприятий небольшой мощности, не имеющих собственных лабораторий и опытного персонала.

Ряд замечаний в отношении номенклатуры и качества изделий адресован совещанием Министерству электропромышленности.

Совещание заслушало сообщение, посвященное одному из крупных специалистов в области теории и практики электроснабжения промпредприятий, автору ряда трудов в этой области А. С. Либерману, в связи с годовщиной его смерти, и почтило его память вставанием.

Совещанием был избран новый состав Комитета электроснабжения ВНИТОЭ в составе 70 чел., в который вошли представители местных организаций ВНИТОЭ. Председателем Комитета избран инж. А. А. Принцев, ученым секретарем — кандидат техн. наук М. К. Харчев.

Инж. М. Р. Найфельд

ВОПРОСЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В октябре 1954 г. состоялось объединенное заседание кафедр техники высоких напряжений и организации и планирования энергетики Ленинградского политехнического института им. Калинина для обсуждения вопросов, связанных с расчетами технико-экономических показателей дальних электропередач. В заседании приняли участие представители проектных и эксплуатирующих организаций, а также ряда кафедр Ленинградского политехнического института им. Калинина и Ленинградского инженерно-экономического института им. Молотова.

Были заслушаны доклады В. В. Болотова (ЛПИ) «Определение себестоимости потерь энергии в технико-экономических расчетах при проектировании дальних электропередач», Г. Л. Госпитальник (Ленинградский филиал Гидропроекта) «К вопросу об определении эффективности дальних электропередач», С. Н. Никогосова (ЛИЭИ) «Об уточнении амортизационных отчислений в дальних электропередачах» и В. А. Смирнова (ЛПИ) «Обоснование размера ежегодных расходов при проектировании дальних электропередач 220...400 кв». В дискуссии приняли участие: К. М. Великанов (ЛПИ), Л. Д. Наумовский (Ленэнерго), А. А. Морозов (ЛПИ), И. Ф. Половой (ЛПИ), Б. И. Розенберг (ЛПИ) и А. Н. Филимонов (Ленинградский филиал Гидропроекта).

Ниже приводится краткое содержание результатов обсуждения.

Сооружение гидроэлектростанций на Волге (Куйбышевской и Сталинградской) оказалось тесно связанным с проблемой дальних электропередач, поскольку для распре-

¹ Электричество, № 4, 1951 и № 3, 1953.

деления энергии этих станций потребовалось сооружение линий передачи в Московский промышленный район и другие удаленные районы. При освоении гидроэнергетических ресурсов Сибири вопросы распределения электроэнергии приобретают еще большее значение ввиду больших мощностей проектируемых там гидроэлектростанций и, следовательно, больших радиусов распределения электроэнергии.

По мере увеличения дальности передачи энергии капитальные затраты на передачу 1 кВт мощности становятся соизмеримыми с затратами на 1 кВт установленной мощности электростанции, а себестоимость передачи 1 кВтч энергии от электростанции к потребителям начинает составлять значительную долю в себестоимости электроэнергии на шинах потребителей. В этих условиях целесообразность постройки электростанций зависит от технико-экономических показателей дальних электропередач. Важная роль при этом принадлежит учету стоимости потерянной энергии и ежегодных расходов, размер которых сильно сказывается как на оценке себестоимости энергии, обеспечиваемой на шинах потребителей, так и на выборе технических параметров электропередач.

Вопрос учета стоимости потерянной энергии был в основном рассмотрен в докладе В. В. Болотова.

В дискуссии нашло полную поддержку основное положение доклада о том, что при проектировании дальних электропередач стоимость потерянной энергии должна приниматься различной в зависимости от того, какая задача решается: определяется себестоимость энергии, обеспечиваемой гидроэлектростанцией на шинах потребителей, или выбираются технические параметры электропередачи.

Пусть c_1 — себестоимость энергии на шинах электростанции; A — энергия, отпускаемая ежегодно станцией для передачи; ΔA — потери энергии в электропередаче; I — общая сумма ежегодных расходов по передаче энергии (амортизация, текущий ремонт и обслуживание). Тогда c_2 — себестоимость энергии на шинах потребителя (в конце электропередачи) определится следующим образом:

$$c_2 = \frac{c_1 A + I}{A - \Delta A}.$$

Себестоимость передачи энергии

$$c_n = c_2 - c_1 = \frac{I + c_1 \Delta A}{A - \Delta A}.$$

Из последней формулы следует, что для получения себестоимости 1 кВтч энергии, обеспечиваемой электростанцией у потребителей, энергия, потерянная в электропередаче, должна учитываться по ее себестоимости на шинах электростанции.

Иначе приходится подходить к учету стоимости потерянной энергии в технико-экономических расчетах по выбору технических параметров электропередачи.

Себестоимость передачи энергии в этом случае не имеет самостоятельного значения как экономический показатель, поскольку сооружение линии задано. Учет стоимости потерь нужен лишь для определения различия ежегодных расходов в сопоставляемых вариантах, отличающихся по тому или иному параметру, и экономического сопоставления этих вариантов. При этом к оценке ежегодных расходов необходимо подходить с точки зрения народного хозяйства в целом, исходя из анализа возможных путей компенсации увеличения потерь мощности и энергии, имеющего место при переходе от одного варианта к другому.

Объединенное заседание в своем решении рекомендует при выполнении технико-экономических расчетов, имеющих целью выбор параметров магистральной электропередачи, учитывать обусловленные потерями энергии и мощности в линии затраты по стоимости установленного киловатта и по себестоимости электроэнергии на заменяющей конденсационной электростанции в той системе (передающей или приемной), в которой эти показатели ниже.

Вопросы размера ежегодных расходов на амортизацию и обслуживание линии электропередачи были рассмотрены в докладах С. Н. Никогосова и В. А. Смирнова. Материалы докладов показали, что принятые в системе Министров электростанций для установления годовых издержек при эксплуатации и технико-экономических расчетов при проектировании дальних электропередач нормы амортизации воздушных линий электропередачи в размере 6%

необоснованно завышены. Они не могут быть оправданы ни сроками физического износа линии, ни сроками службы до момента, когда потребность в электропередаче может отпасть.

Первая в нашей стране линия 220 кв Свирь — Ленинград была введена в эксплуатацию в 1932 г. По мнению Ленэнерго не может быть никаких сомнений в том, что эта линия будет работать еще 25...30 лет. Хорошо сохранились также металлические опоры, провода и изоляторы на линиях 110 кв, построенных Волховстроем 30 лет назад. Опыт эксплуатации Ленэнерго, Мосэнерго, Донбассэнерго и Уралэнерго показывает, что линии электропередачи на металлических опорах, за исключением проходящих в местах с вредным химическим загрязнением атмосферы, могут надежно работать не менее 40...50 лет.

Анализ ежегодных затрат на капитальный ремонт линий 220 кв Свирь — Ленинград за длительное время показал, что они составляют менее 0,4% балансовой стоимости этих линий или менее 0,25% их сметной стоимости, исчисленной по укрупненным показателям в ценах 1950 г. Анализ ежегодных затрат по линиям 110 и 200 кв на металлических опорах в двух высоковольтных районах Мосэнерго и двух высоковольтных районах Ленэнерго за период с 1951 по 1953 г. показывает, что ежегодные расходы на капитальные ремонты составляли от 0,5 до 1,0% балансовой стоимости линии.

По этим же данным эксплуатационные расходы (включая текущий ремонт) колеблются в пределах от 3 до 1% балансовой стоимости линии. Они в основном определяются содержанием обслуживающего персонала. С повышением номинального напряжения численность обслуживающего персонала увеличивается медленнее, чем стоимость линии. Поэтому нормы эксплуатационных расходов снижаются.

Объединенное заседание рекомендовало для проектных расчетов в качестве первой попытки уточнения следующие цифры ежегодных отчислений в процентах сметной стоимости дальних передач:

Всего на амортизацию (в среднем)	3,0
В том числе капитальный ремонт	0,5...1
Эксплуатационные расходы (включая текущий ремонт):	
при напряжении 220 кв	1,5
при напряжении 400 кв	1,0

Желательно продолжение работы по анализу опыта эксплуатации для дальнейшего уточнения приведенных норм ежегодных отчислений.

Доктор техн. наук, проф. В. В. Болотов,
старший научный сотрудник И. Ф. Половой

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ В ОДЕССКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

В феврале т. г. в Одесском политехническом институте состоялась XVI научно-техническая конференция. В работе *электротехнической секции* приняли участие представители местных вузов и промышленных предприятий. На заседаниях секции были заслушаны и обсуждены доклады научных работников Электротехнического факультета ОПИ.

В докладе инж. В. И. Артеменко «Работа однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя на встречную э. д. с. при наличии индуктивности до выпрямителя и в цепи нагрузки» рассмотрены физические процессы при работе выпрямителя в режимах прерывистого и непрерывного тока, введены аналитические зависимости для определения мгновенных и средних значений тока нагрузки, а также для установления границы режима прерывистого и непрерывного тока.

В докладе «Схема регулирования скорости коллекторных двигателей посредством магнитных усилителей» В. И. Артеменко сообщил о результатах исследования схемы автоматического управления коллекторным двигателем малой мощности, позволяющей получить жесткие регулировочные характеристики и значительно сократить продолжительность переходных процессов.

Кандидат техн. наук, доц. М. Е. Лукишкер посвятил свой доклад «Повышение пропускной способности линий электрических сетей» вопросам применения схемы каскадного включения вольтодобавочных трансформаторов для повышения пропускной способности электрических сетей.

Инж. А. Е. Чесноков выступил с докладом «Резонанс n -ного рода в электромеханической колебательной системе», в котором установлены условия возникновения дробночастотных колебаний и влияние различных факторов на величину частоты их в электромагнитном вибраторе, состоящем из механической колебательной системы и электрического колебательного контура.

Инж. Л. П. Петров в докладе «Тензометрический метод измерения моментов асинхронных двигателей» предложил метод нахождения экспериментальных механических характеристик двигателей при помощи тензометрического датчика. Метод позволяет производить измерение и запись моментов при любом законе изменения скорости двигателя.

В докладе «Регулирование скольжения двухскоростного асинхронного двигателя» кандидат техн. наук, доц. Л. В. Волянский рассмотрел работу двухскоростного асинхронного двигателя с двумя обмотками в статоре и роторе (обмотки ротора включены последовательно и присоединены к общим кольцам).

В докладе кандидата техн. наук, доц. В. С. Дирацу «Метод магнитной сепарации для экспериментального определения усилий в проволоках стальных канатов» (сделанном на заседании механико-технологической секции) изложены результаты исследований автора по экспериментальному определению распределения механических напряжений в стальных канатах электромагнитным методом.

На электротехнической секции был заслушан также доклад главного конструктора ленинградского завода «Электроаппарат» Л. К. Грейнера о работах завода по созданию нового высоковольтного электрооборудования.

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

КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ В СВЕРДЛОВСКЕ

Конференция состоялась 27 января 1955 г. по инициативе Свердловского отделения ВНИТОЭ и редакционной коллегии журнала «Электричество». В работе конференции участвовали представители промышленности, энергосистемы, научно-исследовательских институтов, высших учебных заведений, проектных институтов, монтажных и других организаций, всего около 100 чел.

Доклад о деятельности журнала «Электричество» сделал член редакционной коллегии доктор техн. наук, проф. Г. В. Буткевич. В докладе были освещены: вопросы направления и содержания журнала, показатели деятельности журнала за 5 лет, основные задачи и дальнейшие перспективы издания. Докладчик, а также и читатели, выступавшие в дискуссии, отмечали, что некоторые из опубликованных статей были трудными по своему изложению ввиду перегруженности трюмоздкими математическими выкладками; отдельные статьи были мало полезны ввиду недостаточной практической значимости их. Докладчик отметил слабое участие в журнале авторов с периферии, в частности из Свердловска и Урала. Редакция не

один раз обращалась к заводским и научным коллективам Свердловска и Урала с предложениями о представлении статей, но отклики на эти предложения никак нельзя считать удовлетворительными.

В обсуждении работы журнала приняли участие инж. З. Б. Нейман (завод Уралэлектроаппарат), кандидат техн. наук, доц. Г. П. Кропачев (Уральский политехнический институт), инж. П. М. Чудновский (Свердловское отделение ГПИ Тяжпромэлектропроект), доктор техн. наук, проф. С. А. Волотковский (Свердловский горный институт), инж. В. А. Караман (Техотдел Уралэлектромонтажа), инж. Е. М. Глух (завод Уралэлектроаппарат), инж. В. Н. Блинова (Главуралэнерго), кандидат физ.-матем. наук Н. М. Родигин (Уральский филиал Академии наук СССР), кандидат техн. наук, доц. В. А. Шубенко и доктор техн. наук, проф. М. М. Аюдис (Уральский политехнический институт).

Читатели отмечали, что в интересах развития науки и техники, для свободного обмена мнениями между различными школами и направлениями редакции необходимо расширить круг рецензентов, привлекая в большей мере научных работников и инженеров, работающих на периферии.

Выступавшие отмечали улучшение журнала за последние несколько лет. Вместе с тем указывалось, что не все актуальные вопросы получают должное освещение на страницах журнала. В последнее время, например, недостаточно освещались вопросы: методики расчета и конструирования электрических машин и аппаратов, электрического привода и разнообразного применения электричества в промышленности и сельском хозяйстве, крупного энергетического строительства, релейной защиты, автоматики и телемеханики, применения новых изоляционных и магнитных материалов, полупроводников, методики испытаний и исследований в различных областях электротехники и измерительной техники, вопросы электротермии. Конечно, один электротехнический журнал «Электричество» не в состоянии удовлетворить полностью широкие и разнообразные требования инженерно-технической и научной общности всех отраслей электротехники. Большое количество инженеров, работающих по проектированию, монтажу и эксплуатации электрического привода в промышленности, на транспорте и в других отраслях народного хозяйства, испытывают нужду в специальном органе периодической печати, в котором освещались бы новейшие достижения и передовой опыт в этой области.

Отмечалось, что за последние годы в журнале значительно увеличилось количество дискуссий. Необходимо следить за тем, чтобы подводились итоги дискуссий в виде мнения редакционной коллегии или же других авторитетных организаций и лиц.

Указывалось, что в журнале должна даваться глубокая физическая трактовка рассматриваемых явлений и процессов и инженерные методы анализа и расчета схем и устройств; журнал должен в большей степени освещать новые достижения в различных областях электротехники, периодически давать обзоры современного состояния электротехники и статьи, обобщающие соответствующий опыт теории и практики.

Конференция рекомендовала Свердловскому отделению ВНИТОЭ добиться более активного участия свердловских и уральских электротехников в работе журнала.

Инж. Х. П. Хирвонен
Свердловское отделение ВНИТОЭ



ПРОФЕССОР Е. В. НИТУСОВ

К 60-летию со дня рождения и 35-летию научно-педагогической деятельности

Общественность Московского энергетического института им. Молотова недавно отметила юбилей доктора техн. наук, проф. Евгения Васильевича Нитусова.

Е. В. Нитусов родился в 1895 г. в г. Рязке в семье мелкого ремесленника по ремонту сельскохозяйственных машин. Среднее образование он получил в Московском комиссаровском техническом училище. В 1920 г. Е. В. Нитусов окончил Московское высшее техническое училище (МВТУ) по Электротехническому факультету со званием инженера-электрика и был оставлен на этом факультете для подготовки к научной и педагогической деятельности.

В 1921 г. Евгений Васильевич был привлечен К. И. Шенфером к участию в организации и к работам Государственного экспериментального электротехнического института (ныне ВЭИ им. Ленина) по отделу электрических машин и аппаратов. В этом институте за период 1921—1935 гг. Е. В. Нитусовым было выполнено значительное число исследований и разработок в области электрических машин для электросварки и для электрической тяги.

Одновременно Е. В. Нитусов вел в Московском энергетическом институте им. Молотова большую педагогическую работу по теоретической электротехнике и по общим и специальным курсам электрических машин. Он принимал также деятельное участие в создании отечественной учебной литературы по электротехнике в качестве автора, переводчика и научного редактора ряда изданий. В 1933—1935 гг. Е. В. Нитусов был деканом Электромеханического факультета МЭИ.



Работая вначале под руководством К. И. Шенфера, а затем самостоятельно, Е. В. Нитусов стремился охватить в своей научной работе разнообразные вопросы электромашиностроения: коммутацию машин постоянного тока, особые режимы асинхронных машин, специальные машины постоянного и переменного токов.

В 1940 г. Е. В. Нитусову была присвоена ученая степень доктора технических наук и он был утвержден в ученом звании профессора кафедры электрических машин. Широкий технический и теоретический кругозор Е. В. Нитусова позволил ему успешно вести научную и педагогическую работу не только по электрическим машинам, но и в смежных областях — по электрическому приводу, теоретическим основам электротехники и общей электротехнике. В течение ряда лет он возглавлял кафедры по этим дисциплинам в высших учебных заведениях.

За 35 лет научно-педагогической деятельности Е. В. Нитусов подготовил большое количество молодых научных работников, которые под его руководством выполнили и успешно защитили кандидатские диссертации по вопросам электромашиностроения и электрического привода.

За долголетнюю успешную работу в высшей школе профессор Е. В. Нитусов был награжден в 1951 г. орденом Ленина.

**М. Г. Чиликин, А. Н. Ларионов, Г. Н. Петров,
В. В. Мешков, А. Т. Голован, Н. Е. Лысов,
В. С. Пантюшин, Н. С. Курбатова, В. А. Смирнов**

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН**(14.3.1879 — 18.4.1955)**

Умер Альберт Эйнштейн — один из создателей современной физики, мыслитель, которого В. И. Ленин отнес к числу «великих преобразователей естествознания», ученый, пользовавшийся глубочайшим уважением всего научного мира, всего передового человечества.

Эйнштейн родился в Ульме (Германия) 14 марта 1879 года, детство до 14 лет провел в Германии, затем до 1910 года жил в Швейцарии. Здесь он получил высшее образование, но не был оставлен при кафедре для научной деятельности. После кратковременной преподавательской работы он поступил в Патентное бюро в Берне и вплоть до 1909 года, когда он получил профессию в Цюрихском университете, совмещал свою службу с научной работой. В 1911—1912 гг. Эйнштейн был профессором университета в Праге, в 1913 году был избран членом Прусской академии наук, с 1914 года читал лекции в Берлинском университете вплоть до прихода к власти фашистов. Вынужденный эмигрировать, Эйнштейн поселился в Принстоне (США), где и жил до своей смерти. Эйнштейн был членом академий наук различных стран. В 1926 году он был избран почетным иностранным членом Академии наук СССР.

Свое научное творчество Эйнштейн начал еще в 1901 году, и на период 1901—1906 гг. приходится цикл его работ по обоснованию физической статистики и теории броуновского движения. В 1905 году Эйнштейн публикует свою знаменитую теорию относительности (так называемая специальная теория относительности), значение которой трудно переоценить. Впервые после двухсот лет господства законов классической механики, вопреки утвердившемуся

в науке метафизическому представлению о всеобщности этих законов, была показана их ограниченность. Новая теория подтвердила, что известные нам на каждом этапе развития науки законы не являются окончательной истинной, по мере появления новых опытных фактов они могут менять свой характер.

Теория относительности легла в основу последующего развития физики. Ее конкретное содержание — учение об особенностях движений, происходящих при скоростях, сравнимых со скоростью света, — сыграло крупнейшую роль в развитии физики атома и физики ядра и необходимо для современной ядерной физики так же, как строительная механика для техники.

Специальная теория относительности была сформулирована 25-летним ученым с необычайной ясностью и полнотой уже в первой статье. 50-летие этого события весь научный мир отмечает в этом году.

Впоследствии (в 1916 году) Эйнштейн создал так называемую общую теорию относительности, частным случаем которой является специальная теория. Общая теория относительности имеет фундаментальное значение для проблем космогонии. Отдельные ее замечательные предсказания были подтверждены в ряде астрономических наблюдений. Эйнштейну принадлежит также труд фундаментального значения по квантовой теории света и по квантовой статистике. Эйнштейн выдвинул представление о световом потоке как о совокупности квантов света (фотонов) и тем сразу внес ясность во множество экспериментальных фактов, имеющих основополагающее значение и для ряда

технических проблем (фотоэффект, люминесценция и др.). Введенные Эйнштейном квантовые представления о процессах излучения и поглощения света, квантовая теория теплоемкости твердых тел и новая квантовая статистика составляют важнейшую часть современной физики.

Труды Эйнштейна имеют столь большое значение, что реакционные философы, по словам В. И. Ленина, «стремятся уцепиться за Эйнштейна» и извратить материалистическое содержание теории относительности. Сам Эйнштейн в своих философских высказываниях допускал уступки идеализму. Однако это не может и не должно заслонить от нас выдающееся значение его работ.

Последние десятилетия жизни Эйнштейна были в на-

учной области заполнены дальнейшей разработкой общей теории относительности. В это же время развернулась его общественная деятельность.

Эйнштейн не замыкался в узкие рамки научной работы и горячо откликался на вопросы, волнующие передовое человечество. Эйнштейн был противником войны и использования атомного оружия.

Советские ученые чтут память выдающегося ученого Альберта Эйнштейна.

Академики: **А. Н. Несмеянов, А. В. Топчиев, А. Ф. Иоффе, П. Л. Капица, М. А. Лаврентьев, Д. В. Скобельцын, В. А. Фок.**



Библиография

ЕЩЕ О КНИГЕ „ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ“

(Электричество, № 8, 1954)

В рецензии, опубликованной в № 8 журнала, о книге коллектива авторов под редакцией проф. Л. И. Сиротинского сказано, что «рецензируемые книги представляют собой содержательный учебник с большим фактическим экспериментальным и теоретическим материалом». Однако это заключение никак не вытекает из всего текста рецензии, от которого остается впечатление, будто бы рецензируемая книга плоха. Я полагаю, что это неверное впечатление следует рассеять, так как рассматриваемые книги заслуживают и хорошего освещения и положительной оценки.

Ниже я останавливаюсь на содержании наиболее мне близкого второго выпуска книги. Попутно придется остановиться и на некоторых замечаниях рецензентов. Останавливаться на всех замечаниях рецензентов нет необходимости уже и потому, что большинство их было рассмотрено в опубликованном ответе авторов и редактора.

Рассматриваемое второе издание книги значительно расширено по сравнению с первым изданием, в котором не было разделов: а) высоковольтные конденсаторы; б) изоляция силовых трансформаторов; в) изоляция вращающихся машин высокого напряжения; г) методы профилактики высоковольтной изоляции. Книга приобрела большую цельность и лучше охватила вопросы изоляции высоковольтных устройств.

Глава I книги является, по существу, введением. Она посвящена в основном рассмотрению вопроса об уровнях изоляции и испытательных напряжениях. Этот вопрос не может, конечно, рассматриваться вне связи с вопросом о перенапряжениях в устройствах высокого напряжения. Естественно, что последний вопрос не рассмотрен здесь сколько-нибудь подробно — ему будет посвящена третья часть книги. Но дать краткие сведения о видах перенапряжений и предельных возможных их величинах безусловно полезно. Иначе было бы невозможно обосновать принятые в СССР уровни изоляции и испытательные напряжения, являющиеся основой проектирования всех изоляционных конструкций высокого напряжения. Поэтому я не вижу оснований согласиться с замечаниями рецензентов по этой главе.

Глава II посвящена высоковольтным изоляторам. Содержание этой главы значительно пересмотрено и обновлено по сравнению с первым изданием. Описанные в этой главе типы и конструкции изоляторов и их арматуры являются за редкими исключениями современными советскими конструкциями. Это описание достаточно хорошо иллюстрировано чертежами изоляторов и дает ясное представление об основных конструктивных типах изоляторов. Вместе с описаниями конструкций даны и некоторые элементы расчета. По поводу этой главы заметим лишь, что при изложении вопроса о защитной арматуре пирлянд автор считает возможным осуществить арматуру, обеспечивающую бескасадный разряд при импульсах. В настоящее время эта точка зрения как общее правило не может быть принята. Следовало бы, далее, коснуться применения этой арматуры на колонках опорных изоляторов. Здесь есть некоторые особенности, о которых было бы полезно упомянуть.

Глава III рассматривает высоковольтные конденсаторы. Наиболее подробно рассмотрены бумажно-масляные конденсаторы, широко применяемые при высоких напряжениях. Автор останавливается на вопросах электрической прочности и потерь в них, рассматривает устройство и расчет емкости секций конденсаторов, нагревание конденсаторов и их конструкцию. Нам представляется, что автор успешно справился со своей задачей и дал сжатое, но ясное и находящееся на современном уровне представление о конденсаторах высокого напряжения. По поводу этой главы можно сделать только одно замечание. На стр. 79 автор указывает, что «напряженности при номинальном напряжении должны лежать ниже коронных и могут лишь незначительно превышать напряженности начала ионизации». По современным представлениям напряженности начала ионизации должна быть значительно выше рабочей напряженности изоляции конденсатора.

Главы IV и V трактуют вопросы изоляции и конструкции кабелей высокого напряжения. Материал этих глав несколько переработан и обновлен по сравнению с тем, что было в первом издании книги, в частности, исключены вопросы о нагревании кабелей и об особенностях одножильных кабелей, а взамен отмечены особенности работы изоляции кабелей при постоянном напряжении. Заслуживает упоминания появление в книге значительного количества новых данных (таблиц, диаграмм) по материалам и электрическим характеристикам кабелей, а также увеличение сведений по новым типам кабелей (газонаполненные кабели, кабели под давлением масла). Едва ли, однако, правильно то, что при наличии в книге особой главы, посвященной профилактике изоляции, в рассматриваемой (V) главе имеется параграф (5—6), посвященный профилактическим испытаниям и контролю кабелей в эксплуатации. Этот параграф целесообразнее было бы перенести в главу IX.

Главы VI и VII посвящены изоляции силовых трансформаторов. Эти главы в большей своей части рассматривают вопросы электрической прочности масла и лишь в значительно меньшей части — специфические вопросы изоляции трансформаторов. Вопросы электрической прочности масла было бы более целесообразно перенести в первую часть книги. Такое расположение материала является более правильным потому, что масляная изоляция применяется не только в трансформаторах, но также в выключателях. В ином положении находится бумажно-масляная изоляция кабелей и конденсаторов. Она имеет свои серьезные особенности, существенно отличающие ее от чисто-масляной и масло-барьерной изоляции. Поэтому рассмотрение характеристик бумажно-масляной изоляции в главах о кабелях и конденсаторах может быть оправдано.

Большое количество весьма ценного и нужного экспериментального материала, помещенного в главах VI и VII, в большей части повторяет первое издание книги. Однако есть и новый, очень полезный материал, в частности — временные характеристики масляной и масло-барьерной изоляции. Нельзя согласиться с рецензентами, что этот материал

излишен. Он очень нужен студентам не только при изучении теории, но особенно при курсовом и дипломном проектировании.

Последний параграф главы VII носит название «конструкция изоляции силовых трансформаторов». Это название не совсем точно. По существу дело идет здесь о схемах изоляционных конструкций и нормах на изоляционные расстояния. Приведенные нормы являются нормами, принятыми на Московском трансформаторном заводе. К сожалению, они приводятся без всякого обоснования.

Оригинальной является разработанная автором номограмма для определения размеров межкатушечной изоляции.

В главе VIII рассматривается изоляция вращающихся машин высокого напряжения. Дав краткие сведения о материалах, применяемых для изоляции статорных обмоток, автор затем несколько подробнее останавливается на устройстве этой изоляции.

Вопрос об электрических характеристиках изоляции автор рассматривает на основе лабораторных исследований последних лет. Приведенные здесь материалы было бы желательнее дополнить данными эксплуатационных организаций.

Последние две главы (VIII и IX) посвящены вопросам профилактики изоляции. Автор достаточно подробно рассматривает как методы профилактических испытаний изоляции, так и применяемую для них аппаратуру. Здесь нашли отражение почти все современные методы профи-

лактических испытаний изоляции. Роль профилактических испытаний в советской энергетике очень велика, а потому включение в книгу посвященных им глав следует приветствовать. Можно лишь отметить, что некоторые положения, выдвигаемые автором, спорны. Так, едва ли правильно утверждение о том, что бумага, пропитанная маслом, может выдерживать внутренние разряды длительное время (до года). Следует также отметить, что при изложении многих методов измерений автор не дает их оценки.

В заключение отметим, что книга охватывает почти все вопросы изоляции устройств высокого напряжения. Она дает современный материал, в подавляющем большинстве случаев — советский. Если содержание ее и выходит за пределы лекционного курса техники высоких напряжений, как указывают авторы в предисловии, то это нельзя считать ее недостатком. Не следует забывать, что книгой будут пользоваться студенты при курсовом и дипломном проектировании, что в полной мере оправдывает некоторое расширение ее содержания. Кроме того, она безусловно будет полезна и инженерам, сталкивающимся с вопросами изоляции высокого напряжения. Добавим, что книга написана хорошим, ясным языком.

Книгу следует признать безусловно ценной и полезной. Некоторые указанные выше недостатки могут быть устранены в следующем издании.

Доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский
Ленинград

НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Белоцветов А. В. ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. 144 стр., ц. 6 руб. 10 коп. Гизлегпром.

Булгаков А. А. ЧАСТОТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ. 216 стр., ц. 7 руб. 80 коп. Академиздат.

Бурьянов Б. П. ТРАНСФОРМАТОРНОЕ МАСЛО. Изд. 3-е, переработ. и доп. 191 стр., ц. 6 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.

ВОПРОСЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ. Сборник статей под ред. И. М. Кирко и др. 130 стр., ц. 4 руб. 45 коп. Академиздат. Латв. ССР.

Долговский Н. М. ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ. Учебн. пособие для энергетич. техникумов. Под ред. В. В. Лукницкого. 240 стр., ц. 11 руб. 35 коп. Госэнергоиздат.

Иосифьян А. Г. и Каган В. М. ОСНОВЫ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА. 596 стр., ц. 19 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

Иофинов С. А., Турбин Б. Г., Цирин А. А. МЕХАНИЗАЦИЯ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА. 627 стр., ц. 12 руб. Госсельхозиздат УССР.

Калантаров П. Л. и Цейтлин Л. А. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТЕЙ. Справочная книга. 368 стр., ц. 12 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

Качанова Н. А. и Крутикова В. Е. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. 84 стр., ц. 3 руб. 70 коп. Академиздат УССР.

Китайгородский А. И. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. Стенограмма лекции. 40 стр., ц. 60 коп. «Знание».

Лихачев Ф. А. ВЫБОР, УСТАНОВКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДУГОГАСЯЩИХ АППАРАТОВ. 144 стр., ц. 4 руб. 70 коп. Госэнергоиздат.

Лэпп Р. НОВАЯ СИЛА. ОБ АТОМАХ И ЛЮДЯХ. Сокр. пер. с англ. Предисловие М. И. Рубинштейна. 224 стр., ц. 7 руб. 25 коп. Изд. иностр. лит.

Малов В. С. и Мешков В. К. ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ПУНКТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. 272 стр., ц. 8 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Мартынов В. П. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ. 120 стр., ц. 3 руб. 15 коп. Госэнергоиздат.

ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. Изд. 4-е, переработ. 576 стр., ц. 18 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Под ред. Р. Холмманна, 2-е переработ. изд. 948 стр., ц. 44 руб. Эстгосиздат. На эст. яз.

ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ ЯБЛОЧКОВ. ТРУДЫ. ДОКУМЕНТЫ. МАТЕРИАЛЫ (отв. ред. М. А. Шателен). Сост. Л. Д. Белькинд. 464 стр., ц. 29 руб. 50 коп. Академиздат.

ПУТИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА. Переработ. и доп. материалы IV сессии Уральского филиала АН СССР. Под ред. М. П. Макарова и др. 64 стр., ц. 1 руб. Свердловское книжн. изд.

РОССИ Б. ЧАСТИЦЫ БОЛЬШИХ ЭНЕРГИЙ. Пер. с англ. Под ред. С. З. Бельского. 636 стр., ц. 21 руб. 70 коп. Гостехиздат.

ФАЙНБОЙМ И. Б. ИВАН ГАВРИЛОВИЧ АЛЕКСАНДРОВ (1875—1936). 136 стр., ц. 4 руб. 35 коп. Госэнергоиздат.

ФАТЕЕВ А. В. ОСНОВЫ ЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ И ФАКУЛЬТЕТОВ. 296 стр., ц. 7 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.

Харитонов А. М. МНОГОСКОРЯСТНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ. 224 стр., ц. 8 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.

Шайкевич А. С. ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ОТКРЫТЫХ ПОДСТАНЦИЙ. 133 стр., ц. 7 руб. Изд. ВНИИОТ ВЦСПС. Ленинград.

Шпангенберг К. Р. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ. Пер. с англ. под ред. С. А. Оболенского. 420 стр., ц. 19 руб. 10 коп. Изд. «Сов. радио».

ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. СБОРНИК СТАТЕЙ. Под ред. А. А. Тайца. 272 стр., ц. 10 руб. 10 коп. Машгиз.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИЯ. Сборник статей под ред. А. Н. Ларионова. 208 стр., ц. 8 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.

Поправки

В № 3, 1955, в статье В. Г. Зусмана и О. Н. Татур, стр. 18, левая колонка, 21-ую строку сверху следует читать: ... моментов
1 ... 100 кгм

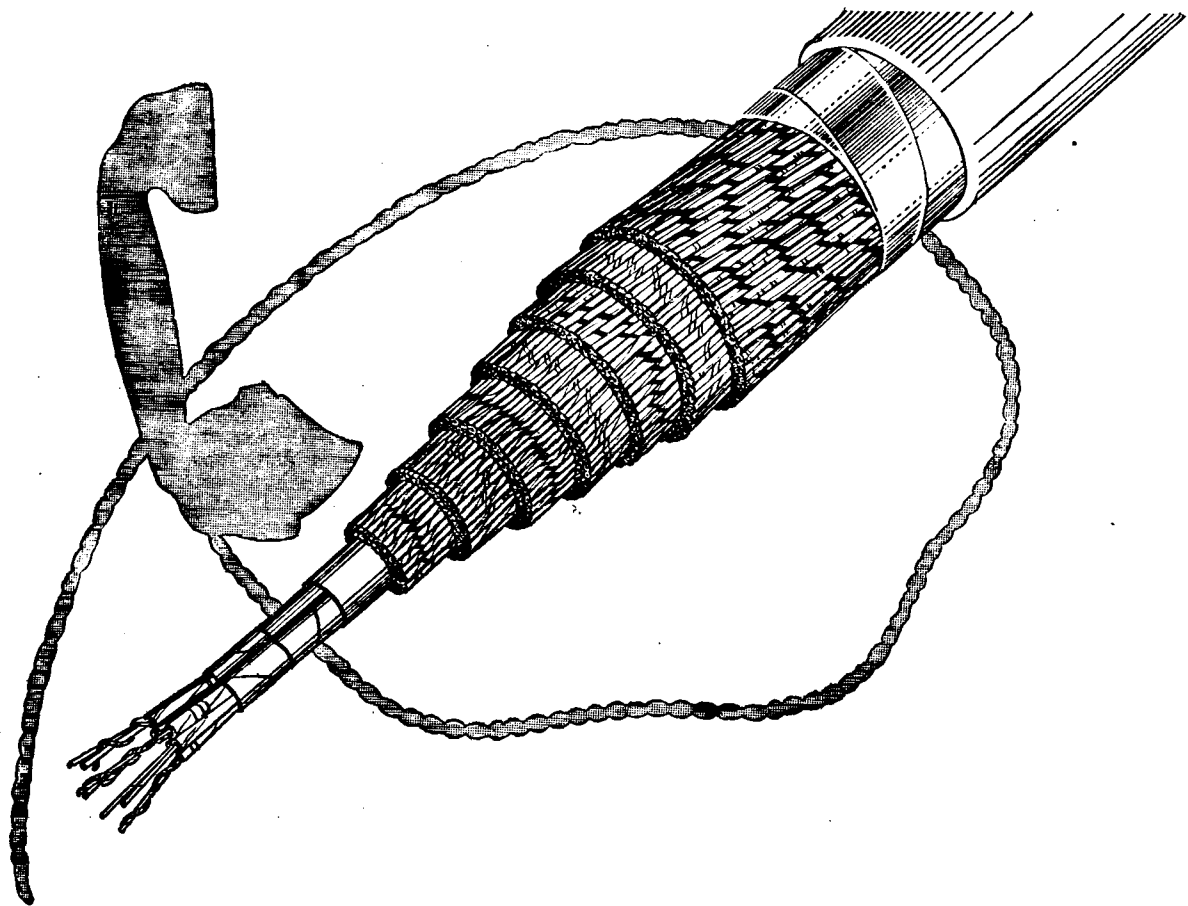
В № 4, 1955, в статье Е. Л. Эттингера, Г. В. Чалого, Е. Н. Глуха

на рис. 12 следует читать $I_p = 3\ 300\ a$ (вместо 3 800 a)

„ 13 „ „ „ $U_p = 1\ 100\ b$ (вместо 910 b)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. Андрианов, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова,
Н. Г. Дроздов (главный редактор), **Е. Г. Комар, В. П. Костенко,**
И. А. Сыромятников (зам. главного редактора), **А. М. Федосеев,**
М. Г. Чиликин, М. А. Шателен.

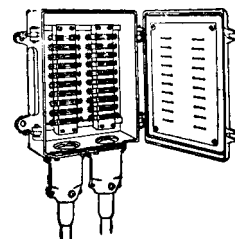


МЕЖДУГОРОДНЫЕ ИЛИ МЕСТНЫЕ

Кабели «BICC» имеются для всех типов телефонных сетей, как междугородных, так и местных. Диапазон производства фирмы охватывает магистральные и распределительные кабели, коммутаторные кабели и проволоки, а также кабели для железнодорожной сигнализации и телеконтроля.

Дальнейшие сведения относительно телефонных кабелей «BICC» даны в брошюре № 279, а относительно кабельных ящиков для телефонных и служебных сетей — в брошюре № 302, каковые высылаются по запросу.

Кабельные ящики «BICC» пригодны для концевой заделки проводов, соединения и подразделения телефонных сетей и для служебных проводок вообще. Этими ящиками можно также пользоваться для дистанционного выключения и для индикационных и сигнальных целей, связанных с выключательными и контрольными установками.



BICC

ТЕЛЕФОННЫЕ КАБЕЛИ И КАБЕЛЬНЫЕ ЯЩИКИ

Двухмерное вихревое магнитное поле удовлетворяет уравнению Пуассона относительно вектор-потенциала магнитного поля. В силу этого при моделировании в электролитической ванне вихревые области отображаются зонами с распределенным подводом тока.

Предлагается метод замены участка зоны с распределенными источниками тока эквивалентным электродом. Результирующее поле получается путем наложения составляющих полей отдельных электродов. В статье дан расчет размеров электродов, при которых потенциалы, замеряемые на модели, с достаточной точностью совпадают с потенциалами поля распределенных источников. Если растекание тока из зоны источников происходит в различных направлениях, то диаметр эквивалентного цилиндрического электрода можно брать равным 0,6 диаметра круга, равновеликого площади участка источников. При строго одностороннем же сте-

ОПЫТ РАБОТЫ ШВЕДСКОЙ СЕТИ 380 кВ

Первая секция шведской сети 380 кВ (линия Гарспрэнгет—Мидског—Гальсберг) была включена на полное напряжение в апреле 1952 г.; опыт ее эксплуатации удовлетворителен. В результате проведенного и намеченного расширения в 1956 г. сеть 380 кВ должна иметь общую длину около 2 700 км и установленную мощность всех трансформаторов 3 800 мвта.

В результате проведенных в сети опытов было установлено, что коммутационные перенапряжения не превосходят 2,5-кратного фазного напряжения. Основываясь на этом, импульсный уровень изоляции для вновь сооружаемых подстанций снижен с 1 775 до 1 500 кВ (эти величины равны испытательному напряжению при полной волне 1/50 мксек); одноминутное испытательное напряжение соответственно снижается с 781 до 660 кВ_{эф} (прежний уровень сохраняется, однако, для выключа-

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В статье сопоставляется количественное влияние различных мероприятий на повышение пропускной способности электропередачи. Показано, что за счет расщепления проводов линии, уменьшения реактивностей трансформаторов и генераторов, увеличения постоянной механической инерции генераторов, «потолочного» напряжения возбуждителей генераторов, а также за счет компенсации индуктивного сопротивления линии статическими конденсаторами пропускную способность электропередачи можно увеличить в несколько раз.

Приводятся результаты исследования влияния параметров генераторов на динамическую устойчивость. Показано, что за счет полутора-двухкратного изменения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗЕМЛИ И ОТКЛЮЧЕНИЕ
НАГРУЗКИ В ЛИНИЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При длительном возврате постоянного тока через землю плотность тока не должна превышать 45 а на 1 м² поверхности трубчатых электродов (в глинистой почве). Положительный электрод должен быть помещен во влажную среду, например в яму с соляным раствором. При применении металлических положительных электродов можно ожидать электролитического износа их порядка нескольких сот грамм на килоамперчас. Более благоприятные результаты дают электроды из магнитного железняка. При непрерывном возврате тока 500 а через землю возможна коррозия оболочек длинных кабелей на расстоянии до 40 км от электродов.

Для разветвленных линий постоянного тока предлагалось применение силовых выключателей ионно-конденсаторного типа. Необходимый запас энергии в кон-

ПРАКТИКА ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Бонневильское энергетическое управление (США) на основании многолетней практики значительно уменьшило стоимость сооружения новых линий сети 230 кВ, осуществляя следующие мероприятия:

1. Снижение изоляционных уровней. Основной импульсный уровень (т. е. импульсное испытательное напряжение полной волны) был снижен с 1 050 до 825 кВ, что допускается новыми американскими нормами в случае глухо заземленной нейтральной системы. Соответственно снижается и одноминутное испытательное напряжение. Это дало 20% уменьшения стоимости трансформаторов. 2. Быстродействующая автоматическая коммутация с повторным включением (АПВ). 3. Снижение защитных уровней разрядников. В системе установлены разрядники на номинальное напряжение 182 кВ. 4. От-

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОТЛАНДСКОЙ ЛИНИИ
100 кВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЗА 1954 г.

В течение первых четырех месяцев Готландская линия постоянного тока работала при напряжении 50 кВ. В июле 1954 г. число ртутных вентилях на обоих концах линии было удвоено, и напряжение передачи было доведено до расчетного значения 100 кВ. Из 28 вентилях, установленных на передаче, два оказались дефектными и были заменены: в одном была нарушена герметичность; в другом во время перевозки был поврежден анодный узел.

В переходном режиме непосредственно после включения линии в работу имел место ряд обратных зажиганиях. В установившемся режиме наблюдались лишь два обратных зажиганиях, ликвидировавшихся сетками в течение 0,5 сек без отключения передачи. На приемном конце неоднократно имели место нарушения комму-

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ 110...220 кВ

Рассматривается дифференциально-фазная высокочастотная защита, обладающая высокой чувствительностью ко всем видам коротких замыканий. Защита не действует при перегрузках, качаниях и может быть использована при неполнофазных режимах. При помощи токов высокой частоты сравниваются фазы токов прямой и обратной последовательностей по концам линии. Кратко описывается назначение и взаимодействие основных органов защиты: пуска, управления высокочастотным передатчиком и сравнения фаз токов. Приводятся основные положения, которыми необходимо руководствоваться при выборе уставок защиты.

Рассматриваются особенности применения защиты на линиях с однофазным автоматическим повторным включением. Указывается, что при работе линии двумя

РАБОТЫ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭНЕРГИИ
ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ В ЯПОНИИ

В Японии намечается прокладка ряда подводных кабельных линий постоянного тока для связи между собой отдельных островов страны. Такая связь позволит использовать богатые гидроэнергетические ресурсы островов Шикоку и Якушима, а также обеспечить питание промышленности на острове Садо, лишенном гидроэнергии.

Для исследования вопросов устойчивости инвертора, взаимодействия инвертора с приемной сетью, регулирования и защиты линий постоянного тока сооружена модель передачи на двух 12-фазных тиристорных преобразователях 1,5 кВ, 10 а. Линия моделируется 20 звеньями. Генератор 15 кВА, питающий установку, является электрической моделью крупного гидрогенератора. Модель оборудована безинерционным сеточным регулятором,

телей и измерительных трансформаторов). В результате стоимость подстанции снизилась на 8%. Импульсный уровень линейной изоляции также уменьшен с 1600 до 1500 кВ.

В течение грозового сезона 1952 г. была зарегистрирована работа контрольных искровых промежутков в заземлениях 300 опор из общего числа 2350 опор, снабженных такими промежутками. Лишь в одном случае грозовой разряд привел к однофазному короткому замыканию на линии.

Для связи 380-кВ сети с сетями 230 и 130 кВ во всех случаях будут применяться автотрансформаторы. Для малых станций изготавливаются трехфазные повышающие трансформаторы на 400 кВ мощностью 110 мВА вместо групп однофазных трансформаторов, применяемых для больших мощностей.

Tr. AIEE, т. 72, ч. III, стр. 1089, 1953.

(Э-во, 6, 1955)

денсаторах равен в этом случае $\frac{1,67n^2X}{\cos \alpha}$, где n — кратность тока короткого замыкания; X — относительная реактивность цепи постоянного тока; α — угол регулирования. Для отключения короткого замыкания на линии 200 мВТ, питающейся от сборных шин постоянного тока, потребовались бы конденсаторы общим объемом 800 м³.

В разветвленной цепи постоянного тока высокого напряжения можно отключить короткое замыкание и без силовых выключателей: при аварии запираются сетки всех питающих выпрямителей, затем селективно отключается разъединитель поврежденной ветви и производится сеточное АПВ. Весь процесс занимает 1 сек.

Direct Current, стр. 74, № 3, 1951.

(Э-во, 6, 1955)

тации отдельных вентилях; они не приводили к опрокидыванию инвертора в целом и самоликвидировались в течение $\frac{1}{6}$ периода без включения обходных вентилях. Короткие замыкания в приемной сети 30 кВ не нарушали коммутацию инвертора. В результате дефектов автоматики на выпрямительном конце дважды произошло ошибочное включение обходных разъединителей под нагрузкой.

С 28 ноября линия постоянного тока является в нормальном режиме единственным источником питания сети 30 кВ острова. К середине декабря 1954 г. по линии постоянного тока было передано на остров 12 млн. кВтч; 0,5 млн. кВтч было передано в апреле и мае с острова на материк в связи с затяжкой в наступлении весеннего паводка.

Direct Current, стр. 76, 84, № 3, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

способным сдвигать угол зажигания на 150° в течение 0,01 сек.

Введена в действие связь сетей 50 и 60 Гц через выпрямитель и инвертор 10 000 кВт. Автоматический сеточный регулятор изменяет величину и направление потока мощности через преобразователи таким образом, чтобы поддержать нагрузку генераторов в одной из сетей на заданном уровне.

Изготовлен опытный образец одноанодного ртутного выпрямителя на 120 кВ амплитудного обратного напряжения.

Исследуются также электрическая прочность и условия загрязнения изоляторов для воздушных линий, постоянного тока.

Direct Current, стр. 57, № 3, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

кании тока диаметр электрода следует уменьшить до 0,4 диаметра равновеликого круга.

Предложенный метод обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими методами как в отношении точности получаемых результатов, так и в смысле возможности моделирования систем с неравномерным распределением источников, это позволяет использовать его при построении конформно преобразованных моделей.

В работе описано применение этого метода для изучения вихревых магнитных полей электрических машин. В этом случае для решения большого числа практических задач достаточно произвести измерение распределения магнитного потока только по граничным линиям поля, что значительно снижает трудоемкость эксперимента. Применение метода наложения позволяет на основании ограниченного числа экспериментов получить большое число картин магнитных полей, соответствующих различным режимам работы машины.

Электричество, № 6, 1955.

параметров машин можно увеличить пропускную способность передачи на 25%.

Рассмотрено применение нагрузочных сопротивлений в качестве мероприятия, повышающего динамическую устойчивость. Устанавливается, что кратковременное включение нагрузочных сопротивлений не только обеспечивает сохранение устойчивости, но и уменьшает амплитуду колебаний роторов машин в последующих циклах. При отклонении от оптимального времени или от оптимальной величины сопротивления эффективность этого мероприятия уменьшается.

Электричество, № 6, 1955.

каз от защиты заземленными тросами всей длины линии. Тросами защищаются лишь подходы к подстанциям на протяжении 1,7 км. На остальной части линии могут быть установлены опоры облегченного типа, что дает значительную экономию. 5. Применение мощных однофазных автотрансформаторов вместо трансформаторов с раздельными обмотками. 6. Отказ от резервных однофазных трансформаторов.

Следующий пример показывает эффективность мероприятий по пунктам 1 и 5. В 1940 г. в системе была установлена группа трансформаторов 100 мВА, 220/110 кВ с импульсным уровнем 1050 кВ. Установленная в 1952 г. группа автотрансформаторов 250 мВА, 230/115 кВ с импульсным уровнем 825 кВ имеет меньшие размеры, несмотря на увеличение мощности в 2,5 раза.

El. Eng., т. 73, стр. 161, № 2, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

фазами защита надежно действует при междофазных повреждениях, а при однофазных коротких замыканиях в защищаемой зоне она может в некоторых случаях блокироваться.

Показано, что защита может быть использована при наличии на линии одного ответвления. Указывается на требования, которым должна при этом удовлетворять защита для обеспечения селективности при внешних коротких замыканиях и надежности действия при повреждениях в защищаемой зоне.

Электричество, № 6, 1955.

СЕРИЕСНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ В СЕТЯХ 230 кВ

Первоначально серийные конденсаторы применялись в США в небольших электрических системах для снижения резких колебаний напряжения, причиняемых электрическими печами. В настоящее время продольная компенсация широко применяется для увеличения пропускной способности мощных электропередач большой протяженности.

В сетях 230 кВ Бонневилльской электрической системы работают три установки продольной компенсации. Установка Чегалис мощностью 24 тыс. кВА смонтирована на линии 230 кВ длиной 360 км, связывающих две части системы. Две необслуживаемые установки мощностью 59 и 36 тыс. кВА предназначены для увеличения пропускной способности линий 230 кВ гидроэлектростанция Гранд-Кули—Мидвэй и Гранд-Кули—Колумбия.

ВЗРЫВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА 150 тыс. кВт НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В США

Ряд аварий турбогенераторов большой мощности, имевших место в Америке за последний год (см. «Электричество», № 2, 1955), увеличился в результате наиболее тяжелой аварии, происшедшей 19 декабря 1954 г. на электростанции Риджленд: взорвался один из четырех однотипных двухвалвных турбогенераторов мощностью по 150 тыс. кВт. Взрыв произошел в турбине низкого давления мощностью 50 тыс. кВт при 1800 об/мин в процессе обычной проверки обеих частей агрегата на повышенную (на 10%) скорость до включения его на общие шины. Авария возникла вследствие поломки вала турбины низкого давления, повидимому, из-за какого-то дефекта в материале вала, хотя последний прошел на заводе («Аллис-Чалмерс») все испытания, включая ультразвуковое, а также просверливание в определенных местах. До аварии турбогенератор 4 мес. работал беспре-

Б. П. Медведев

3

УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ

В статье приведены упрощенные алгебраические выражения для расчета в инженерной практике ряда электромагнитных переходных процессов, возникающих при изменениях напряжения на зажимах статора и напряжения на кольцах ротора, при которых не происходит нарушения симметрии трехфазной системы. К ним относятся процессы при трехфазных коротких замыканиях (включая и автоматические повторные включения на неустраняющиеся повреждения), восстановлении напряжения, гашении поля, саморазряде электродвигателей и др.

Полученные расчетные выражения позволяют правильно учесть соотношение между активными сопротивлениями контуров ротора, что в ряде случаев имеет важное значение, и позволяют учитывать любые начальные условия процесса.

Р. Х. Бальян

3

К РАСЧЕТУ МАССИВНОГО РОТОРА

Цель статьи — дать простой инженерный метод расчета электрических машин с массивным ферромагнитным ротором. При этом поставлены задачи:

1) учесть аналитически непостоянство магнитной проницаемости и как по глубине ротора, так и вдоль его полюсного деления;

2) получить обобщенные результаты, которые позволили бы расчет асинхронного двигателя вести как частный случай расчета явнополюсного синхронного двигателя.

Теория построена на основе рассмотрения процесса проникновения в массив ротора электромагнитной волны, возбужденной статорной обмоткой. Нелинейность кривой намагничивания вводится в уравнения аналитически по выражению Л. Р. Неймана.

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ НИЗКОГО НАПЯЖЕНИЯ

Важнейшую характеристику высокочастотных конденсаторов — удельную емкость — принято определять, исходя из значения диэлектрической проницаемости и толщины стенки конденсатора. При повышенных напряжениях электрического поля толщину стенки определяют по электрической прочности диэлектрика.

Исследование вопросов стабильности электрических характеристик керамических конденсаторов показывает, что выбор минимальной толщины стенки, а следовательно, удельной емкости зависит не только от допускаемой напряженности поля в нормальных условиях, но и от ряда эксплуатационных требований — в отношении мерцания емкости, предельной влажности воздуха в рабочих условиях, предельной рабочей температуры.

А. В. Стукачев

4

СХЕМА ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ИСПЫТАНИЯ АППАРАТОВ ИМПУЛЬСНЫМ НАПЯЖЕНИЕМ И НАПЯЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Описывается принцип действия и основные элементы установки для исследования дуговых свойств искровых промежутков вентильных разрядников. Рассматриваются отдельные элементы установки, от надлежащего выбора которых зависит правильная и надежная ее работа. Схема установки обеспечивает возможность широкой регулировки момента подачи импульсного напряжения по отношению к синусоиде промышленной частоты. Для этого используется вспомогательный генератор импульсов, посылающий зажигающие импульсы через синхронный переключатель; при изменении пространственного расположения его контактов в пределах от 0 до 90° и при синхронной скорости вращения переключателя, равному 1500 об/мин, момент подачи импульса может быть перемещен в пределах полупериода синусоиды промышленной частоты.

А. А. Воскресенский

4

РАСЧЕТ ТОКОВ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА

Изложен способ аналитического расчета тока намагничивания трансформатора тока при переходных процессах. Расчетом определяется изменение во времени сложной кривой тока намагничивания от момента возникновения процесса до момента, когда аперийодическая составляющая тока намагничивания достигает максимального значения. Расчет ведется в предположении, что магнитная характеристика трансформатора удовлетворяет выражению

$$i = me^{a\Phi}.$$

Сложная кривая тока намагничивания рассматривается как гармонический ряд периодических токов. Устанавливается математическая связь уравнения идеального трансформатора с константами нелинейной

E. Schulz — Du Bois

4

ТОЧНЫЙ ОММЕТР С РАВНОМЕРНОЙ ШКАЛОЙ

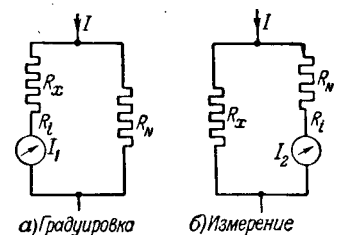
Как известно, большим недостатком обычных омметров является чрезвычайно неравномерная шкала.

Ниже описан омметр с равномерной шкалой, принцип работы которого можно уяснить из рисунка. Если в схеме а протекает общий ток I , то ток, протекающий по амперметру, будет равен:

$$I_1 = I \frac{R_N}{R_x + R_N + R_i}.$$

Если далее в схеме б протекает тот же общий ток I , то отклонение амперметра будет:

$$I_2 = I \frac{R_x}{R_x + R_N + R_i}.$$



Установлено, что требования в отношении допускаемой напряженности поля из условий: а) отсутствия мерцания конденсаторов, б) увеличения их рабочей температуры и в) надежной работы при высокой влажности — совпадают.

Исходя из указанного, разработаны новые конструкции керамических конденсаторов, рассчитанные на повышенные эксплуатационные требования. Конденсаторы могут использоваться и без герметизации корпуса, что ведет к упрощению технологии. Для менее жестких эксплуатационных условий рекомендуются вновь разработанные многослойные дисковые конденсаторы, отличающиеся малой толщиной стенки и соответственно очень большой удельной емкостью, составляющей десятки и сотни тысяч пф/см^2 .

Электричество, № 6, 1955.

Предусмотрены две схемы соединения зажигающего импульсного генератора с объектом испытаний:

1) несимметричная, применяющаяся в том случае, если одна из фаз или нейтраль источника напряжения промышленной частоты заземляется, что имеет место обычно в лабораторных условиях;

2) симметричная, применяющаяся в том случае, если испытания проводятся в условиях действующей энергетической системы без заземления фазы или нейтрали.

Приведены осциллограммы, записанные магнитным осциллографом, иллюстрирующие процесс гашения дуги сопровождающего тока искровым промежутком вентильного разрядника.

Установка пригодна также для проведения исследований и других типов высоковольтных аппаратов, если программой испытаний предусматривается одновременное воздействие на испытуемый объект импульсного напряжения и напряжения промышленной частоты.

Электричество, № 6, 1955.

магнитной характеристики, для вычисления мгновенных значений тока намагничивания в расчетных интервалах времени. На основании расчетов, выполненных методом последовательных интервалов, даются уравнения для вычисления максимального значения индукции и времени, соответствующего этому значению.

Уравнения дают общее решение для вычисления тока намагничивания по заданным параметрам процесса и магнитной характеристике трансформатора.

Дана оценка погрешностей предлагаемого метода расчета. Приведены примеры расчета по параметрам опытов, известных из ранее опубликованных на эту тему работ.

Электричество, № 6, 1955.

Разделив почленно оба уравнения, получим:

$$\frac{R_x}{I_2} = \frac{R_N}{I_1}.$$

Прибор и параметры схемы выбирают такими, чтобы току $I_1 = I_{\text{макс}}$ соответствовало полное отклонение стрелки прибора. Образцовое сопротивление R_N должно быть много больше измеряемого сопротивления R_x и, кроме того, должно быть выбрано так, чтобы

отношение $\alpha = \frac{R_N}{I_{\text{макс}}}$ в ом/дел было кратным 10^2 . Тогда отсчет отклонения I_2 на равномерной шкале прибора дает искомое значение сопротивления R_x .

ETZ-A, стр. 783, № 23, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

При сооружении третьих цепей на каждой из этих линий были подвешены провода большего, чем на двух других цепях, сечения и включены серьезные конденсаторы, что позволяет осуществить распределение нагрузок по цепям с минимальными потерями. Компенсация 35% реактивности линий и подвеска проводов большего сечения позволяют отказаться от сооружения четвертой цепи, что дало экономию более 3 млн. долларов.

Опыт эксплуатации установок продольной компенсации показал, что конденсаторы надежны в работе и не требуют большого ухода. На установке Чегалис с момента включения ее в феврале 1951 г. не было повреждений конденсаторов. На двух других установках за $1\frac{1}{2}$ года работы вышло из строя девять конденсаторов.

CIGRE, доклад № 327, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

ребойно. Более точно причину аварии установить не удалось. Взрыв повлек за собой тяжелые последствия: из персонала станции было убито два дежурных инженера и 5 чел. ранено. Разлетевшимися частями и осколками турбины были повреждены не только агрегат высокого давления непосредственно пострадавшего турбогенератора (100 тыс. квт при 3600 об/мин), но и три остальных турбогенератора, так что электроснабжающая система лишилась сразу мощности в 600 тыс. квт . Серьезно пострадали также крыша и стены здания и трубопроводы. Работа трех турбогенераторов была восстановлена в течение двух-трех дней, для ввода же в эксплуатацию взорвавшегося агрегата потребуются несколько месяцев.

El. World, т. 143, стр. 54, № 2, 1955.

(Э-во, 6, 1955)

Методика расчета включает применение схем замещения, что помогает отчетливо представить физическую сторону происходящих явлений.

Метод последовательных интервалов и метод наложения позволяют применить изложенную методику к расчету более сложных процессов, чем перечисленные выше.

Электричество, № 6, 1955.

Все искомые величины находятся аналитически. Необходимые вспомогательные коэффициенты определяются также аналитически через заданные параметры рассчитываемой машины. Для удобства коэффициенты представлены на соответствующих графиках.

Излагается пример расчета и приводятся результаты опытной проверки.

Совпадение механических пусковых характеристик $M=f(s)$ вполне удовлетворительное. Величина пускового тока получается заниженной вследствие принятых допущений.

Электричество, № 6, 1955.

ФОТОКОМПЕНСАТОР С ЭЛЕКТРОМЕТРОМ

Фотоэлектрический компенсатор может быть успешно применен для измерения электростатических зарядов, напряжений, емкостей и больших сопротивлений, если магнитоэлектрический зеркальный нуль-гальванометр заменить зеркальным электрометром. Последний имеет две пары неподвижных электродов, одна из которых заземлена, другая является измерительной, а поворотный листочек на подвесе, несущий на себе зеркальце, подключен к вспомогательному напряжению.

Фотокомпенсатор выполнен по обычной мостовой схеме с двумя фотоэлементами и одной усилительной лампой. При измерении электростатического заряда дебаланс мостовой схемы, вызываемый через электрометр измеряемой величиной, компенсируется зарядом образцового конденсатора, который заряжается от напряжения, возникающего на компенсационном сопротивлении. Отсчет измеряемой величины производится миллиампер-

ТЕМПЕРАТУРНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ В УСИЛИТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ТРИОДАМИ

Применение кристаллических триодов в усилителях постоянного тока затруднено вследствие большой зависимости выходного тока триода от температуры (до 5...10% на 1°C). Температурная компенсация может осуществляться либо соответствующим выбором типов кристаллических триодов и схем их включения, либо включением сопротивлений, зависящих от температуры.

При использовании первого способа компенсации в двухкаскадных усилителях необходимо применять сочетание двух триодов $p-n-p$ и $n-p-n$, соединяя их по соответствующим схемам, приведенным в статье.

Более действенным является применение второго способа температурной компенсации путем включения

ГЕРМАНИЕВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Германиевые выпрямители, имеющие наименьшие из известных твердых выпрямителей габаритные размеры, отличаются одновременно исключительно высоким к. п. д. и большим сроком службы. Германиевый выпрямитель на 2 квт постоянного тока с объемом 52 см^3 и весом около 0,34 кг в 40 раз по объему и в 4 раза по весу меньше, чем селеновый выпрямитель на ту же мощность в одинаковых условиях охлаждения. Коэффициент полезного действия трехфазного германиевого выпрямителя 98...99%. При падении напряжения на германиевом элементе порядка 1 в допускаемая плотность тока достигает 46 а/см^2 , тогда как при тех же условиях селеновые элементы допускают лишь $0,03\text{ а/см}^2$. Сопротивление германиевых элементов в обратном направлении в $4 \cdot 10^6$ раз выше, чем в прямом. При коротком замыкании, если оно длится свыше 5 мсек или если пиковое

ТИРАТРОН В КАЧЕСТВЕ УСИЛИТЕЛЯ ИМПУЛЬСОВ

Усиление импульсов, в особенности коротких, представляет большой интерес для различных областей применения электроники. Быстрое развитие разряда и отсутствие колебаний при зажигании позволяют надеяться, что тиратроны могут быть применены в качестве усилителей импульсов в ряде специальных схем.

Включение тиратрона в качестве усилителя импульсов показано на рисунке. При достижении результирующим напряжением в цепи сетки потенциала зажигания предельно заряженная до потенциала источника емкость C_a разряжается через тиратрон. При этом на сопротивлении R_a появляется усиленный импульс напряжения. Как только напряжение на конденсаторе C_a упадет ниже напряжения горения тиратрона, разряд

ТЕОРИЯ УДВОЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ПОМОЩИ ДВУХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Два трансформатора с подмагничиванием постоянным током, первичные и вторичные обмотки которых включены последовательно синфазно или противофазно, могут работать в качестве удвоителя частоты 50/100 гц также при частичном или полном исчезновении напряжения постоянного тока. Напряжение на выходе содержит только четные гармоники напряжения 50 гц. В работе трактуется проблема стабилизации напряжения 100 гц при возрастании нагрузки. Процессы в удвоителе частоты описываются двумя дифференциальными уравнениями. Кривые намагничивания замещены последовательным рядом прямых, что соответствует линеаризации проблемы для частичных диапазонов. Возможны различные виды связи между сторонами трансформатора в 50 и 100 гц: А-связь (вредная) является причиной паде-

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ДРОССЕЛЬ НАСЫЩЕНИЯ С КОМПЕНСИРОВАННЫМ ТОКОМ ПОКОЯ

В промышленных системах постоянного тока применяются измерительные дроссели насыщения для измерения величины тока. Управляющая обмотка такого дросселя питается измеряемым током. В обмотки переменного тока через выпрямительный мостик из полупроводниковых элементов включается прибор постоянного тока. Характеристика такой схемы $I_{\Sigma} = f(I_-)$ на большом участке является линейной, за исключением близких к нулю значений тока I_- . При измерении тока $I_- = 0$ переменный ток покоя I_0 не равен нулю. Это является известным неудобством, так как требует специальной градуировки измерительного прибора.

Для устранения данного недостатка автором предложена схема измерительного дросселя насыщения, от-

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Применение магнитных усилителей в системах автоматического управления электроприводом непрерывно развивается. Накопленный опыт теоретических исследований и практических наблюдений позволяет охарактеризовать достоинства и недостатки магнитных усилителей. Их достоинства заключаются в следующем: магнитный усилитель является статическим аппаратом, не требующим ухода и обладающим большим сроком службы; он хорошо выдерживает толчки и вибрации; не теряется время на пуск, необходимое для прогрева в электронном усилителе; обмотки управления изолированы от силовой цепи и др. Основными недостатками магнитных усилителей являются: невозможность реверсирования, т. е. изменения полярности мощности на выходе; некоторая инерционность; необходимость определенного минимального уровня мощности сигнала на входе; известная чувствительность к колебаниям темпе-

ОБРАЗОВАНИЕ МОСТИКА В ДУГЕ ПРИ РАЗРЫВЕ ЦЕПЕЙ С БОЛЬШИМ ТОКОМ

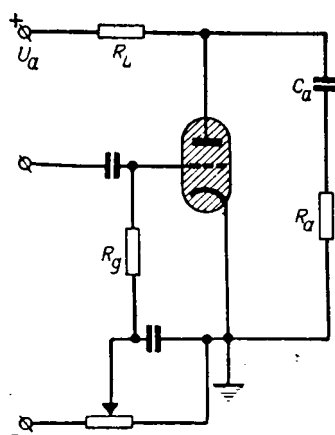
Методы, обычно применяемые для изучения процессов, происходящих в дуге, имеют ряд недостатков. Авторы применили метод импульсной рентгеновской фотографии для регистрации быстрых изменений состояния дуги. Таким кратковременным процессом является извержение из электрода пара, имеющего плотность более высокую, чем плотность плазмы дуги, и видимого вследствие этого на рентгенограмме в виде мостика между электродами. Экспериментальное устройство представляет собой мощную цепь, питающуюся от источника напряжения 120 в с двумя электродами, раздвигаемыми механическим путем.

Межэлектродное пространство фотографировалось при помощи импульсной рентгеновской трубки на движущуюся пленку. После замыкания цепи контакты

ряда сопротивлений, часть из которых зависит от температуры. Наиболее целесообразно применение в качестве сопротивлений германиевых диодов, включенных в обратном направлении. Сопротивление этих диодов в обратном направлении изменяется в зависимости от температуры (до 5% на 1°C). Путем параллельного и последовательного соединений с диодом постоянных, независимых от температуры сопротивлений имеется возможность подгонки температурной компенсации и достижения требуемой стабильности выходного тока усилителя. Например, при двухкаскадном усилителе на кристаллических триодах при изменении температуры от 20 до 50°C удалось снизить зависимость выходного тока с 50 до 5%.

Proc. IRE, стр. 661, № 4, 1954.

(Э-во, 6, 1955)



прекращается. Крутизна подъема импульса определяется временем формирования разряда в тиратроне и может иметь величину порядка 10^{-8} сек.

В указанной схеме с применением тиратрона для импульсов длительностью 10^{-6} сек получена чувствительность, равная 0,1 в. «Время покоя» схемы было равным 2×10^{-6} сек.

Zeit. f. Angew. Physik, т. 5, № 3, 1953. (Э-во, 6, 1955)

личающаяся от вышеуказанной наличием трансформатора. Первичная обмотка этого трансформатора включается последовательно с обмотками переменного тока и источником питания, а во вторичную обмотку трансформатора через выпрямительный мостик включается измерительный прибор. Устранение тока покоя I_0 является результатом нелинейных свойств трансформатора и выпрямителя.

Экспериментальные исследования данной схемы, проведенные на образце, показали, что прибор может дать на выходе ток 3,5 ма при нагрузке в 10 000 ом и токе 17 ма на входе (управляющей обмотке). Испытания установили, что выходной ток является линейной функцией измеряемого тока при всех значениях последнего от 0 до 17 ма (до 100%). При этом ошибка нигде не превышает 0,5% от номинальной величины, т. е. $\pm 0,0175$ ма (при $I_{ном} = 3,5$ ма).

El. Eng, стр. 1119, № 12, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

раздвигались, и процессы, возникающие в дуге, фотографировались с экспозицией 10^{-6} сек через $1/150$ сек. Из рассмотрения фотографий авторы делают предположение, что в момент окончания горения дуги из нагретого до высокой температуры и, повидимому, расплавленного участка электрода происходит испарение мельчайших капель вещества электрода, и поток пара образует мостик между электродами. Это мостик возникает за время менее $1/150$ сек и, если предположение о его характере верно, должен замыкать электроды накоротко. Авторы делают вывод о пригодности импульсной рентгеновской методики для регистрации кратковременных процессов, происходящих в дуге.

Zeit. f. Angew. Physik, т. 6, стр. 416, № 9, 1954. (Э-во, 6, 1955)

метром класса 0,1, включенным последовательно с этим сопротивлением. Наименьшая цена деления прибора 10^{-12} к/дел.

Для измерения больших сопротивлений искомое сопротивление включается в схему фотокомпенсатора последовательно с источником постоянного тока. Зная величину напряжения, значение компенсационного сопротивления, образцовой емкости и измерив изменение тока в компенсационном сопротивлении, а также время этого изменения, можно вычислить величину искомого сопротивления.

Аналогично производятся измерения емкостей, но при этом используется метод замещения.

ETZ-A, стр. 529, № 16, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

напряжение превысит безопасное, германиевый элемент выходит из строя. Допустимая наибольшая рабочая температура 80°C .

Германиевые элементы выпускаются промышленностью на токи от 0,5 до 75 а с воздушным охлаждением. На основе последних изготавливаются стандартные выпрямительные установки мощностью 25 кВт. Выпускаются также стандартизованные выпрямительные установки на 120 кВт с водяным охлаждением. Мощные германиевые выпрямители нашли распространение для электролитических процессов в производстве металлокерамических изделий, в дуговых печах для рафинирования титана, в регулируемых электромашинных приводах, для стартеров авиадвигателей, для зарядки батарей на телефонных станциях и т. д.

GER, стр. 11, № 6, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

ния напряжения при нагрузке и В-связь, как нежелательная передача энергии в цепь 100 гц. На основании исследований дано объяснение процесса связи и его последовательности в течение одного периода. Установлено, что с увеличением активной или индуктивной нагрузки А-связь возрастает и препятствует передаче энергии. Устранение вредной А-связи достигается при возрастании нагрузки увеличением тока подмагничивания. Практическое исследование шести трансформаторов по 1 кВа при питании их от трехфазной сети 50 гц показало, что получаемое напряжение 100 гц имеет сдвиг в 90° . Стабилизацию напряжения 100 гц в пределах $\pm 5\%$ при к. п. д. 70% возможно осуществить при помощи соответствующих схем управления в зависимости от подмагничивания и нагрузки.

Deutsche Elektrotechnik, т. 8, стр. 408, № 11, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

ратуры и др. Если требуется магнитный усилитель с реверсированием, то может быть применена так называемая «двухтактная или пушпульная схема», но ее максимальный к. п. д. не превосходит 17% и поэтому ее применение ограничивается весьма малыми мощностями в специальных случаях. Можно применять два независимых магнитных усилителя для питания двух отдельных обмоток разной полярности, но такая схема обходится сравнительно дорого. В статье приведены примеры применения магнитных усилителей в установках автоматизированного привода прокатных станов, реверсивного строгального станка, электронакала для намочки в рулон бумаги, выходящей из машины со скоростью 25 м/сек, и др.

Instruments and Automation, т. 27, стр. 1300, № 8, 1954.

(Э-во, 6, 1955)

РАСЧЕТ СРЕДНИХ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Современные методы расчета системы электроснабжения электрических железных дорог разработаны на основе принципов теории вероятностей. Это обоснование не может считаться удовлетворительным, так как движение поездов на железных дорогах не является стихийным, беспорядочным, как это предполагается законами теории вероятностей. Однако формулы, полученные указанными методами, дают достаточно удовлетворительные результаты при сравнении их с материалами опытных исследований. В целях более реального обоснования методов расчета электроснабжения автор предлагает использовать аппарат теории математической статистики (теория соединений), оперирующей обычно с опытными материалами.

Для этого используемые ранее понятия теории вероятностей заменяются понятиями относительных дли-

КОНСТРУКЦИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ ЗАПАДНОЙ ГЕРМАНИИ

Для устранения нагрева роликовых букс заземление схемы электровоза производится через осевые торцевые скользящие контакты, подключаемые параллельно буксам. Корпус 1 (см. рисунок) навинчен на буксу; в нем размещается изолированный щеткодержатель 2. Между корпусом и скользящим элементом 3 образуются камера 4, служащая для улавливания продуктов износа угольной щетки 5, и защитная камера 6. Лабиринты 7 и 8 препятствуют проникновению пыли в подшипник и смазки на контакт. Пружина 9 обеспечивает давление в контакте примерно 300 г/см^2 . Ток подводится к щетке по проводам 10 сечением $3 \times 25 \text{ мм}^2$.

El. Bahnen, стр. 226, № 9, 1954

(Э-во, 6, 1955)

Е. Б. Даензон

5

ВНЕДРЕНИЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В МОРСКОМ РАЗВЕДОЧНОМ БУРЕНИИ

Рассматривается вопрос использования, синхронных двигателей СМ-540 взамен асинхронных для привода грязевых насосов на морских буровых.

Из-за технологического режима работы буровой (резко выраженная переменная нагрузка) приводные асинхронные двигатели значительную часть времени работают с недогрузкой и $\cos \varphi$ буровой в целом обычно не превышает 0,6...0,65. Низкое значение $\cos \varphi$ и удаленность буровой от снабжающей подстанции обуславливают значительное снижение напряжения на шинах РУ буровой.

На отдельных морских разведочных буровых треста разведочного бурения Министерства нефтяной промышленности АзССР для привода грязевых насосов У-8-3 взамен асинхронных двигателей ФАМСО мощностью

P. Howard

6

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО ПРОБОЯ КАБЕЛЕЙ С ВЯЗКОЙ ПРОПИТКОЙ

Испытания проводились с кабелями на напряжение 33 кВ с гладкой жилой сечением 95, 162 и 325 мм², с вязкой пропиткой (толщина изоляции соответственно 8,65, 7,6 и 8,0 мм). Для испытаний брались отрезки кабеля длиной 2,13 м; с концов удалялись свинцовая оболочка и металлизированная бумага. Для уменьшения краевого эффекта на оголенную изоляцию наматывалась полупроводящая лента.

Импульсное напряжение повышалось до пробоя ступенями по 5%, начиная с 75% от пробивного. Для исследования влияния полярности, ее перемены и числа импульсов на пробой изоляции испытания велись при волне 1/50 мксек. Влияние формы волны исследовалось при отрицательной полярности (1/5, 1/50, 1/250 и 11/85 мксек).

Ю. М. Файнберг

5

О ПАРАМЕТРАХ ГЛАВНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

В статье освещаются результаты исследования влияния параметров прокатных двигателей и привода непрерывных станов на протекание неуставившихся процессов при работе двигателей совместно с регуляторами скорости вращения.

Анализ произведен применительно к системе электроинформационного управления, которая отвечает современной практике использования управляемых ртутных выпрямителей для питания главных прокатных двигателей непрерывных станов.

При помощи аналитических зависимостей, описывающих в общем виде свойства системы, процессы регулирования исследованы для комбинации в основном практически осуществимых значений параметров электропривода.

АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРНЫХ ОБМОТОК

К материалам роторных обмоток турбогенераторов большой мощности предъявляют повышенные требования в отношении механических и электрических свойств.

Сплав алюминия с магнием под названием «кондал» содержит 0,43% Fe, 0,32% Mg и 0,10% Si. Он обладает высокой проводимостью (61,6% проводимости меди), жесткостью (88 по Роквеллу), повышенным пределом ползучести при нагрузке на сжатие. Последнее необходимо, так как стержни обмоток в пазах нагружаются на сжатие вследствие центробежной силы, а также температурных расширений. Добавка железа повышает температуру рекристаллизации сплава и прочность на разрыв в разогретом состоянии. Эти качества сплав получает посредством обработки его при температуре примерно 560° С. С 1949 г. он используется в турбогенера-

Г. Г. Марквардт

5

РАСЧЕТ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ В ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Исследуется затекание блуждающих токов электрической железной дороги в параллельно расположенное подземное сооружение.

Путем использования принципа наложения общая схема загрузки электрической железной дороги приводится к простейшим схемам. Используется также то, что подземное сооружение практически не оказывает влияния на токи утечки из рельсов в землю. Это позволяет разбить поставленную задачу на две части: а) определение токов утечки из рельсов в землю и б) определение потенциалов и токов подземного сооружения при известных токах утечки из рельсов.

Упрощенное, но достаточно точное решение первой части задачи имеется в литературе. Исходя из него, выведено общее уравнение потенциала любой точки грунта. Путем введения упрощений, практически не влия-

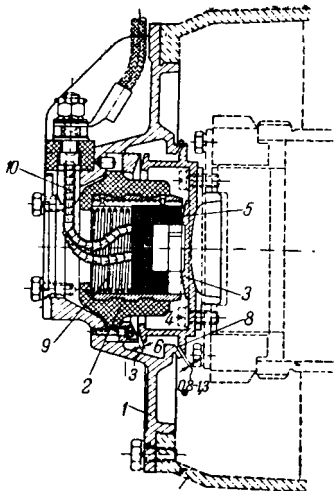
Gibson, Moses

6

ИЗОЛЯЦИЯ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ВНУТРЕННИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Дано краткое описание изоляции статорной обмотки с внутренним охлаждением: применяемые материалы и конструктивные особенности обмотки. Описан также подход к установлению уровня контрольных испытаний изоляции.

Обмотка генератора стержневая. Для основной изоляции в качестве связующего использованы термоактивные органические смолы, т. е. основная изоляция выполнена из «термоластика». Места соединений стержней в лобовых частях в отличие от обычного способа изолируются изолирующими специальными покрышками, отлитыми из кремнийорганической резины. Места стыков покрышек и основной изоляции изолированы обычной



тельностью, понятие математического ожидания — понятием среднего значения. Особенно важно было заменить понятие математического ожидания произведения нескольких переменных. Нетрудно доказать, что в случае рассмотрения всей совокупности возможных комбинаций произведений отдельных значений каждой из переменных можно заменить среднее значение от произведения нескольких переменных на произведение средних значений каждой из них. Указывается на возможные отклонения в этом правиле, вносимые реальной организацией движения поездов. Фактически могут быть графики движения поездов, создающие нагрузки, превышающие средние значения, и графики, которым соответствуют нагрузки, несколько меньшие средней.

Электричество, № 6, 1955.

Среднее пробивное напряжение при положительной полярности на 5...7% больше, чем при отрицательной (при равном числе импульсов). Перемена полярности напряжения на каждой ступени, а также введение интервала в 1...10 мин между такими переменами почти не влияют на пробивное напряжение, так же как и форма волны.

Увеличение числа импульсов на каждой ступени напряжения с 2 до 100 уменьшает напряжение пробоя на 10%. Пробивная напряженность на жиле зависит от ее размеров и повышается на 7% при переходе от жилы 325 к жиле 95 мм². Минимальная напряженность на жиле была примерно 100 кВ/мм.

Прог. ЖЕЭ, т. 101, ч. II, стр. 315, № 75, 1953. (Э-во, 6, 1955)

320...380 кВт, 6 кВ, 735 об/мин были установлены синхронные двигатели СМ-540 мощностью 401 кВт, 6 кВ, 750 об/мин.

Пуск синхронных двигателей с глухо подключенными возбудителями как вхолостую, так и под нагрузкой дал удовлетворительные результаты: двигатели свободно входили в синхронизм. Использование синхронных двигателей улучшает энергетические показатели электрохозяйства буровых и увеличивает радиус действия напряжения 6 кВ до 12...14 км. Последнее имеет важное значение в связи с большой стоимостью и трудоемкостью сооружения линий электропередач и подстанций 35 кВ в море.

Почти двухлетний опыт эксплуатации синхронных двигателей на морских буровых дал положительные результаты.

Электричество, № 6, 1955.

торах мощностью в 160 и 300 мкВт, притом не как заменитель меди, а как специальный материал для мощных машин с большими размерами, для которых медь в качестве материала для обмоток уже непригодна. Так, например, он был применен в четырех турбогенераторах, каждый весом 700 т и общей длиной 25 м.

Teknisk Tidskrift, т. 83, стр. 763, № 37, 1953. (Э-во, 6, 1955)

Теоретические исследования подтверждаются данными, полученными на экспериментальной установке.

Сформулированы общие принципы выбора параметров прокатных двигателей при работе в системах автоматического регулирования скорости вращения рабочих валков непрерывных станов горячей прокатки.

Электричество, № 6, 1955.

изоляционной лентой. В покрышках предусмотрены отверстия для выхода вентиляционных трубок, имеющих такую же изоляцию, как и обмоточные провода.

Испытательные напряжения повышены на 25% по сравнению с напряжениями, установленными американскими стандартами. На столько же повышена величина импульсного испытательного напряжения.

El. Eng., т. 73, стр. 522, № 6, 1954. (Э-во, 6, 1955)

яющих на точность, дано выражение этого потенциала через известные функции.

Составлено дифференциальное уравнение для потенциала подземного сооружения. Дано решение его без учета искажения поля земляных токов подземным сооружением. На основе этого решения выведены уравнения для токов в подземном сооружении и разности потенциалов между подземным сооружением и грунтом, по которой может быть определена плотность тока, затекающего в подземное сооружение.

Выведены формулы для среднего значения плотности тока утечки из подземного сооружения. Эта величина выражена через расход энергии на движение поездов и распределение его между подстанциями.

Электричество, № 6, 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

Первый русский электротехнический журнал

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

*Орган Академии наук СССР,
Министерства электростанций СССР
и Министерства электротехнической
промышленности СССР*

75-й год издания

Журнал «Электричество» выходит с 1 июля 1880 г. по инициативе выдающихся русских электротехников и физиков конца XIX в.: В. Н. Чиколева, П. Н. Яблочкова, А. Н. Лодыгина, Д. А. Лачинова, А. С. Попова, Я. И. Ковальского, Н. П. Булыгина, А. Г. Столетова, О. Д. Хвольсона, Ф. Ф. Петрушевского, Н. Г. Егорова и др.

Журнал «Электричество» ведет систематическую пропаганду научно-технических знаний и методов в области электричества, освещает проблемные — теоретические и инженерные — вопросы электротехники, результаты научно-исследовательских работ, опыт эксплуатации электротехнических установок и информирует о выпуске нового электроэнергетического оборудования.

Журнал «Электричество» рассчитан на широкие круги электротехников — инженеров и научных работников — и направлен на оказание им действенной помощи в разработке и решении важнейших практических и теоретических задач, возникающих в работе по электрификации всех отраслей народного хозяйства Советского Союза.

Журнал «Электричество» содержит обзорные материалы, специально предназначенные для расширения научно-технического кругозора молодых инженеров и научных работников.

Журнал «Электричество» дает научно-техническую консультацию читателям.

Журнал «Электричество» освещает вопросы истории электротехники, роль отечественных ученых и изобретателей; информирует читателей в рефератах и обзорах об актуальных материалах советской и иностранной электротехнической периодики; сообщает в хроникальных заметках о важнейших событиях и совещаниях электротехнической общественности страны, о решениях технических управлений МЭС и МЭП, о юбилейных и памятных датах.

Журнал «Электричество» регулярно помещает научно-технические дискуссии и критико-библиографические материалы.

Журнал «Электричество» на 1955 г. можно выписать в любом почтовом отделении и конторе Союзпечати, а также через уполномоченных по подписке на предприятиях, в институтах и в учреждениях.

12 номеров в год

144 печ. л.

Подписная цена на II полугодие

48 руб.