

Задачи электропромышленности по созданию нового электрооборудования для сельского хозяйства

Кандидат техн. наук А. П. ЗЛАТКОВСКИЙ и инж. Я. С. ТЕПЛИЦКИЙ

Москва

Электрификация сельского хозяйства нашей страны развивается нарастающими темпами. Многие колхозы и совхозы страны стали образцовыми электрифицированными хозяйствами, где электроэнергия широко используется для производственных и коммунально-бытовых нужд.

Наряду с ростом общей мощности вводимых в эксплуатацию сельских электроустановок из года в год растет средняя мощность построенных гидроэлектростанций и трансформаторных подстанций, повышается технический уровень энергоустройств и особенно гидромеханического и электротехнического оборудования. Сельские электростанции, работавшие изолированно, объединяются в местные энергетические системы. Начинает широко осуществляться присоединение сельских потребителей к сетям крупных энергосистем и промышленных электростанций. Большое значение приобретает автоматизация электростанций и в первую очередь гидроэлектростанций.

Благодаря всем этим мероприятиям повышается качество электроэнергии, вырабатываемой сельскими электростанциями, обеспечиваются надежность их работы и бесперебойность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, снижается стоимость электроэнергии, что способствует дальнейшему внедрению ее в сельскохозяйственное производство и быт сельского населения.

Несмотря на успехи, развитие сельской электрификации все же отстает от растущих потребностей в электроэнергии колхозов, совхозов и мтс. Одной из причин такого отставания является отсутствие массового выпуска машин, аппаратов, комплектных устройств, эксплуатационных приспособлений и прочих видов оборудования и материалов, отвечающих по своим техническим параметрам, простоте и экономичности требованиям сельской электрификации.

Как известно, сельские потребители электроэнергии отличаются раздробленностью и распыленностью, сезонностью потребления и специфической технологии сельскохозяйственного производ-

ства. Сравнительно небольшая плотность электрических нагрузок в сельском хозяйстве и большие радиусы действия сельских электроустановок не позволяют применить для них те же схемы электрических соединений и те же конструкции различных элементов, которые приняты для промышленных и городских электроустановок. Особенности сельских электроустановок в ряде случаев обуславливают и специальные требования к электрическому оборудованию, аппаратуре и материалам.

Особенно важно наметить основные задачи электропромышленности в области выпуска новых типов электрооборудования для сельского хозяйства. При этом необходимо исходить из приведенных на рис. 1..5 типовых схем электрических соединений сельских электроустановок.

Электрические станции с генераторами напряжением 400/230 в и шинами генераторного напряжения (рис. 1) чаще всего сооружаются для электроснабжения укрупненных и сосредоточенных на сравнительно небольшой территории потребителей, например мастерских и усадеб мтс, совхозов, предприятий по переработке сельскохозяйственных продуктов и т. п.

Более мощные сельские электростанции общего пользования, т. е. обслуживающие сельскохозяйственные районы с разнообразными потребителями, сооружаются по схеме блока генератор—трансформатор (рис. 2 и 3). На них устанавливаются генераторы напряжением 0,4 (при мощности в единице до 400..500 ква) или 6,3 кв (при мощности в единице, большей 400..500 ква) и повышающие трансформаторы 0,4/10, 6/10 или 6,3/35 кв. От шин повышенного напряжения этих станций отходят радиальные линии 10 кв длиной 15..20 км или 35 кв длиной 50..60 км.

Напряжение 35 кв применяется для питания отдаленных потребителей. Присоединение к сетям районных и местных энергосистем обычно осуществляется также при напряжении 35 кв (рис. 4). Весьма эффективно применение в сельских сетях

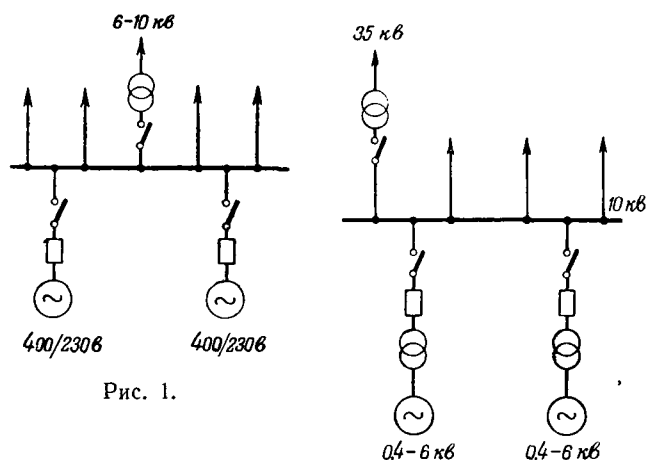


Рис. 1.

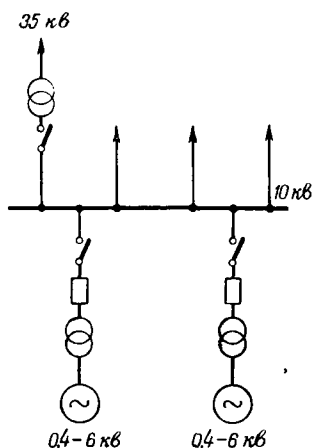


Рис. 2.

однотрансформаторных подстанций 35/10 кВ со схемой блока линия—трансформатор (рис. 5).

Прежде всего следует признать ненормальным то положение, что приходится иметь дело с большим количеством разнообразных типов и систем синхронных генераторов, выпускаемых промышленностью для сельских электростанций. Необходимо создать единую серию синхронных генераторов мощностью примерно до 2 000 кВА в единице, подразделив их на горизонтальные и вертикальные. В зависимости от характера первичного двигателя горизонтальные генераторы в свою очередь должны подразделяться на гидро-, турбо-, дизель- и локомобиль-генераторы. Вертикальными являются только гидрогенераторы.

Генераторы мощностью до 150 кВА должны быть быстроходными (750...1 500 об/мин); их связь с первичным двигателем должна осуществляться посредством плоскоременной или клиноременной передачи. На передвижных электростанциях и станциях, оборудованных быстроходными двигателями внутреннего сгорания или быстроходными паровыми машинами, валы генераторов соединяются непосредственно с валами двигателей. Валы всех генераторов, мощность которых больше 150 кВА, должны быть соединены также непосредственно с валами первичных двигателей. В соответствии с номинальной скоростью вращения наиболее распространенных гидротурбин, стационарных дизелей и локомобилей скорость вращения гидро-, дизель- и локомобиль-генераторов следует принимать по шкале: 428, 375, 300, 250, 214, 187 и 125 об/мин.

Для уменьшения степени неравномерности хода первичных двигателей (особенно поршневых) в целях повышения устойчивости работы агрегатов при параллельной работе следует разработать для сельских электростанций опытные конструкции генераторов с наружным ротором.

В связи с освоением гидромашиностроительными заводами новой серии поворотных лопастных гидротурбин с двойным регулированием электропромышленность должна наладить серийный выпуск вертикальных гидрогенераторов с полым валом для сельских электростанций. В серию этих гидрогенераторов следует включить генераторы

мощностью 250—2 000 кВА включительно по следующей шкале:

Напряжение, в	6 300				400/230			
	Мощность, кВА				Скорость вращения, об/мин			
Мощность, кВА	2 000	1 250	800	630	500	400	320	250
Скорость вращения, об/мин								
428		+	+					
375	+	+	+	+				
300	+	+	+	+	+	+	+	+
250		+	+	+	+	+	+	+
214		+	+		+	+	+	+
187	+	+	+		+		+	+
150	+	+	+		+			
125	+	+	+		+			

Гидрогенераторы мощностью больше 2 000 кВА относятся к машинам индивидуального исполнения, но и они должны удовлетворять основным требованиям сельской электрификации, которые приводятся ниже.

В целях обеспечения надежной работы устройств автоматического управления гидроагрегатами необходимо, чтобы электродвигатель маятника автоматического регулятора скорости гидротурбины питался независимо от главного генератора. Для этого каждый гидрогенератор, помимо возбуждателя, должен иметь еще регулярный генератор. Желательно, чтобы и возбуждатель и регуляторный генератор приводились во вращение непосредственно от вала генератора либо посредством редукторной передачи.

Клиноременная передача, применяемая рядом заводов электропромышленности для привода возбуждателя, не вполне обеспечивает необходимое форсирование возбуждения генератора в аварийных режимах из-за проскальзывания отдельных ее ремней.

При наличии регуляторных генераторов можно отказаться от реле оборотов, так как защиту от разгона в этом случае может обеспечить обычное токовое реле, включенное в цепь регуляторного генератора. При этом следует учесть, что некоторые гидротурбины двойного регулирования, например типа ВБ, устанавливаемые в закрытых бетонных камерах, обычно укомплектовываются центробежными выключателями.

В соответствии с приведенными типовыми схемами сельских электростанций, а также в целях повышения надежности эксплуатации и обеспечения чувствительной защиты оборудования необходимо, чтобы генераторы для сельских электростанций имели выведенными все шесть концов статорной обмотки.

В комплект генератора, помимо других элементов и общих деталей, должны входить: автоматический регулятор напряжения (АРН) в виде компаундирующего устройства с корректором напряжения, автомат гашения поля (АГП) и устройство форсирования возбуждения.

Многоступенчатые по напряжению сельские электросети должны рассчитываться таким образом, чтобы уровень напряжения на зажимах любого токоприемника находился в допустимых, нормированных пределах $\pm 7,5 \dots 10\%$ номинального напряжения токоприемника при любых режимах электроустановки в целом или отдельных ее частей. Этого можно добиться лишь при условии автоматического регулирования напряжения в сетях. Одним из способов такого регулирования может явиться применение трансформаторов с автоматическим регулированием напряжения под нагрузкой на питающих подстанциях и линейных бустер-регуляторов на потребительских понизительных подстанциях

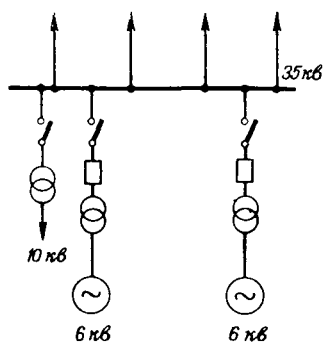


Рис. 3.

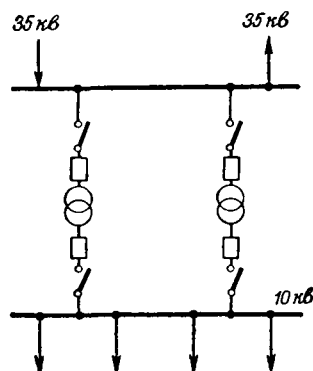


Рис. 4.

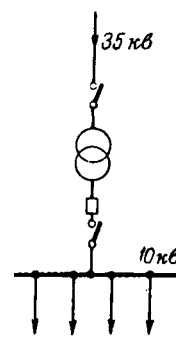


Рис. 5.

6 (10)/0,4/0,23 кВ. Независимо от этих устройств может применяться компенсация реактивных потерь напряжения при помощи статических конденсаторов или синхронных компенсаторов. В качестве последних могут быть использованы синхронные генераторы сезонных гидроэлектростанций небольшой мощности, присоединенных к сетям местных или крупных энергосистем.

Устройством для регулирования напряжения должны быть снабжены все поставляемые для сельских электроустановок силовые трансформаторы напряжением 35₆₍₁₀₎ и 110₆₍₁₀₎ кВ и мощностью 560 кВА и выше. Напряжение трансформаторов должно регулироваться в пределах $\pm 10\%$ ступенями по 2,5%. Регулирование должно быть как автоматическим, так при необходимости и ручным. Трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой должны изготавливаться для установки их на открытом воздухе.

Для питания мелких потребителей (освещение, мелкие двигатели и бытовая нагрузка) должны применяться однофазные трансформаторы малой мощности. Благодаря простоте конструкции однофазных трансформаторных подстанций, устраиваемых на обычных промежуточных опорах линий 6 (10) кВ, и возможности увеличения их количества подстанции приближаются к потребителю. Это позволяет максимально упростить, а иногда почти полностью ликвидировать воздушную сеть низкого напряжения.

Электропромышленность должна наладить массовое производство однофазных масляных трансформаторов наружной установки типа ОМС

мощностью 5 и 10 кВА и напряжением 6 (10)/2 × 0,23 кВ. Эти трансформаторы должны быть укомплектованы комбинированными двухполюсными высоковольтными разъединителями-предохранителями, пристраиваемыми непосредственно к трансформаторам и управляемыми штангой со столба подстанции. Обмотки однофазных трансформаторов должны иметь ответвления, позволяющие регулировать их напряжение в пределах $\pm 5\%$ номинального.

Наиболее распространенным типом потребительских понизительных трансформаторных подстанций являются мачтовые подстанции, устанавливаемые на специальных деревянных конструкциях. Элементы электрической части такой под-

станции (трансформаторы, разъединители и т. п.), изготавливаемые многими заводами, весьма разнообразны по своему исполнению. Электропромышленность должна наладить выпуск для сельской электрификации комплектов трансформаторных подстанций, изготавливаемых по нескольким обязательным стандартам. Это позволит сократить сроки строительства и монтажа сельских электроустановок, понизит их стоимость и облегчит эксплуатацию. Если комплекты трансформаторные подстанции будут устанавливаться только во вновь электрифицируемых колхозах, то годовая потребность в них составит не менее десяти тысяч штук, так как каждому укрупненному колхозу потребуются три-четыре такие подстанции.

Комплектные закрытые трансформаторные подстанции (КЗТП) предназначены для установки их на открытом воздухе в сельских населенных пунктах и полевых установках. Они должны изготавливаться на напряжение 6 (10) кВ с высоковольтной стороны и 400/230 В с низковольтной стороны на мощности от 10 до 100 кВА включительно.

Оборудование КЗТП должно быть заключено в стальной водонепроницаемый кожух с двумя дверями, через одну из которых открывается доступ к высоковольтной части подстанции, а через другую — к щиту низкого напряжения. В качестве высоковольтных разъединителей, помещаемых внутри кожуха, желательно применить малогабаритные разъединители внутренней установки специального изготовления на номинальный ток 20 А, напряжение 6 и 10 кВ и максимально допустимые амплитуды токов короткого замыкания до 5 кА.

Для защиты от атмосферных перенапряжений необходимо предусмотреть установку вентильных разрядников подстанционного типа. На четырех линиях низкого напряжения, отходящих от подстанции и предназначенных для питания смешанной (силовой и осветительной) нагрузки, должны устанавливаться пакетные выключатели на номинальные токи 25 — 100 а и соответствующие плавкие предохранители. Между силовым трансформатором и сборными шинами низкого напряжения устанавливается трехполюсный рубильник на ток до 200 а с плавкими предохранителями. Для учета энергии на шите низкого напряжения должен быть установлен трехфазный счетчик для неравномерной нагрузки фаз при четырехпроводной системе с трансформаторами тока класса 0,5. Точная работа счетчика должна быть гарантирована при температурах $+35^{\circ} \dots -30^{\circ}$.

Комплектные подстанции устанавливаются на опорах так, чтобы высота от земли до зажимов линейных выводов высокого напряжения была не ниже 4,5 м, а до выводов низкого напряжения — не ниже 3 м.

Для дальнейшего развития сельской электрификации большое значение имеет внедрение комплектных распределительных устройств для наружной установки на напряжение 10 кВ (КРУН-10). Эти устройства предназначаются для сельских повысительных и понизительных подстанций с напряжениями 0,4/10, 6,3/10 и 35/10 кВ. Комплектование КРУН-10 должно производиться применительно к типовым схемам электрических соединений сельских электроустановок.

В качестве отключающих аппаратов высокого напряжения в КРУН-10 должны применяться преимущественно баковые малообъемные масляные выключатели ВМБ-10 и выключатели нагрузки ВН-16.

Приводы масляных выключателей и выключателей нагрузки должны быть снабжены катушками дистанционного отключения, питающимися от трансформатора напряжения, и устройствами автоматического повторного включения. Измерительные приборы, счетчики и отдельно стоящие реле устанавливаются в ячейках КРУН-10, если они утеплены, либо в специальной закрытой сборной ячейке, общей для всего распределительного устройства. Вторичные цепи измерительных трансформаторов тока и напряжения, размещенных в ячейках КРУН-10, должны быть выведены на особые зажимы для присоединения к ним измерительных приборов и аппаратов защиты и сигнализации. Должна быть предусмотрена возможность устройства как воздушных, так и кабельных вводов и выводов на подстанциях, оборудованных КРУН-10.

В отношении блокировок, заземлений и прочих

устройств безопасности комплектные распределительные устройства должны удовлетворять повышенным требованиям, предъявляемым к подобным установкам в сельской местности.

В некоторых случаях может встретиться необходимость в применении отдельных аппаратов, которые могли бы быть установлены на открытом воздухе без всяких защитных кожухов. Прежде всего это касается облегченных масляных выключателей напряжением 6 и 10 кВ. Выключатели для наружной установки должны иметь комплект встроенных трансформаторов тока. В качестве приводов для этих выключателей должны применяться любые приводы дистанционного управления, например, грузовые, пружинно-грузовые, соленоидные и др.

Касаясь электрических сетей, необходимо отметить, что назрела необходимость в освоении производства специальных алюминиево-стальных проводов для воздушных линий и специальных облегченных и дешевых кабелей с хлорвиниловой оболочкой для подземных линий. Алюминиево-стальные провода отличаются от обычных стале-алюминиевых проводов тем, что они имеют алюминиевый сердечник, скрученный из отдельных жил, и оболочку из стальных жил. Применение кабелей в сельских электросетях даст существенную экономию лесоматериалов, расходуемых на столбы. Кроме того, это мероприятие сыграет большую роль в улучшении защиты сельского населения от поражения током при грозовых перенапряжениях. Всесоюзный научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства разработал требования к алюминиево-стальным проводам и шкалу их сечений, а также требования к подземным кабелям с хлорвиниловой изоляцией.

В настоящей статье мы вкратце коснулись задач электропромышленности в части освоения производства некоторых новых типов электрооборудования для сельских электростанций, подстанций и сетей. Задачи освоения производства электрооборудования для сельских потребительских установок мы не касались. Этот вопрос может быть успешно решен только на основе органического совмещения и рационального сочетания технологической и электрической частей всякой сельскохозяйственной машины, работающей на электроприводе. Только при таком подходе можно будет полностью использовать все преимущества, которые дает электропривод по сравнению с другими видами привода, и усовершенствовать сам технологический процесс. Решение этой задачи должно быть возложено не только на электропромышленность, но и на сельскохозяйственное машиностроение.

Расчет пускового процесса в системе генератор—двигатель

Кандидат техн. наук, доц. О. А. СИНИЦЫН

Государственный проектный институт
„Тяжпромэлектропроект“

Нахождение максимума пускового тока двигателя по заданной форсировке при параметрической схеме генератор—двигатель (рис. 1), а также времени пуска требует производства трудоемких расчетов по уравнениям, имеющим вид показательной или логарифмической функции. Оценка качества получаемого процесса требует дополнительных расчетов и не дает общего представления о влиянии отдельных параметров на пуск двигателя.

Поэтому была поставлена задача связать между собой аналитически все величины, характеризующие пуск двигателя, и дать их в виде универсальных кривых, использование которых сведет к минимуму необходимые подсчеты и даст наглядную оценку качества процесса пуска. Такие кривые будут пригодны для схем с электромашинным управлением в случае пуска при насыщенном электромашинном усилителе.

При пуске двигателя по схеме рис. 1 закрываются контакты $\mathcal{L}$ и Φ и э. д. с. генератора нарастает с форсировкой от нуля до номинальной. После этого контакт Φ открывается и форсировка прекращается.

На рис. 2 даны примерные кривые скорости и тока двигателя при пуске с учетом неизменного статического момента нагрузки двигателя.

Скорость идеального холостого хода двигателя n_0 , пропорциональная э. д. с. генератора, нарастает при пуске по экспоненте. Влияние статического момента учтено падением скорости Δn_c . Трогание двигателя при пуске происходит, как известно, с запаздыванием после включения привода на время t_z , в течение которого ток двигателя нарастает от нуля до статического (I_c); затем он остается неизменным. Основной процесс разгона двигателя происходит от момента его трогания (точка O') до момента снятия форсировки генератора (точка B'), чему соответствует скорость двигателя n_6 (точка B).

Динамический ток двигателя i_d показан кривой $O'BB$ в осях с началом координат в точке O' .

Найдем выражения, связывающие все основные величины привода, характеризующие пуск двигателя. Качество процесса пуска предлагаем оценивать отношением времени разгона двигателя t'_n при форсировке генератора (до скорости n_6) к идеальному времени разгона двигателя t_{un} до той же скорости ($n_a = n_6$) при неизменном динамическом токе, равном его максимуму. Назовем отношение этих времен относительным временем пуска:

$$t_{om} = \frac{t'_n}{t'_{un}} \quad (1)$$

Время t_{om} равно обратной величине коэффициента k_i заполнения диаграммы пускового тока двигателя и всегда больше единицы; чем оно ближе к единице, тем быстрее происходит разгон двигателя при данном максимуме пускового (динамического) тока.

Из подобия треугольников $Oa'a$ и $Ob'b$, а также пропорциональности площади, ограниченной кривой динамического тока двигателя, соответствующему изменению скорости двигателя следует:

$$t_{om} = \frac{t'_n}{t'_{un}} = \frac{n_6}{n_6} = \frac{\text{площ. } O'CD'B'}{\text{площ. } O'B'B'B'} = \frac{1}{k_i} \quad (2)$$

Таким образом, время t_{om} характеризует также величину коэффициента k_i , по которой часто судят о качестве пуска двигателя.

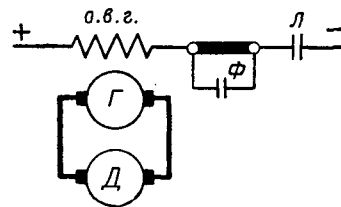


Рис. 1. Параметрическая схема генератор—двигатель для пуска двигателя.

Γ — генератор; $\mathcal{L}$ — двигатель; о. в. з. — обмотка возбуждения генератора; Φ — контактор форсировки; $\mathcal{L}$ — линейный контактор.

Найдем аналитическое выражение t_{om} , для чего определим предварительно выражения для t'_n и t_{un} . Время разгона нагруженного двигателя t'_n (рис. 2) согласно известному выражению [Л. 1] будет:

$$t'_n = T_z \ln \frac{\alpha_p}{\alpha_p - \left(1 - \frac{\Delta n_c}{n_{0n}}\right)},$$

где T_z — рабочая постоянная времени генератора для ненасыщенного прямолинейного участка его характеристики холостого хода.

Рабочая форсировка α_p (с учетом статического момента двигателя) равна полной форсировке генератора, но несколько уменьшенной за счет потери скорости двигателя от действия статического момента:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \frac{\alpha n_{0n} - \Delta n_c}{n_{0n}} = \alpha - \frac{\Delta n_c}{n_{0n}} = \\ &= \alpha - I_c^2 R^2 = \alpha - M_c^2 R^2. \end{aligned} \quad (3)$$

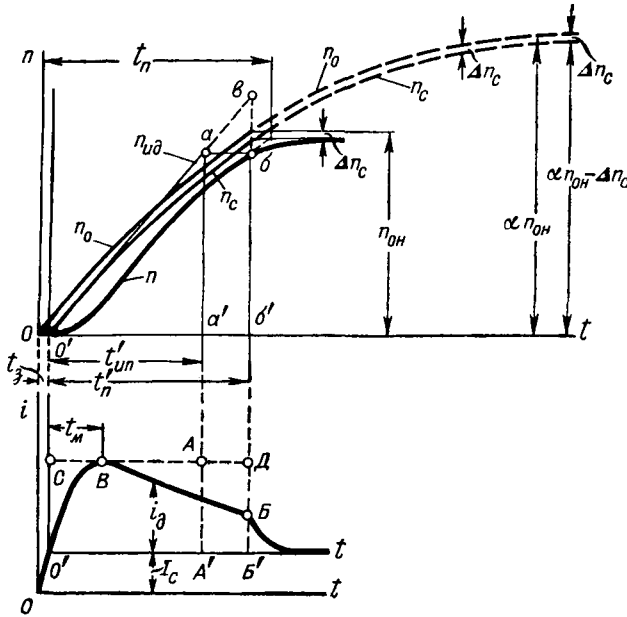


Рис. 2. Примерные кривые изменения скорости и тока двигателя при пуске.

Здесь I_c^{∂} — ток статической нагрузки двигателя в долях номинального; R^{∂} — сопротивление цепи якоря двигателя в долях номинального; $n_{0н}$ — скорость идеального холостого хода двигателя при номинальной э. д. с. генератора.

Полная форсировка генератора α выражается, как известно [Л. 1], через форсировку по напряжению и коэффициент μ , учитывающий начальный прямолинейный наклон характеристики холостого хода генератора

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \mu. \quad (4)$$

Зная коэффициент μ , можно по α найти α_0 , и наоборот.

Время разгона двигателя с учетом уравнения (3)

$$t'_n = T_z \ln \frac{\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}}{\alpha - 1}. \quad (5)$$

Выражение для времени идеального разгона двигателя

$$\begin{aligned} t'_{un} &= \frac{GD^2 n_0}{375 M_{\partial m}} = \frac{GD^2 [n_{0н} - (n_{0н} - n_0)]}{375 \cdot C_m \cdot I_{\partial m}} = \\ &= \frac{GD^2 \cdot R}{375 C_m \cdot C_e} \cdot \frac{e_{2н} - (e_{2н} - e_0)}{R \cdot I_{\partial m}} = T_m \frac{I_{\kappa} - (I_c + i_{\partial 0})}{I_{\partial m}}. \end{aligned}$$

Здесь T_m — электромеханическая постоянная времени двигателя в системе генератор — двигатель.

Постоянные C_m и C_e равны:

$$C_m = \frac{M_{\kappa}}{I_{\kappa}}; \quad C_e = \frac{e_{2н}}{n_{0н}}.$$

Далее, заменим в уравнении для t'_{un} максимальный динамический ток двигателя при пуске выражением [Л. 1]

$$I_{\partial m} = (\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}) I_{\kappa} \cdot \left(\frac{T_m}{T_z} \right)^{\frac{T_z}{T_z - T_m}}. \quad (6)$$

Получаем:

$$\begin{aligned} t'_{un} &= \frac{T_m [I_{\kappa} - (I_c + i_{\partial 0})]}{\frac{T_z}{T_z - T_m} (\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}) \cdot I_{\kappa} \left(\frac{T_m}{T_z} \right)^{\frac{T_z}{T_z - T_m}}} = \\ &= \frac{T_m [I_{\kappa} - (I_c + i_{\partial 0})]}{\frac{T_z}{T_z - T_m} (\alpha I_{\kappa} - I_c)} \cdot \left(\frac{T_m}{T_z} \right)^{\frac{T_z}{T_z - T_m}}. \end{aligned}$$

Здесь статический ток I_c получен из выражения

$$I_c^{\partial} R^{\partial} \cdot I_{\kappa} = \frac{I_c}{I_{\kappa}} \cdot \frac{R}{R_{\kappa}} \cdot \frac{e_{2н}}{R} = \frac{I_c}{I_{\kappa}} \cdot I_{\kappa} = I_c.$$

Подставляя найденные времена t'_n и t'_{un} в уравнение (1), получим:

$$t_{om} = \frac{t'_n}{t'_{un}} = \frac{T_z \ln \frac{\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}}{\alpha - 1} \cdot (\alpha I_{\kappa} - I_c) \left(\frac{T_m}{T_z} \right)^{\frac{T_z}{T_z - T_m}}}{T_m (I_{\kappa} - i_{\partial 0} - I_c)},$$

При холостом пуске двигателя $I_c = 0$ и формула для t_{om} приобретает более простой вид. Величина времени t_{om} при этом почти не меняется, поэтому можно принимать $I_c = 0$.

Чтобы доказать это, представим t_{om} в виде произведения двух выражений, в одно из которых соберем все множители, зависящие от статического тока I_c :

$$\begin{aligned} t_{om} &= \frac{T_z}{T_m} \cdot \frac{\alpha I_{\kappa}}{I_{\kappa} - i_{\partial 0}} \cdot \frac{I_{\kappa} - i_{\partial 0}}{I_{\kappa} - i_{\partial 0} - I_c} \cdot \frac{\alpha I_{\kappa} - I_c}{\alpha I_{\kappa}} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} \times \\ &\times \frac{\ln \frac{\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}}{\alpha - 1}}{\ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}} \left(\frac{T_m}{T_z} \right)^{\frac{T_z}{T_z - T_m}} = \\ &= \frac{\alpha I_{\kappa}}{I_{\kappa} - i_{\partial 0}} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} \cdot \frac{T_z}{T_m} \left(\frac{T_m}{T_z} \right)^{\frac{T_z}{T_z - T_m}} K. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь

$$K = \left[\frac{I_{\kappa} - i_{\partial 0}}{I_{\kappa} - i_{\partial 0} - I_c} \cdot \frac{\alpha I_{\kappa} - I_c}{\alpha I_{\kappa}} \cdot \frac{\ln \frac{\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}}{\alpha - 1}}{\ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}} \right].$$

При $I_c = 0$ $K = 1$. Выражение перед коэффициентом K является относительным временем пуска ненагруженного двигателя.

Коэффициент K может быть путем простых преобразований выражен через

$$I_c^{\partial} R^{\partial}; i_{\partial 0}^{\partial} R^{\partial} \text{ и } \alpha.$$

При максимально возможной величине $I_c^{\partial} R^{\partial} = 0,15$ и возможных пределах

$$i_{\partial 0}^{\partial} R^{\partial} = 0,075 \dots 0,2 \text{ и } \alpha = 1,5 \dots 4$$

в любом сочетании $K = 0,975 \dots 1,015$.

Принимаем в уравнении (7) $K \approx 1$, полагая максимально возможную ошибку ($-2,5\%$) допустимой.

Для нахождения окончательного выражения относительного времени пуска t_{om} найдем предварительно динамический ток $i_{\partial 0}$ в момент прекращения форсировки генератора.

Этот ток может быть выражен достаточно точно через известные величины.

Динамический ток [Л. 1]

$$i_{\partial} = \frac{GD^2}{375C_m} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375C_m C_e} \cdot \frac{de_{\partial}}{dt}.$$

Здесь e_{∂} — э. д. с. якоря двигателя. Для цепи якоря имеем:

$$e_{\partial} = e_z - (I_c + i_{\partial}) R,$$

отсюда

$$i_{\partial} = \frac{GD^2 \cdot R}{375C_m C_e} \left(\frac{1}{R} \frac{de_z}{dt} - \frac{di_{\partial}}{dt} \right) = \frac{T_m}{R} \frac{de_z}{dt} - T_m \frac{di_{\partial}}{dt}.$$

Иногда в этом уравнении при нахождении динамического тока после его максимума ввиду относительно медленного изменения тока пренебрегают членом с производной по току. Более точно в этом случае можно учитывать влияние производной по току некоторым неизменным по времени коэффициентом β_2 при члене с производной по э. д. с. генератора. Найдем этот коэффициент.

Представим выражение для динамического тока в конце пуска в виде:

$$i_{\partial 0} = \frac{T_m}{R} \frac{de_z}{dt} \left[1 - R \left(\frac{di_{\partial}}{dt} \right) \right] = \frac{T_m}{R} \cdot \frac{de_z}{dt} \cdot \beta. \quad (8)$$

Здесь через β обозначено выражение в скобках.

Величина β после подстановки соответствующих выражений производных динамического тока и э. д. с. генератора [Л. 1] будет равна:

$$\beta = \frac{T_z}{T_z - T_m} \left(1 - e^{-\frac{1}{T_z} \frac{T_z - T_m}{T_z}} \right).$$

Выразим время t'_n в долях времени t_m , учитывая, что согласно [Л. 1]

$$t_m = \frac{T_z T_m}{T_z - T_m} \ln \frac{T_z}{T_m}.$$

Подставляя отсюда отношение с постоянными времени в предыдущее уравнение, получим:

$$\beta = \frac{T_z}{T_z - T_m} \left[1 - e^{-\ln \left(\frac{T_m}{T_z} \right) \frac{t'_n}{T_z}} \right] = \frac{1 - \left(\frac{T_m}{T_z} \right)^{\frac{t'_n}{T_z}}}{1 - \frac{T_m}{T_z}},$$

где $t'_n = \frac{t'_n}{t_m}$.

Обычно пусковой ток двигателя достигает максимума ранее момента прекращения форсировки генератора, поэтому $t'_n > 1$.

При изменении t'_n от 1 до ∞ величина β увеличивается незначительно, потому что максимальная величина отношения $T_m : T_z$ обычно не превосходит 0,15 и вычитаемое числителя в выражении для β меняется от 0,85 до 1.

В такой же пропорции меняется и β .

При возможных значениях $t'_n = 1,5 \dots \infty$ примем $t'_n = 2$, чему соответствует

$$\beta = \beta_2 = \frac{1 - \left(\frac{T_m}{T_z} \right)^2}{1 - \frac{T_m}{T_z}} = 1 + \frac{T_m}{T_z}.$$

Примем β_2 в уравнении (8) в качестве расчетного коэффициента. Получаемая при этом ошибка, определяемая отклонением β_2 от действительной переменной величины β , лежит в пределах от $+3,6$ до $-2,26\%$.

Если принять $t'_n = 1$, получаемая ошибка была бы больше и лежала бы в пределах от $-9,97$ до -15% . Заметим, что при $\frac{T_m}{T_z} < 0,15$ получаемые пределы ошибки при замене действительной величины β неизменным коэффициентом β_2 будут меньше указанных.

Далее, найдем в уравнении (8) производную э. д. с. генератора в момент прекращения его форсировки. С учетом уравнения (3)

$$e_z = (\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}) e_{zn} \left(1 - e^{-\frac{t'_n}{T_z}} \right),$$

откуда

$$\frac{de_z}{dt} = \frac{(\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}) e_{zn}}{T_z} e^{-\frac{t'_n}{T_z}} = \frac{(\alpha - 1) e_{zn}}{T_z}.$$

Подставляя найденное выражение и принятую величину β_2 в уравнение (8), получим динамический ток $i_{\partial 0}$ в конце пуска:

$$i_{\partial 0} = I_k (\alpha - 1) \cdot \frac{T_m}{T_z} \left(1 + \frac{T_m}{T_z} \right).$$

Заменяя в уравнении (7) ток $i_{\partial\partial}$ его значением, получим после сокращения тока I_{κ} окончательную формулу для относительного времени пуска:

$$t_{om} = \frac{\ln \frac{\alpha}{\alpha-1}}{\left[1 - (\alpha-1) \frac{T_m}{T_z} \left(1 + \frac{T_m}{T_z}\right)\right] \cdot \frac{T_m}{T_z}} \cdot \alpha \left(\frac{T_m}{T_z}\right)^{\frac{T_z}{T_z-T_m}}. \quad (9)$$

Здесь t_{om} выражено через полную форсировку генератора α и отношение постоянных $\frac{T_m}{T_z}$.

Свяжем полученное выражение с максимальной величиной динамического тока $I_{\partial mx}$ при пуске ненагруженного двигателя [Л. 1]:

$$I_{\partial mx} = \alpha I_{\kappa} \left(\frac{T_m}{T_z}\right)^{\frac{T_z}{T_z-T_m}} = \frac{\alpha I_{\kappa}}{R^{\partial}} \left(\frac{T_m}{T_z}\right)^{\frac{T_z}{T_z-T_m}},$$

или

$$I_{\partial mx} \cdot R^{\partial} = \alpha \left(\frac{T_m}{T_z}\right)^{\frac{T_z}{T_z-T_m}}. \quad (10)$$

Правая часть этого равенства имеется в выражении (9) для относительного времени пуска. Вместо максимума пускового тока $I_{\partial mx}$ в уравнении (10) получено произведение $I_{\partial mx} R^{\partial}$, но R^{∂} при расчетах известно, и поэтому произведение $I_{\partial mx} R^{\partial}$ характеризует максимум тока.

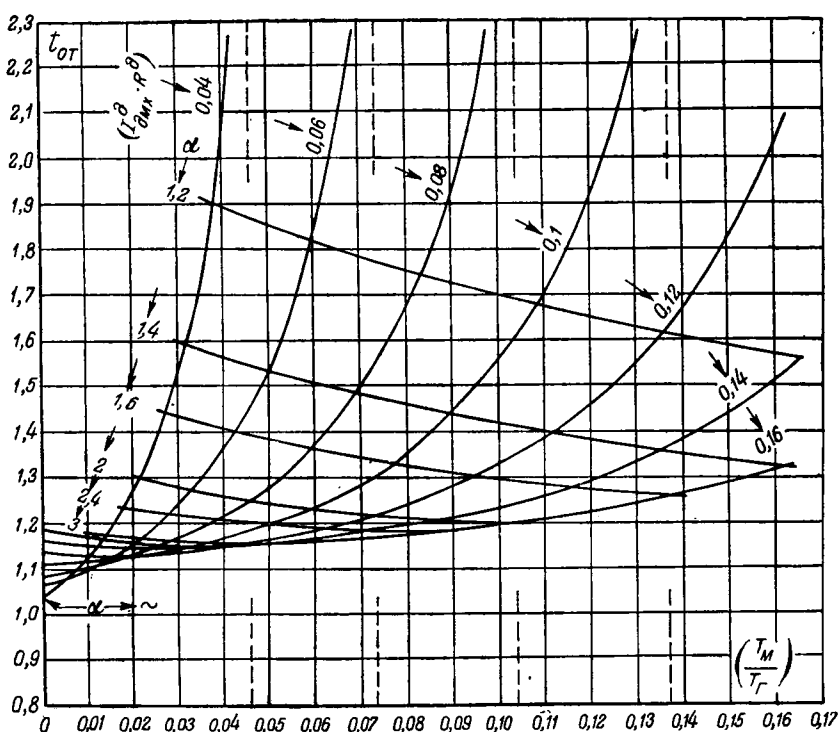


Рис. 3. Универсальные кривые форсировки, тока и времени для параметрической системы генератор — двигатель.

Уравнения (9) и (10) являются окончательными, связывающими четыре величины, характеризующие пуск двигателя, а именно:

$$t_{om}; \alpha; \frac{T_m}{T_z}; I_{\partial mx} R^{\partial}. \quad (11)$$

Любые две из этих четырех величин определяют две остальные по уравнениям (9) и (10).

На рис. 3 даны универсальные кривые, построенные по этим уравнениям, связывающие между собой все четыре указанные выше величины. Кривые построены для пределов изменений

$$\frac{T_m}{T_z} = 0 \dots 0,16 \text{ и } \alpha = 0 \dots \infty.$$

Построение кривых произведено следующим образом. Задаваясь величинами $I_{\partial mx} R^{\partial}$ и α , из уравнения (10) находили отношение $\frac{T_m}{T_z}$ и далее из уравнения (9) — относительное время пуска t_{om} . Любая точка на графике рис. 3 определяет одновременно значения всех четырех величин.

Вместе с тем положение любой точки на рис. 3 определяется двумя любыми величинами из четырех. Например, по заданному отношению постоянных $\frac{T_m}{T_z}$ и форсировке α , пользуясь кривыми, можно найти максимум пускового тока ненагруженного двигателя $I_{\partial mx}$ (найдя сперва по кривым величину $I_{\partial mx} R^{\partial}$ и разделив ее на R^{∂}), а также относительное время пуска t_{om} . При отсутствии форсировки ($\alpha=1$) кривые

для пускового тока ($I_{\partial mx} R^{\partial}$) уходят вверх в бесконечность. Асимптоты этих кривых показаны на рис. 3 пунктирными вертикальными прямыми. Из кривых, например, сразу видно, можно ли получить желаемый максимум тока ($I_{\partial mx} R^{\partial}$) при заданном отношении постоянных $\frac{T_m}{T_z}$.

Если величина отношения $\frac{T_m}{T_z}$ больше абсциссы асимптоты желаемой кривой для $I_{\partial mx} R^{\partial}$, получение заданного максимума пускового тока невозможно.

С увеличением форсировки α , а также уменьшением отношения $\frac{T_m}{T_z}$ качество процесса пуска повышается, так как относительное время пуска t_{om} уменьшается (оставаясь всюду больше единицы).

Из рис. 3 видно, что увеличение форсировки выше 3 может дать

лишь незначительное снижение t_{om} . При изменении форсировки α в пределах 1,5–3 относительное время пуска может колебаться в пределах 1,52–1,15.

При насыщенных генераторах фактическое время будет несколько больше получаемого из кривых вследствие снижения форсировки в конце пуска. При больших форсировках погрешность будет меньше.

Промежуточные величины α и $(I_{\partial mx}^{\partial} R^{\partial})$ наводятся на рис. 3 интерполяцией.

Найдем максимум пускового тока I_m и время пуска t_n нагруженного двигателя при неизменном статическом моменте M_c по известным величинам $I_{\partial mx}$ и t_{om} . Максимум пускового тока

$$I_m^{\partial} = I_{\partial m}^{\partial} + I_c^{\partial}.$$

$I_{\partial m}^{\partial} < I_{\partial mx}$ за счет омического падения напряжения в цепи якоря двигателя от тока I_c и уменьшения вследствие этого форсировки генератора от полной α до рабочей α_p .

Ток $I_{\partial m}^{\partial}$ можно выразить через $I_{\partial mx}^{\partial}$:

$$I_{\partial m}^{\partial} = I_{\partial mx}^{\partial} \frac{\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}}{\alpha}.$$

Окончательно

$$I_m^{\partial} = I_{\partial mx}^{\partial} \frac{\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}}{\alpha} + I_c^{\partial}. \quad (12)$$

По этому уравнению находится максимум пускового тока I_m^{∂} нагруженного двигателя по известному максимуму тока $I_{\partial mx}^{\partial}$ для ненагруженного двигателя.

Время пуска нагруженного двигателя в секундах (рис. 2) с учетом времени запаздывания трогания двигателя с места t_3 будет:

$$t_n = t_3 + t_{un} \cdot t_{om}. \quad (13)$$

По этому уравнению можно найти время пуска двигателя, зная относительное время пуска t_{om} из универсальных кривых.

Время запаздывания пуска с хорошим приближением определяется по формуле

$$t_3 = T_z \cdot \frac{I_c}{\alpha \cdot I_K} = \frac{T_z \cdot I_c^{\partial} R^{\partial}}{\alpha}. \quad (14)$$

Это время при больших величинах $I_c^{\partial} R^{\partial}$ и форсировках может доходить до 15% времени подъема э. д. с. генератора при пуске (или времени его форсировки).

В большинстве случаев, однако, это время настолько мало, что им можно пренебречь.

Время идеального разгона нагруженного двигателя до установившейся скорости при неизменном динамическом моменте $M_{\partial m}$, соответствующем максимуму динамического тока $I_{\partial m}$,

$$t_{un} = \frac{GD^2 \cdot \pi_K}{375 M_{\partial m}} \cdot \frac{1 - I_c^{\partial} R^{\partial}}{1 - R^{\partial}} = \frac{GD^2 \cdot \pi_K}{375 M_K \cdot I_{\partial m}^{\partial}} \cdot \frac{1 - I_c^{\partial} R^{\partial}}{1 - R^{\partial}}. \quad (15)$$

Это время иногда для расчетов удобнее выражать через электромеханическую постоянную T_m . Умножая и деля правую часть равенства (15) на R^{∂} , получаем;

$$t_{un} = \frac{GD^2 \cdot \pi_K}{375 M_K} \cdot \frac{R^{\partial}}{1 - R^{\partial}} \cdot \frac{1 - I_c^{\partial} R^{\partial}}{I_{\partial m}^{\partial} R^{\partial}} = T_m \frac{1 - I_c^{\partial} R^{\partial}}{I_{\partial m}^{\partial} \cdot R^{\partial}}. \quad (16)$$

Пример 1. Требуется определить максимум пускового тока двигателя и время пуска.

Данные двигателя:

$$M_K = 174 \text{ кгм}; \pi_K = 490 \text{ об/мин}; R^{\partial} = 0,07; GD^2 = 300 \text{ кгм}^2; M^{\partial} = 0,5.$$

Данные генератора:

$$T_z = 2,43 \text{ сек}; \alpha = 2,2.$$

Найдем отношение постоянных времени.

Электромеханическая постоянная двигателя

$$T_m = \frac{GD^2 \cdot \pi_K}{375 M_K} \cdot \frac{R^{\partial}}{1 - R^{\partial}} = \frac{300 \cdot 490}{375 \cdot 174} \times \times \frac{0,07}{1 - 0,07} \approx 0,17 \text{ сек.}$$

Отсюда искомое отношение постоянных

$$\frac{T}{T_z} = \frac{0,17}{2,43} = 0,07.$$

По этому отношению и форсировке генератора α находим на графике универсальных кривых (рис. 3) соответствующую точку, проводя ординату с абсциссой 0,07 до пересечения с кривой форсировки $\alpha = 2,2$ (кривая для $\alpha = 2,2$ находится интерполяцией и расположена между кривыми $\alpha = 2$ и $\alpha = 2,4$).

Найденной точке на графике соответствуют

$$I_{\partial mx}^{\partial} R^{\partial} = 0,125, t_{om} = 1,2.$$

Максимум пускового тока по уравнению (12)

$$I_m^{\partial} = \frac{I_{\partial mx}^{\partial} R^{\partial}}{R^{\partial}} \cdot \frac{\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}}{\alpha} + I_c^{\partial} = \frac{0,125}{0,07} \cdot \frac{2,2 - 0,5 \cdot 0,07}{2,2} + 0,5 = 1,76 + 0,5 = 2,26$$

(или 226 % номинального).

Время пуска по уравнению (13) с учетом уравнений (14) и (16)

$$t_n = \frac{T_z I_c^{\partial} R^{\partial}}{\alpha} + T_m \cdot \frac{1 - I_c^{\partial} R^{\partial}}{I_{\partial m}^{\partial} R^{\partial}} \cdot t_{om} = \frac{2,43 \cdot 0,5 \cdot 0,07}{2,2} + + 0,17 \cdot \frac{1 - 0,5 \cdot 0,07}{1,76 \cdot 0,07} \cdot 1,2 = 0,0387 + 1,59 \approx 1,63 \text{ сек.}$$

Пример 2. Найти требуемую форсировку генератора α и время пуска двигателя t_n при заданном максимуме пускового тока двигателя $I_m^{\partial} = 1,8$.

Данные привода те же, что и в примере 1, но без форсировки α .

Для нахождения α и t_{om} по кривым на рис. 3 необ-

ходимо знать $\frac{T_m}{T_z}$ и $I_{\partial mx}^{\partial} R^{\partial}$.

Из примера 1

$$\frac{T_m}{T_z} = 0,07.$$

Величину $I_{\partial mx}^{\partial} R^{\partial}$ найдем по заданному максимуму пускового тока двигателя I_m^{∂} , используя уравнение (12):

$$I_{\partial mx}^{\partial} R^{\partial} = (I_m^{\partial} - I_c^{\partial}) \frac{\alpha}{\alpha - I_c^{\partial} R^{\partial}} \cdot R^{\partial}.$$

Характеристики и расчет электромагнитных муфт с ферромагнитным наполнителем

Кандидат техн. наук Г. М. ПЕТУХИН

Москва

Введение. В последние годы в электроприводе различных механизмов все большее распространение получает электромагнитная муфта с ферромагнитным наполнителем.

Эта муфта может применяться для сцепления двух валов, регулирования скорости, плавного запуска, регулирования и ограничения передаваемого момента, создания постоянного натяжения или давления, точной остановки, в качестве тормоза или динамометра и т. п.

Недостаточная изученность муфт и отсутствие в литературе материалов по их расчету побудили автора провести экспериментальное и теоретическое исследование их, что дало возможность определить основные свойства муфт и разработать инженерную методику их расчета.

Экспериментальное исследование. Опыты проводились на образцах муфт цилиндрического и дискового типов при различных числах и размерах рабочих зазоров и нескольких концентрациях

наполнителя (отношение веса порошка железа к весу масла). Исследование проводилось на муфтах с жидким наполнителем. Диапазон мощностей, охватываемый опытными муфтами, составлял 1,0...7,5 кВт при 1000...1500 об/мин.

На рис. 1 в схематическом виде показано устройство двух опытных муфт.

В качестве приводного электродвигателя использовался двигатель постоянного тока, регулируемый по схеме генератор — двигатель. Для создания регулируемой нагрузки применялся электромагнитный динамометр. Все это позволило определить характеристики муфт при широком диапазоне изменений скорости, скольжения и нагрузочного момента.

На рис. 2 приведена зависимость момента от тока возбуждения $M = \psi_1(I_a)$ для одной из опытных муфт с двумя рабочими зазорами по 1 мм при концентрации наполнителя 1:1. Эта характеристика определяет максимальный момент муфты и ее регулировочные свойства по моменту.

Характеристика снималась при постепенном увеличении тока возбуждения от нуля до максимума с последующим уменьшением от максимума до нуля. Она свидетельствует о наличии магнитного и механического гистерезисов, а также начального момента M_0 , обусловленного вязким трением и трением в уплотнении вала. Эксперименты показали, что отношение $\frac{\Delta M_{\max}}{M_{\max}}$ (рис. 2) колеблется в пределах 0,07...0,15,

а отношение $\frac{M_0}{M_{\max}}$ — в пределах 0,03...0,10.

На характеристику в значительной степени влияют размер рабочих зазоров, их число и концентрация наполнителя.

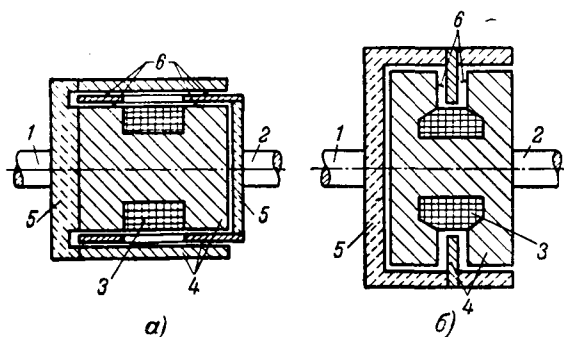


Рис. 1. Схематическая конструкция опытных муфт с ферромагнитным наполнителем.

а — цилиндрическая муфта с двумя рабочими зазорами; б — дисковая муфта с двумя рабочими зазорами; 1 — ведущий вал; 2 — ведомый вал; 3 — катушка возбуждения; 4 — детали из магнитных материалов; 5 — детали из немагнитных материалов; 6 — рабочие зазоры.

Форсировка здесь неизвестна, но $I_c^d R^d \ll 1$, а $\alpha > 1$. Дробь правой части равенства близка к единице и мало меняется при возможных величинах $\alpha = 1,5 \dots 4$.

Поэтому принимаем $\alpha = 2$; тогда

$$I_{\partial mx}^d R^d = (1,8 - 0,5) \cdot \frac{2}{2 - 0,5 \cdot 0,07} \cdot 0,07 = 0,0925.$$

Из кривых рис. 3 по этой величине и отношению постоянных времени (0,07) находим:

$$\alpha = 1,56 \text{ и } t_{om} = 1,37.$$

Время пуска t_n при известном t_{om} находится, как в примере 1.

Пример 3. Найти требуемые значения постоянной времени генератора T_z и относительного времени пуска t_{om} . Заданы:

$$I_{\partial mx}^d R^d = 0,1; \alpha = 2; T_m = 0,2 \text{ сек.}$$

Пользуясь кривыми рис. 3, по первым двум заданным величинам находим:

$$\frac{T_m}{T_z} = 0,0595; t_{om} = 1,23.$$

Далее,

$$T_z = \frac{T_m}{0,0595} = \frac{0,2}{0,0595} = 3,36 \text{ сек.}$$

Пример 4. Возможен ли пуск двигателя при

$$I_{\partial mx}^d = 0,8, \text{ если } \frac{T_m}{T_z} = 0,1 \text{ и } R^d = 0,08.$$

Находим:

$$I_{\partial mx}^d R^d = 0,8 \cdot 0,08 = 0,064.$$

Из кривых рис. 3 следует, что асимптота (вертикальная прямая) для кривой тока 0,064 расположена левее ординаты с абсциссой 0,1, и поэтому кривая тока 0,064 нигде не пересекает указанную ординату.

Следовательно, пуск с таким малым током невозможен даже при отсутствии форсировки.

Литература

1. Д. П. Морозов. Теория электропривода и автоматика реверсивных станков. Госэнергоиздат, 1949.

[9.12.1954]

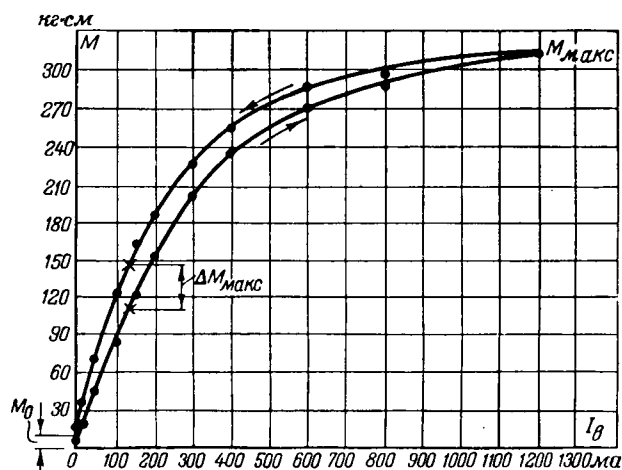


Рис. 2. Зависимость момента муфты от тока возбуждения.

Влияние размера рабочих зазоров объясняется в основном изменением проводимости магнитной цепи, а следовательно, и индукции в рабочих зазорах. Влияет также некоторое изменение удельной силы сцепления на один гаусс f_B , являющейся функцией величины зазора δ .

Влияние на характеристику числа рабочих зазоров двойное: с одной стороны, увеличение числа зазоров уменьшает магнитную проводимость, а следовательно, и индукцию в зазорах, что влечет за собой снижение момента; с другой стороны, увеличение числа зазоров приводит к увеличению рабочей поверхности и способствует росту момента муфты. Результат увеличения числа зазоров зависит от того, какой фактор будет преобладать. Как правило, при сильной концентрации наполнителя результат увеличения поверхности преобладает над результатом снижения проводимости, и в этом случае момент муфты при большем числе зазоров возрастает. При слабой концентрации имеет место обратное явление.

Увеличение концентрации наполнителя улучшает магнитную проводимость, что приводит к росту индукции и увеличению момента; этому способствует также рост числа частиц железа в зазорах и, следовательно, увеличение контактной поверхности.

На рис. 3 показана зависимость момента муфты от скорости без возбуждения $M_0 = \psi_2(n_1)$, а на рис. 4 — при возбуждении $M = \psi_3(n_1)$.

Из этих характеристик следует, что при росте относительной скорости между ведущим и ведомым элементами муфты наблюдается некоторое увеличение момента. При этом изменение относительной скорости в несколько раз вызывает изменение момента всего на 20...40%.

На рис. 5 и 6 приведены характеристики $n_2 = \varphi_1(M)$ и $n_2 = \varphi_2(I_B)$, показывающие способность муфт к регулированию числа оборотов в минуту n_2 при $n_1 = \text{const}$. Характеристики даны для муфты с двумя зазорами по 1 мм при концентрации наполнителя 5:1. При $M = \text{const}$ и достаточно большом токе возбуждения наблюдается синхронное вращение обеих частей

Рис. 3. Зависимость момента муфты от скорости при отсутствии возбуждения: $I_B = 0$; $n_2 = 0$; 1:3; 1:1; 5:1 — концентрации наполнителя.

а — муфта с одним зазором 1 мм; б — муфта с двумя зазорами по 1 мм; в — муфта с одним уплотняющим резиновым кольцом; г — муфта с двумя уплотняющими кольцами.

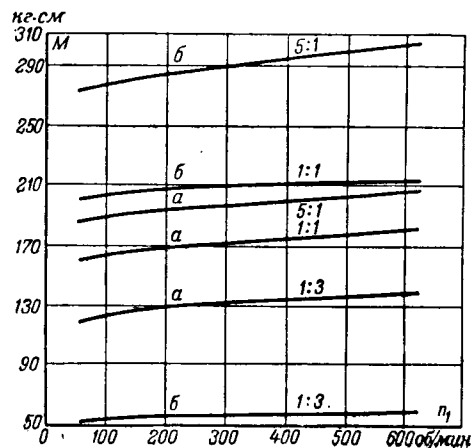
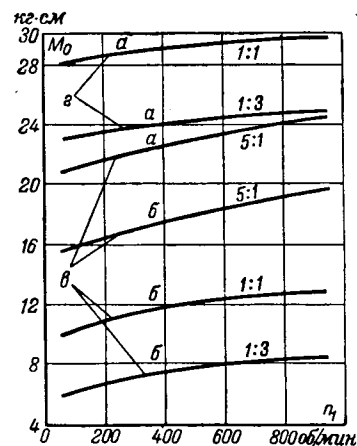


Рис. 4. Зависимость момента муфты от скорости при наличии возбуждения: $I_B = \text{const}$; $n_2 = 0$; 1:3, 1:1, 5:1 — концентрации наполнителя.

а — муфта с одним зазором 1 мм; б — муфта с двумя зазорами по 1 мм.

муфты; по мере снижения I_B начинается проскальзывание и n_2 становится меньше n_1 . Чем меньше I_B , тем больше разность $(n_1 - n_2)$, а при достаточно малом I_B наступает положение, когда $n_2 = 0$ (рис. 6).

Процентное изменение тока возбуждения, т. е. величина $\frac{I_{ск} - I_0}{I_{ск}} \cdot 100$, при регулировании

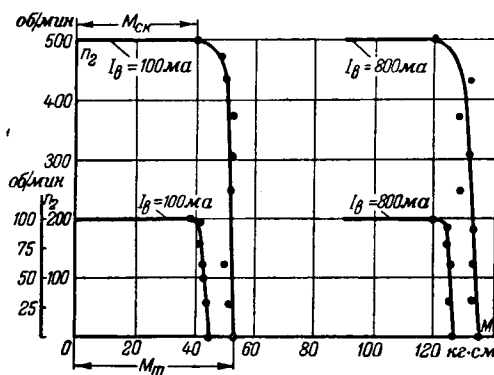


Рис. 5. Зависимость скорости вращения ведомого вала от момента муфты при $I_B = \text{const}$.

$M_{ск}$ — момент, при котором начинается скольжение; M_m — момент при скольжении, равном единице.

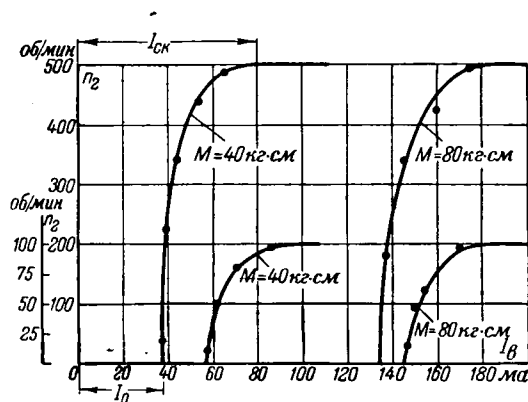


Рис. 6. Зависимость скорости вращения ведомого вала от тока возбуждения при $M = \text{const}$.

$I_{ск}$ — ток, при котором начинается скольжение; I_0 — ток при скольжении, равном единице.

скорости тем больше, чем больше окружная скорость муфты, меньше ее нагрузка и слабее концентрация наполнителя. Эти условия являются наиболее благоприятными для регулирования скорости.

При изменении скольжения от 0 до 1 процентное изменение тока возбуждения достигает 50% и более.

При условии постоянства I_0 (рис. 5) увеличение нагрузочного момента вызывает скольжение и увеличение разности ($n_1 - n_2$).

С целью определения времени срабатывания муфт, т. е. времени нарастания и спада момента при включении и выключении тока возбуждения, было проведено осциллографирование кривых момента и тока. При осциллографировании кривой момента применялись провололочные датчики, сигнал с которых усиливался ламповым усилителем.

На рис. 7 приведены две такие осциллограммы для цилиндрической муфты с крутящим моментом 1,5 кг·м с двумя зазорами по 1 мм и концентрацией наполнителя 5:1.

Из анализа осциллограмм, полученных при различных величинах тока возбуждения, окружной скорости и концентрации наполнителя, вытекают следующие положения:

1. При большом токе возбуждения и сильной концентрации наполнителя время нарастания момента равно времени нарастания тока.

2. При малом токе возбуждения и слабой концентрации наполнителя время нарастания момен-

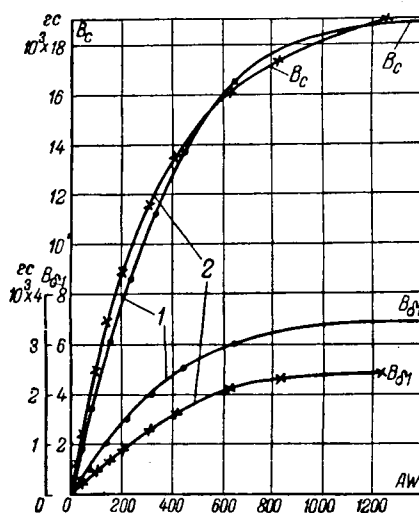


Рис. 8. Зависимость магнитной индукции в наружном рабочем зазоре $B_{\delta 1}$ и в сердечнике B_c от ампервитков возбуждения.

1 — расчетные кривые; 2 — экспериментальные кривые.

та превышает время нарастания тока, причем наблюдается длительное, постепенное увеличение момента.

3. С ростом тока возбуждения и концентрации наполнителя время спада момента увеличивается, а время нарастания его уменьшается.

4. В цилиндрических муфтах скорость вращения почти не оказывает влияния на время нарастания момента.

5. В опытных муфтах как время нарастания, так и время спада момента находятся в пределах 0,05...0,5 сек.

Снижение времени нарастания и спада момента может быть достигнуто методами, известными из теории электромагнитных процессов. В частности, хорошие результаты дает применение шихтованного магнитопровода.

Для определения коэффициента магнитного рассеяния σ и удельной силы сцепления на один гаусс f_B были сняты зависимости магнитной индукции в рабочем зазоре и сердечнике от ампервитков возбуждения $B_{\delta} = f_1(AW)$ и $B_c = f_2(AW)$. На рис. 8 показаны данные зависимости для опытной цилиндрической муфты при двух зазорах по 1 мм и концентрации наполнителя 5:1.

Эксперименты показали, что при указанной концентрации и насыщенной магнитной цепи коэффициент рассеяния равен:

при одном рабочем зазоре 1 мм $\sigma = 1,2 \dots 1,4$;

при двух рабочих зазорах по 1 мм $\sigma = 1,6 \dots 2,0$;

при четырех рабочих зазорах по 1 мм $\sigma = 2,2 \dots 2,8$.

При более слабых концентрациях коэффициент рассеяния, естественно, увеличивается.

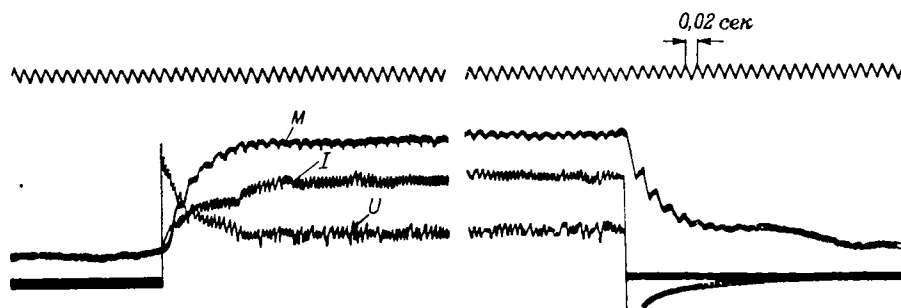


Рис. 7. Кривые тока и момента муфты при включении и выключении тока возбуждения.

U — напряжение; I — ток; M — момент.

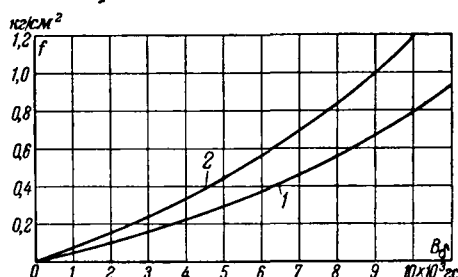


Рис. 9. Зависимость удельной силы сцепления от индукции в рабочем зазоре при концентрации наполнителя 5:1. 1—для карбонильного железа; 2—для восстановленного железа.

Кривые $B_\delta = f_1(AW)$ и $M_{ср} = \psi(AW)$ позволяют рассчитать характеристики $f = \varphi(B_\delta)$, показывающие зависимость удельной силы сцепления f от индукции в рабочих зазорах B_δ .

Эти характеристики весьма существенны, так как они дают возможность установить зависимость момента от индукции в зазорах.

Анализ характеристик показывает, что при малых значениях индукции (до 2...3 тыс. гс) зависимость f от B_δ имеет линейный характер; при больших значениях B_δ наблюдается отклонение от линейной зависимости.

Характеристика $f = \varphi(B_\delta)$ при B_δ в пределах 0—12 кГс может быть аппроксимирована следующим уравнением:

$$f = f_B \cdot B_\delta^{1+0,02B_\delta} [\text{кГс/см}^2], \quad (1)$$

где B_δ — в кГс; f_B — в кГс/см² кГс.

Зависимость f от B_δ по уравнению (1) приведена на рис. 9.

Экспериментально установлено, что при достаточной сильной концентрации, а именно порядка 5:1, значение f_B довольно устойчиво и может быть принято равным $50 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{кГс}}{\text{см}^2 \text{ кГс}} \right]$.

Данное значение f_B соответствует лишь определенному сорту карбонильного железа; для других порошков оно отклоняется от указанного значения. Так, например, для восстановленного железа с размером частиц до 50 мкм

$$f_B = 75 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{кГс}}{\text{см}^2 \text{ кГс}} \right].$$

Расчет и конструирование. При разработке муфты основными исходными данными являются передаваемый муфтой момент и режим ее работы.

Эксперименты показали, что наиболее целесообразной конструкцией является цилиндрическая муфта с двумя рабочими зазорами. Данная муфта обладает простотой устройства, хорошими свойствами и стабильными характеристиками, имеет малоинерционный ведомый элемент.

При равных габаритах моменты, передаваемые цилиндрической и дисковой муфтами, примерно равны между собой, но конструкция дисковой муфты значительно сложнее и менее надежна в эксплуатации. Крупным недостатком дисковых муфт является наличие в них осевых усилий, которые являются причиной «прилипания» или ча-

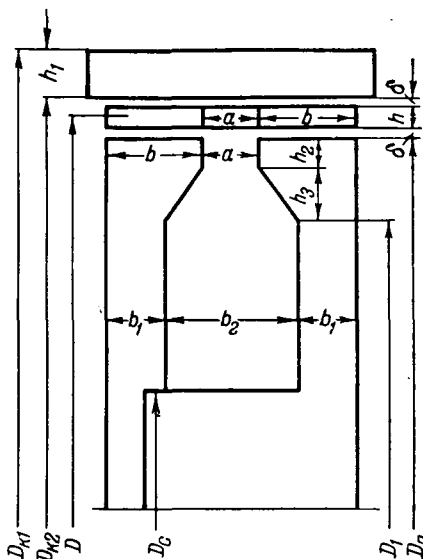


Рис. 10. Магнитопровод цилиндрической муфты с двумя рабочими зазорами.

стичного задевания между ведомой и ведущей частями муфты.

В дисковых муфтах сильнее сказывается влияние центробежных сил, действующих на наполнитель и приводящих к нестабильной работе и заклиниванию. Для цилиндрических муфт могут быть рекомендованы следующие соотношения размеров (рис. 10):

$$\frac{D}{D_c} = 1,7 \dots 2,3; \quad \frac{b}{b_1} = 1,2 \dots 2,0;$$

$$\frac{b_2}{D_c} = 0,3 \dots 0,8; \quad \frac{b_1}{D_c} = 0,25.$$

Экономически целесообразно принимать отношение $\frac{D}{D_c}$ наименьшим, так как при этом получаются более низкие значения веса муфты и мощности возбуждения на 1 кГ·см передаваемого ею момента.

Исходя из целесообразных соотношений размеров и магнитных нагрузок магнитопровода муфты, зависимость между ее моментом и диаметром может быть в первом приближении определена по следующим формулам:

для цилиндрической муфты с двумя рабочими зазорами

$$D = (1,4 \dots 1,8) \sqrt[3]{M} [\text{см}], \quad (2)$$

для цилиндрической муфты с одним рабочим зазором

$$D = (1,6 \dots 2,1) \sqrt[3]{M} [\text{см}]. \quad (3)$$

Для расчета магнитной цепи рекомендуется метод расчета по участкам; при этом магнитная цепь заменяется эквивалентной электрической цепью.

На рис. 11 представлена магнитная цепь цилиндрической муфты с двумя рабочими зазорами, на которой отмечены расчетные участки и магнитные потоки, принимаемые в расчете.

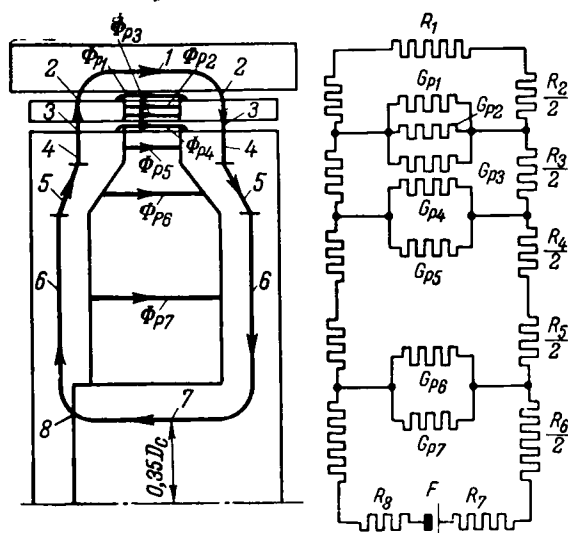


Рис. 11. Магнитная цепь цилиндрической муфты и схема замещения.

1...8 — расчетные участки; $\Phi_{p1} \dots \Phi_{p7}$ — магнитные потоки рассеяния; $R_1 \dots R_8$ — магнитные сопротивления магнитопровода основного потока; $G_{p1} \dots G_{p7}$ — магнитные проводимости путей потоков рассеяния; F — н. с.

На эквивалентной схеме замещения, изображенной на этом же рисунке, показаны магнитные сопротивления магнитопровода и проводимости путей потоков рассеяния. Расчет ведется от корпуса муфты к ее сердечнику.

Задаваясь несколькими значениями магнитной индукции в наружном рабочем зазоре $B_{\delta 1}$ и последовательно рассчитывая магнитную цепь, находят все необходимые величины и в том числе основную — н. с. катушки.

По результатам расчета строятся зависимости индукции от ампервитков возбуждения (рис. 8).

Наиболее нагруженным участком магнитной цепи является сердечник, индукцию в котором не следует допускать больше 17 000 гс.

Кривые намагничивания ферромагнитного наполнителя и стали магнитопровода, необходимые для расчета, следует получить экспериментально на тороидальных образцах. Кривую намагничивания стали магнитопровода целесообразно аппроксимировать. Это позволяет в ряде случаев осуществить аналитический расчет участков магнитной цепи.

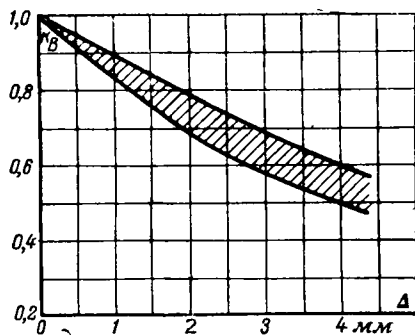


Рис. 12. Зависимость поправочного коэффициента, учитывающего потоки рассеяния, от суммарной величины рабочих зазоров.

Снятая нами кривая намагничивания стали марки Ст. 10 была аппроксимирована уравнением

$$B = \frac{H}{c_1 + c_2 H}, \quad (4)$$

где H — напряженность магнитного поля; $c_1 = 2,6 \cdot 10^{-4}$; $c_2 = 0,52 \cdot 10^{-4}$.

Из рис. 11 видно, что участок 6 магнитопровода имеет переменное сечение и значительную длину; для данного участка потребную н. с. можно определить по формуле

$$F_6 = c_1 \cdot B_{6 \max} \cdot D_c \ln \frac{k - c_2 B_{6 \max}}{1 - c_2 B_{6 \max}}, \quad (5)$$

где

$$k = \frac{D_1}{D_c} \quad \text{и} \quad B_{6 \max} = \frac{\Phi_c}{\pi \cdot D_c \cdot b_1}.$$

Как показали эксперименты, расчетные значения индукции в рабочих зазорах получаются больше экспериментальных. Объясняется это наличием дополнительных потоков рассеяния, не поддающихся учету. В связи с этим следует вводить поправочный коэффициент k_B , являющийся функцией суммарной величины рабочих зазоров Δ . На рис. 12 приведены кривые, определяющие значения поправочного коэффициента.

Используя расчетную откорректированную характеристику $B_\delta = f_1(AW)$ и применив следующие ниже формулы, рассчитывают характеристику $M = \psi(AW)$:

для цилиндрической муфты с одним зазором

$$M = k_3 \pi b (D_n + \delta)^2 \cdot f \quad [\text{кг} \cdot \text{см}], \quad (6)$$

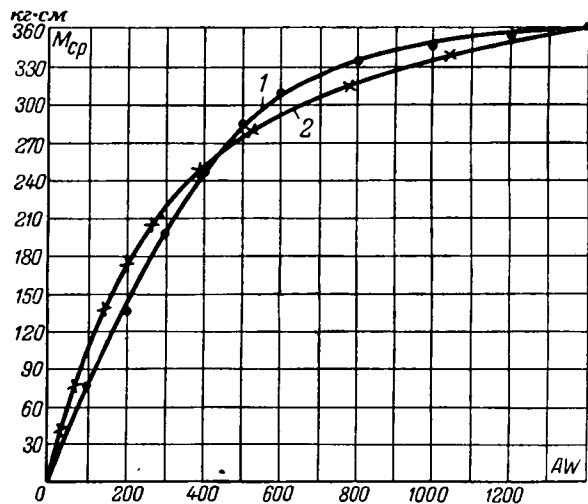
для цилиндрической муфты с двумя зазорами

$$M = k_3 \pi b [f'(D_{n2} - \delta)^2 + f''(D_n + \delta)^2] \quad [\text{кг} \cdot \text{см}], \quad (7)$$

где $k_3 = 0,8 \dots 0,9$ — коэффициент запаса;

f , f' и f'' — удельные силы сцепления, $\text{кг}/\text{см}^2$, при индукциях B_δ , $B_{\delta 1}$ и $B_{\delta 2}$, определяемые по уравнению (1).

На рис. 13 приведена характеристика, рассчитанная по уравнению (7) при концентрации наполнителя 5:1.



Фиг. 13. Зависимость момента муфты от ампервитков возбуждения.

1 — расчетная кривая; 2 — экспериментальная кривая.

Существуют два режима работы муфт, характеризующиеся различными условиями нагрева. В первом муфта работает без скольжения и нагрев ее вызывается током возбуждения. Во втором она работает со скольжением, и нагрев ее происходит главным образом за счет мощности скольжения. При работе в первом режиме источником тепла и наиболее нагретым местом муфты является катушка. Расчет нагрева катушки представляет собой неотъемлемую часть общего ее расчета, для которого исходными данными служат н. с. катушки, ее размеры и напряжение источника питания.

Диаметр провода и число витков могут быть определены по следующим формулам:

$$d = 20 \sqrt{\frac{k_{зан} \cdot k_T \cdot Q \cdot s \cdot \vartheta_{неп}}{\pi \cdot U \cdot AW}} \text{ [мм]}; \quad (8)$$

$$W = \frac{U}{AW} \cdot \frac{k_{зан} \cdot Q}{l_{cp} \rho_\vartheta} \cdot 10^4. \quad (9)$$

Температура перегрева катушки

$$\vartheta_{неп} = \rho_\vartheta \frac{l_{cp} AW^2}{k_{зан} \cdot k_T \cdot Q \cdot s \cdot 10^4} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (10)$$

В формулах приняты следующие обозначения: $k_{зан}$ — коэффициент заполнения медью; k_T — коэффициент теплоотдачи $\text{вт/см}^2 \text{град}$; Q — окно катушки, см^2 ; s — теплоотдающая поверхность катушки, см^2 ; l_{cp} — средняя длина витка, см ; ρ_ϑ — удельное сопротивление при температуре ϑ , $\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; U — напряжение, в ; AW — ампервитки возбуждения, а .

Ввиду того что в формулах (8), (9) и (10) некоторые величины в правой части их являются функциями искомых величин, определение значений d , W и $\vartheta_{неп}$ производится методом последовательных приближений.

Точность расчета в сильной мере зависит от правильного выбора коэффициента теплоотдачи k_T .

Экспериментальная работа, проведенная для определения значений k_T , показала, что для катушек муфт его величина может быть принята равной $(30 \dots 35) \cdot 10^{-4} \frac{\text{вт}}{\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$. Эти значения

k_T следует относить к средней температуре катушки, находящейся в хорошем тепловом контакте с сердечником.

При работе муфты со скольжением будет иметь место мощность скольжения

$$P_{ск} = \frac{M}{97,5} (n_1 - n_2) \text{ [вт]}, \quad (11)$$

вызывающая нагрев муфты.

При этом к. п. д. муфты, равный отношению отдаваемой мощности к подводимой, определяется из уравнения

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P} \approx \frac{0,01 M_2 n_2}{0,01 M_1 n_1 + P_\vartheta}, \quad (12)$$

где

$$P_\vartheta = I_\vartheta^2 \cdot R_\vartheta \text{ [вт]}.$$

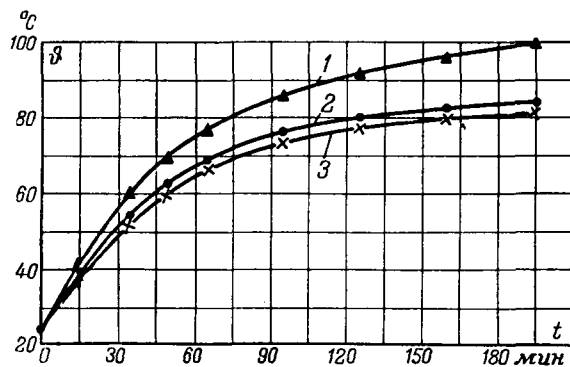


Рис. 14. Кривые нагрева цилиндрической муфты. 1 — экспериментальная кривая нагрева катушки; 2 — расчетная кривая нагрева катушки; 3 — экспериментальная кривая нагрева корпуса.

В связи с тем что $P_\vartheta \ll P_1$ и $M_2 \approx M_1$, можно считать

$$\eta \approx \frac{n_2}{n_1}. \quad (13)$$

Тепловой расчет муфты, работающей со скольжением, рекомендуется проводить в следующей последовательности (предполагается, что муфта представляет собой однородное тело):

1. Подсчитываются мощность скольжения $P_{ск}$ и мощность возбуждения P_ϑ .

2. Определяется установившаяся температура корпуса муфты по формуле

$$\vartheta_{уст} = \frac{P_{ск} + P_\vartheta}{S_k \cdot k'_T} + \vartheta_o, \quad (14)$$

где ϑ_o — температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

S_k — теплоотводящая поверхность корпуса, см^2 ;

k'_T — коэффициент теплоотдачи корпуса, $\text{вт/см}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

3. Подсчитывается постоянная времени муфты по формуле

$$T = \frac{\Sigma G \cdot c}{S_k \cdot k'_T}, \quad (15)$$

где G — вес отдельных частей муфты, $г$;

c — удельная теплоемкость этих частей, $\frac{\text{вт сек}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}$.

4. Рассчитывается по формуле

$$\vartheta = \vartheta_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (16)$$

и строится кривая нагрева муфты.

Рассчитанная по данной методике кривая нагрева опытной муфты, а также экспериментальная кривая приведены на рис. 14. Муфта имела четыре зазора по 1 мм при концентрации наполнителя 1:3. Момент, передаваемый муфтой, $M = 24 \text{ кгсм}$; $n_1 - n_2 = 250 \text{ об/мин}$, $I_\vartheta = 0,35 \text{ а}$.

Экспериментальное исследование показало, что коэффициент теплоотдачи корпуса муфты $k'_T = (16 \dots 20) \cdot 10^{-4} \frac{\text{вт}}{\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$; было также установлено, что перепад температур внутри муфты при двух рабочих зазорах составляет $15 \dots 25^\circ\text{C}$.

Следовательно, значение $\vartheta_{уст}$, определяемое по формуле (14), не должно превышать 75...80°C (при изоляции катушки класса А).

Таким образом, потери мощности в муфте ограничиваются ее допустимым нагревом. Для более полного использования режима скольжения необходимо увеличить теплоотдачу муфты. Это можно осуществить несколькими путями.

К числу их относятся окраска теплоотдающей поверхности муфты черным лаком, что повышает теплоотдачу на 30...40%, и обеспечение шероховатости поверхности с созданием различных выступающих частей, способствующих образованию завихрений, что повышает теплоотдачу на 20...50%.

Существенное значение для увеличения теплоотдачи имеет устройство охлаждающих ребер, способных увеличить теплоотдачу на 50...100%.

Еще большее влияние на увеличение теплоотдачи оказывает охлаждение муфты воздухом, маслом или водой. Так, например, при охлаждении муфты потоком воздуха теплоотдача свободно может быть увеличена в 2...4 и больше раз.

Кроме отмеченных способов, более полное использование режима скольжения муфты может быть достигнуто повышением ее рабочей температуры. Это допустимо при условии применения в муфте материалов повышенной теплостойкости, что относится в первую очередь к катушке и жидкой составляющей наполнителя.

Теплостойкость катушки может быть существенно повышена при условии изготовления ее из обмоточных проводов марки ПЭВ, допускающих максимальную температуру 125°C, марки ПДА или ПСД, допускающих температуру до 130°C, и, наконец, алюминиевых оксидированных, допускающих температуру до 400°C.

В качестве жидкой составляющей наполнителя могут быть применены кремнийорганические жидкости, допускающие температуру до 250°C, или минеральные масла с допустимой температурой нагрева до 180°C.

В действующих установках нередко случаи работы муфт в кратковременном или повторно-кратковременном режиме. В этих случаях потери мощности в муфте могут быть значительно увеличены без опасения перегрева.

[20. 12. 1954]



Электромагнитные муфты и их применение в машиностроении

Кандидат техн. наук В. Г. ЗУСМАН и инж. О. Н. ТАТУР

Москва

Электромагнитные муфты по сравнению с рычажными, гидравлическими и пневматическими обладают многими преимуществами. Им свойственны:

1) простота и дешевизна канала, подводящего энергию управления к муфте;

2) простота подвода этой энергии на вращающийся вал как контактным, так и бесконтактным путем;

3) отсутствие необходимости предварительного преобразования первичной электрической энергии в другой ее вид для управления и возможность непосредственного включения воспринимающего органа муфты в электрическую схему автоматического управления;

4) в отдельных случаях весьма высокие скорости переходных процессов в муфте;

5) высокие значения отношения вращающего момента муфты к величине мощности, необходимой для ее управления.

Перечисленные преимущества электромагнитных муфт при глубокой насыщенности современных автоматических машин средствами электроавтоматики, образующими обычно основу любой схемы автоматического управления, позволяют в большинстве случаев считать их наиболее подходящими средствами для переключения кинематических цепей в современных и будущих конструкциях машин.

Релейное управление движениями в передаче при помощи муфт обладает также одним существенным преимуществом по сравнению с управлением в электродвигателе. Оно заключается в том, что отношение вращающего момента к моменту инерции для муфты в десятки и сотни раз больше, чем для двигателя. Это позволяет во многих случаях обеспечить наибольшие скорости переходных процессов в механических системах, управляемых муфтами.

В соответствии с отмеченными преимуществами в машиностроении наблюдается неуклонное расширение использования электромагнитных муфт. К настоящему времени типы и конструкции их достигли значительного разнообразия. Для целей автоматического управления наибольший интерес представляют муфты с таким исполнительным органом, который позволяет переключать кинематические цепи, в том числе и инерционные, не прерывая вращения. Эти муфты, рассматриваемые в данной статье, выполняются:

1) с фрикционными исполнительными органами (дисками) вне магнитной цепи муфты;

2) с фрикционными исполнительными органами, включенными в магнитную цепь муфты;

3) с исполнительным органом в виде ферромагнитного порошка, помещенного в зазоры магнитной цепи.

Фрикционные электромагнитные муфты как

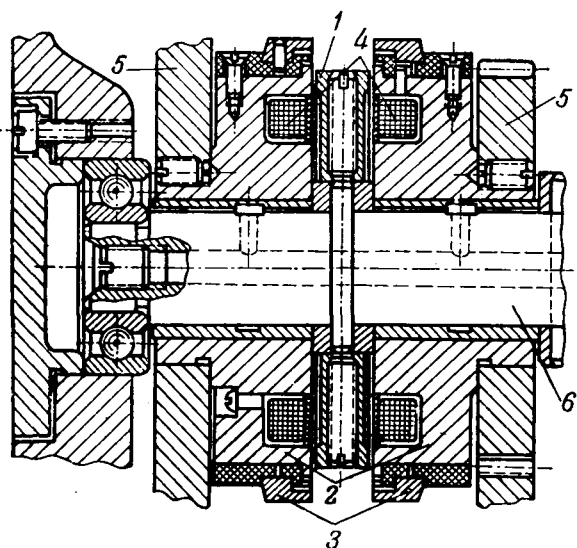


Рис. 1. Однодисковая смазываемая электромагнитная муфта в реверсивном исполнении.

1 — якорь; 2 — корпус; 3 — контактное кольцо; 4 — катушка; 5 — ведущие шестерни; 6 — ведомый вал.

однодисковые, так и многодисковые известны давно. Муфты, снабженные на фрикционных поверхностях накладками, повышающими коэффициент трения, строятся в весьма широком диапазоне размеров. Описаны конструкции до 1,5 м в диаметре. Будучи в сильной степени чувствительными к попаданию масла на поверхности трения, эти муфты выносятся в места, изолированные от смазки, размещаются снаружи корпусов, заключающих передаточные механизмы машин. Такие (сухие) муфты имеют повышенный нагрев и износ в условиях динамически напряженных режимов работы. Повышенный износ требует частой регулировки зазора муфты, поскольку момент муфты, приблизительно обратно пропорциональный квадрату толщины зазора, существенно меняется даже при небольшом износе.

Эти обстоятельства несколько ограничивают применение сухих электромагнитных муфт.

Большее применение имеют смазываемые муфты, обладающие высокой износостойкостью и хорошим рассеиванием тепловых потерь, что достигается подводом охлаждающего масла непосредственно к местам их выделения. Смазываемые муфты дают возможность выполнить исполнительные органы с трением сталь по стали, что позволяет реализовать конструктивные схемы муфт с дисками, включенными в магнитную цепь муфты. Это ведет к упрощению конструкции муфты в смысле уменьшения количества и упрощения формы деталей и, что особенно важно, к появлению свойства самокомпенсации износа, т. е. к конструкции муфты, не требующей никакой регулировки в процессе ее эксплуатации.

Смазываемые муфты по сравнению с сухими обладают, естественно, значительно меньшими удельными силами сцепления на фрикционных поверхностях, что, однако, не мешает выполнять такие муфты в габаритных размерах, относительно меньших, чем сухие, благодаря возможности значительно большего развития общей поверхно-

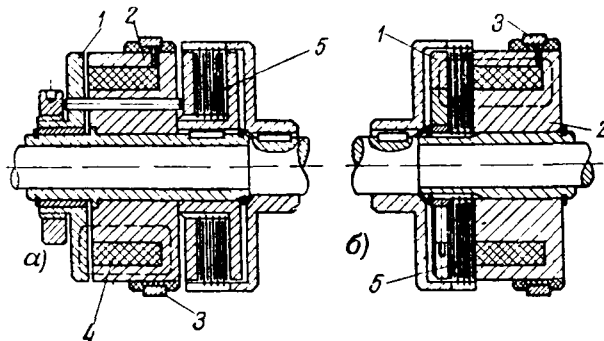


Рис. 2. Распространенные схемы многодисковых смазываемых электромагнитных муфт.

1 — якорь; 2 — корпус; 3 — контактное кольцо; 4 — катушка; 5 — диски.

сти сцепления. В ряде случаев при небольшой величине вращающего момента целесообразно выполнять смазываемую муфту с неразвитой поверхностью сцепления.

На рис. 1 приведен пример использования смазываемой однодисковой электромагнитной муфты в одной из отечественных серийных моделей автоматизированных токарно-револьверных станков. Характерным является массивный якорь, касающийся корпуса по поверхности наружного кольца. Между притянутым якорем и поверхностью внутреннего кольца корпуса оставлен зазор, благодаря которому обеспечивается малая остаточная индукция в магнитопроводе муфты, а также увеличивается средний радиус приложения усилия сцепления.

Увеличение общей поверхности сцепления смазываемых муфт достигается за счет большого количества дисков. Применяющиеся в настоящее время в машиностроении схемы таких многодисковых муфт показаны на рис. 2. Используются схемы как с дисками вне магнитной цепи (а), так и с дисками, включенными в магнитную цепь (б). В муфте по схеме а пакет дисков сжимается якорем через направляемые корпусом стержни, упирающиеся в гайку, навинченную на якорь, при помощи которой осуществляется регулирование зазора между корпусом и якорем по мере износа дисков. В муфте по схеме б якорь, выполненный из двух колец для компенсации разности осевых размеров по нижним и верхним диаметрам дисков, является по сути потокозамыкающим звеном магнитной цепи; сами диски представляют собой якоря, шунтирующие рабочий магнитный поток. Это обстоятельство ограничивает количество дисков и вызывает необходимость придавать дискам форму, обеспечивающую большое сопротивление той части магнитного потока, которая замыкается через диски. Приведенная на рис. 3 форма дисков позволяет свести рассеяние магнитного потока через каждый диск в среднем до 2—4% и обеспечить наибольший момент муфты при 6...20 дисках (большее количество при больших размерах). Диски толщиной 0,8 мм изготавливаются из закаленной стали (65Г), причем ее коэрцитивная сила, как показал опыт, не вызывает остаточной индукции, опасной в смысле неполного расцепления муфты после отключения тока. Весьма важными оказываются плоскостность дисков, чистота

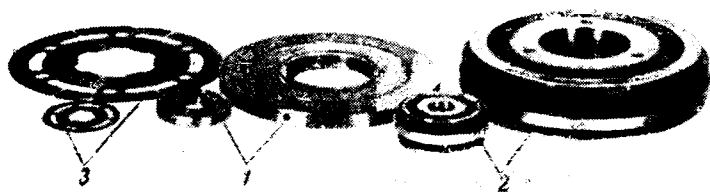


Рис. 3. Детали многодисковых электромагнитных муфт серии ЭМ (1-й и 6-й габариты).
1—якоря; 2—корпуса с катушкой; 3—диски.

(по 8-му классу) и параллельность их трущихся поверхностей. Для быстрого и надежного расцепления муфты необходима установка упругих разводных колец между дисками.

В муфтах по схеме *a* количество дисков в пакете определяется лишь точностью изготовления дисков по плоскостности, параллельности и их износоустойчивостью, чем обуславливается допустимый начальный зазор между якорем и корпусом при сжатом пакете. Практически оно может быть больше, чем у муфт по схеме *б*. Некоторым преимуществом является и более свободный выбор материалов трущихся пар, включая немагнитные и немагнитические материалы.

Простая конструкция и свойство самокомпенсации износа обусловили преимущественное распространение муфт по схеме *б*, которые в настоящее время выпускаются серийно для нужд станкостроения. Серия таких муфт ЭМ выполнена в шести габаритах с диапазоном номинальных вращающих моментов 1...10 кгм. Указанные значения моментов соответствуют работе муфты в переходных режимах (при скольжении) и возрастают в 1,5...2 раза в установившемся режиме.

На рис. 3 показаны корпуса, якоря и внутренние диски первого и шестого габаритов (диаметры якорей соответственно 65 и 200 мм). Муфты серии ЭМ предназначены для работы с наибольшими скоростями — до 3000...1000 об/мин (в соответствии с габаритом). Остаточные моменты при наибольшей скорости вращения не превосходят 1...0,7% величины номинального момента. При работе на высокой скорости или в режиме частых включений при значительных моментах инерции управляемой механической системы муфты рекомендуется охлаждать поливом масла снаружи, или, что более эффективно, подводом масла к дискам через вал. Муфты изготавливаются вместе со щетками (из латунной сетки) для работы в масляной среде и рассчитаны для питания от двухполупериодного выпрямителя при напряжении 24 в с потребляемой мощностью в соответствии с габаритом 12—50 вт.

Муфты серии ЭМ широко применяются в металлорежущих станках в приводах как главного, так и вспомогательных движений, являясь весьма удобным средством автоматизации станков. Известное применение эти муфты нашли в копировальных устройствах универсальных станков.

Электромагнитные муфты с исполнительным органом в виде ферромагнитного порошка появились всего несколько лет назад. Такая новизна

обусловила применение в технической литературе ряда наименований этих муфт: «магнитоэмульсионные», «муфты с магнитодиэлектриком», «муфты с ферромагнитным заполнителем» и т. д. Эти наименования неверно отображают содержание или дают слишком расплывчатое определение без какой-либо связи с названиями других муфт. Целесообразно для этих муфт в качестве отличительного признака брать их исполнительный орган, подобно тому как это делается для других

управляемых муфт (кулачковых, многодисковых и т. п.), и называть их электромагнитными и порошковыми муфтами, а для краткости — просто порошковыми, поскольку неэлектромагнитные порошковые муфты практического применения не получили.

Принцип действия порошковых муфт основан на эффекте сцепления, которое возникает между двумя поверхностями, разделенными зазором, содержащим ферромагнитный порошок, если зазор пересекается магнитным потоком. Частицы порошка связываются друг с другом и намагниченными поверхностями образуют сцепляющийся слой, обладающий сопротивлением сдвигу, зависящим от величины магнитной индукции в слое и других факторов. Крутящий момент, который может передать муфта с таким слоем, не проскальзывая, определяется предельным касательным напряжением в слое, которое не вызывает еще его пластической деформации. Это предельное касательное напряжение, являющееся как бы пределом текучести слоя, может достигать величин, позволяющих выполнять порошковые муфты в размерах, близких к размерам многодисковых электромагнитных муфт.

Основным материалом сцепляющего слоя, как было уже отмечено, является ферромагнитный порошок, который может использоваться в чистом виде или, что больше подходит для практических целей, в смеси со смазывающими средами. Роль последних сводится к защите частиц порошка от химического и механического разрушения и предотвращению нарушения относительной подвижности частиц, а также к улучшению теплопроводности муфты.

В настоящее время в порошковых муфтах почти исключительно применяется карбонильное железо, шаровые частицы которого имеют средние размеры в пределах 0,002—0,008 мм. Количество смазывающих сред, упоминаемых в различных литературных источниках, велико. Среди них жидкие: минеральные масла, керосин, полисилоксановые жидкости, различные синтетические соединения; твердые: графит, тальк, двусернистый молибден, окись цинка, азотистый бор, двуокись кремния. Установившегося мнения о целесообразных средах для различных конкретных условий эксплуатации еще нет.

Принципиальная возможность выполнения сцепляющего слоя по поверхностям вращения любой формы, поскольку исходным материалом для его образования служит текучая или сыпучая

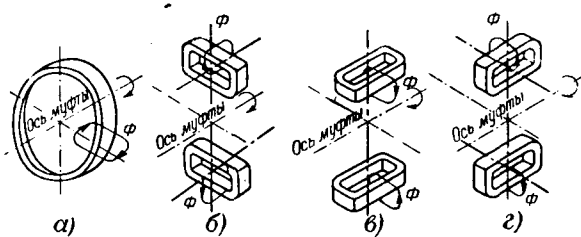


Рис. 4. Возможное расположение катушек в порошковых муфтах.

среда, определяет все многообразие конструкций порошковых муфт, в основу которых могут быть положены самые разнообразные электромагнитные системы. Фрикционные муфты значительно уступают в многообразии конструкций порошковым.

С целью выявления, систематизации и оценки возможных конструкций порошковых муфт целесообразно классифицировать схемы электромагнитной системы, базируясь на следующих главных признаках:

1. Взаимное расположение оси вращения муфты и оси катушки (катушек). Схемы (рис. 4) могут быть: униполярными — ось катушки (катушек) совпадает с осью муфты (а); многополюсными — оси катушек параллельны (б), перпендикулярны оси муфты (в), скрещиваются с ней (г).

2. Форма и расположение поверхностей локализации магнитных линий рабочего потока. Схемы могут быть с магнитными линиями: в плоскостях, проходящих через ось муфты (радиальных плоскостях); в плоскостях, параллельных оси муфты и между собой; в плоскостях, перпендикулярных оси муфты; в цилиндрических поверхностях, концентричных с осью муфты.

Кроме того, схемы порошковых муфт могут быть также подразделены:

1) по количеству катушек — на одно- и многокатушечные;

2) по форме сцепляющего слоя — на цилиндрические, плоскостные (дисковые), конусные;

3) по количеству сцепляющих слоев — на двух- и многослойные;

4) по признаку подвижности катушки — с подвижной и неподвижной катушкой;

5) по соотношению моментов инерции ведомой и ведущей половин муфты — на малоинерционные и инерционные.

На рис. 5 приведены примеры униполярных однокатушечных схем, на рис. 6 — многокатушечных многослойных схем и на рис. 7 — многополюсных схем. В униполярных схемах магнитные линии рабочего потока локализируются в радиальных плоскостях, в многополюсных схемах они могут быть удобно локализованы в плоскостях, перпендикулярных оси.

Приведенная классификация охватывает все существенные различия в конструкциях и особенности характеристик порошковых муфт (полная система реализуемых схем, соответствующая этой классификации, разработанная в ЭНИМС, здесь не приводится). Не останавливаясь на характере конструктивных различий, которые очевидны, сле-

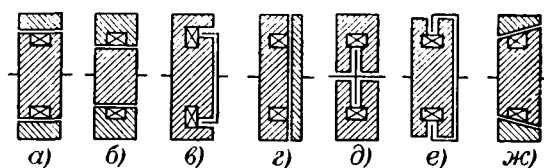


Рис. 5. Униполярные однокатушечные схемы порошковых муфт.

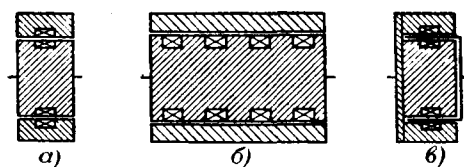


Рис. 6. Униполярные многокатушечные схемы порошковых муфт.

дует обратить внимание на особенности характеристик, обусловленные расположением катушек и локализацией магнитных линий.

Крутизна динамической характеристики $M = f(t)$ при $\frac{du}{dt} \rightarrow \infty$ в пределах от $U=0$ до $U_{\text{ном}}$

определяется инерцией электромагнитного процесса в муфте и цепи ее управления, так как механическая инерция сцепляющего слоя в отношении его формирования и разрушения практически отсутствует. При прочих одинаковых условиях инерция электромагнитного процесса зависит от величины потокосцепления и при достаточно высоких скоростях изменения намагничивающего тока — от демпфирующего действия вихревых токов в магнитопроводе. В свете этого ясно выступает возможность получения в порошковых муфтах, выполненных в отличие от униполярных по многополюсным схемам, весьма крутых динамических характеристик как при включении, так и при отключении муфты вне зависимости от их размера. Это достигается применением технологически приемлемой шихтовки магнитопровода и благодаря тому, что полный рабочий магнитный поток может быть составлен из любого количества потокосцеплений.

Простота выполнения шихтованных магнитопроводов по схемам рис. 7 открывает также реальные возможности создания порошковых муфт, питаемых переменным током.

Общими критериями совершенства конструкции порошковой муфты, если к ней не предъявляется никаких специальных требований, можно считать: степень заполнения объема муфты активными материалами, наличие или отсутствие шунтирования сталью рабочих зазоров муфты, удоб-

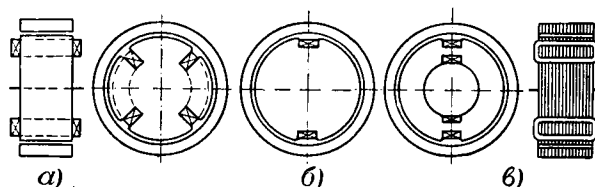


Рис. 7. Многополюсные схемы порошковых муфт.

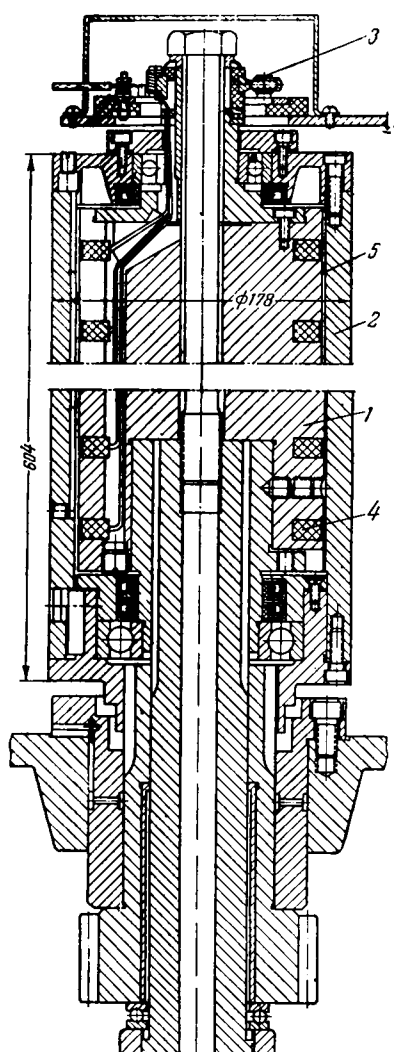


Рис. 8. Динамометрическая порошковая муфта (120 кгм).

1—сердечник; 2—корпус; 3—контактное кольцо; 4—катушки;
5—рабочий зазор.

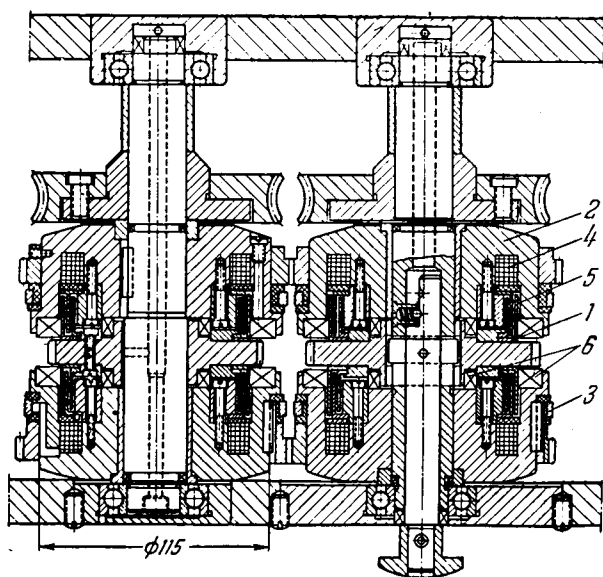


Рис. 9. Порошковые муфты к токарно-винторезному станку.

1—ведомые стаканы; 2—корпуса; 3—контактные кольца; 4—катушки;
5—рабочие зазоры; 6—уплотнительные кольца.

ство уплотнения внутренней полости муфты и токоподвода к катушке, простоту изготовления и ремонта муфты. На основе анализа схем электромагнитной системы порошковых муфт в соответствии с этими критериями можно указать схемы, которые целесообразно положить в основу реального конструирования муфт. К таким схемам следует отнести схемы *а, б, в и д* (рис. 5), *б* (рис. 6), а также *а и в* (рис. 7) с любым количеством катушек, но расположенных на наружном кольце, и производные от них. Многие схемы из рассмотренной здесь частично системы были выполнены в виде промышленных конструкций и образцов, изготовленных для целей исследования.

Рис. 8 дает пример одной из таких конструкций муфт, использующей схему рис. 4,б. Эта муфта была применена как динамометрическая с закручивающим моментом 120 кгм. Муфта имеет ведомый сердечник, несущий десять соосных катушек, включенных так, что н. с. соседних катушек направлены встречно, и расположены вертикально. Своеобразие формы (вытянутость по оси) определилось имевшимся пространством для размещения муфты в машине. В работе муфта показала малые отклонения закручивающего момента (менее $\pm 3\%$).

На рис. 9 показан комплект порошковых муфт с номинальным моментом 7 кгм для управления движениями суппорта одной из последних моделей универсальных токарно-винторезных станков. Ведомые части муфт в виде двух соосных стаканчиков закреплены на шестернях, которые передают вращение механизмам продольного и поперечного перемещений суппорта.

Муфты управляются командоаппаратом или от контактного датчика копировального устройства. При выполнении копировальных работ с этими муфтами были достигнуты более высокие скорости и одновременно большая точность обработки, чем при многодисковых муфтах, несмотря на то, что их магнитопровод был нешихтован. Различия в характере переходных процессов в шихтованных и нешихтованных муфтах можно видеть из осциллограмм рис. 10. Осциллограммы изображают процесс включения и отключения двух муфт, приблизительно одинаковых по весу стали и вращающему моменту. Постоянная времени при включении шихтованной муфты равна 0,008 сек, полное же время ее расцепления колебалось от 0,003 до 0,008 сек, будучи равным времени горения дуги на контактах в цепи муфты. Следует отметить, что запаздывание начала изменения момента по отношению к началу изменения тока при включении составляло 0,001 сек, а при отключении несколько меньше. Частично эти цифры можно отнести за счет инерционности применявшегося измерительного устройства, а частично за счет инерционности сцепляющего слоя. Шихтованные порошковые муфты в применении к следящим системам могут обеспечить весьма высокие их качества.

На рис. 11 дан пример конструкции порошковой муфты в тормозном исполнении. Этот порошковый тормоз, предназначенный для поддержания постоянного натяжения навиваемой на каркас

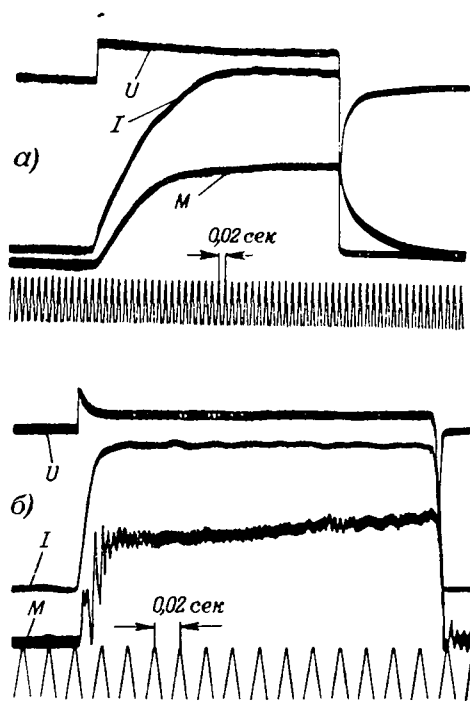


Рис. 10. Процессы включения и отключения порошковых муфт.

1—со сплошным магнитопроводом, схема *a* (рис. 6); 2—с шихтованным магнитопроводом, схема *b* (рис. 8); *U*—напряжение; *I*—ток в катушке; *M*—момент муфты.

напряженной проволоочной арматуры, был поставлен на одной из отечественных машин для изготовления железобетонных изделий. Наибольший момент, который обеспечивался тормозом, был несколько больше 600 кгм. Корпус тормоза, насаженный на вал, приводимый во вращение наматываемой проволокой, по технологическим соображениям выполнен составным.

Сердечник, несущий катушку и систему водяного охлаждения в виде отверстий и кольцевых канавок в полюсных накладках, приварен к валу, который закреплен неподвижно. Водяное охлаждение введено вследствие того, что средняя мощность торможения составляет 6...8 квт. Важным преимуществом порошкового тормоза, определившим успех его применения, помимо исключительной плавности тормозного усилия, явилось его постоянство в широком диапазоне скорости скольжения (0...2 м/сек в рабочем зазоре). Примененный до порошкового, фрикционный тормоз рвал навиваемую проволоку при трогании с места после остановки. Высокая плавность скольжения (подобная скольжению в индукционных тормозах) и практически независимое от скорости скольжения тормозное усилие позволяют рекомендовать порошковые тормоза как очень удобные малогабаритные нагрузочные динамометрические устройства для испытания самых различных машин и двигателей. Большие удобства представляет и возможность точного автоматического задания испытываемому объекту цикла статических нагрузок.

Порошковые муфты находят основное применение для следящих систем в копировальных станках и в приводах рабочих органов, осуществляю-

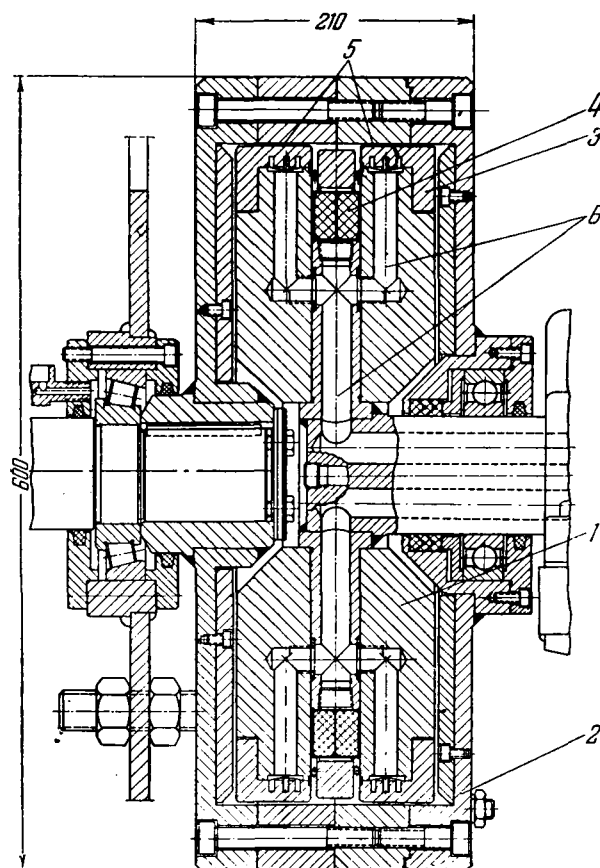


Рис. 11. Динамометрический порошковый тормоз (около 600 кгм).

1—сердечник неподвижный; 2—вращающийся корпус; 3—полюсные накладки с кольцевыми канавками; 4—катушка; 5—рабочий зазор; 6—отверстия для подвода охлаждающей воды.

щих точно ограниченные перемещения. Целесообразным является применение порошковых муфт в тяжелых машинах, где они могут играть роль пуска-тормозных и реверсивных устройств (реостатного типа) с весьма высокой плавностью действия, легкостью и точностью управления величинами усилий на рабочих органах и нужным быстродействием. В качестве приводов для изменения скорости в сколько-нибудь широком диапазоне порошковые муфты вряд ли будут использоваться, поскольку для удовлетворительного рассеяния потерь при полном использовании по моменту они должны будут снабжаться специальной системой охлаждения или выполняться в размерах, достаточных для естественного охлаждения. В последнем случае они будут сильно недоиспользованы по моменту. Кроме того, почти вертикальный вид механической характеристики (даже с отрицательным наклоном в координатах ось *Y*—скольжение, ось *X*—моменты) потребует достаточно сложной системы автоматического регулирования.

Исследования и опыт эксплуатации отдельных конструкций показали, что порошковые муфты являются достаточно надежным механизмом, подверженным авариям в такой же мере, как и всякий другой электромагнитный механизм.

Основным недостатком порошковых муфт является довольно быстрое термическое старение

Методы расчета электропривода петледержателей тонколистовых станов

Кандидат техн. наук Н. Н. ДРУЖИНИН и инж. В. К. ХОТУЛЕВ

Центральный научно-исследовательский институт технологии и машиностроения

Введение. Трудность осуществления непрерывной горячей прокатки, когда прокатываемый металл одновременно находится в нескольких клетях, объясняется возможностью возникновения в металле — на участке между клетями — усилий растяжения или сжатия вследствие изменений ряда технологических и электрических параметров (в переходных и установившихся режимах). Поэтому считают, что во избежание утяжек металла и изменения калибра горячая прокатка должна производиться при отсутствии усилий растяжения или сжатия металла между клетями или при минимальном их значении. Там, где можно образовать петлю металла между клетями стана, прокатка ведется с петлей. Между клетями тонколистовых станов предусмотрены петледержатели, поддерживающие петлю полосы. Схема петледержателя показана на рис. 1.

Привод петледержателей, как правило, осуществляется от электрических двигателей и является одним из основных элементов в комплексе стана, определяющим его нормальную эксплуатацию. Существующее представление о принципах работы петледержателей не характеризует действительной картины процесса и в ряде случаев приводит к ошибкам при проектировании. Работа петледержателя представляется примерно следующим образом.

Если между клетями стана образовать свобод-

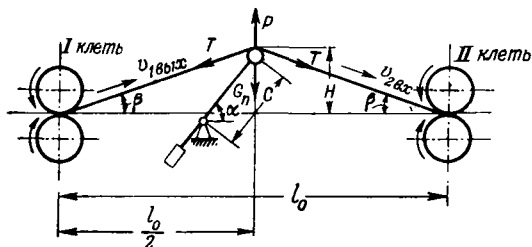


Рис. 1. Кинематическая схема петледержателя.

ную петлю полосы и включить петледержатель, то подъем последнего будет ограничен после того, как будет выбрана вся петля. При этом полагают, что, подперев полосу, петледержатель создаст в ней натяжение, величина которого может быть определена, исходя из условия статического равновесия в соответствии с рис. 1:

$$T = \frac{P - G_n}{2 \sin \beta}, \quad (1)$$

где T — натяжение полосы;

P — сила давления петледержателя на полосу, определяемая моментом короткого замыкания приводного двигателя;

β — угол между горизонталью и полосой;

G_n — вес полосы между клетями.

Полный вес полосы будет действовать на ролик петледержателя только при определенном подъеме последнего. Анализ этого вопроса показывает, что при угле поворота $2-3^\circ$ (рабочий угол обычно $20-25^\circ$) и применяемых рабочих натяжениях полосы на ролик уже будет приходиться полный вес. При дальнейшем подъеме приращение веса за счет увеличения длины полосы между клетями незначительно и при максимальном угле поворота ($60-70^\circ$) не превосходит $1,5-2\%$. Поэтому допущение о действии на ролик полного веса полосы между клетями не сказывается практически на характере переходных режимов, исследуемых ниже; для установившегося режима (что существенно при расчете мощности), когда угол подъема заведомо больше $10-15^\circ$, на ролик будет действовать полный вес полосы.

Из выражения (1) следует, что если образованная петля мала и угол близок к нулю, то включение петледержателя приведет к возникновению чрезмерно больших натяжений, могущих вызвать разрыв полосы.

заполняющей муфту магнитной смеси, будь то на жидкой или твердой основе. Старение заключается в слипании частиц в результате химических и физико-химических превращений в смазывающих средах, что ведет к постепенному снижению первоначального момента (на $30-60\%$), причем скольжение теряет плавность, напоминая своим характером взаимное скольжение твердых поверхностей при полусухом трении. Борьба с этим явлением может успешно вестись в разных направлениях: путем поддержания в слое низких средних температур, надежного уплотнения внутренней полости муфты для предотвращения утечек и связанного с ними газообмена муфты с атмосферой, компенсации утечек, циркуляции смазывающих сред через внутреннюю полость муфты, применения специальных синтетических

смазывающих сред (например, полисилоксанов), стабилизированных различными присадками, и т. п.

Применение сухих сред вроде окиси цинка, азотистого бора и двуокиси кремния, как указывается в некоторых источниках, может значительно увеличить стабильность смеси.

В связи с тем что несменяемые рабочие элементы муфты практически не изнашиваются, а магнитная смесь легко заменяется, указанный выше недостаток порошковых муфт не является решающим.

Высокие качества порошковых муфт как элементов управления машинами, незаменимых во многих случаях, обуславливают их все более расширяющееся применение в настоящее время.

Из такой оценки процесса также следует, что усилие P , развиваемое приводом, определяет величину натяжения полосы: чем больше момент приводного двигателя в заторможенном состоянии, тем большее натяжение создает петледержатель в полосе при одном и том же размере петли. Если бы описанная картина действительно имела место, то применение петледержателей было бы практически невозможно из-за частого разрыва полосы при малых углах β .

Ошибочность приведенного выше толкования объясняется тем, что задача рассматривается как статическая и не учитываются особенности технологического процесса. Анализ и экспериментальные исследования, проведенные на тонколистовом стане одного из комбинатов Советского Союза, помогли выявить действительную физику работы петледержателей.

Теория вопроса. Скорость выхода полосы из валков предыдущей клетки $v_{1\text{вых}}$ и скорость входа в последующую клетку $v_{2\text{вх}}$ (рис. 1) зависят от натяжения полосы и могут быть выражены [Л. 3]:

$$v_{1\text{вых}} = \frac{\pi D_1 n_{\partial a1}}{60 i_1} (1 + S_{o1} + b_1 T); \quad (2)$$

$$v_{2\text{вх}} = \frac{h_2 D_2 n_{\partial a2}}{h_1 60 i_2} (1 + S_{o2} - b_2 T), \quad (3)$$

где D_1 и D_2 — диаметры валков соответствующих клеток;

i_1 и i_2 — передаточные отношения редукторов;

S_{o1} и S_{o2} — опережения металла при прокатке без натяжений;

b_1 и b_2 — коэффициенты пропорциональности между натяжением и приращением опережения металла;

h_1 и h_2 — толщина полосы до и после второй клетки;

$n_{\partial a1}$ и $n_{\partial a2}$ — скорости вращения двигателей клеток.

Таким образом, приращение натяжения, создаваемое петледержателем, будет увеличивать скорость полосы, выходящей из валков первой клетки, и уменьшать скорость ее входа во вторую клетку. Это приводит к тому, что нарушается постоянство секундного объема металла на участке между клетями в направлении образования петли, вследствие чего петледержатель начнет подниматься вверх. Очевидно, что рост петли будет происходить до тех пор, пока сила давления петледержателя не будет уравновешена весом и натяжением прокатываемой полосы. При этом необходимо учесть, что натяжение в установившемся режиме будет равно начальному, определяемому параметрами приводов клеток.

Из условия равновесия можно записать:

$$\sin \beta = \frac{P - G_n}{2T_0}, \quad (4)$$

где T_0 — натяжение полосы до включения петледержателя, определяемое параметрами приводных двигателей клеток (соотношением скоростей);

P — сила давления петледержателя на полосу, определяемая моментом приводного двигателя петледержателя.

Из этого выражения следует, что высота подъема петледержателя при данном усилии, оказываемом им на полосу, обратно пропорциональна натяжению полосы.

Если натяжение полосы при прокатке равно нулю, то при включении петледержателя последний будет подниматься до тех пор, пока не достигнет до упора, если до этого он не уравновесится весом полосы.

Очевидно, что в переходном режиме при подъеме петледержателя натяжение полосы больше, чем начальное. При выводе уравнения движения привода петледержателя будем исходить из условия, что в качестве приводного двигателя использован двигатель постоянного тока независимого возбуждения.

Примем следующие допущения:

а) скорость вращения двигателей клеток не меняется при изменении натяжения;

б) не учитывается упругое растяжение полосы между клетями.

Эти допущения не вносят заметных погрешностей в рассматриваемый процесс [Л. 3]. Уравнение моментов двигателя петледержателя запишется:

$$M_{\partial a} = \frac{GD^2 dn}{375 dt} + M_c. \quad (5)$$

Статический момент M_c , приведенный к валу двигателя петледержателя, согласно кинематической схеме рис. 1 может быть выражен следующим образом:

$$M_c = \frac{2TC \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha + (M_{yp} + G_n C) \cos \alpha}{i_p \cdot \eta_p}, \quad (6)$$

где T — натяжение полосы;

C — плечо петледержателя;

α — угол подъема петледержателя;

M_{yp} — недоуравновешенный момент механизма;

i_p — передаточное число привода петледержателя.

При выводе выражения статического момента, а также в дальнейших выводах принято допущение, что ролик петледержателя расположен посередине между клетями и при подъеме движется перпендикулярно, не меняя своего положения относительно клеток. Для ряда станов имеет место именно такое конструктивное решение.

Длина полосы между клетями в переходном режиме может быть выражена как

$$l = \frac{l_0}{\cos \beta} = l_0 + \int_0^t (v_{1\text{вых}} - v_{2\text{вх}}) dt, \quad (7)$$

где l_0 — расстояние между клетями.

Определим из этого уравнения скорость выхода полосы из валков первой клетки:

$$v_{1\text{вых}} = v_{2\text{вх}} + \frac{l_0 \cdot \sin \beta}{\cos^2 \beta} \frac{d\beta}{dt}. \quad (8)$$

Используя уравнения (2), (3) и (8), выразим величину натяжения полосы в функции скоростей двигателей и угла β :

$$T = \frac{D_2 \frac{h_2 n_{\partial \partial 2}}{h_1 i_2} (1 + S_{o2}) - D_1 \frac{n_{\partial \partial 1}}{i_1} (1 + S_{o1})}{D_1 b_1 \frac{n_{\partial \partial 1}}{i_1} + D_2 b_2 \frac{h_2 n_{\partial \partial 2}}{h_1 i_2}} + \frac{60 l_o \sin \beta d\beta}{\pi \left(b_1 D_1 \frac{n_{\partial \partial 1}}{i_1} + b_2 D_2 \frac{h_2 n_{\partial \partial 2}}{h_1 i_2} \right) \cos^2 \beta dt} \quad (9)$$

Первый член этого выражения представляет собой начальное натяжение T_0 , обусловленное соответствующей установкой скоростей приводных двигателей клеток.

Второй член характеризуется изменением угла β при включении петледержателя и представляет собой приращение натяжения в переходном режиме при подъеме петледержателя.

Выразим β через угол подъема петледержателя (рис. 1):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2H}{l_0} = \frac{2C \sin \alpha}{l_0} \quad (10)$$

Угол β при подъеме петледержателя изменяется примерно от 0 до 4°, вследствие чего без особой погрешности можно положить:

$$\operatorname{tg} \beta \approx \sin \beta \approx \beta. \quad (11)$$

Подставив в выражение статического момента (6) значение натяжения (9) и заменив $\sin \beta$ и $\frac{d\beta}{dt}$ через α , по (10) и (11), после преобразования, будем иметь:

$$M_c = 2 \frac{T_0 C^2}{i_p \eta_p l_0} \sin 2\alpha + \frac{240 C^4 \cdot \sin^2 \alpha}{\pi l_o^2 i_p \eta_p \left(b_1 D_1 \frac{n_{\partial \partial 1}}{i_1} + b_2 \frac{h_2}{h_1} D_2 \frac{n_{\partial \partial 2}}{i_2} \right)} \frac{d\alpha}{dt} + \left(\frac{M_{yp} + G_n C}{\eta_p i_p} \right) \cos \alpha. \quad (12)$$

В уравнении моментов выразим скорость вращения и производную скорости через угла α подъема петледержателя:

$$M_{\partial} = \frac{U_z}{R_{як}} c_m - \frac{c_e c_m 60 i_p}{R_{як} 2\pi} \frac{d\alpha}{dt}; \quad (13)$$

$$\frac{GD^2 dn}{375 dt} = \frac{GD^2 60}{375 2\pi} i_p \frac{d^2 \alpha}{dt^2}, \quad (14)$$

где U_z — напряжение, питающее двигатель;

$R_{як}$ — сопротивление якорной цепи;

c_e и c_m — коэффициенты э. д. с. и момента двигателя.

Подставим выражения (12), (13) и (14) в уравнение моментов (5) и после преобразования получим:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \left[\frac{1}{\theta} + A \sin^2 2\alpha \right] \frac{d\alpha}{dt} + B \sin 2\alpha = \frac{n_0 \pi}{930 i_p} - \frac{(M_{yp} + G_n C) 375 \pi}{\eta_p i_p^2 GD^2 30} \cos \alpha, \quad (15)$$

$$\text{где } A = \frac{375 \cdot 8 C^4}{GD^2 i_p^2 \eta_p \left(b_1 D_1 \frac{n_{\partial \partial 1}}{i_1} + b_2 D_2 \frac{h_2}{h_1} \frac{n_{\partial \partial 2}}{i_2} \right)};$$

$$B = \frac{\pi T_0 C^2 25}{i_p^2 \eta_p l_0 GD^2};$$

$$\theta = \frac{GD^2 R_{як}}{375 c_e c_m} \text{ — электромеханическая постоянная времени привода;}$$

n_0 — скорость идеального холостого хода двигателя петледержателя.

Полученное дифференциальное уравнение является нелинейным, и решение его не может быть выражено аналитически в элементарных функциях. Однако уравнение (15) без ущерба для целей исследования можно значительно упростить, если рассматривать процесс подъема петледержателя на небольшие углы (8...12°); в этом случае

$$\sin 2\alpha \approx 2\alpha; \quad \sin^2 2\alpha \approx 4\alpha^2; \quad \cos \alpha \approx 1.$$

Тогда уравнение запишется так:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \left[\frac{1}{\theta} + 4A\alpha^2 \right] \frac{d\alpha}{dt} + 2B\alpha = \frac{n_0 \pi}{930 i_p} - \frac{(M_{yp} + G_n C) 375 \pi}{\eta_p i_p^2 GD^2 \cdot 30}. \quad (16)$$

Из уравнения (16) найдем установившееся значение угла подъема петледержателя:

$$\alpha_y = \frac{i_p \cdot \eta_p \cdot l_0}{4 T_0 C^2} \left[M_{\partial \partial} - \frac{(M_{yp} + G_n C)}{\eta_p \cdot i_p} \right]. \quad (17)$$

Как показывает анализ этого выражения, угол подъема петледержателя в установившемся режиме пропорционален моменту приводного двигателя в режиме короткого замыкания, расстоянию между клетями и обратно пропорционален натяжению полосы T_0 , обусловленному начальной установкой соотношения скоростей двигателей клеток. Натяжение полосы в переходном режиме работы петледержателя можно выразить из уравнения (9), заменив угол β углом α , используя при этом выражения (10) и (11).

В окончательном виде натяжение полосы выразится:

$$T = T_0 + \frac{240 C^2 \alpha}{\pi \left(b_1 D_1 \frac{n_{\partial \partial 1}}{i_1} + b_2 D_2 \frac{h_2}{h_1} \frac{n_{\partial \partial 2}}{i_2} \right) l_0} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (18)$$

Как уже указывалось выше, вторая составляющая натяжения обусловлена переходным процессом. По достижении петледержателем установившегося угла подъема, когда $\frac{d\alpha}{dt} = 0$, натяжение полосы будет равно начальному (T_0).

График натяжения в переходном режиме может быть построен по выражению (18), если использовать результаты решения дифференциального уравнения движения петледержателя (16). Уравнение (16) нелинейно, и его решение не может быть выражено в элементарных функциях. Довольно простое решение этого уравнения возможно графоаналитическим методом.

Кроме того, как показали расчеты переходных процессов, в большинстве случаев переменным

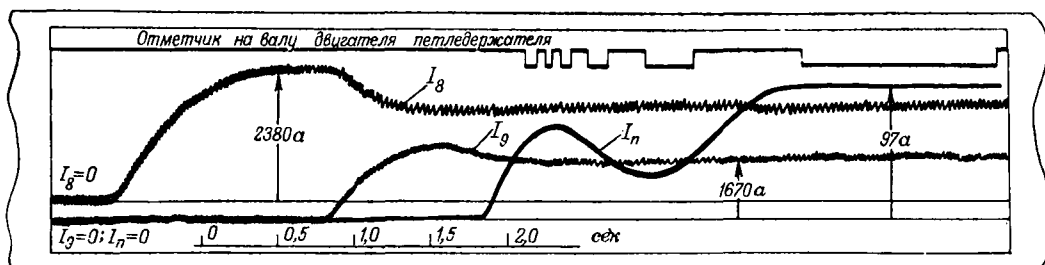


Рис. 2. Осциллограмма токов двигателей тонколистового стана.
 I_8 — ток двигателя 8-й клетки; I_9 — ток двигателя 9-й клетки; I_n — ток петледержателя между 8-й и 9-й клетями.

коэффициентом при первой производной можно пренебречь, так как максимальное значение его при установившемся значении угла подъема в 15...20 раз меньше, чем постоянный коэффициент при первой производной. В этом случае уравнение сводится к линейному, и аналитическое решение его не представляет трудностей.

Результаты экспериментального исследования. При проведении исследования была поставлена задача подтвердить основные физические положения проведенного анализа; в первую очередь надо было убедиться в том, что рассмотрение задачи только с позиций статики расходится с данными опыта. Исследование проводилось на тонколистовом стане одного из заводов Советского Союза. Прокатка в чистовой группе стана проводилась с некоторым натяжением полосы между клетями; такой режим освоен заводом при высоком качестве продукции. При установившемся режиме прокатки производилось включение петледержателя. Следовательно, петледержатель с самого начала хода, при угле $\alpha=0$, упирался в натянутую полосу. Однако при этом обрыва полосы не происходило, а петледержатель начинал подниматься, образуя петлю металла, что немислимо при рассмотрении задачи как статической. При некотором угле подъема наступало равновесие, и подъем петледержателей прекращался. При опускании петледержателя петля металла не оставалась между клетями, а выбиралась, следуя за опускающимся петледержателем. Чем величина натяжения полосы больше, тем подъем петледержателя меньше. Это свойство используется оператором стана для выявления величины натяжения при прокатке.

На рис. 2 приведена осциллограмма, на которой записаны токи двигателей 8-й и 9-й клеток стана и ток двигателя петледержателя при его включении. Прокатка полосы происходила с натяжением; об этом можно судить по уменьшению тока двигателя 8-й клетки за счет момента натяжения, возникающего при входе полосы в 9-ю клеть. Расчеты показали, что средние удельные натяжения имеют порядок 1...1,5 кг/мм². При установившемся режиме прокатки было произведено включение петледержателя. На осциллограмме зафиксированы изменение тока двигателя петледержателя и его путь (отметчик пути). Из осциллограммы следует, что после того как была образована петля определенной величины, движение петледержателя прекратилось. В переходном режиме подъема петледержателя ток двигателя

8-й клетки заметно не изменяется; это говорит о том, что в полосе не возникает значительных добавочных натяжений.

Таким образом, проведенные опыты подтвердили основные положения, разработанные в результате анализа, и дали возможность обосновать методику расчета привода петледержателей тонколистовых станов.

Пример расчета для конкретной установки. В качестве примера приведем расчет переходных процессов для одного из непрерывных прокатных станов. Привод и механическая часть петледержателя имеют следующие данные: двигатель петледержателя МП-62; $P_n = 44$ кВт при ПВ=25%; $U_n = 440$ в; $n_n = 580$ об/мин; $GD_{\partial\partial}^2 = 22$ кгм².

Питание двигателя осуществляется от шин постоянного тока напряжением 62 в. Суммарное сопротивление якорной цепи двигателя с добавочным сопротивлением $R_{\text{жк}} = 1,55$ ом. Момент, развиваемый двигателем в заторможенном состоянии, $M_{\text{дв макс}} = 28$ кгм. Передаточное отношение редуктора $i_p = 23,7$. Плечо петледержателя $C = 0,6$ м. Расстояние между клетями $l_0 = 6$ м. Ролик петледержателя находится посередине между клетями. Маховой момент механизма, приведенный к валу двигателя, $GD_{\text{м}}^2 = 18$ кгм². Недоуравновешенный момент механизма $M_{yp} = +170$ кгм. Вес прокатываемой полосы между клетями стана $G_n = 250$ кг. Скорость полосы между клетями при прокатке $v_{np} = 1$ м/сек. Коэффициенты задерживания от натяжения в первой и второй клетях принимаем равными:

$$b_1 = b_2 = 1,9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{кг}}.$$

Это соответствует приращению опережения в каждой клетки на 3% при изменении удельного натяжения от нуля до значения, равного половине предела текучести прокатываемого металла. Начальное натяжение полосы до включения петледержателя $T_0 = 5000$ кг.

Уравнение движения в числовом виде запишется:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + (2,85 + 2,95\alpha^2) \frac{d\alpha}{dt} + 2,33\alpha = 0,53.$$

Установившееся значение угла подъема петледержателя:

$$\alpha_y = \frac{0,53}{2,33} = 0,227 \text{ рад} = 13^\circ.$$

Определим, на сколько процентов изменится коэффициент при первой производной при изменении угла подъема от 0 до α_v :

$$\delta\% = \frac{2,95 \cdot 0,227^2 \cdot 100\%}{2,85} = 5,33\%.$$

Такое незначительное изменение коэффициента при первой производной при изменении угла подъема петледержателя от 0 до α_v позволяет без особой погрешности решать данное уравнение как линейное, приняв коэффициент при первой производной постоянным, не зависящим от угла подъема. Как показали расчеты, кривые переходных режимов, построенные графоаналитическим методом без указанного выше допущения, и кривые, полученные в результате решения линеаризованного уравнения движения, практически совпадают.

При аналитическом решении уравнения коэффициент при первой производной был принят постоянным и равным

$$(2,85 + 2,95\alpha_v^2) = 3,0.$$

При определении частного решения данного уравнения были приняты следующие начальные условия:

$$\text{при } t=0 \quad \alpha=0 \text{ и } \frac{d\alpha}{dt}=0,$$

т. е. угол и скорость петледержателя в момент соприкосновения его с полосой равны нулю. Выражение угла подъема петледержателя в переходном режиме в результате решения уравнения может быть записано:

$$\alpha = 0,227 - e^{-1,5t} (0,227 \cos 0,283t + 1,2 \sin 0,283t),$$

где α — угол, град.

Подставив значения α и $\frac{d\alpha}{dt}$ в уравнение (18), получим выражение для натяжения:

$$T = 5000 + 25800e^{-1,5t} \sin 0,283t - e^{-3t} (12900 \sin 0,283t + 137000 \sin^2 0,283t).$$

На рис. 3 представлены кривые изменения угла подъема петледержателя и натяжения полосы, построенные по полученным уравнениям.

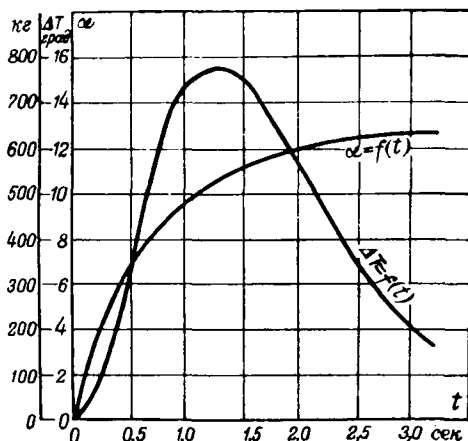


Рис. 3. Кривые изменения натяжения полосы и угла подъема петледержателя.

Как показывает анализ кривой натяжения, максимальный прирост натяжения составляет 780 кг, или 15,6% начального.

Методика расчета и выводы. В результате проведенных исследований установлено:

1. Момент двигателя петледержателя не определяет величины натяжения полосы в установившемся режиме. Натяжение полосы при прокатке как с петледержателем, так и без него определяется соотношением скоростей двигателей клеток.

2. При данном моменте двигателя петледержателя высота его подъема зависит от величины натяжения полосы: чем больше натяжение, тем меньше подъем петледержателя; таким образом, петледержатель может быть использован как указатель натяжения.

3. Петля полосы может быть образована при включении петледержателя в результате силового воздействия его на полосу. Этот род петли следует именовать «силовой» петлей в отличие от свободной петли, образованной воздействием на скорость вращения двигателей смежных клеток.

4. Величина момента двигателя в заторможенном состоянии, а значит, и величина усилия, развиваемого петледержателем, могут быть принципиально установлены таким образом, что установившемуся рабочему углу поворота петледержателя будет соответствовать сколь угодно малое натяжение полосы.

5. Непрерывный процесс прокатки с силовой петлей при малых значениях натяжения может быть использован и на других непрерывных станках, например при прокатке сортового металла.

Наличие петледержателя, работающего при силовой петле в качестве указателя натяжения, позволяет автоматизировать процесс. При этом импульс, получаемый в функции угла поворота петледержателя, должен воздействовать на систему привода клеток.

Если бы время подъема петледержателя не являлось существенным фактором, то выбор передаточного отношения редуктора и момента двигателя определялся бы только технико-экономическим расчетом. Однако в процессе прокатки и особенно при заправке полосы возможно образование свободной петли с обеих сторон какой-либо клетки. Последнее может привести к аварии вследствие колебаний свободной полосы между клетями. Эксплуатационный персонал считает, что образование свободной петли с двух сторон клетки недопустимо, поэтому петледержатель между двумя любыми смежными клетями должен подняться на рабочую высоту за время прохождения передним концом полосы расстояния между последующими двумя клетями. Если обозначить через t_n время, за которое петледержатель должен повернуться на угол α , чтобы ограничить колебания полосы, то средняя скорость вращения вала петледержателя $n_{н.с.р}$ при $M_c = 0$ может быть выражена формулой

$$n_{н.с.р} = \frac{\alpha}{60t_n} \text{ об/мин}, \quad (19)$$

где α — угол, град.

В настоящее время для привода петледержателя наиболее рациональным с точки зрения гибкости управления является применение двигателя постоянного тока параллельного возбуждения или специального моментного двигателя.

Расчеты по определению мощности и выбору электропривода петледержателя проводятся в следующей последовательности:

1. Момент, который должен развивать двигатель в заторможенном состоянии, определяется по формуле

$$M_c = PC \cdot \cos \alpha = \frac{2C^2}{l_o} T_{раб} \cdot \sin 2\alpha_{раб} + \\ + (M_{ур} + G_n C) \cos \alpha_{а5},$$

где $T_{раб}$ — рабочее значение натяжения полосы при прокатке.

Если нет особых указаний в задании на проектирование, то рекомендуется подсчитывать $T_{раб}$, исходя из средних удельных натяжений

$$\sigma_{ср} = (0,15 \dots 0,2) \sigma_s,$$

где σ_s — предел текучести металла при данной температуре;

α_p — оптимальный угол подъема петледержателя, принимается равным

$$(0,3 \dots 0,4) \alpha_{макс};$$

$\alpha_{макс}$ — максимальный угол подъема петледержателя, обычно равный $60^\circ \dots 70^\circ$ (при $c \approx 0,1 l_o$);

$M_{ур}$ — недоуравновешенный момент механизма петледержателя;

G_n — вес полосы, находящейся на участке между клетями;

C, l_o — геометрические размеры в соответствии с рис. 1.

2. Исходя из графика работы петледержателя, подсчитывают относительную продолжительность включения ϵ_c с учетом ухудшения теплоотдачи двигателя в заторможенном состоянии при работе на упор [Л. 2].

3. Определяется величина момента M'_c , приведенного от действительной продолжительности включения к ближайшей каталожной ϵ_k , по формуле

$$\frac{M_c}{M'_c} = \sqrt{\frac{\epsilon_k}{\epsilon_c}}.$$

4. Подсчитывается средняя угловая скорость вала петледержателя $n_{с.ср}$ по формуле (19):

$$n_{с.ср} = \frac{\alpha}{60 t_n} \text{ об/мин},$$

где t_n — время, за которое петледержатель при работе вхолостую должен повернуться на угол α .

Если нет особых указаний в задании на проектирование, можно исходить из условия

$\alpha = 20 \dots 25^\circ$; t_n — время прохождения конца полосы между двумя смежными клетями.

Максимальное значение напряжения при прямом пуске двигателя петледержателя не должно превосходить величины $I_n R_{дв} \lambda$, где λ — коэффициент перегрузки двигателя по моменту (току).

Исходя из условия, что для металлургических двигателей величина коэффициента λ имеет порядок $2,5 \dots 3$, а $I_n R_{дв}$ в процентах лежит в пределах $3 \dots 7\%$, величину установившейся скорости двигателя, соответствующую средней скорости вала петледержателя можно принять равной $(0,15 \dots 0,2) n_n$, где n_n — номинальная скорость двигателя.

5. Мощность двигателя определяется по формуле

$$P_{дв} = \frac{M'_c n_{с.ср}}{975 (0,15 \dots 0,2) \eta_p} [\text{квт}]. \quad (20)$$

6. Передаточное число подсчитывается по формуле

$$i_p = \frac{(0,15 \dots 0,2) n_n}{n_{с.ср}}, \quad (21)$$

где $n_{с.ср}$ определено по формуле (19).

При мощности двигателя $P_{дв}$ он может быть выбран на различную номинальную скорость, вследствие чего значения передаточного числа будут также различны.

Так как время ускорения двигателя может быть соизмеримо со временем работы на установившейся скорости, то из возможных вариантов будет заслуживать предпочтение случай, при котором наиболее близко удовлетворяется равенство [Л. 2]:

$$GD_m^2 = i_p^2 GD_{дв}^2,$$

где GD_m^2 — маховой момент механизма (задан);

$GD_{дв}^2$ — маховой момент якоря выбираемого двигателя.

Сократить время подъема петледержателя при выбранном передаточном отношении редуктора, а также в двигателе можно за счет увеличения питающего напряжения.

При этом необходимо учитывать, что, увеличивая напряжение питающего источника, необходимо одновременно увеличить последовательно включенное с якорем двигателя сопротивление, ограничивающее величину тока короткого замыкания.

Литература

1. Д. П. Морозов. Теория электропривода и автоматика реверсивных станов. Госэнергоиздат, 1949.
2. А. Т. Голован. Электропривод. Госэнергоиздат, 1948.
3. Н. Н. Дружинин. Основные положения и анализ электромеханических процессов непрерывной прокатки холодного металла. Исследование автоматизированного электропривода прокатных станов. Машгиз, 1953.

[7.12.1954]

Усилия от тяжения полюсов в клиньях крепления активной стали гидрогенераторов

Кандидат техн. наук Г. Н. ТЕР-ГАЗАРЯН и кандидат техн. наук К. М. ХУБЕРЯН

Тбилисский научно-исследовательский институт сооружений и гидроэнергетики

В практике эксплуатации гидрогенераторов отмечен ряд случаев отрыва сварных швов, крепящих клинья активной стали к ребрам корпуса. В одном из этих случаев в результате отрыва швов потребовался длительный ремонт генератора [Л. 1 и 2]. Поэтому анализ возможных причин отрыва швов при работе машин в нормальных режимах представляет интерес в целях повышения эксплуатационной надежности гидрогенераторов.

Усилия и напряжения, вызываемые тяжением полюсов, составляют одну из основных частей нагрузки швов. При проектировании конструкции крепления активной стали принимают, что усилия тяжения, существующие в зазоре, полностью передаются на швы клиньев. Это предположение, несомненно, технически оправдано при изготовлении машины, так как оно предопределяет известный необходимый запас прочности и в некоторых режимах может соответствовать действительности. Однако при рассмотрении причин отрыва швов и при анализе усилий в клиньях и швах от сил тяжения полюсов необходимо положить в основу предположение, более соответствующее схеме воздействия этих сил на активную сталь и корпус в обычном эксплуатационном режиме. Действительно, силы поля на клинья передаются полностью лишь в случае, когда активная сталь не представляет собой единого целого. Следовательно, расчетное предположение не соответствует реальным условиям работы конструкций всех машин с цельными статорами. В случае машин с разъемными статорами силы тяжения полюсов полностью передаются на клинья при наличии зазоров в стыках разъемных частей.

При изготовлении и сборке разъемных частей статора стремятся к обеспечению плотности стыков. Однако если разъемные части выполнены недостаточно точно, то неизбежно наличие зазоров в стыках в холодном состоянии машины. Таким образом, полная передача сил поля из зазора на клинья возможна при холостом ходе генератора. Под нагрузкой, с повышением температуры, как показывает опыт, зазоры обычно резко умень-

шаются. Это хорошо подтверждается изменением характера вибрации активной стали и других частей генератора по мере их нагрева (рис. 1 и 2).

На рис. 1 и 2 представлено изменение амплитуды вибрации с частотой 100 гц по мере возрастания нагрузки для генератора типа СВ 1160/180-72, статор которого состоит из шести разъемных частей. В ненагретом состоянии машины амплитуда вибрации достигает 70...75 мкм, что свидетельствует о повышенных зазорах в стыках «шестерок» и ослаблении плотности прессовки активной стали.

Когда температура активной стали достигает 62° С, амплитуда вибрации начинает резко падать и снижается до 10 мкм при температуре 68° С. Очевидно, резкий спад амплитуды вибрации обусловлен уплотнением стыков и прессовки цилиндра активной стали вследствие температурного расширения.

Кривые рис. 1 и 2 построены для отдельных точек контролировавшихся узлов, однако подобным же образом фактически изменялась амплитуда колебаний по всей окружности статора.

Данные рис. 1 и 2 относятся к машине с пониженной плотностью стыков и прессовки активной стали. На других генераторах того же типа с нормальными зазорами в стыках при качественной прессовке стали закрытие стыков и уплотнение прессовки активной стали наблюдаются при более низкой температуре, порядка 40° С. Еще более надежное уплотнение стыков и прессовки стали при температурном расширении будет иметь место в машинах с меньшим числом разъемных частей статора.

Таким образом, для рабочих режимов тех машин, которые удовлетворяют обычным нормальным требованиям в отношении плотности прессовки и стыковки разъемных частей статора, в основу анализа усилий тяжения полюсов, передающихся на клинья, следует положить условие отсутствия зазоров между «шестерками».

Рассмотрим методику определения усилий в клиньях в этом предположении.

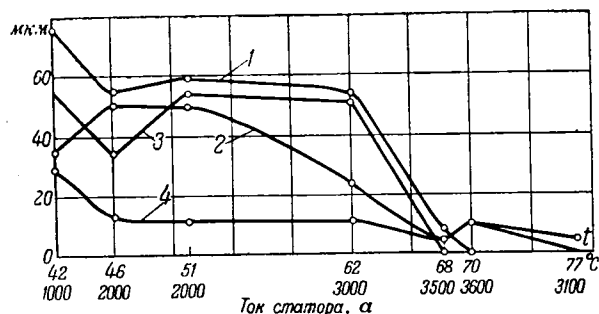


Рис. 1. Снижение двойной амплитуды вибрации частотой 100 гц в радиальном направлении по мере повышения нагрузки (температуры) генератора.

1 — амплитуда вибрации, измеренная на активной стали; 2 — на полке; 3 — на клине; 4 — на лапе.

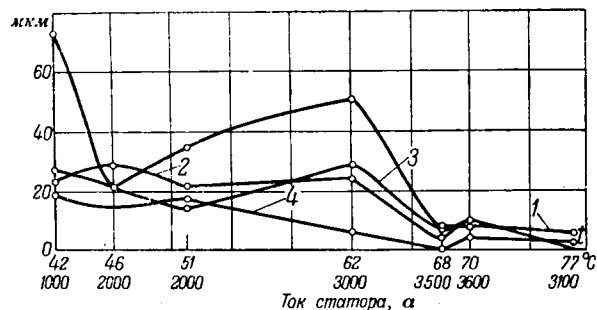


Рис. 2. Снижение двойной амплитуды вибрации частотой 100 гц в касательном направлении по мере повышения нагрузки (температуры) генератора.

1 — амплитуда вибрации, измеренная на активной стали; 2 — на полке; 3 — на клине; 4 — на лапе.

Проведем плоскость, перпендикулярную оси вращения гидрогенератора и делящую пополам расстояние между двумя смежными ребрами корпуса. Двумя такими плоскостями вырежем такую часть статора (пунктир, рис. 3), чтобы на ее долю приходилось одно ребро. Эту часть статора рассчитаем на нагрузку, создаваемую тяжением полюсов при нормальном режиме. Нагрузка, как известно, будет приложена к активной стали и направлена радиально к оси вращения. Эту нагрузку примем распределенной по окружности активной стали равномерно.

Усилия, обусловленные указанной нагрузкой в клиньях, крепящих активную сталь, определим приближенным способом — без учета крепления корпуса к фундаменту, рассматривая, таким образом, вырезанную часть статора как плоскую систему. Эта система состоит из наружного кольца таврового поперечного сечения, принадлежащего корпусу, внутреннего кольца активной стали прямоугольного поперечного сечения (рис. 4) и клиньев, соединяющих эти кольца.

В схематизированном виде эта система показана на рис. 5. Поперечные сечения наружного и внутреннего колец, совпадающие с осями клиньев, обозначим буквой a . Всякое поперечное сечение, расположенное посередине между двумя смежными сечениями a , обозначим буквой o .

Рассматриваемая многократно статически неопределимая система при указанном распределении нагрузки (рис. 5) будет обладать циклической симметрией, и в силу этого она содержит три лишних неизвестных. В качестве этих неизвестных можно принять: 1) изгибающий момент X_n в поперечном сечении a наружного кольца; 2) изгибающий момент X_o в поперечном сечении o внутреннего кольца и 3) растягивающее усилие S в клине. Расчет системы произведем по методу сил. В данном случае нет необходимости совместно решать три канонических уравнения метода сил с тремя неизвестными. Каждое статически неопределимое кольцо можно рассмотреть отдельно и добавить еще одно уравнение неразрывности деформаций, составленное для клина.

Отделим наружное кольцо от клиньев. Оно нагружено только радиальными силами S , которые для кольца играют роль внешней нагрузки. Рассчитаем наружное кольцо на эту

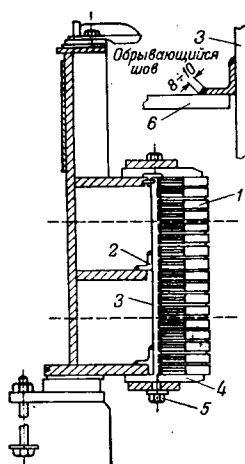


Рис. 3. Продольный разрез конструкции крепления активной стали.

1—активная сталь; 2—уголок; 3—клин; 4—накладка, стягивающая активную сталь; 5—стяжной болт; 6—ребро корпуса.

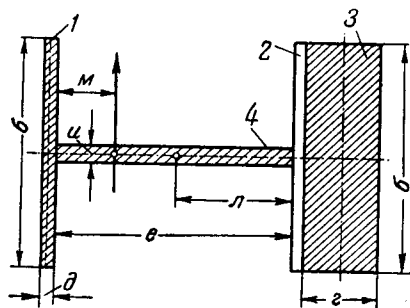


Рис. 4. Тавровое сечение наружного кольца и прямоугольное сечение внутреннего кольца.

1—обшивка корпуса; 2—клин; 3—активная сталь; 4—полка.

нагрузку по методу сил. Основная система и лишняя неизвестная показаны на рис. 6, а. Геометрическая изменяемость основной системы при рассматриваемой нагрузке не мешает расчету. Изгибающий момент, уменьшающий кривизну кольца, и растягивающую нормальную силу полагаем положительными. Угол между поперечным сечением o и произвольным поперечным сечением обозначим α ; угол между сечениями o и a обозначим α_a . Число клиньев обозначим n . В таком случае $\alpha_a = \frac{360^\circ}{2n}$ (в градусах). Радиус

осевой линии наружного кольца обозначим r_n , а радиус осевой линии внутреннего кольца — r_o . Изгибающий момент и нормальную силу в произвольном поперечном сечении основной системы, обусловленные внешней нагрузкой (силами S), принято обозначать M_p и N_p . Изгибающий момент и нормальную силу в произвольном сечении основной системы от единичных сил, приложенных взамен лишней неизвестной (от единичных моментов $X_n = 1$), обозначим M_1 и N_1 .

Используя условия равновесия элемента основной системы, нагруженной силами S (рис. 6, б), найдем:

$$M_p = \frac{S r_n}{2} \left(\operatorname{ctg} \alpha_a - \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha_a} \right); \quad (1)$$

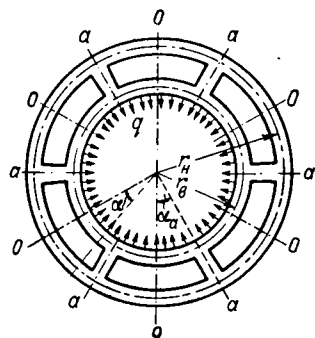


Рис. 5. Схематическое изображение системы, состоящей из наружного и внутреннего колец и клиньев.

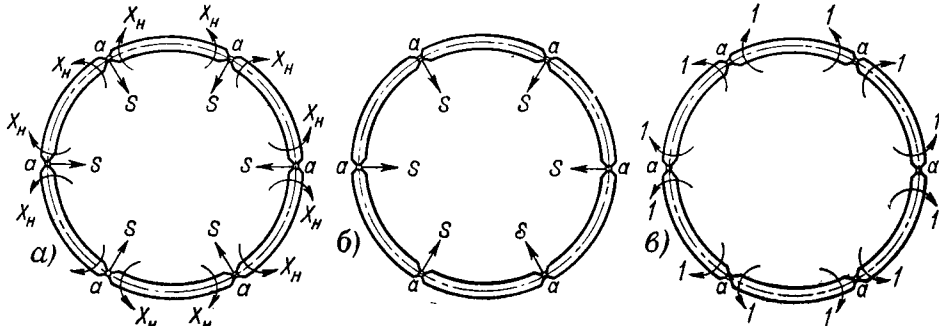


Рис. 6.

а — основная система и лишняя неизвестная X_n для расчета статически неопределимого наружного кольца; б — та же основная система, нагруженная силами S ; в — та же основная система, нагруженная единичными моментами $X_n = 1$.

$$N_p = -\frac{S}{2} \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha_a}. \quad (2)$$

Используя условия равновесия элемента основной системы, нагруженной моментами $X_\kappa = 1$ (рис. 6, в), найдем:

$$M_1 = 1; \quad (3)$$

$$N_1 = 0. \quad (4)$$

Каноническое уравнение метода сил для однократно статически неопределимой системы при действии статической нагрузки, как известно, имеет вид:

$$\delta_{11} X_\kappa + \Delta_{1p} = 0. \quad (5)$$

Перемещения δ и Δ_{1p} определим при помощи известной формулы строительной механики [Л. 5]:

$$\Delta_{ik} = \int \frac{M_i M_k dS}{EJ} + \int \frac{N_i N_k dS}{EF}. \quad (6)$$

Используя выражения (1), (2), (3) и (4), получим:

$$\delta_{11} = 2n \int_0^a \frac{M_1^2 r_\kappa d\alpha}{E_\kappa J_\kappa} + 2n \int_0^a \frac{N_1^2 r_\kappa d\alpha}{E_\kappa F_\kappa} = \frac{2nr_\kappa \alpha_a}{E_\kappa J_\kappa}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{1p} &= 2n \int_0^a \frac{M_p M_1 r_\kappa d\alpha}{E_\kappa J_\kappa} + 2n \int_0^a \frac{N_p N_1 r_\kappa d\alpha}{E_\kappa F_\kappa} = \\ &= \frac{n S r_\kappa^2}{E_\kappa J_\kappa} (\alpha_a \operatorname{ctg} \alpha_a - 1), \end{aligned} \quad (8)$$

где F_κ — площадь поперечного сечения наружного кольца;

J_κ — момент инерции того же сечения;

E_κ — модуль упругости материала наружного кольца при изгибе.

Подставив в уравнение (5) значения δ_{11} и Δ_{1p} из формул (7) и (8), найдем лишнюю неизвестную X_κ :

$$X_\kappa = \frac{S r_\kappa}{2} \left(\frac{1}{\alpha_a} - \operatorname{ctg} \alpha_a \right). \quad (9)$$

Изгибающий момент и нормальную силу в произвольном поперечном сечении наружного кольца статически неопределимого кольца найдем по формулам:

$$M = M_p + M_1 X_\kappa; \quad (10)$$

$$N = N_p + N_1 X_\kappa. \quad (11)$$

Подставив в эти формулы выражения (1), (2), (3), (4) и (9), получим:

$$M = \frac{S r_\kappa}{2} \left(\frac{1}{\alpha_a} - \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha_a} \right); \quad (12)$$

$$N = -\frac{S}{2} \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha_a}. \quad (13)$$

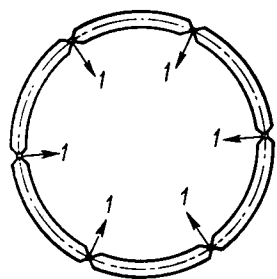


Рис. 7. Основная система наружного кольца, нагруженная единичными радиальными силами.

Определим теперь перемещения наружного кольца.

Радиальное перемещение точки a наружного кольца, вызываемое силами S , обозначим u_κ . Оно направлено к центру кольца. Для определения u_κ нагрузим основную систему единичными радиальными силами, направленными к центру кольца (рис. 7). Изгибающий момент и нормальную силу в произвольном поперечном сечении основной системы от единичных радиальных сил обозначим M' и N' . Системы, представленные на рис. 6, б и 7, отличаются друг от друга только абсолютным значением радиальных сил. Поэтому выражения M' и N' получим из формул (1) и (2), приняв в них $S = 1$:

$$M' = \frac{r_\kappa}{2} \left(\operatorname{ctg} \alpha_a - \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha_a} \right); \quad (14)$$

$$N' = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha_a}. \quad (15)$$

Единичные радиальные силы и внутренние силы M' и N' образуют уравновешенную систему сил. Применим к ней принцип возможных перемещений. В качестве возможных перемещений примем действительные перемещения наружного статически неопределимого кольца. В таком случае получим уравнение

$$n \cdot 1 \cdot u_\kappa = 2n \int_0^a \frac{M' M r_\kappa d\alpha}{E_\kappa J_\kappa} + 2 \cdot n \int_0^a \frac{N' N r_\kappa d\alpha}{E_\kappa F_\kappa}. \quad (16)$$

Подставив в это уравнение значения M , N , M' и N' из формул (12), (13), (14) и (15) и проведя интегрирование, получим:

$$u_\kappa = \frac{S r_\kappa}{4 E_\kappa} \left(\frac{B r_\kappa^2}{J_\kappa} + \frac{A}{F_\kappa} \right), \quad (17)$$

где

$$A = \operatorname{ctg} \alpha_a + \frac{\alpha_a}{\sin^2 \alpha_a}, \quad (18)$$

$$B = A - \frac{2}{\alpha_a}. \quad (19)$$

Перемещение u_κ , направленное к центру кольца, считаем положительным. На этом расчет наружного кольца заканчивается.

Составим уравнение неразрывности деформаций для клина. Отделим внутреннее кольцо от клиньев. Оно находится под совместным действием равномерно распределенной радиальной нагрузки интенсивностью q , создаваемой тяжением полюсов и направленной к центру кольца, и сосредоточенных радиальных сил S , направленных в противоположную сторону. Радиальное перемещение точки a внутреннего кольца, вызываемое совместным действием нагрузки q и сил S , обозначим u_κ . Так же как и перемещение u_κ , оно направлено к центру кольца. Удлинение клина обозначим λ_κ . Перемещение u_κ больше перемещения u_κ , так как клин растянут. Их разность должна равняться удлинению клина:

$$u_\kappa - u_\kappa = \lambda_\kappa. \quad (20)$$

Перемещение u_s представим в виде суммы двух слагаемых, а именно перемещения u_{sq} , вызываемого нагрузкой q , и перемещения u_{sS} , вызываемого силами S :

$$u_s = u_{sq} + u_{sS}. \quad (21)$$

Удлинение клина, как известно, выражается формулой

$$\lambda_k = \frac{S \cdot l_k}{E_k F_k}, \quad (22)$$

где l_k — длина клина;

F_k — площадь его поперечного сечения.

Учитывая формулы (21) и (22), уравнению (20) придадим вид:

$$u_{sq} + u_{sS} - u_n = \frac{S l_k}{E_k F_k}. \quad (23)$$

Нормальная сила во внутреннем статически неопределимом кольце от нагрузки q , как известно, равна $q r_s$. Следовательно, укорочение осевой окружности внутреннего кольца, вызываемое нагрузкой q , будет:

$$\frac{q r_s \cdot 2\pi r_s}{E_s F_s},$$

где E_s — модуль упругости материала внутреннего кольца;

F_s — площадь поперечного сечения внутреннего кольца.

В таком случае легко установить, что укорочение радиуса r_s , вызываемое нагрузкой q , т. е. перемещение

$$u_{sq} = \frac{q r_s^2}{E_s F_s}. \quad (24)$$

Перемещение в каком-нибудь кольце, нагруженном радиальными силами, очевидно, будет выражаться одной и той же формулой независимо от того, направлены ли радиальные силы к центру кольца или в противоположную сторону. При изменении направлений сил S на обратные изменится лишь знак перемещения. Поэтому выражение перемещения u_{sS} можно записать сразу на основании ранее полученной формулы (17), заменив в ней индекс n индексом s и приписав правой части знак минус. Получим:

$$u_{sS} = -\frac{S r_s}{4 E_s} \left(\frac{B r_s^2}{J_s} + \frac{A}{F_s} \right), \quad (25)$$

где коэффициенты A и B определяются по формулам (18) и (19).

Подставив в уравнение (23) значения u_{sq} , u_{sS} и u_n из формул (17), (24) и (25) и решив уравнение относительно S , получим:

$$S = \frac{\frac{4 q r_s^2}{F_s E_s}}{B \left(\frac{r_n^3}{J_n E_n} + \frac{r_s^3}{J_s E_s} \right) + A \left(\frac{r_n}{F_n E_n} + \frac{r_s}{F_s E_s} \right) + \frac{4 l_k}{F_k E_k}}. \quad (26)$$

Легко убедиться в том, что при $0 \leq \alpha_a \leq 90^\circ$ $B > 0$. Следовательно, при любом значении α_a , лежащем в интервале $0 \leq \alpha_a \leq 90^\circ$, усилие S , вычисляемое по формуле (26), будет положительным, растягивающим.

Если клинья настолько жестки, что последний член знаменателя в формуле (26) весьма мал по сравнению с суммой первых двух членов и им можно пренебречь, то

$$S = \frac{4 q r_s}{B \left(\frac{r_s}{i_s} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{r_n}{r_s} \right)^3 \frac{J_s E_s}{J_n E_n} \right] + A \left(1 + \frac{r_n E_s F_s}{r_s E_n F_n} \right)}, \quad (27)$$

где i_s — радиус инерции поперечного сечения внутреннего кольца.

Полученное решение можно применить и к тому случаю, когда рассматриваемая система (рис. 4) нагружена равномерно распределенной радиальной нагрузкой q не на внутреннем кольце, а на наружном. Если при этом нагрузка направлена наружу, то в формуле (26) достаточно заменить в числителе¹ индекс s индексом n . Получим:

$$S = \frac{\frac{4 q r_n^2}{F_n E_n}}{B \left(\frac{r_n^3}{J_n E_n} + \frac{r_s^3}{J_s E_s} \right) + A \left(\frac{r_n}{F_n E_n} + \frac{r_s}{F_s E_s} \right) + \frac{4 l_k}{F_k E_k}}. \quad (28)$$

Эта задача в предельном случае, когда радиус внутреннего кольца уменьшается до нуля ($r_s = 0$; $l_k = r_n$), превращается в задачу обода со спицами, нагруженного равномерно распределенной радиальной нагрузкой. В этом случае формула (28) примет вид:

$$S = \frac{\frac{4 q r_n}{F_n}}{\frac{B r_n^2}{J_n} + \frac{A}{F_n} + \frac{4}{F_k}}. \quad (29)$$

Подобная задача рассмотрена в книге [Л. 3] стр. 14...19. Формула (12), приведенная в этой книге на стр. 16, в частном случае, когда нагрузка приложена только к ободу и спицы имеют постоянное сечение, совпадает с формулой (29) данной статьи (длина спицы приближенно приравняется радиусу r_n).

Формула (26) служит для приближенного определения усилий, вызываемых тяжением полюсов в клиньях, крепящих активную сталь гидрогенераторов. Она справедлива при любом числе клиньев, лежащем в интервале $2 \leq n \leq \infty$, т. е. при любом значении α_a , лежащем в интервале $90^\circ \geq \alpha_a \geq 0$. В гидрогенераторах среднего и крупного габаритов число клиньев обычно колеблется в интервале $20 \leq n \leq 120$. Коэффициенты A и B , вычисленные по формулам (18)

¹ Знаменатель формулы (26) по своей структуре симметричен относительно индексов n и s и поэтому не изменится.

и (19) для некоторых значений n при помощи восьмизначных тригонометрических таблиц [Л. 4], даны в табл. 1.

Таблица 1

n	α_a	A	B
120	$1^\circ 30'$	76,39437	~ 0
60	3°	38,19719	~ 0
30	6°	19,09864	0,000054
20	9°	12,732568	0,000172

Таблица 2

Мощность генератора, мва	Скорость вращения, об/мин	Диаметр активной стали по расточке статора, м	Наружный диаметр активной стали, м	Число клиньев крепления активной стали	Число клиньев на 1 м длины корпуса статора	Усилия тяжения поля на один клин, Г	Усилия от электромагнитного момента на один клин, Г
14,5 90	500 83,3	2,7 11,0	3,1 11,6	32 120	3,3 3,3	9,4 14	0,325 0,76

Мощность генератора, мва	Размеры сечения, см							q , т/м
	b	c	d	e	u	m	l	
14,5 90	40 45	10 15	2 3	30 64	2 3	8,5 16,5	15 32	36 47

Полученное решение (26) показывает, что усилие S зависит, в частности, от моментов инерции поперечных сечений колец (первый член знаменателя), площадей поперечных сечений колец (второй член знаменателя) и площади поперечного сечения клина (третий член знаменателя). Рассмотрим теперь величину S и значения указанных трех членов для типичных конструкций машин среднего и крупного габаритов. Полученные результаты могут быть, как правило, отнесены к любому из указанных типов гидрогенераторов.

В табл. 2 приведены конструктивные данные, необходимые для подсчета усилий тяжения полюсов при полной их передаче на клинья, и значения их усилий для генераторов среднего и крупного габаритов.

На рис. 4 показано сечение расчетного слоя. Размеры сечений (см) для подсчета параметров, необходимых при вычислении S по формуле (26), сведены в табл. 3. Параметры приведены в табл. 4.

Подставляя полученные данные в формулу (26) и принимая $E_k = E_a$, получаем для генератора средних габаритов:

$$S = \frac{36000 \cdot 9}{0,32 + 96 + 0,4} = 3350 \text{ кг},$$

что составляет приблизительно 36% полного усилия тяжения полюсов, приходящегося на один клин и равного 9400 кг.

Для крупногабаритного гидрогенератора

$$S = \frac{47000 \cdot 131}{0 + 1414 + 0,675} = 4350 \text{ кг},$$

что составляет около 31% полного усилия на один клин, равного 14000 кг.

Как видим, первый и третий члены в знаменателе могут быть отброшены. Следовательно, для определения S при числе клиньев 30 и более можно предложить упрощенную формулу:

$$S = \frac{4qr_a}{A \left(1 + \frac{r_k E_a \cdot F_a}{r_a E_k \cdot F_k} \right)}. \quad (30)$$

Таблица 3

Мощность генератора, мва	Размеры сечения, см						
	b	c	d	e	u	m	l
14,5 90	40 45	10 15	2 3	30 64	2 3	8,5 16,5	15 32

Таблица 4

Мощность генератора, мва	r_k , м	r_a , м	F_k , м ²	F_a , м ²	J_k , м ⁴	J_a , м ⁴	F_k , м ²	I_k , м	q , т/м
14,5 90	1,85 6,3	1,5 5,72	0,021 0,0327	0,04 0,0675	0,000132 0,00154	0,000033 0,000127	0,012 0,012	0,03 0,03	36 47

Выше мы получили, что для генератора средних габаритов усилие, передающееся на клинья, составляет около 36% полного усилия тяжения полюсов, а для машины крупного габарита соответствующая цифра равна 31%. Учитывая, что при полной передаче усилий максимальное расчетное напряжение в швах от тяжения полюсов получается порядка 350...400 кг/см², на основании полученного решения и анализа можно сделать следующее заключение.

В рабочих режимах гидрогенераторов, удовлетворяющих нормальным требованиям в отношении плотности стыков и прессовки цилиндра активной стали, усилия и напряжения в сварных швах, крепящих клинья к ребрам, от сил тяжения полюсов получаются небольшими. Поэтому случаи отрыва швов следует объяснять главным образом недостатками сварки, а также расслаблением активной стали.

Литература

1. Г. Н. Тер-Газарян. О креплении активной стали гидрогенераторов. Электрические станции, № 6, 1953.
2. Э. Г. Файнштейн. Повреждения сварных швов креплений активной стали гидрогенераторов. Электрические станции, № 6, 1953.
3. С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев, В. М. Макушин, Н. Н. Малинин и Ф. И. Федосеев. Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении. Машгиз, М., 1952.
4. Восьмизначные таблицы тригонометрических функций. Геодезиздат, М., 1950.
5. И. М. Рабинович. Курс строительной механики стержневых систем, Стройиздат, М.—Л., 1940.

[17.12.1954]



Опытное определение коммутационной реакции якоря в машинах постоянного тока

Кандидат техн. наук, доц. В. В. ФЕТИСОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Расчетное определение коммутационной реакции якоря в машинах постоянного тока представляет большие трудности. Поэтому много внимания уделяется разработке различных методов опытного определения коммутационной реакции [Л. 1, 2 и 3]. Предложенные методы, являясь пригодными для установившихся режимов, не позволяют, однако, исследовать коммутационную реакцию якоря во всех случаях переходных процессов, кроме случая включения цепи якоря вращающейся машины на вспомогательный источник тока [Л. 2]. Поэтому в дополнение к разработанным в литературе методам, автором предлагается способ опытного определения коммутационной реакции, пригодный как для установившихся, так и для переходных режимов различных видов.

Методика исследования. На машине, используемой в качестве объекта исследований, помещаются вспомогательные катушки *аа* и *бб* (рис. 1), и в начале проводится дополнительное исследование, которое заключается в опытном определении поперечной реакции и продольного потока рассеяния якоря.

Опытное определение поперечной реакции якоря производится по методу включения и выключения тока в цепи заторможенного якоря, питаемой от постороннего источника тока [Л. 4]. Щетки устанавливаются на нейтрали и производится включение тока при различных возбуждениях машины. Изменение основного потока полюсов $\Delta\Phi_a$, обусловленное возникновением и исчезновением поперечной реакции якоря, измеряется флюксметром, присоединенным к вспомогательной катушке *аа*. При помощи характеристики холостого хода по измерен-

ным значениям потока $\Delta\Phi_a$ для различных значений тока якоря $I_a = \text{пост}$ строятся кривые [Л. 4] основного потока главных полюсов в зависимости от результирующего тока возбуждения: $\Phi_{ma} = f(i_{f2})$ (рис. 2).

Определение продольного потока рассеяния якоря Φ_{as} также производится по методу включения тока в цепи заторможенного якоря. Но при этом опыте цепь возбуждения размыкается, а щетки (или точки питания якоря, если подвод тока осуществляется непосредственно к петушкам коллектора) сдвигаются с нейтрали на различное число коллекторных делений β_k [Л. 4]. Поток Φ_{as} измеряется флюксметром, присоединенным к встречно включенным катушкам *аа* и *бб* (рис. 1). По значениям тока I_a при различных сдвигах щеток β в масштабе тока возбуждения находится продольная н. с. якоря:

$$F'_d = \frac{\beta \omega_s I_a}{\beta_k \omega_j a}, \quad (1)$$

где β и β_k — сдвиг щеток с нейтрали и коллекторное деление;

ω_s и ω_j — числа витков в секции якоря и обмотки возбуждения на полюс;

a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

По полученным данным строят сначала кривые $\Phi_{as} = f(F'_d)$ продольного потока рассеяния якоря в зависимости от продольной н. с. якоря (кривые *а* и *б*, рис. 3). Точки кривых, соответствующие одинаковым значениям тока якоря, соединяются с началом координат плавными линиями; тем самым находят зависимость $\Phi_{as} = f(F_d)$ при $I_a = \text{пост}$, которые необходимы при дальнейших подсчетах (кривые *в*, рис. 3) [Л. 4].

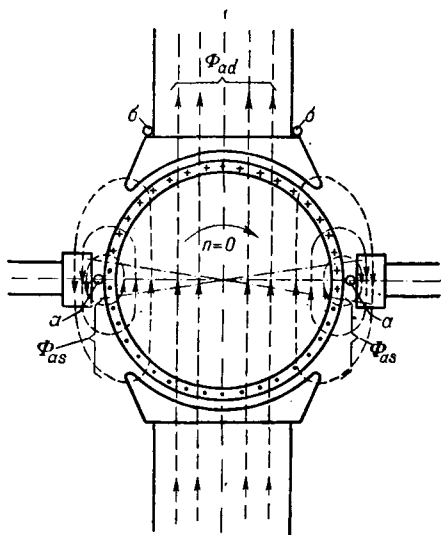


Рис. 1. Расположение вспомогательных катушек *аа* и *бб* для измерения продольных потоков машины.

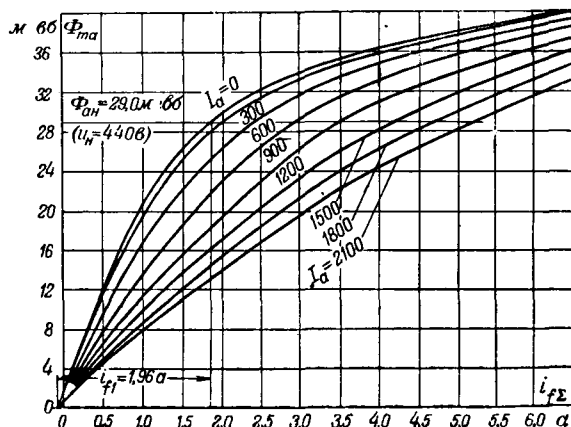


Рис. 2. Опытные кривые намагничивания машины $\Phi_{am} = f(i_{f2})$ при различных токах якоря $I_a = \text{пост}$.

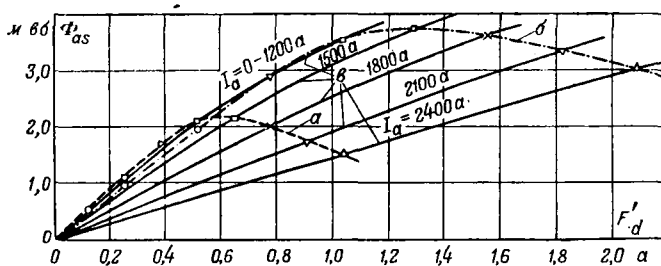


Рис. 3. Продольный поток рассеяния якоря $\Phi_{as} = f(F'_d)$.
а — $\beta = \beta_K$; б — $\beta = 2\beta_K$; в — $I_a = \text{пост.}$

Дальнейшее исследование ведется следующим образом.

Для определения коммутационной реакции якоря в установившемся режиме работы, например при кратковременной перегрузке генератора, измеряют $\Delta\Phi_a$ при переходе от холостого хода к заданной нагрузке при помощи флюксметра, присоединенного к катушке aa . Измеряют также и другие величины, характерные для данной нагрузки: токи якоря I_a и возбуждения i_f , напряжение u и скорость вращения машины n . Для определения коммутационной реакции якоря в переходном режиме следует осциллографировать в этом режиме токи I_a и i_f , скорость вращения n , э. д. с. e_a , индуктируемую изменяющимся потоком Φ_a во вспомогательной катушке aa , и напряжение на зажимах машины u .

Рассмотрим, как на основе этого экспериментального материала вычисляется н. с. коммутационных токов F'_K (в масштабе тока возбуждения), например в переходном режиме. По осциллограмме переходного процесса, например при внезапном коротком замыкании генератора (рис. 4), задаемся током I_a , в частности его максимальным значением I_{am} . Находим скорость вращения n и ток i_f и по площади фигуры, ограниченной кривой $e_a = f(t)$, осью абсцисс и соответствующей ординатой, для выбранного момента времени вычисляем изменение потока $\Delta\Phi_a$. Затем находим поток Φ_a на

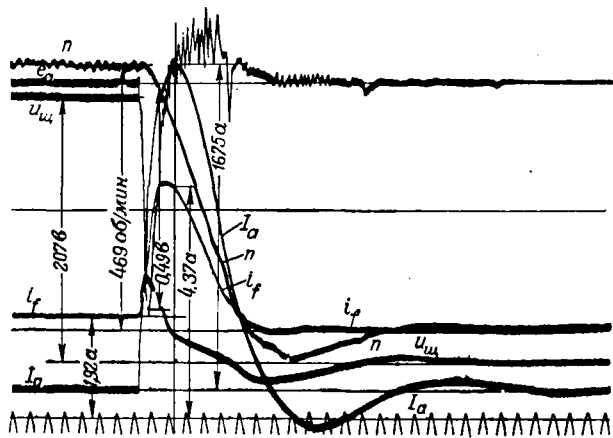


Рис. 4. Осциллограмма внезапного короткого замыкания при выбеге генератора и независимом возбуждении.

одно полюсное деление, входящий в рассматриваемый момент времени в якорь:

$$\Phi_a = \Phi_{ao} - \Delta\Phi_a, \quad (2)$$

где Φ_{ao} — поток при холостом ходе, соответствующий E_{ao} .

Далее расчет ведется по методу последовательных приближений.

Задаемся каким-либо значением продольной н. с. якоря $F'_{d\Sigma}$, равной при отсутствии сдвига щеток с нейтральной н. с. коммутационных токов F'_K . По н. с. $F'_{d\Sigma}$ и току I_a в соответствии с кривыми $\Phi_{as} = f(F'_d)$ при $I_a = \text{пост.}$ (рис. 3) находим продольный поток рассеяния якоря Φ_{as} . Большинство магнитных линий потока Φ_{as} замыкается вокруг коммутируемых секций через башмаки добавочных полюсов вблизи от нейтрали (рис. 1), где влияние потока главных полюсов невелико; поэтому можно считать, что поток Φ_{as} не зависит от тока возбуждения. Тогда основной поток главных полюсов, проходящий через якорь,

$$\Phi_{ma} = \Phi_a \pm \Phi_{as}; \quad (3)$$

знак плюс относится к случаю размагничивающей, а минус — намагничивающей н. с. $F'_{d\Sigma}$.

Магнитные линии потока Φ_{as} проходят через зубцы якоря преимущественно поблизости от нейтрали, и влияние потока Φ_{as} на насыщение зубцов, расположенных под башмаками главных полюсов, невелико. Поэтому можно считать, что продольное рассеяние якоря не оказывает влияния на кривые намагничивания машины $\Phi_{ma} = f(i_{f\Sigma}, I_a)$. Основываясь на этом допущении, зная поток Φ_{ma} и ток I_a , по кривым намагничивания (рис. 2) находим ток $i_{f\Sigma}$, представляющий собой в некотором масштабе результирующую продольную н. с. машины $F'_{f\Sigma}$. Намагничивающая сила $F'_{f\Sigma}$ есть сумма всех н. с., действующих по продольной оси машины:

$$F'_{f\Sigma} = i_{f\Sigma} = i_f + F'_s = F'_{d\Sigma}, \quad (4)$$

где i_f — ток в обмотке возбуждения, определяемый по осциллограмме для рассматриваемого момента времени;

F'_s — выраженная в масштабе тока возбуждения н. с. вихревых токов, индуктируемых в массивных участках магнитной цепи изменяющимся потоком; приближенно, с некоторым преувеличением

$$F'_s = \frac{T_1}{T_f} i'_f, \quad (5)$$

где i'_f — переходная составляющая тока возбуждения;

T_f и T_1 — постоянные времени цепи возбуждения и основной гармонической вихревых токов в станине.

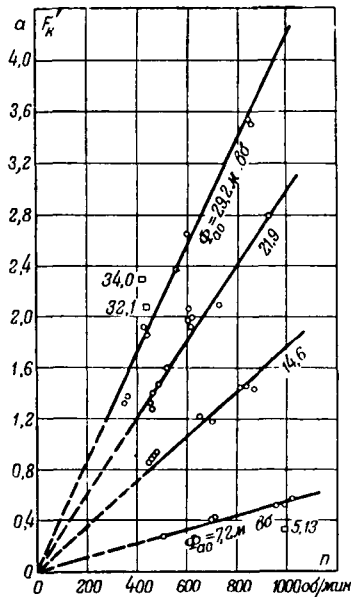


Рис. 5. Опытные кривые н. с. коммутационной реакции $F'_k = f(n)$ при $\Phi_{ao} = \text{пост}$, построенные для момента всплеска тока якоря (по осциллограммам внезапного короткого замыкания генератора).

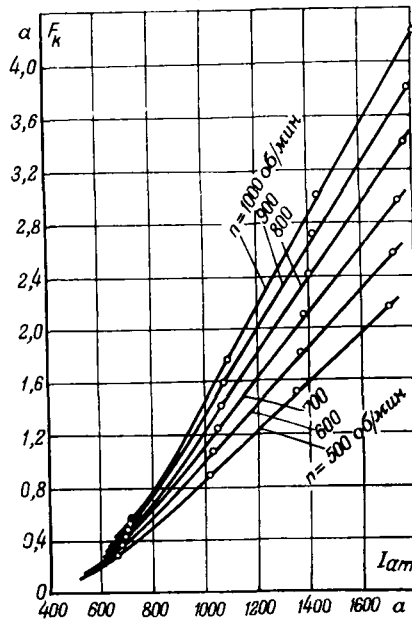


Рис. 6. Намагничивающая сила коммутационной реакции F'_k в зависимости от максимального тока якоря I_{am} при внезапном коротком замыкании генератора и $n = \text{пост}$ (опытные кривые).

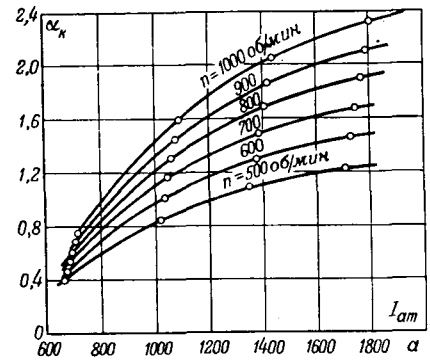


Рис. 7. Коэффициент коммутационной реакции α_k в зависимости от максимального тока якоря I_{am} при внезапном коротком замыкании и $n = \text{пост}$ (опытные кривые).

Предполагая н. с. $F'_{d\Sigma}$ размагничивающей, из (4) имеем:

$$F'_{d\Sigma} = i_f + F'_{ax} - i_{f\Sigma}. \quad (6)$$

Определив $i_{f\Sigma}$, i_f и F'_{ax} по уравнению (6) находим н. с. $F'_{d\Sigma}$ и для контроля правильности полученных результатов сравниваем его с ранее выбранным значением. В случае несовпадения выбранного значения н. с. $F'_{d\Sigma}$ с найденным задаемся другим значением н. с. $F'_{d\Sigma}$, равным приблизительно полусумме двух прежних значений, и производим все вычисление заново. При некотором навыке после второго приближения удается получить хорошее совпадение.

Полученное описанным путем значение $F'_{d\Sigma}$ и дает при положении щеток на нейтрали искомые значения н. с. коммутационных токов F'_k . В случае сдвига щеток с нейтрали при осциллографировании переходного процесса на расстоянии $\pm \beta$ н. с. F'_k окончательно вычисляется по уравнению $F'_k = F'_{d\Sigma} \mp F'_d$. (7)

Результаты опытного исследования. Изложенным способом автор исследовал коммутационную реакцию якоря при внезапном коротком замыкании генератора независимого возбуждения типа GM-282 118 квт, 440 в, 300 а, 1000 об/мин. На осциллограмме рис. 4 записаны при коротком замыкании в режиме выбега тока I_a и i_a , скорость вращения n , э. д. с. e_a , напряжение на щетках $u_{щ}$ и — в качестве масштаба времени — переменный ток 50 гц. В результате обработки большого числа осциллограмм и вычислений для разных значений максимального тока короткого замыкания I_{am} и скорости вращения n по-

лучен (без учета влияния вихревых токов) ряд значений н. с. F'_k и построены кривые $F'_k = f(n)$ (рис. 5). Каждая из этих кривых соответствует коротким замыканиям, произведенным при одном и том же начальном значении потока машины $\Phi_{ao} = \text{пост}$, но при различных скоростях вращения. Как показало исследование, при постоянном значении потока Φ_{ao} максимальный всплеск тока якоря I_{am} почти не зависит от скорости вращения машины в широких пределах изменений скорости. Поэтому можно считать, что каждая кривая $F'_{km} = f(n)$ рис. 5 соответствует одному и тому же значению максимального тока $I_{am} \approx \text{пост}$.

На графике рис. 6 построено другое семейство кривых $F'_k = f(I_{am})$ для различных значений скорости вращения $n = \text{пост}$.

Кривые $F'_k = f(I_{am}, n)$ позволяют определить коэффициент коммутационной реакции α_k (рис. 7), который нередко используется при практических расчетах, когда н. с. коммутационной реакции вычисляется по формуле

$$F_k = \alpha_k b_k A_k k_T, \quad (8)$$

где F_k — н. с. коммутационных токов на пару полюсов;

b_k — ширина коммутационной зоны;

A_k — номинальное значение линейной нагрузки;

k_T — кратность тока якоря.

Полученные зависимости дают возможность сделать следующие выводы:

1. Намагничивающая сила коммутационной реакции F'_k , соответствующая одинаковым всплескам тока якоря $I_{am} = \text{const}$ при внезапном коротком замыкании генератора, изменяется, примерно, прямо пропорционально скорости вращения машины.

2. Зависимости н. с. F'_k от максимального тока якоря I_{am} при $n = \text{const}$ не являются линейными; приближенно их можно принять за степенные функции с показателем степени 2.

3. Коэффициент a_k для момента максимума тока в главной цепи машины существенно зависит от скорости вращения и максимального тока якоря. Зависимость $a_k = f(n)$ при $I_{am} = \text{const}$ близка к прямолинейной, а $a_k = f(I_{am})$ при $n = \text{const}$ несколько отклоняется от прямой. Наибольшее значение коэффициента a_k , соответствующее короткому замыканию, произведенному во время работы машины в режиме холостого хода при номинальном напряжении $U_0 = 440$ в и номинальной скорости вращения $n = 1000$ об/мин, составляет 2,33. Обычно рекомендуется при расчете короткого замыкания компенсированных машин принимать $a_k = 0,7 \dots 1,0$; для некомпенсированных машин вследствие более тяжелых условий коммутации коэффициент a_k может быть значительно больше (1,0...1,5 и выше). Большое значение коэффициента a_{km} в исследованном случае объясняется возникновением при коротком замыкании мощных коммутационных дуг, распространяющихся на некоторое расстояние по коллектору, несмотря на установленные вблизи щеток асбестовые барьеры.

Закключение 1. Предлагаемый способ опытного определения коммутационной реакции якоря пригоден как для установившихся, так и для переходных режимов работы машины постоянного тока. Однако вследствие того, что н. с. коммутационных токов определяется как разность соответствующих н. с., изложенный метод дает наибольшую точность при больших значениях F'_k ; иначе говоря, он наиболее пригоден для определения коммутационной реакции в переходных режимах и при перегрузках машины, когда коммутация расстраивается и н. с. F'_k достигает больших значений.

2. Как показало экспериментальное исследование, коммутационная реакция якоря, возникающая в машине при внезапном коротком замыкании, оказывается весьма значительной. Наряду с другими факторами в виде возрастания переходного напряжения под щетками [Л. 5], поперечной реакции якоря в некомпенсированных машинах и т. п., она способствует существенному ограничению всплеска тока короткого замыкания в цепи якоря.

Литература

1. М. И. Алябьев. Опытное определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока. Электричество, № 5, 1950.
2. В. В. Фетисов. Экспериментальное исследование коммутационной реакции якоря. Электричество, № 5, 1951.
3. М. И. Алябьев. Опытное определение коммутационной реакции в электромашинных усилителях с поперечным полем и в машинах постоянного тока. Электричество, № 2, 1952.
4. В. В. Фетисов. Экспериментальное исследование поперечной реакции якоря машины постоянного тока. Труды ЛПИ, № 3, 1953.
5. В. В. Фетисов. Переходное падение напряжения и потери под щетками в машине постоянного тока при расстроенной коммутации. Электричество, № 8, 1953.

[20.11.1954]



К измерению параметров и расчету селеновых выпрямителей

Инж. И. И. РАТГАУЗ

Москва

В селеновых выпрямительных элементах, как и в других полупроводниковых вентилях, падение напряжения при прохождении тока в проводящем направлении существенно и нелинейно зависит от нагрузки (рис. 1). По величине падения напряжения промышленные элементы классифицируются по группам; более качественным элементам, с меньшим падением напряжения, присваивается более высокий порядковый номер. Элементы, принадлежащие к разным группам, обнаруживают заметное различие в самом ходе вольтамперной характеристики: чем выше качество элемента, тем круче его характеристика, тем она ближе к характеристике идеального вентиля.

Своеобразна также характеристика и в области обратных токов (рис. 1): если допускаемое

обратное напряжение электронно-ионных приборов определяется их электрической прочностью и указывается в амплитудных значениях, то в селеновых элементах обратные потери соизмеримы с потерями по прямому падению напряжения и допустимое обратное напряжение преимущественно ограничено потерями и указывается в действующих значениях волны обратного напряжения. По величине допускаемого обратного напряжения элементы разделяются на классы.

В связи с этими особенностями расчет селеновых выпрямителей требует детального знания вольтамперных характеристик элементов.

Из трех известных видов вольтамперных характеристик селеновых вентилях и, в частности, элементов — динамической, статиче-

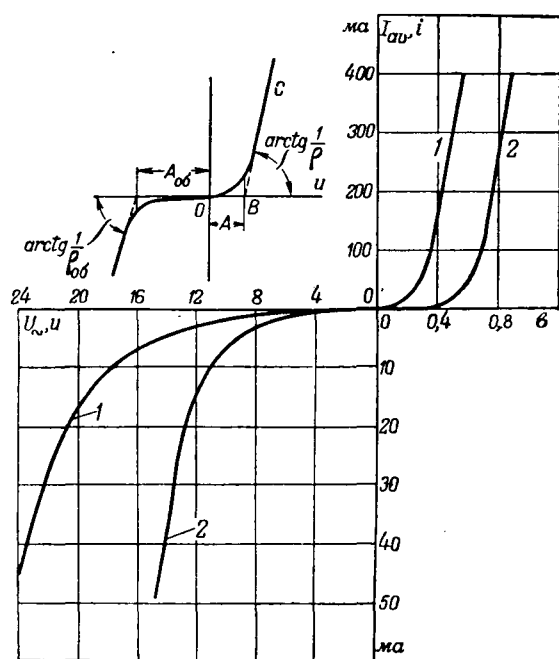


Рис. 1. Примерные характеристики селенового элемента на алюминиевой основе диаметром 45 мм.

1 — классификационная; 2 — статическая (по оси абсцисс для ветви обратного тока кривой 1 дано $U_{\sim}$ — действующее значение волны измерительного напряжения).

ской и классификационной — наиболее важное значение имеет классификационная характеристика, как нашедшая применение в контрольных промышленных измерениях.

Классификационная характеристика снимается в схемах, с достаточным приближением воспроизводящих условия работы элементов в схеме однофазного однополупериодного выпрямителя.

Потребителям часто приходится измерять параметры выпрямительных столбов, главным образом клапанов или плеч мостовых схем, в порядке контроля или в связи с возможным уходом параметров в процессе работы и хранения столбов. Иногда точного знания параметров столбов требует схема их применения.

Описываемые здесь схемы снятия классификационных характеристик в равной мере пригодны для обмера как отдельных элементов, так и клапанов или плеч мостовых схем.

В области прямого тока (рис. 1, кривая 1) классификационная вольтамперная характеристика дает зависимость среднего за период переменного тока значения падения напряжения U_{av} от среднего значения I_{av} полуволны синусоидального тока, проходящего через элемент (рис. 2). В области обратного тока классификационная характеристика дает значение I_{rv} — среднего за период значения обратного тока при подаче на элемент полуволны синусоидального напряжения среднего значения U_{rv} (рис. 2).

Для обеспечения тождества и сопоставимости результатов измерений в схемах измерения следует обеспечить возможно более строгую синусоидальную форму полуволны тока при измерении

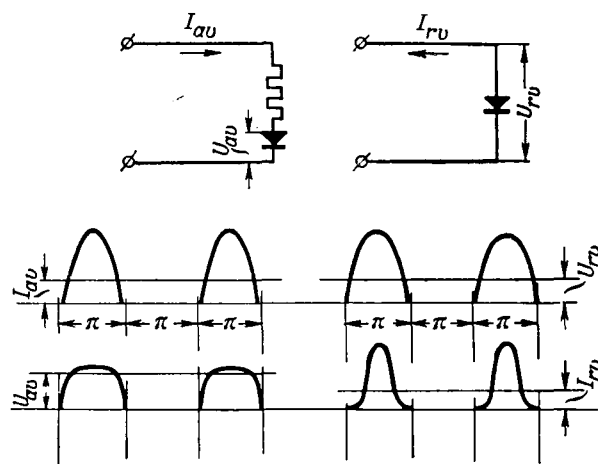


Рис. 2.

прямого падения напряжения и синусоидальную форму полуволны напряжения при измерении обратного тока.

На рис. 3 показана одна из возможных схем измерения классификационного напряжения U_{av} .

В рабочий полупериод ток i течет в направлении стрелки через потенциометр 2 и клапаны 6 и 7. Напряжение с потенциометра подается на измерительную цепь, состоящую из измеряемого клапана 8 и балластного сопротивления 3. В обратный, «холостой» полупериод клапан 6 запирает потенциометр 2. На шунтирующий клапан 5 падает весьма небольшое напряжение, но и это напряжение гасится на добавочном запирающем клапане 7 и не попадает на потенциометр 2. Ветвь 1, 4 нагружает трансформатор в нерабочий полупериод, чем исключается подмагничивание сердечника трансформатора постоянной составляющей от однополупериодной нагрузки, создаваемой потенциометром 2.

Оценим погрешность при измерениях. Будем рассматривать только рабочий полупериод, так как ошибкой, возникающей за счет наличия на сопротивлении 2 напряжения в нерабочий полупериод, можно пренебречь.

Нелинейную вольтамперную характеристику элемента можно заменить ломаной ОВС (рис. 1). Отрезок А называют порогом напряжения. При таком приближении уравнение характеристики будет: $A + i_{av} \cdot \rho$, где ρ — называют сопротивлением второго рода. Величина А уподобляется противо-э. д. с.: при напряжении, меньшем А, элемент заперт.

При такой аппроксимации характеристики элемента измерительная схема подобна схеме выпрямления с нагрузкой в виде последовательно соединенных сопротивления и противо-э. д. с.

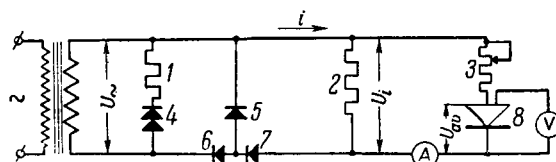


Рис. 3. Схема измерения классификационного значения падения напряжения на элементе U_{av} .

Погрешность в измерении классификационного напряжения элемента обусловлена тем, что измерительный ток имеет форму усеченной синусоиды. Одной причиной искажения полуволны тока и, следовательно, источником ошибки является наличие у вентиля 6, 7 порога напряжения A_1 , а другим источником — наличие порога A в измеряемом вентиле.

В таком случае напряжение на измеряемом элементе в схеме рис. 3 будет:

$$U_{av} = I_{av} \rho + A \frac{\lambda_2}{2\pi},$$

где λ_2 — угол открытия схемы:

$$\lambda_2 = \pi - 2\theta_2 = \pi - 2 \arcsin \frac{A_1 + A}{\sqrt{2}U};$$

θ_2 — угол отсечки.

Ток в измерительной цепи течет тогда, когда мгновенное значение переменного напряжения больше суммы порогов напряжения A_1 вентиля 6 и 7 и порога напряжения измеряемого элемента A :

$$\sqrt{2}U \sin \vartheta \geq \sqrt{2}U \sin \theta_2 = A_1 + A.$$

Очевидно, чем больше балластное сопротивление 3, тем ближе нагрузка, создаваемая измерительной цепью, к активной, тем меньше величина $\sin \theta_2$, равная отношению суммы порогов напряжения $A + A_1$ к амплитуде полуволны измерительного напряжения $\sqrt{2}U$.

При неискаженном токе ($\theta_2 = 0$)

$$U'_{av} = I_{av} \rho + \frac{A}{2}.$$

Следовательно, погрешность

$$\delta = \frac{U'_{av} - U_{av}}{U'_{av}} \cdot 100\%,$$

или

$$\delta = \frac{A\theta_2 \cdot 100}{\pi \left(I_{av} \rho + \frac{A}{2} \right)} \approx \frac{A \cdot \theta_2}{\pi U_{av}} \cdot 100\%.$$

По малости угла θ_2 можно его положить равным $\sin \theta_2$. Тогда

$$\delta \approx \frac{A}{\pi \sqrt{2}U} \cdot \frac{A + A_1}{U_{av}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Весьма малое искажение формы тока I_{av} можно обеспечить, повышая напряжение U на вторичной обмотке до предельного значения, допускаемого для вентиля 5 и 6. Однако при измерении вентиля или плеч выпрямительных схем, содержащих несколько последовательно соединенных элементов, чрезмерное увеличение напряжения приводит к весьма громоздким схемам, потребляющим большую мощность.

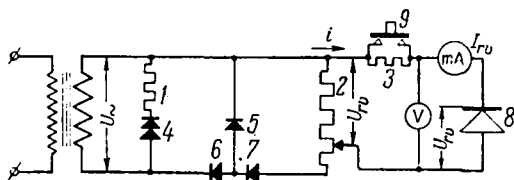


Рис. 4. Схема измерения классификационного значения обратного тока элемента I_{rv} .

Достаточная точность измерения будет обеспечена, если принять (рис. 3) $U_i = 4 \cdot n$, где n — число последовательно соединенных элементов в измеряемом вентиле 8 (рис. 3), чему соответствует

$$U_{\sim} = \frac{4 \cdot n}{0,45} \approx 9 \cdot n. \quad (2)$$

Пример. Измеряемый вентиль содержит три последовательно соединенных элемента:

$$n = 3; U_i = 4 \cdot n = 4 \cdot 3 = 12 \text{ в};$$

$$U_{\sim} = \frac{U_i}{0,45} = \frac{12}{0,45} \approx 26,7 \text{ в}.$$

Допуская, например, обратное напряжение на элемент не более 18 в, следует в вентилях 5 и 6 поставить по два элемента. В вентиле 7 обычно устанавливается один элемент. Принимаем порог напряжения одного элемента 0,5 в. Тогда

$$A = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ в};$$

$$A_1 = 0,5 \cdot 2 + 0,5 = 1,5 \text{ в}.$$

Падение напряжения на вентиле U_{av} при элементах группы 3 будет порядка $0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ в}$. По формуле (1)

$$\delta \approx \frac{A(A + A_1) 100}{\pi \sqrt{2} U_{\sim} U_{av}} = \frac{1,5(1,5 + 1,5)}{\pi \sqrt{2} \cdot 26,7 \cdot 1,5} 100 \approx 2,5\%.$$

Если поднять напряжение на вторичной обмотке до допускаемого для вентиля 6 обратного напряжения $U_{\sim} = 2 \cdot 18 = 36 \text{ в}$, можно снизить ошибку до $\delta \approx 1,9\%$, однако это не оправдывает затрат мощности.

Во избежание искажений формы кривой напряжения на потенциометре «балластный» ток потенциометра должен быть в несколько (3...4) раз больше классификационного. Этим условием определяются выбор значения сопротивления потенциометра 2 и размер элементов вентиля 6 и 7. Нагрузкой элементов вентиля 5 является обратный ток вентиля 6, чем определяется выбор размеров этого вентиля.

На рис. 4 дана схема для снятия классификационной характеристики в области обратных токов. Для обеспечения сравнимых результатов следует подавать на элемент полуволну обратного напряжения синусоидальной формы со средним значением U_{rv} .

В рабочий, измерительный полупериод «балластный» ток идет через сопротивление 2 и вентили 6 и 7. С сопротивления 2 напряжение подается на измеряемый вентиль 8. В обратный, нерабочий полупериод напряжение блокируется вентилем 6. Незначительное прямое падение напряжения на вентиле 5 блокируется вентилем 7.

Во избежание повреждения прибора в случае включения закороченного элемента предусмотрены кнопка 9 и защитное сопротивление 3. При измерении, убедившись, что элемент не закорочен, шунтируют сопротивление 3 и производят отсчет.

Если в спрямленной характеристике по обратному току (рис. 1) $A_{об}$ — порог обратного напряжения, а $\rho_{об}$ — сопротивление второго рода, то среднее значение обратного тока в схеме рис. 4

$$I_{rv} = \frac{U_{rv} - \frac{A_{об}(\pi - 2\theta_1)}{2\pi}}{\rho_{об}}.$$

При измерении обратного тока вопрос об обеспечении тождественности условий измерений решается значительно проще, так как собственно измерительная цепь не вносит искажений в форму измерительного напряжения.

Основная ошибка связана с искажением формы полуволны напряжения, подаваемого на потенциометр 2. Для обеспечения неискаженного измерительного напряжения балластный ток в потенциометре 2 должен быть много больше измеряемого обратного тока (раз в 10). Затем обратное сопротивление вентилей 7 должно быть много больше сопротивления потенциометра 2. Иначе возможна существенная ошибка в определении обратного тока, обусловленная протеканием прямого тока в измеряемом вентиле, вызванного наличием в нерабочий полупериод некоторого напряжения на вентиле 5.

Суммарный порог напряжения вентилей 6 и 7 несколько искажает форму полуволны измерительного синусоидального напряжения. Если при отсутствии искажений обратный ток

$$I'_{rv} = \frac{U_{rv} - \frac{\pi - 2\theta}{2\pi} A_{06}}{\rho_{06}},$$

где $\sin \theta = \frac{0,45 \cdot A_{05}}{\sqrt{2} U_{rv}},$

то из-за наличия порога напряжения у вспомогательных вентилей

$$I_{rv} = \frac{U_{rv} - \frac{\pi - 2\theta_1}{2\pi} A_{06}}{\rho_{06}},$$

где

$$\sin \theta_1 = \frac{A_{06} + A_1}{\sqrt{2} U_{rv}} \approx \frac{0,45 (A_{06} + A_1)}{\sqrt{2} U_{rv}}$$

и A_1 — суммарный порог напряжения вентилей 6 и 7.

С некоторыми допущениями¹ можно принять, что ошибка, вносимая в определение обратного тока наличием вентилей 6 и 7, будет:

$$\delta = \frac{0,32}{U_{rv}} \cdot \frac{A_1 \operatorname{tg} \theta \cdot 100}{1 - 0,5 \pi \sin \theta + \theta \sin \theta}. \quad (3)$$

Пример. Измеряется обратный ток одного элемента

$$U_{rv} = 8,16; A_{06} = 11 \text{ в}; A_1 = 1,0 \text{ в}.$$

$$\sin \theta = \frac{0,45 \cdot A_{06}}{\sqrt{2} U_{rv}} = \frac{0,45 \cdot 11}{\sqrt{2} \cdot 8,1} = 0,43;$$

$$\operatorname{tg} \theta = 0,48; \theta = 0,45 \text{ рад}.$$

По формуле (3)

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{0,32}{U_{rv}} \cdot \frac{A_1 \operatorname{tg} \theta \cdot 100}{1 - 0,5 \pi \sin \theta + \theta \sin \theta} = \\ &= \frac{0,32}{8,1} \cdot \frac{1,0 \cdot 0,48 \cdot 100}{1 - 0,5 \pi \cdot 0,43 + 0,45 \cdot 0,43} \approx 3,5\%. \end{aligned}$$

Расчет выпрямителей и вольтамперные характеристики. Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с видом вольтамперной характеристики, положенной в основу расчета.

Следует отметить, что при расчете собственно выпрямителя (выбор числа элементов, определение нагрева, к. п. д.) силовых выпрямительных схем игнорирование особенностей характеристик элементов может привести к грубым ошибкам.

¹ $\cos(\theta_1 - \theta) \approx 1; \sin(\theta_1 - \theta) \approx 0.$

На практике получил применение расчет селеновых выпрямителей по способу линеаризации [Л. 1], который ведется по средним значениям тока и напряжения с введением коэффициентов линеаризации.

Вольтамперная характеристика выражается дробно-степенной функцией: прямое падение напряжения на элементе при токе i_{av}

$$u_{av} = u_{an} \left(\frac{i_{av}}{i_{an}} \right)^{\alpha_1}, \quad (4)$$

где u_{an}, i_{an} — целесообразно выбранная точка характеристики (обычно берется в середине рабочего участка характеристики);

α_1 — коэффициент крутизны характеристики.

Обратный ток при напряжении u_{rv}

$$i_{rv} = i_{rn} \left(\frac{u_{rv}}{u_{rn}} \right)^{\alpha_2}, \quad (5)$$

где u_{rn}, i_{rn} — также целесообразно выбранная точка рабочего участка обратной ветви характеристики.

Выражения (4) и (5) дают связь между мгновенными значениями тока и напряжения и, следовательно, отражают, в частности, статические характеристики.

Можно установить соотношения между рассмотренной выше классификационной характеристикой и статической. По [Л. 1] среднее за период значение падения напряжения на элементе (вентиле)

$$U_{av} = k_{au} u_{av}, \quad (6)$$

где u_{av} — значение напряжения по (3) для мгновенного значения тока i_{av} , численно равного среднему значению тока в элементе в данной схеме I_{av} ;

k_{au} — коэффициент, определяющийся крутизной характеристики α_1 и видом схемы выпрямления (однофазная, трехфазная и т. д.).

Считая, что статическая и классификационная характеристики имеют практически одинаковую крутизну характеристики α_1 , можно статическую характеристику построить по классификационной, так как $u_{an} = \frac{U_{av}}{k_{au}}$ и, следовательно,

$$u_{av} = \frac{U_{av}}{k_{au}} \left(\frac{i_{av}}{I_{av}} \right)^{\alpha_1}.$$

Опыт показывает, что практически такой переход не дает большой ошибки.

На рис. 1 приведены классификационная характеристика 1, снятая на пульсирующем токе, и статическая 2, снятая на постоянном токе, для элемента на алюминиевой основе диаметром 45 мм. Возьмем по две точки на обеих характеристиках: $I_{av1} = i_{av1} = 200 \text{ ма}$ и $I_{av2} = i_{av2} = 400 \text{ ма}$. Для этих значений токов статическая характеристика дает (кривая 2, рис. 1)

падение напряжения $U_{av} = 0,75$ и $0,9$ в соответственно. Пользуясь формулой (4), находим по этим двум точкам $\alpha_1 = 0,26$. По кривой рис. 3, приведенного в [Л. 1], для схемы однофазного однополупериодного выпрямления и $\alpha_1 = 0,26$ находим: $k_{au} = 0,6$.

Формула (6) дает для средних значений тока:

$$U_{av1} = k_{au} u_{av1} = 0,6 \cdot 0,75 = 0,45 \text{ в};$$

$$U_{av2} = k_{au} u_{av2} = 0,6 \cdot 0,9 = 0,54 \text{ в}.$$

По опытной классификационной характеристике (кривая 1, рис. 1) находим: $U_{av1} = 0,43$; $U_{av2} = 0,56$. Совпадение удовлетворительное.

Возможность этого перехода позволяет исключить из процесса расчета статическую характеристику и оперировать только с классификационной характеристикой. Если допустить, что α_1 не зависит от вида характеристики, то очевидно, что отношения средних значений падения напряжения в вентиле в различных схемах выпрямления равно отношению соответствующих коэффициентов линеаризации. Следовательно, среднее падение напряжения на вентиле в любой из схем можно рассчитать по классификационному падению напряжения, снятому в схеме однофазного однополупериодного выпрямления. Например, для трехфазной мостовой схемы

$$U_{av(3)} = U_{av} \frac{k_{au(3)}}{k_{au}},$$

где $k_{au(3)}$ — коэффициент линеаризации для мостовой схемы;

k_{au} — для однофазной однополупериодной схемы выпрямления [Л. 1, рис. 3].

Пример. $\alpha_1 = 0,26$. По кривой рис. 3 [Л. 1] для $\alpha_1 = 0,26$, $k_{au} = 0,6$, а для трехфазной мостовой схемы $k_{au(3)} = 0,42$. Пусть при некотором токе I_{av} , $U_{av} = 0,54$; тогда для этого же среднего значения тока $U_{av(3)} = 0,54 \cdot \frac{0,42}{0,6} = 0,38$.

По аналогии нетрудно прийти к заключению, что обратный ток в любой схеме выпрямления также можно определить по классификационному значению через отношения коэффициента линеаризации. Например, для трехфазной схемы

$$I_{rv(3)} = I_{rv} \frac{k_{ri(3)}}{k_{ri}}.$$

В области обратных токов пересчет со статической характеристики на классификационную и наоборот может дать значительные отклонения от измеренных величин. При снятии статической характеристики обратного тока наблюдается явление «ползания»: при приложении к элементу постоянного напряжения в запирающем направлении обратный ток растет. При снятии классификационной характеристики это явление наблюдается в малой степени. Поэтому в области обратных токов статическую и классификационную характеристики нельзя связать точным соотношением.

Рассмотрим, например, в области обратного тока по две точки на обеих кривых 1 и 2 рис. 1: одна пара точек $u_{ri1} = U_{rv1} = 4,5$ в, другая $u_{ri2} = U_{rv2} = 9$ в.

На статической характеристике 2, снятой на постоянном токе, для $u_{ri1} = 4,5$ в находим $i_{ri1} = 0,7$, а для $u_{ri2} = 9$ в, $i_{ri2} = 5$ ма. Пользуясь этими двумя точками, находим по (5) $\alpha_2 = 2,8$. Этому значению α_2 для схемы однофазного однополупериодного выпрямления соответствует значение коэффициента линеаризации для обратного тока $k_{ri} = 5,4$ [Л. 1, рис. 4]. Тогда в однополупериодной (классификационной) схеме

$$I_{rv1} = k_{ri} i_{ri1} = 5,4 \cdot 0,7 = 4 \text{ ма};$$

$$I_{rv2} = k_{ri} i_{ri2} = 5 \cdot 5,4 = 27 \text{ ма}.$$

Среднему значению $U_{rv1} = 4,5$ в соответствует $U_{\sim 1} = \frac{4,5}{0,45} = 10$ в,

$$a \quad U_{rv2} = 9 \text{ в} \quad U_{\sim 2} = \frac{9}{0,45} = 20 \text{ в}.$$

Для этих значений обратного напряжения кривая 1 дает токи $I_{rv} = 2$ ма и 17 ма соответственно. Следовательно, обнаруживается существенное расхождение в определении среднего значения обратного тока в зависимости от того, использована ли статическая или классификационная характеристика.

Однако это обстоятельство не наносит ущерба точности вычислений средних значений токов и напряжений по коэффициентам линеаризации путем пересчета, так как вольтамперные характеристики (4) и (5), предложенные в [Л. 1], устанавливают связь между мгновенными значениями, а следовательно, справедливы и для цепи переменного тока.

Следует отметить, что вопрос о способе использования данных измерений для целей расчета возникает только для трехфазных схем, так как во всех однофазных схемах при одном и том же среднем значении тока в вентиле I_{av} имеет место одно и то же среднее падение напряжения U_{av} , совпадающее с классификационным. Также совпадают среднее и классификационное значения обратного тока I_{rv} при одном и том же среднем значении напряжения U_{rv} .

Таким образом, при знании классификационных характеристик расчет по [Л. 1] очень прост; только для трехфазных схем при определении средних значений обратного тока и прямого падения напряжения надо умножать классификационные значения на коэффициенты пересчета, примерно постоянные для данной технологии изготовления элементов.

Схемам измерения много внимания было уделено Е. Е. Глезерманом. Автор выражает признательность А. П. Тинькову за просмотр рукописи.

Литература

1. В. Г. Комар. Расчет селеновых выпрямителей. Электричество, № 9, 1946.

[23.10.1954]

Короткие замыкания при неполнофазных режимах на линиях 400 кВ

Кандидат техн. наук, доц. А. Б. ЧЕРНИН

Теплоэлектропроект

Имеется необходимость исследовать соотношения для линий 400 кВ большой протяженности при коротком замыкании, возникшем при неполнофазном режиме. Ниже излагаются разработанные для этого случая методы расчета.

Применение расчетных схем положительной последовательности. Эти схемы весьма удобны для исследования устойчивости параллельной работы электропередач 400 кВ при сложных повреждениях, а также для расчетов токов коротких замыканий при расхождении э. д. с. генераторов по фазе. Их применение позволяет привести сложные несимметричные повреждения к трехфазным коротким замыканиям [Л. 1...3].

На рис. 1, а показан случай, когда на линии большой протяженности одновременно имеются два разрыва (между точками М и N, Р и Q) и короткое замыкание в точке К. Соответствующая этому случаю схема положительной последовательности с опорными точками D и F показана на рис. 1, б. Части линии с распределенной емкостью, расположенные по ту и другую стороны от места короткого замыкания, замещены Т-образными схемами.

Схема, изображенная на рис. 1, б, может быть замещена эквивалентной схемой, представляющей собой трехполюсник с опорными точками D и F и землей (рис. 2). Трехполюсник характеризуется уравнениями:

$$\dot{U}_{1D} = L_{DD} \dot{I}_{1D} + L_{DF} \dot{I}_{1F}; \quad (1)$$

$$U_{1F} = L_{FD} \dot{I}_{1D} + L_{FF} \dot{I}_{1F}, \quad (2)$$

которые могут быть выведены следующим образом.

На основании схем отрицательной и нулевой последовательностей составляются так называемые особые уравнения положительной последовательности [Л. 3]. Для случая двух разрывов и короткого замыкания число этих уравнений равно трем:

$$\Delta \dot{U}_{1y} = S_{yy} \dot{I}_{1y} + S_{yr} \dot{I}_{1r} + S_{yk} \dot{I}_{1k}; \quad (3)$$

$$\Delta \dot{U}_{1r} = S_{ry} \dot{I}_{1y} + S_{rr} \dot{I}_{1r} + S_{rk} \dot{I}_{1k}; \quad (4)$$

$$\dot{U}_{1k} = S_{ky} \dot{I}_{1y} + S_{kr} \dot{I}_{1r} + S_{kk} \dot{I}_{1k}. \quad (5)$$

Коэффициенты S уравнений (3)...(5) имеют размерность сопротивлений и определяются па-

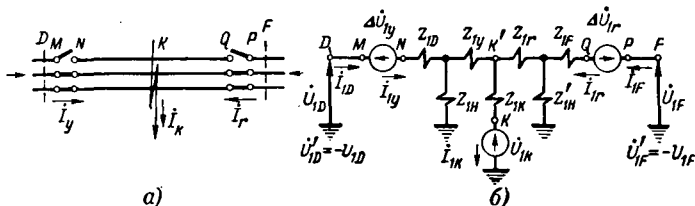


Рис. 1. Короткое замыкание с двумя одновременными разрывами на той же линии.
а — исходная схема; б — схема положительной последовательности.

аметрами схем отрицательной и нулевой последовательностей. Выражения, при помощи которых эти коэффициенты могут быть вычислены для некоторых случаев сочетания двух разрывов и короткого замыкания, включая случаи, когда один из разрывов неполный, даны в приложении.

На основании схемы, представленной на рис. 1, б, в общем случае при $\dot{I}_{1D} \neq \dot{I}_{1y}$ и $\dot{I}_{1F} \neq \dot{I}_{1r}$ (например, при разрывах и коротком замыкании на разных линиях) можно составить пять уравнений, которые выражают напряжения в местах повреждений ($\Delta \dot{U}_{1y}$, $\Delta \dot{U}_{1r}$, $\Delta \dot{U}_{1k}$) и опорных точках ($\dot{U}_{1D}$ и $\dot{U}_{1F}$) через токи в этих же местах и сопротивления схемы.

Таким образом, в общем случае для схемы рис. 1, б имеем восемь уравнений с десятью неизвестными, которыми являются напряжения и токи положительной последовательности в местах повреждений и опорных точках схемы. Шесть неизвестных (напряжения и токи положительной последовательности в обоих местах разрыва и месте короткого замыкания) исключаются, после чего получаем уравнения (1) и (2).

В частном случае, когда $\dot{I}_{1D} = \dot{I}_{1y}$, и $\dot{I}_{1F} = \dot{I}_{1r}$, и число неизвестных напряжений и токов уменьшается до восьми, следует в дополнение к уравнениям (3)...(5) на основании схемы рис. 1, б составить следующих три уравнения:

$$-\Delta \dot{U}'_{1D} + \Delta \dot{U}_{1y} = Z_{1yy} \dot{I}_{1y} + Z_{1yr} \dot{I}_{1r} + Z_{1yk} \dot{I}_{1k}; \quad (6)$$

$$-\Delta \dot{U}'_{1F} + \Delta \dot{U}_{1r} = Z_{1ry} \dot{I}_{1y} + Z_{1rr} \dot{I}_{1r} + Z_{1rk} \dot{I}_{1k}; \quad (7)$$

$$-\dot{U}_{1k} = Z_{1ky} \dot{I}_{1y} + Z_{1kr} \dot{I}_{1r} + Z_{1kk} \dot{I}_{1k}. \quad (8)$$

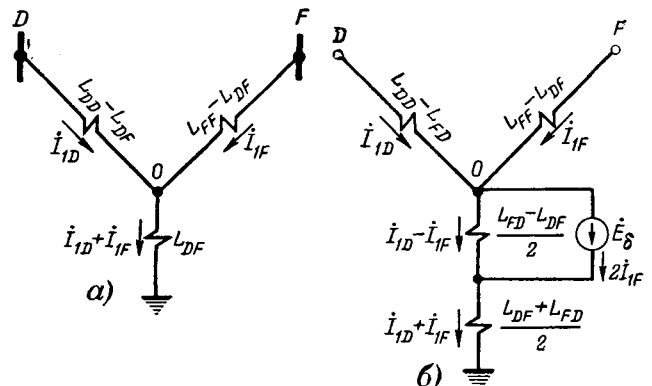


Рис. 2. Эквивалентные схемы, замещающие повреждения в схеме рис. 1.

На основании схемы рис. 1,б при $Z_{lk}=0$ собственные сопротивления определяются выражениями:

$$Z_{lyy} = Z_{ld} + \frac{Z_{ln}(Z_{ly} + Z_{lr} + Z'_{ln})}{Z_{ly} + Z_{lr} + Z_{ln} + Z'_{ln}};$$

$$Z_{lrr} = Z_{lf} + \frac{Z'_{ln}(Z_{ly} + Z_{lr} + Z_{ln})}{Z_{ly} + Z_{lr} + Z_{ln} + Z'_{ln}};$$

$$Z_{lkk} = \frac{(Z_{ly} + Z_{ln})(Z_{lr} + Z'_{ln})}{Z_{ly} + Z_{lr} + Z_{ln} + Z'_{ln}},$$

а взаимные сопротивления выражениями:

$$Z_{lyr} = Z_{lry} = \frac{Z_{ln} \cdot Z'_{ln}}{Z_{ly} + Z_{lr} + Z_{ln} + Z'_{ln}};$$

$$Z_{lyk} = Z_{lky} = -\frac{Z_{ln}(Z_{lr} + Z'_{ln})}{Z_{ly} + Z_{lr} + Z_{ln} + Z'_{ln}};$$

$$Z_{lrk} = Z_{lkr} = -\frac{Z'_{ln}(Z_{ly} + Z_{ln})}{Z_{ly} + Z_{lr} + Z_{ln} + Z'_{ln}}.$$

Исключив из уравнений (3)...(8) неизвестные величины $\Delta \dot{U}_{ly}$, $\Delta \dot{U}_{lr}$, $\dot{U}_{lk}$ и $\dot{I}_{lk}$, получим уравнения (1) и (2).

В тех случаях, когда разрывы и короткое замыкание характеризуются одной и той же фазой, находящейся в особых условиях (например, разрывы — в фазе *A*, а короткое замыкание — между фазами *B* и *C*), в выражениях (3)...(5)

$$S_{ky} = S_{jk}; \quad S_{kr} = S_{rk}; \quad S_{yr} = S_{ry}. \quad (9)$$

Тогда уравнениям (1) и (2) удовлетворяет схема рис. 2,а. В тех же случаях, когда соотношения (9) не соблюдаются, уравнения (1) и (2) преобразуем следующим образом:

$$\dot{U}_{ld} = (L_{dd} - L_{fd}) \dot{I}_{ld} + \frac{L_{fd} - L_{df}}{2} (\dot{I}_{ld} - \dot{I}_{lf}) + \frac{L_{df} + L_{fd}}{2} (\dot{I}_{ld} + \dot{I}_{lf}); \quad (10)$$

$$\dot{U}_{lf} = (L_{ff} - L_{df}) \dot{I}_{lf} + \frac{L_{fd} - L_{df}}{2} (\dot{I}_{ld} - \dot{I}_{lf}) + \frac{L_{df} + L_{fd}}{2} (\dot{I}_{ld} + \dot{I}_{lf}). \quad (11)$$

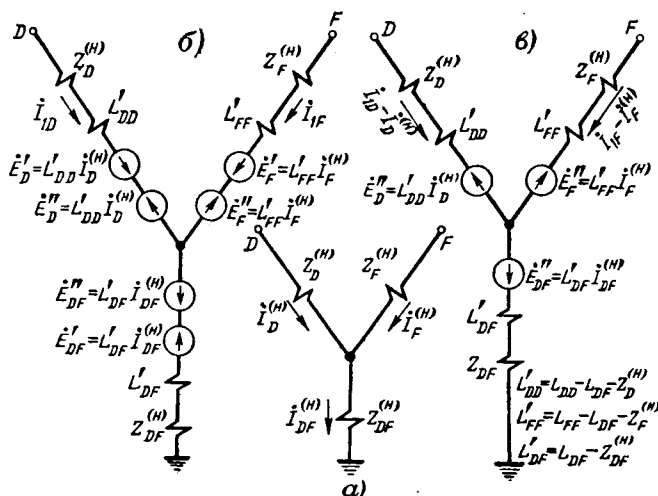


Рис. 3. Применение принципа наложения в эквивалентной схеме рис. 2.

Уравнениям (10) и (11) удовлетворяет эквивалентная схема рис. 2,б. Величина и фаза э. д. с. E_b выбраны таким образом, чтобы ток в ветви, к которой эта э. д. с. приложена, был равен $2\dot{I}_{lf}$. При пользовании расчетной моделью переменного тока э. д. с. E_b должна быть такой, чтобы обеспечивалось требуемое распределение токов. При аналитических же расчетах необходимо определить численное значение э. д. с. E_b [Л. 3].

Включение эквивалентных схем рис. 2 в схему положительной последовательности рис. 1,б (между точками *D* и *F*) позволяет получить расчетную схему положительной последовательности, по которой определяются токи короткого замыкания при двух одновременных разрывах.

Рассмотренный принцип составления расчетных схем положительной последовательности позволяет решить задачу для различных сочетаний мест двух разрывов и короткого замыкания. Возможность распространения предложенного автором принципа составления расчетных схем на случаи с числом повреждений, большим трех, указана Х. И. Орловым. Сочетания короткого замыкания с одним разрывом (полным или неполным) можно рассматривать как случаи, когда одна из э. д. с. разрыва, например $\Delta \dot{U}_{lr}$, равна нулю. Эквивалентные схемы рис. 2 могут быть составлены и для этих последних случаев¹.

Отметим особенности применения принципа наложения нагрузочного режима (полнофазного и неполнофазного) на дополнительный (аварийный) режим. При наложении предполагаются известными сопротивления ветвей схемы рис. 2,а $Z_D^{(n)}$, $Z_F^{(n)}$ и $Z_{DF}^{(n)}$, имитирующие полнофазный нагрузочный режим (рис. 3,а), или сопротивления $Z_D^{(np)}$, $Z_F^{(np)}$ и $Z_{DF}^{(np)}$, имитирующие неполнофазный нагрузочный режим. Для получения схемы дополнительного режима в каждую из ветвей схемы рис. 2,а включим две э. д. с., равные по величине и противоположно направленные, как показано на рис. 3,б. Электродвижущие силы генераторов совместно с э. д. с. E'_D , E'_F и E'_{DF} обеспечивают протекание токов полнофазного нагрузочного режима. Следовательно, дополнительный (аварийный) режим характеризуется тем, что к ветвям схемы приложены э. д. с. E''_D , E''_F и E''_{DF} , а э. д. с. генераторов равны нулю, как показано на рис. 3,в.

Применение комплексных схем последовательностей. Нагрузочный режим с двумя разрывами в одной фазе (рис. 4,а). Схемы отрицательной и нулевой последовательностей для рассматриваемого режима независимо от сложности сети можно привести к схеме, представленной на рис. 4,б,

¹ Для ряда случаев сочетаний короткого замыкания с одним разрывом расчетные схемы положительной последовательности приведены также в [Л. 3].

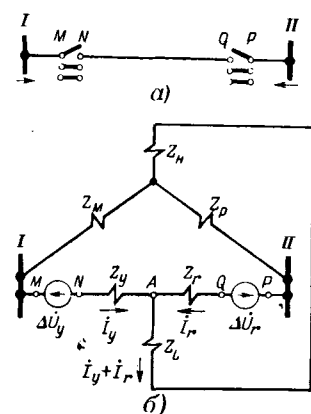


Рис. 4. Нагрузочный режим с двумя разрывами в одной фазе.

а—исходная схема; б—схема замещения отрицательной (нулевой) последовательности.

с которой линия I-II с распределенной емкостью и двумя разрывами представлена Т-образной схемой замещения (сопротивления Z_y , Z_r и Z_L). Для получения комплексной схемы переместим места разрывов MN и PQ к узловой точке А (рис. 4,б). Полученная таким образом комплексная схема показана на рис. 5. При неполных разрывах, когда, например, между точками М и N (рис. 4) включено сопротивление Z_D , в комплексной схеме последовательностей между этими точками должно быть включено сопротивление $\frac{Z_D}{3}$, как показано пунктиром на рис. 5.

Для доказательства возможности применения принципа наложения в схеме рис. 5 замкнем точки М и N, Р и Q. Полученная таким образом схема соответствует условиям нормального нагрузочного режима, так как схемы отрицательной и нулевой последовательностей зашунтированы. При этом токи между точками М и N, Р и Q ($I_y^{(n)}$ и $I_r^{(n)}$) являются токами полнофазного нагрузочного режима в местах последующих разрывов. Схема дополнительного режима, вызванного разрывами и накладываемого на нагрузочный режим, показана на рис. 6; она характеризуется тем, что в ней отсутствуют э. д. с. генераторов, а в местах разрывов приложены источники токов — $-j_y^{(n)}$ и $-j_r^{(n)}$, которые обеспечивают равенство нулю действительных токов в каждом месте разрыва.

Короткое замыкание при работе линии с распределенной емкостью двумя фазами. Используя указанный принцип электрического объединения схем отдельных последовательностей по местам разрыва (рис. 5), можно получить комплексную схему для случая, когда в одной из фаз линии электропередачи имеются два разрыва, а место короткого замыкания находится вне линии или на линии, но так близко к шинам, что практически его можно считать находящимся на шинах (рис. 7,а). Для получения схемы необходимо соединить места короткого замыкания отдельных последовательностей при помощи промежуточных трансформаторов связи с коэффициентом трансформации 1:1 и устройств для сдвига по фазе на угол $\pm 120^\circ$ в соответствии с граничными условиями для места короткого замыкания [Л. 4]. Такая схема для случая замыкания на землю и разрывов в фазе А при наличии двух генерирующих источников приведена на рис. 7,б.

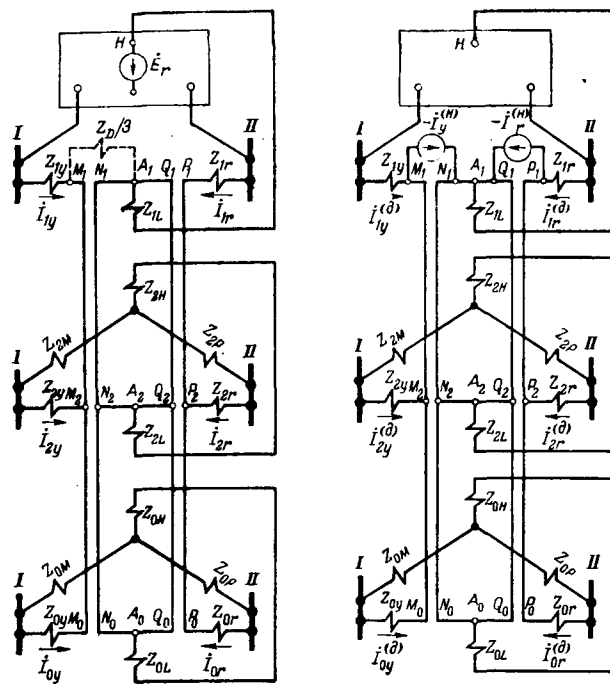


Рис. 5. Комплексная схема последовательностей при двух разрывах в одной фазе.

Рис. 6. Комплексная схема последовательностей при двух разрывах в одной фазе при применении принципа наложения.

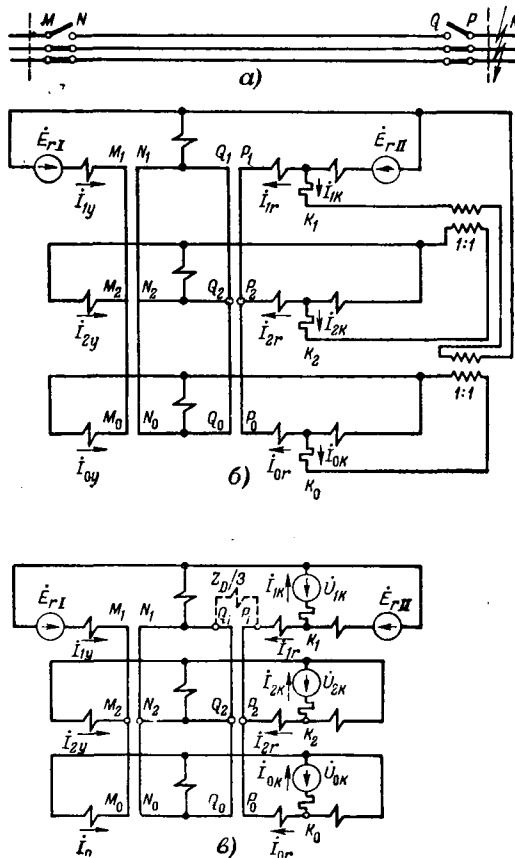


Рис. 7. Комплексные схемы последовательностей при коротком замыкании с двумя одновременными разрывами.

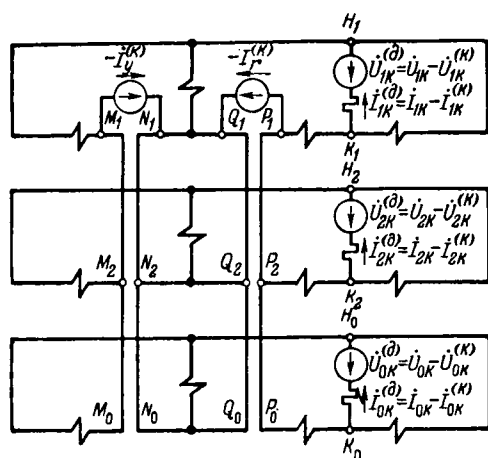


Рис. 8. Комплексная схема последовательностей при коротком замыкании с двумя одновременными разрывами при применении принципа наложения.

Вместо вида схемы рис. 7,б может быть применена схема рис. 7,в, отличающаяся тем, что в местах короткого замыкания приложены напряжения $\dot{U}_k$, соответствующие граничным условиям для этих мест. Показанное пунктиром сопротивление $Z_D/3$ включается между точками P и Q в случае неполного разрыва между последними. Если комплексную схему рис. 7,в применить для производства расчетов при помощи принципа наложения режима короткого замыкания на последующий дополнительный режим с разрывами, то в рассматриваемом случае в первую очередь определяются токи короткого замыкания при отсутствии разрывов.

Схема дополнительного режима, обусловленного последующим разрывом, дана на рис. 8; она характеризуется тем, что в местах разрыва приложены источники токов $-j_y^{(k)}$ и $-j_r^{(k)}$, обеспечивающие равенство нулю действительных токов в соединениях, замыкающих точки M и N, P и Q ($j_y^{(k)}$ и $j_r^{(k)}$ — полные токи в режиме короткого замыкания в местах последующих разрывов). В местах короткого замыкания схем отдельных последовательностей приложены напряжения $\dot{U}_k^{(d)} = \dot{U}_k - \dot{U}_k^{(k)}$, где $\dot{U}_k$ — полные напряжения в местах короткого замыкания. Для определения дополнительных токов короткого замыкания $j_{1k}^{(d)}$, $j_{2k}^{(d)}$ и $j_{0k}^{(d)}$, вызванных разрывами, необходимо составить расчетные выражения, вытекающие из соотношений в комплексной схеме. Например, для случая двух разрывов в фазе A и замыкания на землю фазы B на основании рис. 8 можно составить следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} -\dot{U}_{1k}^{(d)} &= -(\dot{U}_{1k} - \dot{U}_{1k}^{(k)}) = Z_{11}j_{1k}^{(d)} + Z_{12}j_{2k}^{(d)} + \\ &+ Z_{10}j_{0k}^{(d)} + Z_{1y}j_y^{(k)} + Z_{1r}j_r^{(k)}; \\ -\dot{U}_{2k}^{(d)} &= -(\dot{U}_{2k} - \dot{U}_{2k}^{(k)}) = Z_{21}j_{1k}^{(d)} + Z_{22}j_{2k}^{(d)} + \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} &+ Z_{20}j_{0k}^{(d)} + Z_{2y}j_y^{(k)} + Z_{2r}j_r^{(k)}; \\ -\dot{U}_{0k}^{(d)} &= -(\dot{U}_{0k} - \dot{U}_{0k}^{(k)}) = Z_{01}j_{1k}^{(d)} + Z_{02}j_{2k}^{(d)} + \\ &+ Z_{00}j_{0k}^{(d)} + Z_{0y}j_y^{(k)} + Z_{0r}j_r^{(k)}. \end{aligned} \right\}$$

Здесь Z_{11} , Z_{22} и Z_{00} — собственные сопротивления, равные приведенным сопротивлениям по отношению к месту короткого замыкания в схемах соответствующих последовательностей;

Z_{12} , Z_{21} , Z_{10} , Z_{01} , Z_{20} и Z_{02} — взаимные сопротивления, они равны:

$$\left. \begin{aligned} Z_{12} &= Z_{21} = \frac{\dot{U}_{1(k)} - \dot{U}_{1(k)}}{I_{2k}} \Big|_{I_{1k} = I_{0k} = j_y^{(k)} = j_r^{(k)} = 0} = \\ &= \frac{\dot{U}_{2(k)} - \dot{U}_{2(k)}}{I_{1k}} \Big|_{I_{2k} = I_{0k} = j_y^{(k)} = j_r^{(k)} = 0}; \\ Z_{10} &= Z_{01} = \frac{\dot{U}_{1(k)} - \dot{U}_{1(k)}}{I_{0k}} \Big|_{I_{1k} = I_{2k} = j_y^{(k)} = j_r^{(k)} = 0} = \\ &= \frac{\dot{U}_{0(k)} - \dot{U}_{0(k)}}{I_{1k}} \Big|_{I_{2k} = I_{0k} = j_y^{(k)} = j_r^{(k)} = 0}; \\ Z_{20} &= Z_{02} = \frac{\dot{U}_{2(k)} - \dot{U}_{2(k)}}{I_{0k}} \Big|_{I_{1k} = I_{2k} = j_y^{(k)} = j_r^{(k)} = 0} = \\ &= \frac{\dot{U}_{0(k)} - \dot{U}_{0(k)}}{I_{2k}} \Big|_{I_{1k} = I_{0k} = j_y^{(k)} = j_r^{(k)} = 0} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Z_y и Z_r — взаимные сопротивления, которые для соответствующих последовательностей равны:

$$\left. \begin{aligned} Z_y &= \frac{\dot{U}_y^{(k)} - \dot{U}_y^{(k)}}{j_y^{(k)}} \Big|_{j_{1k}^{(d)} = j_{2k}^{(d)} = j_{0k}^{(d)} = j_r^{(k)} = 0}; \\ Z_r &= \frac{\dot{U}_r^{(k)} - \dot{U}_r^{(k)}}{j_r^{(k)}} \Big|_{j_{1k}^{(d)} = j_{2k}^{(d)} = j_{0k}^{(d)} = j_y^{(k)} = 0} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

В уравнениях (13) и (14) U_k и U_k — соответственно напряжения в точках H и K схем отдельных последовательностей (рис. 8). Учитывая граничные условия для места короткого замыкания, которые действительны и для дополнительной схемы рис. 8, из выражений (12) можно получить:

$$\begin{aligned} j_{1k}^{(d)} &= a^2 j_{2k}^{(d)} = a j_{0k}^{(d)} = \\ &= - \frac{(Z_{1y} + a^2 Z_{2y} + a Z_{0y}) j_y^{(k)} + (Z_{1r} + a^2 Z_{2r} + a Z_{0r}) j_r^{(k)}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00} - Z_{12} - Z_{10} - Z_{20}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Аналогично определяются расчетные выражения для других сочетаний короткого замыкания с двумя одновременными разрывами.

Следует отметить, что при коротких замыканиях на оставшихся в работе фазах при равенстве сопротивлений положительной и отрицательной последовательностей дополнительные токи $I_k^{(d)}$ в месте короткого замыкания в схеме рис. 8, как правило, малы, и ими можно пренебречь. В этом случае в схеме дополни-

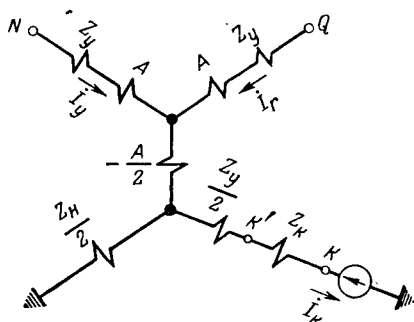


Рис. 9. Эквивалентная схема для случая короткого замыкания в середине линии при двух разрывах в одной фазе.

тельного режима определяется распределение лишь токов $-I_y^{(\kappa)}$ и $-I_r^{(\kappa)}$.

Аналогично в схеме (рис. 7, в) может быть применен принцип наложения на неполнофазный режим последующего дополнительного режима короткого замыкания.

Комплексная схема последовательностей вида рис. 8 может быть составлена также для случая короткого замыкания в середине линии при работе двух фаз последней, если четырехугольник между точками N , K' , Q и землей (рис. 1, б) преобразовать для каждой последовательности в эквивалентную схему (рис. 9), в которой

$$Z_y = Z_r = Z_D = Z_F; \quad Z_K = Z_K'; \quad A = \frac{Z_K \cdot Z_y}{Z_K + Z_y}.$$

Расчеты по рассматриваемому методу отличаются простотой. Он широко используется при проектировании, так как применим для большинства расчетных случаев и удобен для анализа релейной защиты. Его можно применить и для различных сочетаний короткого замыкания с одним разрывом фазы. В частности, при разрыве фазы A между точками M и N (рис. 7, а) и замыкании на землю фазы B расчетное выражение (15) верно, если принять $I_r^{(\kappa)} = 0$.

Применение расчетных выражений. Ниже рассматривается метод вычислений при помощи расчетных выражений для токов в местах короткого замыкания и в местах разрывов фаз. Этот метод является более общим, но более сложным, чем приведенные выше, и базируется на применении принципа наложения. Рассмотрим два способа решения задачи.

1-й способ. Наложение на неполнофазный нагрузочный режим с двумя разрывами последующего дополнительного режима, вызванного коротким замыканием (рис. 10). Токи неполнофазного нагрузочного режима, схема для которого представлена на рис. 10, а, вычисляются при помощи методов, рассмотренных выше. Для вычислений токов дополнительного режима (рис. 10, б) составляются особые уравнения положительной последовательности, аналогичные особым уравнениям (3)...(5), вывод которых дан в приложении. В соответствии со схемами отрицательной и нулевой последовательностей

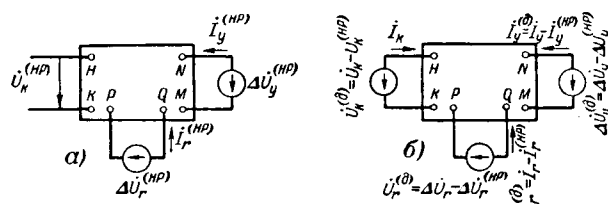


Рис. 10. Наложение на неполнофазный нагрузочный режим дополнительного режима, обусловленного коротким замыканием.

для дополнительного режима (рис. 10, б) эти уравнения для случая замыкания на землю двух фаз с одновременными двумя разрывами в фазе A имеют следующий вид:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_{1\kappa} & -S_{\kappa\kappa} & -S_{\kappa y} & -S_{\kappa r} \\ \Delta \dot{U}_{1y}^{(\partial)} & -S_{y\kappa} & -S_{yy} & -S_{yr} \\ \Delta \dot{U}_{1r}^{(\partial)} & -S_{r\kappa} & -S_{ry} & -S_{rr} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1,0 \\ \dot{A}_\kappa \\ \dot{A}_y \\ \dot{A}_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_{\kappa\kappa} & S_{\kappa y} & S_{\kappa r} \\ S_{y\kappa} & S_{yy} & S_{yr} \\ S_{r\kappa} & S_{ry} & S_{rr} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_{1\kappa} \\ \dot{I}_{1y}^{(\partial)} \\ \dot{I}_{1r}^{(\partial)} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Величины $\dot{A}_\kappa$, $\dot{A}_y$ и $\dot{A}_r$ для случая замыкания на землю фаз A и B равны:

$$\left. \begin{aligned} \dot{A}_\kappa &= aY_{2\kappa\kappa} \dot{U}_{2\kappa}^{(\kappa p)} + a^2 Y_{0\kappa\kappa} \dot{U}_{0\kappa}^{(\kappa p)}; \\ \dot{A}_y &= -(Y_{2y\kappa} \dot{U}_{2\kappa}^{(\kappa p)} + Y_{0y\kappa} \dot{U}_{0\kappa}^{(\kappa p)}); \\ \dot{A}_r &= -(Y_{2r\kappa} \dot{U}_{2\kappa}^{(\kappa p)} + Y_{0r\kappa} \dot{U}_{0\kappa}^{(\kappa p)}), \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где $U_\kappa^{(\kappa p)}$ — напряжения отдельных последовательностей при неполнофазном нагрузочном режиме в месте последующего короткого замыкания.

Для случая замыкания на землю фаз C и A в выражении (17) меняются местами a и a^2 , а для случая замыкания на землю фаз B и C вместо величин a и a^2 следует подставить 1.

В соответствии со схемой рис. 10, б особые уравнения положительной последовательности для случаев замыкания на землю одной фазы и замыкания между двумя фазами с одновременными двумя разрывами в фазе A имеют следующий вид:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_{1\kappa} + \alpha_2 \dot{U}_{2\kappa}^{(\kappa p)} + \alpha_0 \dot{U}_{0\kappa}^{(\kappa p)} \\ \Delta U_{1y}^{(\partial)} \\ \Delta U_{1r}^{(\partial)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_{\kappa\kappa} & S_{\kappa y} & S_{\kappa r} \\ S_{y\kappa} & S_{yy} & S_{yr} \\ S_{r\kappa} & S_{ry} & S_{rr} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_{1\kappa} \\ \dot{I}_{1y}^{(\partial)} \\ \dot{I}_{1r}^{(\partial)} \end{vmatrix}. \quad (18)$$

В зависимости от вида короткого замыкания и поврежденной фазы α_2 и α_0 имеют следующие значения:

Вид короткого замыкания	Замыкание на землю одной фазы			Замыкание между двумя фазами		
	A	B	C	A и B	B и C	C и A
Поврежденные фазы						
α_2	1,0	a^2	a	$-a$	-1	$-a^2$
α_0	1,0	a	a^2	0	0	0

Члены S уравнений (16) и (18) определяются при помощи выражений, приведенных в приложении.

На основании схемы рис. 10, б для положительной последовательности могут быть составлены следующие уравнения:

$$\begin{pmatrix} -(\dot{U}_{1k} - \dot{U}_{1k}^{(KF)}) \\ -\Delta \dot{U}_{1y}^{(\partial)} \\ -\Delta \dot{U}_{1r}^{(\partial)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{1kk}, Z_{1ky}, Z_{1kr} \\ Z_{1yk}, Z_{1yy}, Z_{1yr} \\ Z_{1rk}, Z_{1ry}, Z_{1rr} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{1k}^{(\partial)} \\ \dot{I}_{1y}^{(\partial)} \\ \dot{I}_{1r}^{(\partial)} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Совместным решением уравнений (16) и (19), (18) и (19) получим расчетные выражения для определения токов $\dot{I}_{1k}$, $\dot{I}_{1y}^{(\partial)}$ и $\dot{I}_{1r}^{(\partial)}$.

2-й способ. Наложение на режим короткого замыкания (при отсутствии разрывов) последующего дополнительного режима, вызванного двумя разрывами (рис. 11). Токи короткого замыкания при отсутствии разрывов (рис. 11, а) вычисляются известными способами. Для вычисления токов дополнительного режима (рис. 11, б) составляются особые уравнения положительной последовательности. Эти уравнения выводятся аналогично уравнениям (3)...(5) (см. приложение). В соответствии со схемами отрицательной и нулевой последовательностей они имеют следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{1k}^{(\partial)} - (S_{ky} \dot{I}_{1y}^{(k)} + S_{kr} \dot{I}_{1r}^{(k)}) \\ \Delta \dot{U}_{1y}^{(\partial)} - (S_{yy} \dot{I}_{1y}^{(k)} + S_{yr} \dot{I}_{1r}^{(k)}) \\ \Delta \dot{U}_{1r}^{(\partial)} - (S_{ry} \dot{I}_{1y}^{(k)} + S_{rr} \dot{I}_{1r}^{(k)}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{kk}, S_{ky}, S_{kr} \\ S_{yk}, S_{yy}, S_{yr} \\ S_{rk}, S_{ry}, S_{rr} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{1k}^{(\partial)} \\ \dot{I}_{1y}^{(\partial)} \\ \dot{I}_{1r}^{(\partial)} \end{pmatrix}, \quad (20)$$

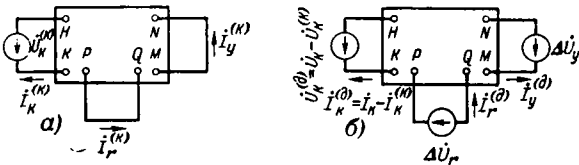


Рис. 11. Наложение на режим короткого замыкания дополнительного режима, обусловленного двумя разрывами.

где $\dot{I}_y^{(k)}$ и $\dot{I}_r^{(k)}$ — токи в режиме короткого замыкания в местах последующих разрывов. Величины

$$\begin{pmatrix} -\dot{I}_{1k} \\ -\dot{I}_{1y} \\ -\dot{I}_{1r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(Y_{2kk} + Y_{0kk}), & (aY_{2ky} + aY_{0ky}), & (aY_{2kr} + a^2Y_{0kr}) \\ (a^2Y_{2yk} + aY_{0yk}), & -(Y_{2yy} + Y_{0yy}), & (Y_{2yr} + Y_{0yr}) \\ (a^2Y_{2rk} + aY_{0rk}), & (Y_{2ry} + Y_{0ry}), & -(Y_{2rr} + Y_{0rr}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{1k} \\ \Delta \dot{U}_{1y} \\ \Delta \dot{U}_{1r} \end{pmatrix}. \quad (П, 4)$$

S определяются по выражениям, приведенным в приложении.

На основании схемы рис. 11, б могут быть составлены следующие уравнения для положительной последовательности:

$$\left. \begin{aligned} -\dot{U}_{1k}^{(\partial)} &= Z_{1kk} \dot{I}_{1k}^{(\partial)} + Z_{1ky} \dot{I}_{1y}^{(\partial)} + Z_{1kr} \dot{I}_{1r}^{(\partial)}, \\ -\Delta \dot{U}_{1y}^{(\partial)} &= Z_{1yk} \dot{I}_{1k}^{(\partial)} + Z_{1yy} \dot{I}_{1y}^{(\partial)} + Z_{1yr} \dot{I}_{1r}^{(\partial)}, \\ -\Delta \dot{U}_{1r}^{(\partial)} &= Z_{1rk} \dot{I}_{1k}^{(\partial)} + Z_{1ry} \dot{I}_{1y}^{(\partial)} + Z_{1rr} \dot{I}_{1r}^{(\partial)}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

В результате совместного решения уравнений (20) и (21) получим расчетные выражения для токов короткого замыкания $\dot{I}_{1k}^{(\partial)}$ и токов разрывов (как полных, так и неполных) $\dot{I}_{1y}^{(\partial)}$ и $\dot{I}_{1r}^{(\partial)}$ в схеме дополнительного режима рис. 11, б.

Приведенные методы использованы для вычисления токов коротких замыканий в неполнофазных режимах на линиях 400 кВ при проектировании релейной защиты. Автор выражает благодарность Б. Я. Смелянской за ценные указания по практическому использованию предлагаемых методов.

Приложение. Вывод особых уравнений положительной последовательности (3)...(5) для случая двух разрывов и одновременного короткого замыкания.

Особые уравнения для случая разрывов в фазе А и замыкания на землю двух фаз. На рис. 12 дана схема для короткого замыкания с одновременными двумя разрывами, представляющая собой шестиполусник с тремя парами опорных точек. Исходя из этой схемы, для отрицательной и нулевой последовательностей составим уравнения шестиполусника в следующей форме:

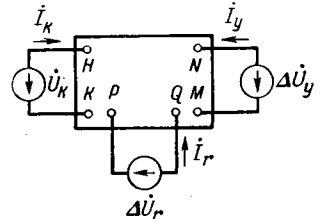


Рис. 12. Схема для отдельных последовательностей при коротком замыкании и двух разрывах.

$$\dot{I}_k = -Y_{kk} \dot{U}_k + Y_{ky} \Delta \dot{U}_y + Y_{kr} \Delta \dot{U}_r; \quad (П, 1)$$

$$\dot{I}_y = Y_{yk} \dot{U}_k - Y_{yy} \Delta \dot{U}_y + Y_{yr} \Delta \dot{U}_r; \quad (П, 2)$$

$$\dot{I}_r = Y_{rk} \dot{U}_k + Y_{ry} \Delta \dot{U}_y - Y_{rr} \Delta \dot{U}_r, \quad (П, 3)$$

где Y_{kk} , Y_{yy} и Y_{rr} — собственные проводимости; $Y_{ky} = Y_{yk}$; $Y_{kr} = Y_{rk}$ и $Y_{yr} = Y_{ry}$ — взаимные проводимости схемы отрицательной или нулевой последовательности.

Определим коэффициенты уравнений (3)...(5) для случая двух разрывов в фазе А и замыкания на землю фаз А и В. Для этого умножим уравнение (П, 1) на оператор a для отрицательной последовательности и a^2 — для нулевой последовательности. Перепишем в матричной форме уравнения (П, 1)...(П, 3) для отрицательной и нулевой последовательностей с указанными изменениями. Просуммировав эти уравнения с учетом граничных условий для случая замыкания на землю фаз А и В, получим:

В результате решения системы уравнений (П,4) получим особые уравнения (3)...(5) для рассматриваемого случая. Коэффициенты уравнений (3)...(5) равны:

$$\left. \begin{aligned} S_{\kappa\kappa} &= \frac{(Y_{\Sigma y\kappa} Y_{\Sigma rr} - Y_{\Sigma y\kappa} Y_{\Sigma ry}) Y_{rr}}{M}, \\ S_{yy} &= \frac{(Y_{\Sigma \kappa\kappa} Y_{\Sigma yy} - Y_{\Sigma \kappa r} Y_{\Sigma r\kappa}) Y_{rr}}{M}, \\ S_{rr} &= \frac{(Y_{\Sigma \kappa\kappa} Y_{\Sigma yy} - Y_{\Sigma \kappa y} Y_{\Sigma y\kappa}) Y_{rr}}{M}, \\ S_{\kappa y} &= \frac{(Y_{\Sigma \kappa y} Y_{\Sigma rr} + Y_{\Sigma \kappa r} Y_{\Sigma ry}) Y_{rr}}{M}, \\ S_{y\kappa} &= \frac{(Y_{\Sigma y\kappa} Y_{\Sigma rr} + Y_{\Sigma r\kappa} Y_{\Sigma ry}) Y_{rr}}{M}, \\ S_{\kappa r} &= \frac{(Y_{\Sigma \kappa y} Y_{\Sigma yr} + Y_{\Sigma y\kappa} Y_{\Sigma rk}) Y_{rr}}{M}, \\ S_{r\kappa} &= \frac{(Y_{\Sigma y\kappa} Y_{\Sigma ry} + Y_{\Sigma y\kappa} Y_{\Sigma rk}) Y_{rr}}{M}, \\ S_{yr} &= \frac{(Y_{\Sigma \kappa\kappa} Y_{\Sigma yr} + Y_{\Sigma y\kappa} Y_{\Sigma rk}) Y_{rr}}{M}, \\ S_{ry} &= \frac{(Y_{\Sigma \kappa\kappa} Y_{\Sigma yr} + Y_{\Sigma y\kappa} Y_{\Sigma rk}) Y_{rr}}{M} \end{aligned} \right\} \quad (П, 5)$$

где

$$M = (Y_{\Sigma \kappa r} Y_{\Sigma r\kappa} - Y_{\Sigma \kappa\kappa} Y_{\Sigma rr}) (Y_{\Sigma yr} Y_{\Sigma ry} - Y_{\Sigma yy} Y_{\Sigma rr}) - (Y_{\Sigma \kappa r} Y_{\Sigma ry} + Y_{\Sigma \kappa y} Y_{\Sigma rr}) (Y_{\Sigma rk} Y_{\Sigma yr} + Y_{\Sigma y\kappa} Y_{\Sigma rr}),$$

а величины Y_{Σ} с соответствующими индексами равны выражениям в скобках уравнений (П,4), например:

$$Y_{\Sigma \kappa\kappa} = Y_{2\kappa\kappa} + Y_{0\kappa\kappa}; Y_{\Sigma \kappa y} = aY_{2\kappa y} + a^2Y_{0\kappa y} \text{ и т. д.}$$

Для других случаев замыкания на землю двух фаз коэффициенты особых уравнений определяются теми же выражениями (П, 5) с той, однако, разницей, что в случае замыкания на землю фаз C и A в соответствующих скобках уравнений (П, 4) операторы a и a^2 меняются местами, а в случае замыкания на землю фаз B и C вместо этих операторов подставляется 1.

Особые уравнения для случая двух разрывов в фазе A и замыкания на землю одной фазы. Приведем уравнения (П,1) ... (П,3) для отрицательной и нулевой последовательностей к следующему виду:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa} &= -\frac{I_{\kappa}}{Y_{\kappa\kappa}} + \frac{Y_{\kappa y}}{Y_{\kappa\kappa}} \Delta U_y + \frac{Y_{\kappa r}}{Y_{\kappa\kappa}} \Delta U_r = \\ &= -F_{\kappa\kappa} I_{\kappa} + F_{\kappa y} \Delta \dot{U}_y + F_{\kappa r} \Delta \dot{U}_r; \end{aligned} \quad (П, 6)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_y &= -\frac{Y_{y\kappa}}{Y_{\kappa\kappa}} I_{\kappa} - \left(Y_{yy} - Y_{y\kappa} \frac{Y_{\kappa y}}{Y_{\kappa\kappa}} \right) \Delta \dot{U}_y + \\ &+ \left(Y_{yr} + Y_{y\kappa} \frac{Y_{\kappa r}}{Y_{\kappa\kappa}} \right) \Delta \dot{U}_r = -F_{y\kappa} I_{\kappa} - F_{yy} \Delta \dot{U}_y + \\ &+ F_{yr} \Delta \dot{U}_r; \end{aligned} \quad (П, 7)$$

$$\begin{aligned} I_r &= -\frac{Y_{r\kappa}}{Y_{\kappa\kappa}} I_{\kappa} + \left(Y_{ry} + Y_{r\kappa} \frac{Y_{\kappa y}}{Y_{\kappa\kappa}} \right) \Delta \dot{U}_y - \\ &- \left(Y_{rr} - Y_{r\kappa} \frac{Y_{\kappa r}}{Y_{\kappa\kappa}} \right) \Delta \dot{U}_r = -F_{r\kappa} I_{\kappa} + \\ &+ F_{ry} \Delta \dot{U}_y - F_{rr} \Delta \dot{U}_r. \end{aligned} \quad (П, 8)$$

Чтобы получить выражения для коэффициентов особых уравнений положительной последовательности для случая двух разрывов в фазе A и замыкания на землю фазы B ,

умножим уравнение (П, 6) на a^2 для отрицательной последовательности и на a для нулевой последовательности в соответствии с граничными условиями для рассматриваемого случая короткого замыкания. Затем, переписав уравнения (П, 6) ... (П, 8) с указанными изменениями в матричной форме и просуммировав их с учетом граничных условий для рассматриваемого случая, получим:

$$\left\| \begin{aligned} -\dot{U}_{1\kappa} \\ -\dot{I}_{1y} \\ -\dot{I}_{1r} \end{aligned} \right\| = \left\| \begin{aligned} -(F_{2\kappa\kappa} + F_{0\kappa\kappa}), & (a^2 F_{2\kappa y} + a F_{0\kappa y}), & (a^2 F_{2\kappa r} + a F_{0\kappa r}) \\ -(a F_{2y\kappa} + a^2 F_{0y\kappa}), & -(F_{2yy} + F_{0yy}), & (F_{2yr} + F_{0yr}) \\ -(a F_{2r\kappa} + a^2 F_{0r\kappa}), & (F_{2ry} + F_{0ry}), & -(F_{2rr} + F_{0rr}) \end{aligned} \right\| \cdot \left\| \begin{aligned} \dot{I}_{1\kappa} \\ \Delta \dot{U}_{1y} \\ \Delta \dot{U}_{1r} \end{aligned} \right\| \quad (П, 9)$$

В результате решения системы уравнений (П, 9) получим особые уравнения (3)...(5) для рассматриваемого случая.

Коэффициенты этих уравнений равны:

$$\left. \begin{aligned} S_{yy} &= \frac{F_{\Sigma rr}}{P}; S_{rr} = \frac{F_{\Sigma yy}}{P}; \\ S_{yr} &= \frac{F_{\Sigma yr}}{P}; S_{ry} = \frac{F_{\Sigma ry}}{P}; \\ S_{\kappa y} &= -\frac{F_{\Sigma \kappa y} F_{\Sigma rr} + F_{\Sigma \kappa r} F_{\Sigma ry}}{P}; \\ S_{y\kappa} &= -\frac{F_{\Sigma y\kappa} F_{\Sigma rr} + F_{\Sigma rk} F_{\Sigma yr}}{P}; \\ S_{\kappa r} &= -\frac{F_{\Sigma \kappa y} F_{\Sigma yr} + F_{\Sigma y\kappa} F_{\Sigma rk}}{P}; \\ S_{r\kappa} &= -\frac{F_{\Sigma y\kappa} F_{\Sigma ry} + F_{\Sigma y\kappa} F_{\Sigma rk}}{P}; \\ S_{\kappa\kappa} &= F_{\Sigma \kappa\kappa} - F_{\Sigma \kappa y} S_{y\kappa} - F_{\Sigma \kappa r} S_{r\kappa}, \end{aligned} \right\} \quad (П, 10)$$

где $P = F_{\Sigma yy} F_{\Sigma rr} - F_{\Sigma yr} F_{\Sigma ry}$, а величины F_{Σ} с соответствующими индексами равны выражениям в скобках уравнений (П,9), например:

$$F_{\Sigma \kappa\kappa} = F_{2\kappa\kappa} + F_{0\kappa\kappa}; F_{\Sigma \kappa y} = a^2 F_{2\kappa y} + a F_{0\kappa y} \text{ и т. д.}$$

Для других случаев замыкания на землю коэффициенты особых уравнений определяются по тем же выражениям (П, 10) с той разницей, что в случае замыкания на землю фазы C и a и a^2 в соответствующих скобках уравнений (П, 9) меняются местами, а в случае замыкания на землю фазы A в скобках этих уравнений вместо a и a^2 следует подставить 1.

Особые уравнения для случая двух разрывов в фазе A и замыкания между двумя фазами. При определении коэффициентов особых уравнений положительной последовательности для этого случая могут быть использованы выражения (П, 4) и (П, 5) для соответствующих случаев замыкания двух фаз на землю, если для нулевой последовательности принять

$$Y_{\Sigma \kappa\kappa} = Y_{0\kappa y} = Y_{0y\kappa} = Y_{\Sigma \kappa r} = Y_{0r\kappa} = 0. \quad (П, 11)$$

Коэффициенты особых уравнений для рассматриваемого случая могут быть выражены также через величины F согласно уравнениям (П, 6) ... (П, 8) аналогично случаям замыкания на землю одной фазы. Чтобы получить расчетные выражения коэффициентов для случая замыкания между фазами A и B , умножим уравнение (П,6) для отрицательной последовательности на a (в соответствии с граничными условиями для этого повреждения) и сложим уравнения (П, 6) ... (П, 8) для отрицательной и нулевой последовательностей, учитывая граничные условия для короткого замыкания и разрывов. После этого будем иметь:

$$\left\| \begin{aligned} \dot{U}_{1\kappa} \\ -\dot{I}_{1y} \\ -\dot{I}_{1r} \end{aligned} \right\| = \left\| \begin{aligned} -F_{2\kappa\kappa}, & a F_{2\kappa y}, & a F_{2\kappa r} \\ -a^2 F_{2y\kappa}, & -(F_{2yy} + F_{0yy}), & (F_{2yr} + F_{0yr}) \\ -a^2 F_{2r\kappa}, & (F_{2ry} + F_{0ry}), & -(F_{2rr} + F_{0rr}) \end{aligned} \right\| \cdot \left\| \begin{aligned} -\dot{I}_{1\kappa} \\ \Delta \dot{U}_{1y} \\ \Delta \dot{U}_{1r} \end{aligned} \right\| \quad (П, 12)$$

Выражения коэффициентов особых уравнений для рассматриваемого случая получим из уравнений (П,12). Они будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} S_{yy} &= \frac{F_{\Sigma rr}}{P}; S_{rr} = \frac{F_{\Sigma yy}}{P}; \\ S_{yr} &= \frac{F_{\Sigma yr}}{P}; S_{ry} = \frac{F_{\Sigma ry}}{P}; \\ S_{ky} &= \frac{F_{\Sigma ky}F_{\Sigma rr} + F_{\Sigma kr}F_{\Sigma ry}}{P}; \\ S_{yk} &= \frac{F_{\Sigma yk}F_{\Sigma rr} + F_{\Sigma rk}F_{\Sigma ry}}{P}; \\ S_{kr} &= \frac{F_{\Sigma ky}F_{\Sigma yr} + F_{\Sigma yy}F_{\Sigma kr}}{P}; \\ S_{rk} &= \frac{F_{\Sigma yk}F_{\Sigma ry} + F_{\Sigma yy}F_{\Sigma rk}}{P}; \\ S_{kk} &= F_{\Sigma kk} + F_{\Sigma ky}S_{yk} + F_{\Sigma kr}S_{rk}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{П, 13})$$

где $P = F_{\Sigma yy}F_{\Sigma rr} - F_{\Sigma yr}F_{\Sigma ry}$, а величины F_{Σ} берутся из уравнений (П,12), например:

$$F_{\Sigma kk} = F_{2kk}; F_{\Sigma ky} = aF_{2ky}; F_{\Sigma yy} = F_{2yy} + F_{0yy}; \\ F_{\Sigma yk} = a^2F_{2yk} \text{ и т. д.}$$

Чтобы получить уравнения, аналогичные уравнениям (П,12), для случая замыкания между фазами С и А операторы a и a^2 следует поменять местами, а для случая замыкания между фазами В и С нужно вместо a и a^2 подставить 1.

Аналогично могут быть выведены выражения для коэффициентов особых уравнений положительной последовательности для случаев сочетания разрывов в разных фазах с короткими замыканиями различных видов.

Особенности составления особых уравнений при коротком замыкании и двух одновременных разрывах, один из которых неполный. Граничные условия для неполного разрыва фазы А — при включении сопротивления Z_D между точками М и N (рис. 12) имеют следующий вид:

$$I_{1y} = -(I_{2y} + I_{0y}); \quad (\text{П, 14})$$

$$\Delta \dot{U}_{1y} = \Delta \dot{U}_{2y} = \Delta \dot{U}_{0y} = \\ = \frac{Z_D}{3} (I_{1y} + I_{2y} + I_{0y}). \quad (\text{П, 15})$$

Если учесть условия (П,14) и (П,15), то из уравнения (3) следует:

$$\frac{Z_D}{3} (I_{1y} + I_{2y} + I_{0y}) = \\ S_{yk}I_{1k} - S_{yy} (I_{2y} + I_{0y}) + S_{yr}I_{1r}, \quad (\text{П, 16})$$

откуда

$$I_{2y} + I_{0y} = \frac{S_{yk}I_{1k} - \frac{Z_D}{3}I_{1y} + S_{yr}I_{1r}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}}. \quad (\text{П, 17})$$

Особые уравнения положительной последовательности для рассматриваемого случая примут следующий вид:

$$\dot{U}_{1k} = \left(S_{kk} - \frac{S_{ky}S_{yk}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} \right) I_{1k} + \frac{S_{ky} \frac{Z_D}{3}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} I_{1y} + \\ + \left(S_{kr} - \frac{S_{ky}S_{yr}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} \right) I_{1r} = S'_{kk}I_{1k} + S'_{ky}I_{1y} + S'_{kr}I_{1r}; \quad (\text{П, 18})$$

$$\Delta \dot{U}_{1y} = \frac{S_{yk} \frac{Z_D}{3}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} I_{1k} + \frac{S_{yy} \frac{Z_D}{3}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} I_{1y} + \frac{S_{yr} \frac{Z_D}{3}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} I_{1r} = \\ = S'_{yk}I_{1k} + S'_{yy}I_{1y} + S'_{yr}I_{1r}; \quad (\text{П, 19})$$

$$\Delta \dot{U}_{1r} = \left(S_{rk} - \frac{S_{yk}S_{ry}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} \right) I_{1k} + \frac{S_{ry} \frac{Z_D}{3}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} I_{1y} + \\ + \left(S_{rr} - \frac{S_{yr}S_{ry}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} \right) I_{1r} = S'_{rk}I_{1k} + S'_{ry}I_{1y} + S'_{rr}I_{1r}, \quad (\text{П, 20})$$

где величины S_{kk} , S_{ky} и т. д. вычисляются в соответствии с указаниями, приведенными выше для отдельных случаев повреждений.

В уравнениях (П, 18) ... (П, 20) для случая короткого замыкания и одновременного неполного разрыва между точками М и N следует принять:

$$S'_{kr} = S'_{rk} = S'_{yr} = S'_{ry} = S'_{rr} = 0.$$

Тогда особые уравнения положительной последовательности для этого случая примут вид:

$$\dot{U}_{1k} = \left(S_{kk} - \frac{S_{ky}S_{yk}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} \right) I_{1k} + \frac{S_{ky} \frac{Z_D}{3}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} I_{1y} = \\ = S'_{kk}I_{1k} + S'_{ky}I_{1y}; \quad (\text{П, 21})$$

$$\Delta \dot{U}_{1y} = \frac{S_{yk} \frac{Z_D}{3}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} I_{1k} + \frac{S_{yy} \frac{Z_D}{3}}{S_{yy} + \frac{Z_D}{3}} I_{1y} = S'_{yk}I_{1k} + S'_{yy}I_{1y}. \quad (\text{П, 22})$$

Величины S_{kk} , S_{ky} , S_{yk} и S_{yy} , входящие в уравнения (П,21) и (П,22) для разных случаев коротких замыканий с одновременным разрывом в одной фазе, приведены в [Л.3, § 3-2].

Литература

1. Н. Н. Щедрин. Токи короткого замыкания высоковольтных линий. ОНТИ, 1935.
2. С. А. Ульянов. Короткие замыкания в электрических системах. Госэнергоиздат, 1952.
3. А. Б. Чернин. Короткие замыкания при неполнофазных режимах электрических систем. Госэнергоиздат, 1952.
4. Н. Н. Соколов. Построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных цепях. Электричество, № 8, 1949.

[15.9.1954]



Транспозиция в электрических сетях 35...220 кВ

Инж. А. И. ГЕРШЕНГОРН и кандидат техн. наук Н. А. МЕЛЬНИКОВ
Теплоэлектропроект Всесоюзный заочный энергетический институт

В работе авторов, посвященной транспозиции длинных линий электропередачи [Л. 1], было показано, что выбор длины цикла транспозиции в основном определяется условиями допускаемой несимметрии токов и напряжений в электрической системе, что практически длина цикла транспозиции линий электропередачи может быть увеличена до 200...300 км вместо 24 км, допускаемых действующими нормами [Л. 2] при горизонтальном расположении проводов, и что линии длиной менее 100 км могут вообще не транспонироваться. Следовательно, как правило, отдельные линии электрических сетей 110...220 кВ достаточно выполнять с одним-двумя циклами транспозиции, а линии сетей 35 кВ — без транспозиции.

В настоящей статье рассматриваются условия работы линий электропередачи с удлиненными циклами транспозиции в сложных электрических сетях. Несимметрия, возникающая вследствие пофазного различия параметров в одной из линий, может увеличиваться из-за наличия в той же электрической сети других линий электропередачи с удлиненными циклами транспозиции. Если линии электропередачи с удлиненными циклами транспозиции образуют замкнутый контур, то возникающая несимметрия может достигать несколько больших значений, чем в случае одиночных линий.

В сетях 110...220 кВ, которые выполняются с заземленной нулевой точкой всех или части трансформаторов, возможность удлинения циклов транспозиции определяется главным образом допускаемой несимметрией токов и напряжений в нормальных режимах работы. В сетях 35 кВ с дугогасящими катушками возникает дополнительное требование о примерном равенстве суммарных емкостей всех фаз сети по отношению к земле. В общем случае рассмотрение вопроса о транспозиции линий должно производиться комплексно для всей сети.

Следует иметь в виду, что в сетях 110...220 кВ результирующая несимметрия может быть существенно снижена путем подбора соответствующих схем и длин циклов транспозиции отдельных линий. В сложной сети, имеющей цепочечную или замкнутую схему, несимметрия может быть уменьшена без применения транспозиции только за счет различного взаимного расположения проводов отдельных линий. В сетях 35 кВ достаточно большой суммарной протяженности вследствие небольшой, как правило, длины каждой из линий транспозиция может не применяться; необходимого равенства емкостей отдельных фаз можно добиться путем соответствующего расположения проводов на отдельных линиях.

Во всех случаях необходимость ограничения несимметрии токов вызывается требованиями нормальной работы релейной защиты и отсутствия мешающих влияний на низкочастотные каналы связи. Как показывают расчеты, при наличии только одного цикла транспозиции на линиях

обычной длины коэффициенты несимметрии токов по обратной последовательности получаются не более 1%, а по нулевой последовательности — не более 0,1%.

Допустимая несимметрия напряжений в любых электрических сетях определяется условиями обеспечения нормальной работы потребителей электроэнергии, а в сетях 35 кВ — также условиями работы дугогасящих катушек. Согласно произведенным расчетам коэффициенты несимметрии напряжений в сетях с удлиненными циклами транспозиции оказываются сравнительно небольшими, обычно значительно меньшими 0,5%.

Ниже приводится метод определения несимметрии в сложных сетях и даются рекомендации по снижению возникающей несимметрии токов и напряжений.

Несимметрия напряжений и токов. Для получения представления о возможных величинах коэффициентов несимметрии напряжений и токов, вызываемой в электрических сетях удлинением циклов транспозиции или устранением транспозиции линии, целесообразно рассмотреть несколько типовых случаев.

Простейшим случаем является наличие в электрической системе одной несимметрированной линии, т. е. нетранспонированной линии или линии с удлиненным циклом транспозиции.

Если влияние поперечных проводимостей несимметрированной линии мало, то приближенно можно считать (см. приложение I), что величина коэффициента несимметрии напряжений в электрической системе прямо пропорциональна величине нагрузки этой линии, так как э. д. с. обратной и нулевой последовательностей прямо пропорциональны току прямой последовательности, протекающему по сопротивлениям Z_{11} и Z_{12} . Поэтому в данном случае наибольшая несимметрия напряжений получается в режиме наибольших нагрузок. Отсюда, кстати, видно, что для симметрирования такой линии достаточно одного цикла транспозиции, так как суммарные э. д. с. обратной и нулевой последовательностей тогда получатся равными нулю. При всех прочих равных условиях суммарные э. д. с. обратной и нулевой последовательностей, возникающие в нетранспонированной линии, прямо пропорциональны длине линии. Некоторое представление о наибольших возможных величинах коэффициентов несимметрии напряжений можно получить по данным, приведенным в табл. 1, где указаны относительные значения соответствующих э. д. с. для нескольких характерных случаев при экономической нагрузке линий.

Величины коэффициентов несимметрии токов при наличии в системе одной несимметрированной линии зависят соответственно от вида и параметров схем обратной и нулевой последовательностей. Если нетранспонированная линия входит в электрическую сеть как звено цепочки, то эквивалентные сопротивления обратной и нулевой по-

Таблица 1

Номинальное напряжение линий, кВ	Марка провода	Длина линии, км	Мощность нагрузки, тыс. кВт	Коэффициенты несимметрии напряжений, %	
				по обратной последовательности	по нулевой последовательности
35	АС-120	30	7,5	0,5	0,3
110	АС-240	100	45	1,1	0,6
220	АСУ-400	300	150	2,7	1,4

следовательностей, внешних по отношению к данному участку частей цепи (рис. 1), можно считать чисто реактивными и определять по величинам предельной отключаемой мощности соответствующих выключателей; чисто реактивным можно принять и сопротивление нулевой последовательности линии. Если нетранспонированная линия является частью сложной замкнутой сети, то сопротивления обратной и нулевой последовательностей внешней части цепи могут оказаться достаточно малыми, и в первом приближении их можно принять равными нулю; тогда коэффициенты несимметрии токов не будут зависеть от длины линии.

Некоторое представление о возможных величинах коэффициентов несимметрии токов можно получить по данным, приведенным в табл. 2, где

Таблица 2

Номинальное напряжение, кВ	Коэффициенты несимметрии токов, %			
	в цепочке		в замкнутой сети	
	по обратной последовательности	по нулевой последовательности	по обратной последовательности	по нулевой последовательности
35	0,8	—	7	0,4
110	4,7	0,6	7	0,7
220	6,3	1	6,6	1,1

указаны относительные значения токов обратной и нулевой последовательностей, полученные в упомянутых выше случаях. Данные нетранспонированных линий приняты такими же, как и в табл. 1.

Величины коэффициентов несимметрии токов в нетранспонированной линии не зависят от ее нагрузки.

Учет влияния емкостных проводимостей нетранспонированных линий, особенно в случае

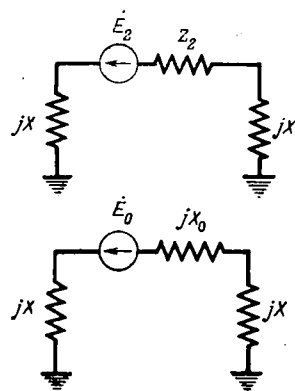


Рис. 1.

линий 220 кВ, вносит некоторые уточнения в расчеты и позволяет обнаружить влияние числа циклов транспозиции на линии.

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициентов несимметрии токов в зависимости от длины линии и числа циклов транспозиции при работе линии в цепочке. Эти графики показывают, что в большинстве

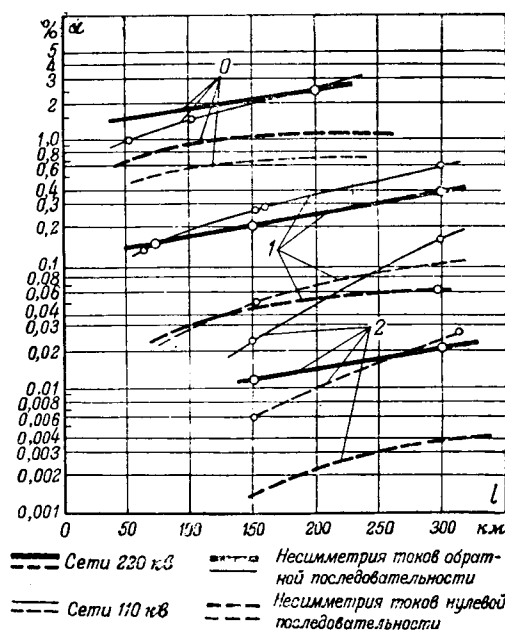


Рис. 2. Зависимость коэффициента несимметрии токов от длины линии.

0 — без транспозиции; 1 — один цикл транспозиции; 2 — два цикла транспозиции.

практически возможных случаев для отдельных линий цепочки в сетях с номинальным напряжением до 220 кВ включительно достаточно одного цикла транспозиции.

Если в цепочке имеется несколько нетранспонированных линий, то, изменяя расположение проводов на отдельных линиях, можно добиться некоторой компенсации э. д. с. обратной и нулевой последовательностей, возникающих в цепи, и, следовательно, снизить несимметрию напряжений и токов. Поскольку графики нагрузки линий на отдельных участках могут иметь различные формы, то взаимная компенсация э. д. с. не будет во всех режимах работы одинаковой. Как правило, определяющими являются режимы сравнительно больших нагрузок, причем наибольшее влияние оказывают самые загруженные и наиболее протяженные участки цепи.

Рассмотрение замкнутых электрических сетей с несколькими несимметризованными линиями удобно начать с двухцепной линии. Если обе цепи линии выполнены одинаково, то в первом приближении несимметрия напряжений и токов в цепи остается такой же, как и при одноцепной линии. Однако в данном случае величины коэффициентов несимметрии напряжений и токов могут измениться в связи с появлением дополнительной э. д. с. обратной последовательности $I_0 Z_{02}$ и дополнительной э. д. с. нулевой последовательности $I_2 Z_{21}$. Заметное отличие данного случая от случая цепочечной схемы заключается в сравнительно малом сопротивлении контура, состоящего из параллельных цепей, токам нулевой последовательности и существенном влиянии взаимной индуктивности между цепями при протекании токов нулевой последовательности. Это отличие объясняется тем, что ток нулевой последовательности

может протекать по замкнутому контуру, состоящему из цепей линии, не замыкаясь на землю.

Индуктивное сопротивление току нулевой последовательности, циркулирующему в контуре, состоящем из цепей линии, определяется так же, как сопротивление линии с двумя проводами, расстояние между которыми равно среднегеометрическому расстоянию между цепями, а радиус поперечного сечения провода — среднегеометрическому радиусу для каждой из цепей рассматриваемой двухцепной линии.

Несимметрия напряжений и токов в сложной замкнутой сети также может быть снижена путем соответствующего взаимного расположения проводов на отдельных нетранспонированных линиях. Суммарные э. д. с. обратной и нулевой последовательностей на цепочках линий, расположенных между узловыми точками сети и образующих замкнутые контуры, должны иметь наименьшие значения. Следует иметь в виду, что при нахождении напряжений и токов нулевой последовательности в сложной сети применение обычной схемы нулевой последовательности оказывается недостаточным (см. приложение II).

Эксплуатационные сведения о транспозиции в сетях. Согласно данным, полученным из энергосистем Советского Союза, в сетях 35 кВ и ниже транспозиция, как правило, не применяется. Линии 110...220 кВ большей частью транспонируются в соответствии с нормами [Л. 2]. Некоторые работающие линии 110 кВ длиной до 100 км не транспонированы. Длина цикла транспозиции на некоторых линиях 110...220 кВ превышает установленную нормами; в отдельных случаях она доходит до 100 км.

Во всех указанных случаях заметных помех на линиях связи, имеющих сближение с этими линиями электропередачи, обнаружено не было. Но были отмечены многочисленные случаи повреждения транспозиционных опор и связанные с ними отключения линий электропередачи.

Вследствие ослабленной междупазной изоляции на транспозиционных опорах линий без тросов отмечается много случаев грозových перекрытий. Устанавливаемые на транспозиционных опорах трубчатые разрядники часто сами являются причиной отключения линий и повреждения опор, в частности при повреждениях или затяжной работе разрядников. Кроме этого, наблюдаются случаи повреждений и перекрытий при грозе или ветре вследствие недостаточных расстояний между фазами линий или проводами и заземляющими спусками от разрядников на транспозиционных опорах.

С наличием транспозиционных опор на линиях связан ряд эксплуатационных неудобств. Недостаточные расстояния между фазами линий, а также между частями транспозиционных опор и токоведущими частями ограничивают возможность проведения ремонтных и профилактических работ по условиям безопасности и соображениям надежности электроснабжения. В частности, на транспозиционных опорах нельзя производить ремонтные работы под напряжением, а также эксплуатационные проверки изоляторов и соеди-

нителей. Наибольшее возможное сокращение числа транспозиционных опор позволяет свести к минимуму повреждения на линиях и облегчает проведение на них профилактических и ремонтных работ.

Опыт эксплуатации линий электропередачи за рубежом подтверждает выводы, основанные на отечественном опыте. В опубликованных иностранных материалах [Л. 3] отмечается, что значительное количество повреждений линий связано с пониженной механической и электрической прочностью транспозиционных опор. Поэтому во многих электрических системах допущено значительное удлинение циклов транспозиции, а в некоторых случаях — и полный отказ от транспозиции линий. Это, как показал опыт, в большинстве случаев не привело к каким-либо нарушениям нормальной работы релейной защиты и появлению практически заметных мешающих влияний на линии связи. В отдельных случаях чрезмерно тесного сближения отмечалось появление заметных помех в телеграфных цепях. Однако для ликвидации этих помех достаточно было осуществления одного цикла транспозиции, что приводило к достаточному снижению тока нулевой последовательности основной частоты, или применения на линиях связи соответствующих защитных мер, не требующих значительных дополнительных затрат.

Как следует из ориентировочных расчетов, токи прямой последовательности основной частоты при нетранспонированных линиях могут оказывать заметное мешающее влияние на телеграфные цепи только в случае сравнительно небольшой (порядка 200 м) ширины сближения.

Таким образом, опыт эксплуатации, накопленный в СССР и за границей, показывает, что увеличение длин циклов транспозиции линий дает положительный эффект, так как приводит к улучшению условий эксплуатации линий и повышению эксплуатационной надежности работы воздушных электрических сетей.

Выводы. 1. Транспозиционные опоры являются слабым местом, снижающим надежность электроснабжения, а также усложняющим и удорожающим эксплуатацию линий. Применение нетранспонированных линий и линий с удлиненными циклами транспозиции повышает эксплуатационные качества электрических сетей, не вызывая заметных нарушений нормальной работы установок.

2. При отсутствии транспозиции линий в сетях 110...220 кВ коэффициенты несимметрии токов могут достигать заметных значений (порядка нескольких процентов). Однако осуществление одного цикла транспозиции на линиях 110...220 кВ оказывается, как правило, достаточным для снижения коэффициентов несимметрии токов в цепи до приемлемых величин: не более 1% — по обратной и не более 0,1% — по нулевой последовательности. Коэффициенты несимметрии напряжений получаются еще меньшими. Линии длиной до 100 км могут сооружаться без транспозиции.

3. Поскольку в сетях с заземленной нейтралью транспозиция линий приводит к снижению токов нулевой последовательности только основной частоты, то рассматривать транспозицию в качестве мероприятия по снижению помех в низкочастотных телефонных каналах не следует. Для устранения мешающих влияний на телеграфные цепи практически достаточно осуществления только одного цикла транспозиции на линиях электропередачи.

4. Применение транспозиции на линиях сетей 35 кВ не вызывает необходимости. В сетях 35 кВ с компенсированной нейтралью равенство проводимостей фаз достигается различием в расположении проводов на отдельных линиях.

5. Основное действие на телеграфные цепи оказывают токи нулевой последовательности, замыкающиеся через землю. Поэтому для расчетов мешающих влияний требуется находить распределение токов нулевой последовательности по цепи.

Приложение I. Определение несимметрии напряжений и токов. Строгий расчет несимметрии напряжений и токов в сложной сети, содержащей несколько несимметризованных линий, связан со значительными техническими трудностями. Ниже излагается приближенный метод расчета несимметричных режимов электрической системы, применимый при сравнительно небольшом различии между параметрами отдельных фаз участков цепи.

Если предположить, что все участки цепи являются полнофазными, т. е. исключить случаи полного разрыва отдельных ее фаз, то любой участок цепи можно представить в виде трехфазной симметричной П-образной схемы замещения (рис. 3).

При операциях с симметричными составляющими напряжений

$$\dot{U} = |\dot{U}_1 \dot{U}_2 \dot{U}_0|$$

и токов

$$\dot{I} = |\dot{I}_1 \dot{I}_2 \dot{I}_0|$$

матрицы параметров имеют следующий вид [Л.1]:

$$Z = \begin{vmatrix} Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{22} & Z_{20} & Z_{21} \\ Z_{01} & Z_{02} & Z_{00} \end{vmatrix};$$

$$Y = \begin{vmatrix} Y_{10} & Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{22} & Y_{20} & Y_{21} \\ Y_{01} & Y_{02} & Y_{00} \end{vmatrix}.$$

Следует иметь в виду, что диагональные члены этих матриц по абсолютному значению в десятки раз больше других членов.

Для любого участка схемы (рис. 4)

$$\dot{U} = \dot{U}' + iZ$$

и, следовательно, для замкнутого контура схемы

$$\sum iZ = 0.$$

Для любого узла схемы (рис. 5)

$$\sum \dot{I} = \dot{U}Y.$$

В рассматриваемом случае, когда несимметрия напряжений заведомо мала, т. е.

$$U_2 \ll U_1 \text{ и } U_0 \ll U_1$$

¹ Здесь имеется в виду только равенство поперечных проводимостей по концам.

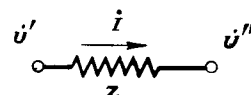


Рис. 4.

и несимметрия токов на участках с большой нагрузкой также мала:

$$I_2 \ll I_2 \text{ и } I_0 \ll I_1,$$

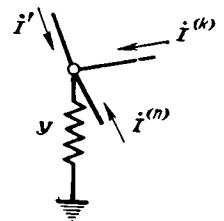


Рис. 5.

решение задачи можно существенно упростить, если пренебречь влиянием величин $\dot{I}_2 Z_{22} + \dot{I}_0 Z_{01}$ и $\dot{U}_2 Y_{22} + \dot{U}_0 Y_{01}$ по сравнению соответственно с произведениями $\dot{I}_1 Z_{10}$ и $\dot{U}_1 Y_{10}$, произведений $\dot{I}_0 Z_{02}$ и $\dot{U}_0 Y_{02}$ по сравнению соответственно с величинами $\dot{I}_1 Z_{11} + \dot{I}_0 Z_{20}$ и $\dot{U}_1 Y_{11} + \dot{U}_0 Y_{20}$ и произведений $\dot{I}_2 Z_{21}$ и $\dot{U}_2 Y_{21}$ по сравнению соответственно с величинами $\dot{I}_1 Z_{12} + \dot{I}_0 Z_{00}$ и $\dot{U}_1 Y_{12} + \dot{U}_0 Y_{00}$.

Тогда матрицы параметров можно упростить:

$$Z \approx \begin{vmatrix} Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ 0 & Z_{20} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{00} \end{vmatrix}$$

и

$$Y \approx \begin{vmatrix} Y_{10} & Y_{11} & Y_{12} \\ 0 & Y_{20} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{00} \end{vmatrix}.$$

При этом схема прямой последовательности получается независимой от схем других последовательностей, так как согласно принятому упрощению протекание токов обратной и нулевой последовательностей не связано с заметным изменением падения напряжения прямой последовательности, равно как и наличие напряжений обратной и нулевой последовательностей не связано с заметным изменением токов прямой последовательности. Напряжения и токи прямой последовательности в такой несимметричной цепи могут быть найдены обычным путем — по схеме прямой последовательности, содержащей средние параметры фаз Z_{10} и Y_{10} .

После определения напряжений и токов прямой последовательности становятся известными произведения $\dot{I}_1 Z_{11}$ и $\dot{I}_1 Z_{12}$ для каждого из продольных участков цепи; их можно рассматривать как э. д. с. соответственно обратной и нулевой последовательностей, которые взяты с обратным знаком и положительное направление которых одинаково с направлением токов $\dot{I}_1$, протекающих по тем же участкам или которые взяты с тем же знаком и положительное направление которых противоположно направлению указанных токов, т. е. $\dot{E}_2 = -\dot{I}_1 Z_{11}$ и $\dot{E}_0 = -\dot{I}_1 Z_{12}$. Так же становятся известными произведения $\dot{U}_1 Y_{11}$ и $\dot{U}_1 Y_{12}$ для каждого из узлов схемы; их можно рассматривать как задающие (нагрузочные) токи соответственно обратной и нулевой последовательностей, оттекающие от этих узлов:

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_1 Y_{11} \text{ и } \dot{I}_0 = \dot{U}_1 Y_{12}.$$

Согласно принятому упрощению протекание токов обратной последовательности по несимметризованным продольным звеньям цепи не связано с заметным падением напряжения нулевой последовательности на этих звеньях, равно как и протекание по ним токов нулевой последовательности не связано с заметным падением напряжения обратной последовательности. Действие на соответствующих поперечных звеньях цепи напряжения обратной последовательности не вызывает в них заметных токов нулевой последовательности, равно как и действие на тех же звеньях напряжения нулевой последовательности не вызывает заметных токов обратной последовательности. В соответствии с этим напряжения и токи обратной и нулевой последовательностей в любом месте цепи могут

быть найдены по независимым схемам соответствующих последовательностей с параметрами Z_{20} , Y_{20} и Z_{00} , Y_{00} .

Найденные величины полностью определяют несимметричный режим работы исследуемой электрической сети. Точность такого расчета получается тем большей, чем меньше величины коэффициентов несимметрии напряжений и значения токов обратной и нулевой последовательностей в рассматриваемой цепи. Пользуясь данным методом расчета, можно так подобрать схемы и длины циклов транспозиции линий в сложной замкнутой сети, чтобы величины коэффициентов несимметрии напряжений и токов были наименьшими и приемлемыми. При этом может быть учтено и влияние всех прочих причин несимметрии напряжений и токов в электрической системе.

При определении индуктивных сопротивлений и емкостных проводимостей нетранспонированных участков линий можно пользоваться указаниями, приведенными в существующей литературе [Л. 4 и 5]. В частности, для линий с гори онталным расположением проводов индуктивные сопротивления имеют следующие постоянные значения² [Л. 6]: $X_{11} = -0,029 \text{ ом/км}$ и $X_{12} = 0,0145 \text{ ом/км}$, если фаза a расположена в середине. При другом расположении проводов аргументы этих сопротивлений отличны от нуля³ (табл. 3).

Таблица 3

Расположение проводов различных фаз			Z_{11}	Z_{12}
a	b	c	jaX_{11}	ja^2X_{12}
○	○	○		
c	a	b	jX_{11}	jX_{12}
○	○	○		
b	c	a	ja^2X_{11}	jaX_{12}
○	○	○		

Чем меньше разница в расстояниях между проводами линий, тем меньшими получаются значения X_{11} и X_{12} . При одинаковых расстояниях между проводами, т. е. при расположении проводов по вершинам равностороннего треугольника, $X_{11} = X_{12} = 0$.

Таблица 4

Номинальное напряжение линии, кВ	B_{11} $10^{-6}/\text{ом} \cdot \text{км}$	B_{12} $10^{-6}/\text{ом} \cdot \text{км}$
35	0,2	0,06
110	0,22	0,06
220	0,19	0,05

В табл. 4 приведены значения емкостных проводимостей B_{11} и B_{12} на 1 км для линий 35...220 кВ стандартных конструкций при горизонтальном расположении проводов и расположении фазы a в середине. В табл. 5 даны значения проводимостей Y_{11} и Y_{12} в зависимости от взаимного расположения проводов различных фаз.

Таблица 5

Расположение проводов различных фаз			Y_{11}	Y_{12}
a	b	c	jaB_{11}	ja^2B_{12}
○	○	○		
c	a	b	jB_{11}	jB_{12}
○	○	○		
b	c	a	ja^2B_{11}	jaB_{12}
○	○	○		

² Сопротивления подсчитаны без учета влияния земли. Как обычно, предполагается, что расчет ведется для фазы a .

³ Комплексные значения сопротивлений указывают на факт передачи энергии от одной фазы линии к другой при помощи индуктивной связи.

Приложение II. Нахождение распределения токов нулевой последовательности. Сопротивление нулевой последовательности линий обычно определяется в предположении, что обратные токи протекают в земле. Однако в несимметричном режиме работы электрической сети ток, протекающий в земле между заземленными нулевыми точками трансформаторов, может не соответствовать току нулевой последовательности, протекающему по линии, которая соединяет эти пункты сети. Кроме токов нулевой последовательности, замыкающихся через землю, по линии может протекать ток нулевой последовательности, замыкающийся по контуру самой сети, состоящему из проводов линий, а также по тросам линии. Очевидно, э. д. с. самоиндукции, наведенная в проводах какой-либо линии током нулевой последовательности, замыкающимся через землю, может существенно отличаться от э. д. с. самоиндукции, наведенной таким же по величине током нулевой последовательности, но замыкающимся по проводам цепочки линий. Эта разница зависит от формы и размеров контура, состоящего из линий, и удельной проводимости земли в данной местности. Поэтому задача нахождения распределения токов нулевой последовательности в замкнутой сети представляет известные практические трудности. В первом приближении можно предложить следующий порядок расчета.

Составляется принципиальная схема, в которой фиксируются контуры, соответствующие возможным путям протекания токов нулевой последовательности. В числе этих контуров могут быть контуры линия — земля — тросы и контуры, состоящие из одних линий сети (имеются в виду только взаимно независимые контуры).

Индуктивность контура линия — земля — тросы определяется по обычным формулам индуктивности нулевой последовательности линии и полностью относится к линии. Индуктивность L контура, состоящего из линий сети, можно определить приближенно, заменив его кольцевым или прямоугольным контуром с тем же периметром π или, когда длина контура значительно превышает его ширину, — двухцепной линией с некоторым средним расстоянием между цепями. Индуктивность L_l любой цепи, входящей в этот контур, можно определить путем простого пересчета:

$$L_l = L \frac{l}{\pi},$$

где l — длина данной линии.

Расчет выполняется путем совместного решения контурных уравнений. Для некоторого контура k уравнение имеет следующий вид:

$$i_k j\omega L_k - \sum_{p \neq k} i_p j\omega L_{pk} = \sum E_{0k},$$

где i_k — ток нулевой последовательности, замыкающийся по контуру k ;

i_p — ток нулевой последовательности, замыкающийся по контуру p , который имеет с контуром k общий участок сети;

L_k — индуктивность контура k ;

L_{pk} — индуктивность участка сети, являющегося общим для контуров p и k , если рассматривать его как часть контура p ;

E_{0k} — э. д. с. нулевой последовательности, возникшая в линиях, входящих в контур k , вследствие протекания токов прямой последовательности по несимметрированным участкам.

Токи нулевой последовательности в линиях получаются путем суммирования соответствующих контурных токов. Электродвижущая сила нулевой последовательности, возникшая в каждой из цепей двухцепной линии, помещается в соответствующей ветви разветвления схемы замещения этой линии. Внешние контурные токи при этом могут считаться распределенными по цепям поровну.

Литература

И. А. И. Гершенгорн, А. Н. Шеренцис и Н. А. Мельников. Транспозиция длинных линий электропередачи. Электричество, № 1, 1953.

Влияние увлажнения на электрические характеристики изоляционной резины

Профессор С. М. БРАГИН

Московский энергетический институт им. Молотова

Кандидат техн. наук М. М. МАРКОСЯН

Ереванский политехнический институт им. К. Маркса

Вопрос об увлажнении изолирующих материалов, в частности резиновой изоляции, имеет особо важное значение в кабельной технике в деле изготовления влагостойких проводов и кабелей без металлических оболочек. Влагостойкость таких проводов и кабелей предопределяется влагонепроницаемостью гибких оболочек и неметаллических покровов и влагостойкостью изолирующего слоя.

В ряде советских и зарубежных работ [Л. 1, 2 и 3] рассматривается весь комплекс вопросов, связанных с изоляцией, применяемой при изготовлении этих изделий, однако вопрос о влагостойкости изоляционной резины, точнее о зависимости электрических характеристик этого материала от длительности увлажнения и процента содержания в нем влаги, еще недостаточно исследован. Совершенно не освещен вопрос о снижении пробивной прочности резиновой изоляции в зависимости от процента содержания в ней влаги.

Для пропитанной бумажной изоляции характеристика снижения пробивной прочности в зави-

симости от процента содержания влаги была исследована еще в 1941 г. [Л. 4]; для резиновой изоляции подобные исследования нам неизвестны ни в советской, ни в зарубежной литературе.

В кабельной лаборатории МЭИ им. Молотова в 1952...1953 гг. проводилось исследование электрических характеристик и пробивной прочности изоляционной резины с 50-, 80- и 100-процентным содержанием синтетического каучука (резины марок ТС-45, ТС-35 и ТС-30), а также резины марки ТСШМ-35 с преобладающим содержанием натурального каучука. Исследовались влагопоглощаемость образцов резины по приращению веса, изменение ϵ и $\tan \delta$ и пробивной прочности при переменном напряжении 50 гц в зависимости от длительности увлажнения.

Количество поглощаемой влаги в процентах от веса образцов резины W в зависимости от длительности их увлажнения в воде и пребывания в атмосфере воздуха со 100-процентной влажностью при различных температурах показано на рис. 1. Количество поглощенной влаги (рис. 1) зависит от состава резины и вообще больше при увлажнении погружением в воду, чем в результате хранения в атмосфере влажного воздуха.

Если считать, что коэффициент диффузии D не зависит от влажности, то получается известное уравнение, связывающее распределение влаги в материале с изменением ее во времени

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (1)$$

Приближенное решение этого уравнения (приложение) для случая увлажнения погружением в воду дает среднюю влажность W_c образца толщиной δ в зависимости от равновесной влажности W_∞ :

$$W_c = W_\infty (1 - 0,64 \cdot e^{-at}), \quad (2)$$

где

$$a = \frac{4 \cdot \pi^2 D}{\delta^2} = \frac{1}{\tau};$$

τ — постоянная времени кривой увлажнения, которая может быть определена графически.

Значения коэффициента диффузии D , вычисленные из (2), для исследованных образцов резины приведены в табл. 1.

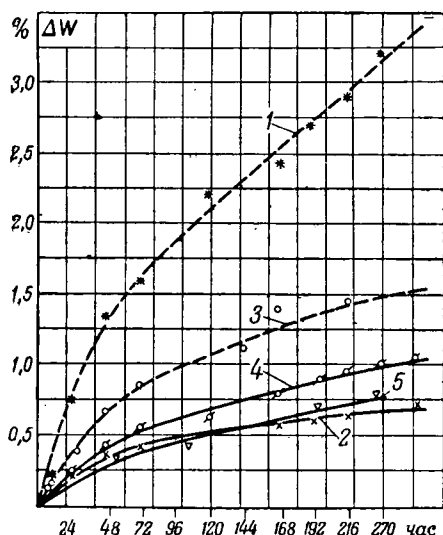


Рис. 1. Относительное приращение веса изоляционной резины толщиной 1 мм в зависимости от времени увлажнения.

1 — резина марки ТСШМ-15, увлажненная в воде, температура воды 22...70° С; 2 — то же при 20...22° С; 3 — резина марки ТС-45 при 20...70° С; 4 — то же при 20...22° С; 5 — резина марки ТС-45, хранение в атмосфере 100-процентной влажности.

2. Правила ограждения сооружений связи и сигнализации от вредного действия установок сильного тока. Госэнергоиздат, 1944.

3. А. И. Гершенгорн и А. Н. Шеренцис. Транспозиция линий электропередачи (обзор). Электричество, № 4, 1954.

4. А. М. Залесский. Передача электрической энергии. Госэнергоиздат, 1948.

5. Н. А. Мельников. Расчеты режимов работы сетей электрических систем. Госэнергоиздат, 1950.

6. А. И. Гершенгорн и Н. А. Мельников. Расчет несимметрии в электрической системе при увеличенной длине цикла транспозиции на длинных линиях. Труды Всесоюзного заочного энергетического института, вып. 3. Госэнергоиздат, 1954.

[25.6.1954]

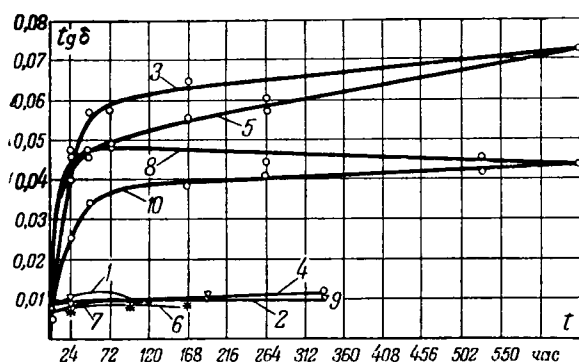


Рис. 2

1, 2, 3 — резина марки ТС-30; 4, 5 — марки ТС-35; 6, 7, 8 — марки ТС-45; 9, 10 — марки ТСШМ-35 (кривые 1, 6 — 20-процентная относительная влажность воздуха; 2, 7, 8 — 50-процентная влажность).

Таблица 1

Марка резины	Коэффициент диффузии D $10^{-7} \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$
ТСШМ-35	10
ТС-45	8,3
ТС-35	8,3
ТС-30	60

В установившемся режиме увлажнения количество влаги, прошедшее через перегородку толщиной δ и площадью S ,

$$Q = B \frac{\Delta p S}{\delta} t, \quad (3)$$

где Δp — разность давлений по обе стороны перегородки. Отсюда получаем коэффициент влагопроницаемости

$$B = \frac{Q \delta}{\Delta p S t} \left[\frac{2}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{мм рт.ст.}} \right]. \quad (4)$$

Если коэффициент диффузии D помножить на изменение влажности в зависимости от давления $\left| \frac{dW}{dp} \right|$, то получим:

$$B = D \cdot \frac{dW}{dp}.$$

Тангенс угла потерь $\text{tg } \delta$ и ϵ (рис. 2 и 3) резины в зависимости от длительности увлажнения измерялись при напряжении 600 в и частоте 50 гц на высоковольтном мосте. На рис. 2 приведен $\text{tg } \delta$, а на рис. 3 — ϵ образцов изоляционной резины (пластинок) толщиной 1 мм в зависимости от длительности их увлажнения в воздухе разной относительной влажности (20, 50 и 100%). Исходные электрические характеристики образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Марка резины	$\text{tg } \delta$	ϵ	Пробивная прочность E , кв/мм
ТСШМ-35	0,0053	3,74	29
ТС-45	0,0052	3,2	26
ТС-35	0,0071	3,28	24
ТС-30	0,0079	3,54	24

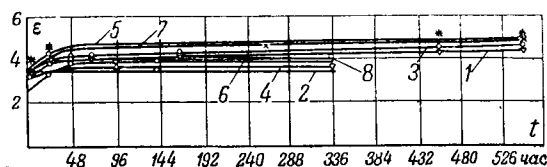


Рис. 3. Диэлектрическая проницаемость вулканизированных резин толщиной 1,0 мм в зависимости от времени их увлажнения при напряжении $U=600$; $f=50$ гц.

1 и 2 — резина марки ТС-45 при 100- и 50-процентной относительной влажности воздуха; 3, 4 — марки ТС-35 при 100- и 50-процентной влажности; 5, 6 — резина марки ТС-50 при 100- и 50-процентной влажности; 7, 8 — марки ТСШМ-35 при 100- и 50-процентной влажности.

Несмотря на то, что испытываемые образцы представляли собой большое разнообразие как по содержанию каучука, так и составу резиновых смесей, существенного изменения электрических характеристик пластинок с их увлажнением не наблюдалось.

Из рис. 2 следует, что в атмосфере воздуха, не насыщенного парами воды (20 и 50% относительной влажности), практически увлажнения не происходит. При 100% относительной влажности воздуха $\text{tg } \delta$ для всех образцов в первые сутки увлажнения увеличивается быстро, затем медленно или даже совсем убывает. Это объясняется тем, что вначале неоднородность резины резко возрастает за счет увлажнения поверхности образца, затем по мере продвижения влаги внутрь неоднородность выравнивается.

Диэлектрическая проницаемость ϵ всех испытанных образцов изменялась примерно одинаково.

Удельное объемное сопротивление исследованных образцов резины заключалось в пределах $10^{13} \dots 4 \cdot 10^{15} \text{ ом} \cdot \text{см}$ для сухой резины и снижалось на одну-две степени в первые 5...6 дней после увлажнения; затем оно больше почти не изменялось.

Подобные же измерения были осуществлены для проводов с изоляцией из резины тех же марок, что и испытанные образцы (рис. 4).

Влияние длительности увлажнения на пробивную прочность резины исследовалось на образцах в виде круга диаметром 70 мм при толщине 1 мм. Пробой производился между стальными электродами, опрессованными полупроводящей резиной (рис. 5). При таких электродах можно было пробивать образцы в воздухе при напряжениях до 20...25 и в масле до 50 кв. Для обеспечения плотного прилегания электродов к поверхности образца на верхний электрод клался груз 3 кг.

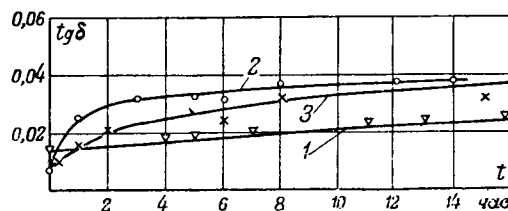


Рис. 4. $\text{tg } \delta$ обрезанных жил в зависимости от времени увлажнения при напряжении $U=600$ в, $f=50$ гц.

1 — резина марки ТСШМ-35; 2 — резина марки ТС-45; 3 — резина марки ТС-35.

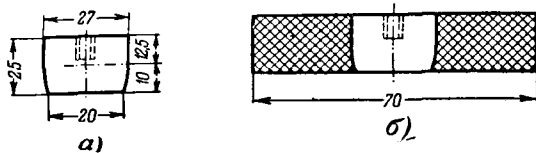


Рис. 5.

а — профиль электрически равнопрочного электрода;
б — электрод, опрессованный сезанитовой резиной.

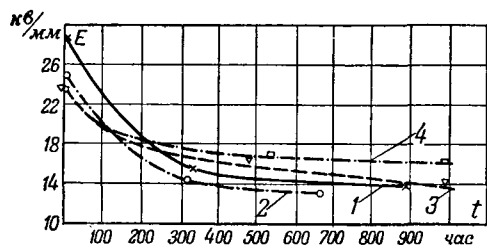


Рис. 6. Пробивное напряжение вулканизированных изоляционных резин толщиной 1,0 мм в зависимости от времени увлажнения (эксикатор, 100-процентная влажность воздуха).

Испытанию подвергались сначала 50 образцов каждой марки после 24-часовой сушки в термостате при 50...60°С, затем образцы резины известное время выдерживались в эксикаторе с относительной влажностью воздуха 100% и тоже испытывались на пробой. Для резины марок ТСШМ-35 и ТС-45 определялась пробивная прочность образцов в зависимости от длительности увлажнения в воде. При испытании напряжение поднималось от нуля до пробоя со средней скоростью около 1 кВ/сек. Результаты испытаний приведены на рис. 6. Наибольшее снижение электрической прочности наблюдалось в начальный период увлажнения; затем снижение замедлялось.

Кривые нормального распределения пробивной прочности исследованных образцов резины (рис. 7), выражающие зависимость между значением пробивного напряжения и числом пробитых при этом напряжении образцов, показывают, что с увеличением длительности увлажнения пробивная прочность уменьшается в среднем с 29 кВ/мм для сухой резины до 13...14 кВ/мм после длительного ее увлажнения.

Выводы. 1. Как показало исследование, $\operatorname{tg} \delta$, ϵ и пробивная прочность изоляционной резины снижаются в процессе увлажнения сначала быстро, потом медленно до некоторых значений, которые при дальнейшем увлажнении почти не изменяются.

2. Содержание синтетического каучука в количестве 50...100% практически не приводит к ухудшению электрических характеристик; абсорбция влаги даже уменьшается.

Приложение. Решая уравнение

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}$$

при граничных условиях:

$$t = 0; x = 0; W = 0 \text{ и } x = \delta/2; W = W_0,$$

получаем общее выражение для влажности в любой точке x по толщине пластины в зависимости от времени:

$$W = W_0 \left[\frac{2x}{\delta} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{-1}{n} \right) e^{-\frac{4Dn^2\pi^2}{\delta^2} t} \cdot \sin \frac{2\pi x \cdot n}{\delta} \right]. \quad (I,1)$$

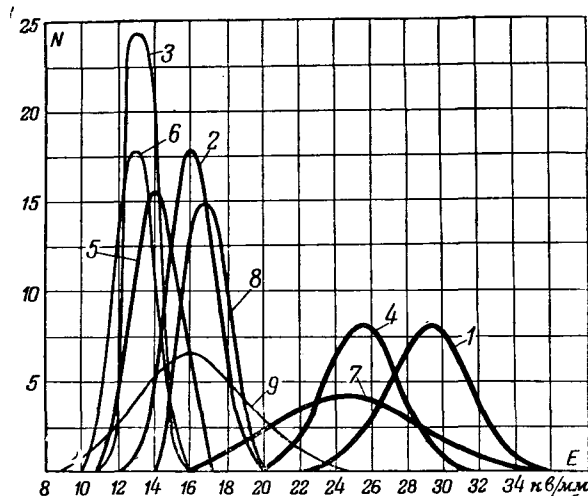


Рис. 7. Нормальное распределение повторяемости пробивных напряжений образцов резины толщиной 1,0 мм (переменный ток).

1, 2, 3 — резина марки ТСШМ-35; 4, 5, 6 — резина марки ТС-45; 7, 8, 9 — резина марки ТС-3 (1, 4, 7 — высушенная резина; 2, 5, 8 — увлажненная; 3, 6, 9 — увлажненная до состояния насыщения).

Раскрывая сумму и ограничиваясь значениями $n = 1$ и 2, получаем:

$$W = W_0 \left\{ \frac{2x}{\delta} - \frac{2}{\pi} \left[e^{-\frac{4D\pi^2}{\delta^2} t} \sin \frac{2\pi x}{\delta} + e^{-\frac{16D\pi^2}{\delta^2} t} \sin \frac{4\pi x}{\delta} \right] \right\}. \quad (I,2)$$

Это уравнение может быть применено в нашем случае при том условии, что в конце процесса увлажнения распределение влаги по толщине пластины будет равномерным; иначе говоря, при $t \rightarrow \infty$ влажность образца одинакова во всех точках и равна равновесной влажности W_∞ при $x = 0$ и $x = \frac{\delta}{2}$.

Введем в (1) некоторые коэффициенты

$$A(x) = \frac{A}{x} \text{ и } B;$$

тогда получим:

$$W = W_0 \left\{ A(x) \frac{2x}{\delta} - B \frac{2}{\pi} \left[e^{-\frac{4\pi^2 D}{\delta^2} t} \sin \frac{2\pi x}{\delta} + e^{-\frac{16\pi^2 D}{\delta^2} t} \sin \frac{4\pi x}{\delta} \right] \right\}. \quad (I,3)$$

Из граничных условий получаем:

$$A \frac{2}{\delta} W_0 = W_\infty \text{ и } B = \frac{\pi}{2},$$

где

$$A = \frac{\delta}{2},$$

подставив в (3), получим окончательно:

$$\frac{W}{W_0} = 1 - e^{-\frac{4\pi^2 D}{\delta^2} t} \sin \frac{2\pi x}{\delta} \left[1 - 2e^{-\frac{12\pi^2 D}{\delta^2} t} \cos \frac{2\pi x}{\delta} \right]. \quad (I,4)$$

Залаваясь максимальной ошибкой определения экспоненциального члена уравнения (4) в 2%, получим приближенное выражение:

$$\frac{W}{W_0} \approx 1 - e^{-\frac{4\pi^2 D}{\delta^2} t} \sin \frac{2\pi x}{\delta}, \quad (I,5)$$

при условии что

$$\frac{D}{\delta^2} \cdot t \geq 0,04,$$

которое почти всегда выполняется для значений $t \geq 1$ час.

Общие закономерности теплового старения полимерных диэлектриков

Кандидат техн. наук В. И. КАЛИТВЯНСКИЙ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

При длительном нагревании полимерных диэлектриков в них происходят необратимые физико-химические процессы, приводящие к структурным изменениям, чем обусловлены соответствующие изменения физических, механических и электрических характеристик этих диэлектриков.

Большинство исследователей, изучавших тепловое старение полимерных диэлектриков — в первую очередь целлюлозных волокнистых материалов, ограничивалось установлением чисто эмпирических зависимостей, не связывая экспериментально установленные изменения характеристик с кинетикой физико-химических процессов. Таким образом, например, появилось так называемое «правило десяти градусов», согласно которому повышение температуры на десять (или другое число) градусов уменьшает срок жизни изоляции вдвое [Л. 1]. Этим и другими эмпирическими правилами широко пользуются при подсчетах сроков жизни изоляции [Л. 2, 3 и др.].

Вместе с тем экспериментальный материал, полученный автором, а также другими исследователями, показывает, что изменения физических, электрических и особенно механических характеристик полимерных диэлектриков в процессе теплового старения подчиняются вполне определенным закономерностям, обусловленным кинетикой физико-химических процессов.

Анализ процессов в полимерных диэлектриках три тепловом старении показывает, что они складываются из следующих основных элементов: 1) полимеризации и поликонденсации; 2) окислительных процессов и 3) термической деструкции.

Полимеризация и поликонденсация. Если в макромолекулах полимерных диэлектриков имеются свободные реактивные функциональные группы или же двойные связи, не использованные ранее, то при нагревании таких диэлектриков в них будут происходить процессы полимеризации и конденсации. Следует отметить, что скорость этих процессов относительно невелика вследствие высокой вязкости системы и малой подвижности макромолекул. Тем не менее процессы полимеризации и поликонденсации завершаются только тогда, когда использованы все доступные реактив-

ные точки. В процессе теплового старения скорость полимеризации и поликонденсации снижается по экспоненциальному закону, так как, с одной стороны, количество реактивных точек уменьшается, а, с другой стороны, из-за образования все большего числа поперечных межмолекулярных связей («мостиков») в реактивных точках вязкость системы возрастает. В результате подвижность макромолекул уменьшается, а значит, падает и статистическая вероятность их соприкосновения в реактивных точках.

После перехода полимерного диэлектрика в стеклообразное состояние процессы полимеризации и поликонденсации практически заканчиваются.

При тепловом старении полимерных диэлектриков скорость процессов полимеризации и поликонденсации определяется следующими основными факторами: характером реактивных групп и двойных связей, количеством реактивных точек, структурой макромолекул, вязкостью системы, наличием катализаторов и ингибиторов, а также температурой, светом, давлением, электрическим полем и др. Влияние этих факторов на скорость процессов полимеризации и поликонденсации полимерных диэлектриков в процессе теплового старения весьма сложно. Однако можно полагать, что и в случае теплового старения применимы общие закономерности, установленные для процессов полимеризации и поликонденсации высокополимерных соединений.

Следовательно, при тепловом старении в полимерных диэлектриках, содержащих неиспользованные реактивные точки, будут происходить процессы, приводящие к укрупнению молекулярных комплексов с образованием сетчатых и пространственных структур. Одновременно будут увеличиваться жесткость и механическая прочность диэлектриков.

Окислительные процессы. В полимерных диэлектриках при повышенных температурах и наличии кислорода воздуха происходят сложные окислительные процессы. Наиболее энергичные окислительные процессы возникают в таких диэлектриках, как целлюлоза, резина, высыхающее

Общий прирост влаги при увлажнении пластинки, отнесенный к 1 см^2 ее поверхности, получим в результате интегрирования (1.5) по толщине пластинки:

$$W = W_{\infty} \left[\frac{\delta}{2} - e^{-at} \left(\frac{\delta}{2\pi x} \right) \cos \frac{2\pi x}{\delta} \right]_{x=0}^{\delta/2} = \\ = W_{\infty} \left(1 - \frac{2}{\pi} e^{-at} \right) \frac{\delta}{2}.$$

Разделив это уравнение на $\delta/2$, получим среднее значение влажности образца в зависимости от времени увлажнения

$$W_c = W_{\infty} (1 - 0,64e^{-at}). \quad (2)$$

Литература

1. М. М. Михайлов. Труды научно-технической сессии по электрической изоляции. Госэнергоиздат, 1949.
2. П. Н. Горшков. Основы техники кабелей силового тока. Госэнергоиздат, 1940.
3. С. М. Брагин. Эластомеры. Справочники по электрической изоляции. Госэнергоиздат, 1948.
4. С. М. Брагин. Исследование электрических характеристик кабельной изоляции на моделях кабеля. Электричество, № 12, 1946.

[20.10.1954]



масло и др., содержащих легко окисляющиеся реактивные группы.

По отношению к окислению полимерные диэлектрики могут быть разделены на следующие основные группы: а) весьма устойчивые к окислению — полиорганосилоксаны, политетрафторэтилен и др.; б) относительно устойчивые к окислению — фенольно-формальдегидные смолы, винифлекс, некоторые полностью замещенные эфиры целлюлозы (триацетат и ацетобутират), алкидные смолы и др.; в) малоустойчивые к окислению — целлюлоза, органическая резина, поливиниловый спирт и др. подобные им диэлектрики, содержащие легко окисляющиеся реактивные группы.

Скорость окислительных реакций в полимерных диэлектриках при тепловом старении зависит от следующих основных факторов: 1) структуры макромолекул, в первую очередь от количества легко окисляющихся групп и двойных связей в цепях главных валентностей; наличие метильного радикала у атома углерода, сопряженного с двойной связью, интенсифицирует окислительные процессы; наоборот, присутствие отрицательных заместителей (C_6H_5 , $COOH$) у атома углерода с двойной связью замедляет процессы; 2) концентрации кислорода воздуха; 3) температуры; 4) поверхности соприкосновения диэлектрика с воздухом; 5) света, особенно с длиной волны около 2800...3000 Å; 6) наличия катализаторов и ингибиторов; 7) наличия в диэлектрике или окружающей среде кислотных продуктов и др.

Несмотря на сложность окислительных процессов в полимерных диэлектриках при тепловом старении, все же имеющиеся данные позволяют утверждать, что кинетика этих процессов укладывается в известные из физической химии закономерности, установленные для кинетики мономерных химических реакций. Так, для таких полимеров, как резина и пленки высыхающих масел, скорость первичных окислительных реакций может быть выражена по Оствальду для автокаталитических реакций:

$$\frac{dx}{dt} = k(a - x)(b - y),$$

где x — число присоединившегося кислорода за время t ;

y — число перекисей и катализаторов в полимерном диэлектрике в исходный момент;

a — предельное количество кислорода, которое может присоединиться;

b — исходная концентрация перекисей и катализаторов;

k — константа скорости, зависящая от таких факторов, как структура полимера, температура, поверхность соприкосновения с воздухом, концентрация кислорода и др.

Константа скорости k в процессе теплового старения меняется, так как изменяется исходная структура полимерного диэлектрика и в нем накапливаются продукты окислительной деструкции, оказывающие влияние на скорость реакции окис-

ления. Это приводит к усложнению закономерностей, которые имеют место при тепловом старении.

Следует отметить, что дальнейшие реакции превращения перекисей и окисей, приводящие к разветвлению и сшиванию макромолекул, образованию циклов, а также разрыву цепей, определяются скоростью первичных реакций окисления.

Для окислительных процессов, происходящих при тепловом старении полимерных диэлектриков, можно также применить с некоторыми оговорками и уравнение Вант-Гоффа-Аррениуса, устанавливающее количественную связь скорости реакции с температурой:

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{A}{RT^2},$$

где T — абсолютная температура, °K;

R — газовая постоянная;

A — величина энергии активации;

k — константа скорости.

Учитывая, что окислительные процессы полимерных диэлектриков складываются из ряда параллельно идущих реакций, скорость которых при разных температурах различна, следует считать, что общая суммарная константа скорости сама является функцией температуры.

В общем случае, когда при окислении полимерных диэлектриков имеют место несколько реакций с различной температурной константой скорости, уравнение, связывающее константы скорости с температурой, будет иметь сравнительно сложный вид.

Все структурные изменения в полимерных диэлектриках при тепловом старении в результате тех или иных окислительных процессов могут быть разделены на две основные группы:

1) изменения, приводящие к разветвлению, сшиванию цепей и образованию циклов, преобладающие в начальном этапе теплового старения;

2) изменения, сопровождающиеся разрывом цепей, — окислительная деструкция.

Если сшивание цепей макромолекул приводит к повышению жесткости и механической прочности полимерных диэлектриков, то окислительная деструкция снижает механическую прочность полимера, влагостойкость и электрическую прочность.

Термическая деструкция. Наряду с процессами, описанными выше, при тепловом старении полимерных диэлектриков возможна и термическая деструкция, при которой разрыв основных связей происходит без предварительных окислительных процессов. Термической деструкции особенно благоприятствуют недостаток кислорода и высокие температуры.

Следует отметить, что чисто термическая деструкция полимерных диэлектриков в практических условиях мало вероятна; даже при тепловом старении в нейтральной атмосфере или вакууме наличие кислорода в самых незначительных количествах будет катализировать процессы термической деструкции с образованием промежуточных окисленных продуктов. Поэтому термическая деструкция является составным элементом термоокислительной деструкции. Температура, при

которой происходит термическая деструкция, зависит от структуры молекул и в основном от прочности валентных связей в макромолекуле: чем выше энергетическая связь отдельных элементов макромолекул, тем при более высокой температуре происходит термическая деструкция.

Независимо от механизма термической деструкции в полимерных диэлектриках происходит распад макромолекул с образованием осколков. При этом снижаются механическая прочность, влагостойкость и электрическая прочность.

При воздействии влаги на полимерные диэлектрики, содержащие продукты окисления, происходит их гидролиз с последующей деструкцией макромолекул (гидролитическая деструкция). К побочным реакциям относятся также изменения коллоидной структуры и др.

Скорость процессов. Подытоживая изложенное выше, следует сказать, что в полимерных диэлектриках при тепловом старении в результате тех или иных процессов происходят в основном два вида структурных изменений: 1) приводящие к укрупнению структуры макромолекул (разветвление, сшивание) и 2) приводящие к распаду (деструкции) макромолекул.

Если первые изменения, происходящие в начальной стадии теплового старения, приводят к повышению механической прочности и жесткости полимеров, то вторые приводят к ухудшению в первую очередь механических свойств, а также к понижению влагостойкости и электрической прочности.

В общем случае скорость реакций в полимерных диэлектриках может быть определена уравнением вида [Л. 4]:

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n,$$

где C — концентрация исходных молекул;

t — время;

n — показатель степени, определяющей порядок реакции (обычно $n=1, 2$).

Для мономолекулярных реакций $n=1$ и

$$\ln C = -kt + \ln C_0,$$

где C_0 — начальная концентрация молекул.

В реальных условиях зависимости, характеризующие скорость процессов, происходящих в полимерных диэлектриках в процессе теплового старения, имеют более сложный характер. Однако на отдельных этапах теплового старения при данной температуре и неизменных условиях константа скорости k сохраняет постоянное значение.

Известно, что физические, механические и диэлектрические свойства полимерных диэлектриков определяются структурой молекул. Так, механическая прочность целлюлозных материалов и других линейных полимеров связана с длиной макромолекулярных цепей. Характер этой связи показан на рис. 1.

Следовательно,

$$P = \varphi(D),$$

где P — мера механических, физических или диэлектрических характеристик полимерного диэлектрика;

D — величина, характеризующая межмолекулярные связи. Для линейных полимеров величина D пропорциональна степени полимеризации, для сетчатых и трехмерных — числу поперечных химических связей.

В процессе теплового старения в результате термоокислительной деструкции межмолекулярные связи распадаются. При этом количество незатронутых термоокислительной деструкцией макромолекул уменьшается в соответствии с уравнением

$$f(C) = -kt + z;$$

или в наиболее простом случае:

$$\ln C = -kt + \ln C_0;$$

но так как D пропорционально C и $D = \varphi(P)$, то

$$\ln \varphi(P) = -kt + \ln \varphi(P_0);$$

или в общем случае:

$$f(P) = -kt + S.$$

Таким образом, независимо от сложности процессов, происходящих при тепловом старении полимерных диэлектриков, график зависимости $f(P)$ от времени должен иметь прямолинейный

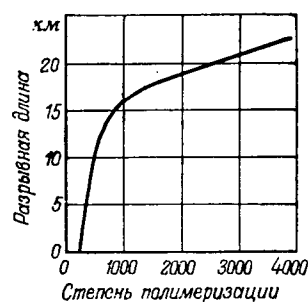


Рис. 1. Влияние степени полимеризации целлюлозы на прочность хлопкового волокна.

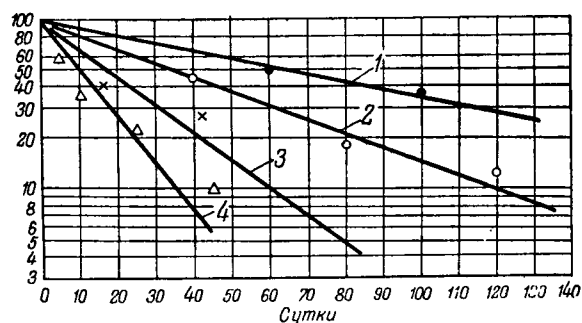


Рис. 2. Относительная прочность на разрыв хлопчатобумажной ткани (%) в зависимости от длительности теплового старения при температурах 125, 135, 145 и 155°C (кривые 1, 2, 3, 4).

характер. Это заключение представляет практический интерес, так как оно позволяет производить интерполяцию и экстраполяцию экспериментальных данных, полученных для определенных промежутков времени. При этом достаточно иметь данные, характеризующие свойства диэлектрика для двух промежутков времени.

Правильность приведенных выше положений может быть подтверждена большим числом экспериментальных данных, полученных в наших и других работах по тепловому старению.

На рис. 2 приведена зависимость прочности на разрыв хлопчатобумажной ткани, отложенной

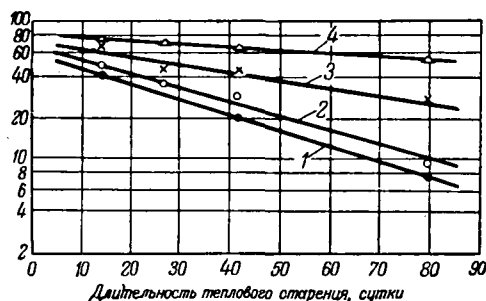


Рис. 3. Относительная прочность миткалевой ленты (%) в зависимости от длительности теплового старения при температуре 145°.

1—непропитанная лента; 2—слабо пропитанная; 3—хорошо пропитанная; 4—хорошо пропитанная, а затем лакированная.

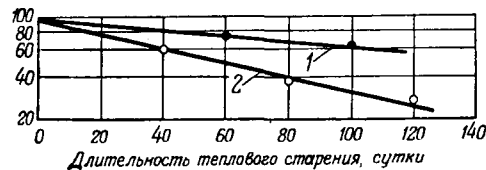


Рис. 4. Относительное удлинение (%) хлопчатобумажной ткани в зависимости от длительности теплового старения.

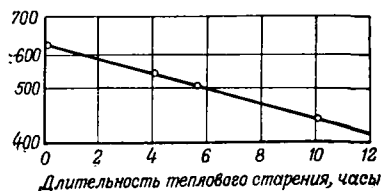


Рис. 5. Разрушающее число двойных перегибов винифлексовой пленки в зависимости от длительности теплового старения при 150°С.

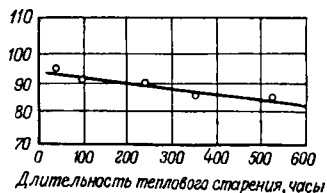


Рис. 6. Относительный вес (%) триацетатно-целлюлозной пленки в зависимости от длительности теплового старения при 160°С.

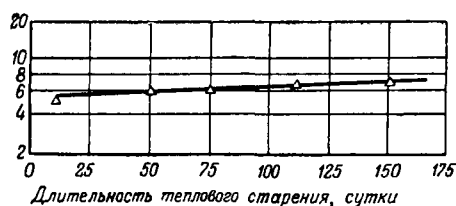


Рис. 7. Потеря веса (%) полиметилфенилсилоксанового лака в зависимости от длительности теплового старения.

в логарифмическом масштабе¹, от времени теплового старения при разных температурах. Зависимость — прямолинейная. Прямолинейную зависимость прочности на разрыв от времени теплового старения имеют также непропитанная и различно пропитанные миткалевые ленты (рис. 3). Такой же характер зависимости от времени теплового старения имеют: относительное удлинение хлопчатобумажной ткани (рис. 4), число двойных перегибов винифлексовой пленки (рис. 5), вес триацетатной пленки (рис. 6), потеря веса пленки кремнийорганического лака (рис. 7), содержание

¹ На всех последующих рисунках масштаб по вертикальной оси также логарифмический.

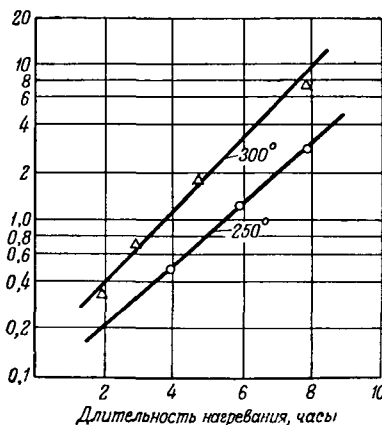


Рис. 8. Содержание (%) карбенов и карбоидов в битуме в зависимости от длительности нагревания.

карбенов и карбоидов в битуме (рис. 8), а также другие характеристики полимеров.

Можно сколько угодно увеличить число примеров, подтверждающих прямолинейный характер зависимости между логарифмом меры характеристики² и временем теплового старения полимерных диэлектриков. Если же эта зависимость нарушается на каком-то этапе времени, то это означает, что на этом этапе имеют место несколько процессов, так или иначе накладывающихся друг на друга и поэтому усложняющих зависимость изменения характеристик во времени.

В общем случае, когда в полимерном диэлектрике в процессе теплового старения протекает несколько реакций, приводящих к изменению исходных характеристик полимерного диэлектрика, уравнение, связывающее логарифм меры характеристики со временем, будет иметь вид:

$$\ln P = \sum_{i=1}^n \pm k_i t + M.$$

Скорость химических реакций связана с температурой уравнением

$$\ln k = -\frac{B}{T} + A,$$

где k — константа скорости химической реакции;

T — абсолютная температура, °K;

A и B — постоянные для данных условий реакции.

Постоянные A и B имеют вполне определенный физический смысл и их значения определяются, в конечном счете, химическим составом и структурой полимерного диэлектрика. Так, величина

$$-B = \frac{\Delta E^*}{R},$$

где ΔE^* — энергия активации химической реакции;

R — газовая постоянная.

² Мера характеристики есть обобщенное понятие для совокупности параметров, характеризующих свойства и поведение полимерного диэлектрика, однообразно изменяющихся в процессе старения. Под мерой характеристики можно, в частности, понимать прочность на разрыв, относительное удлинение, электрическую прочность, влагостойкость и др.

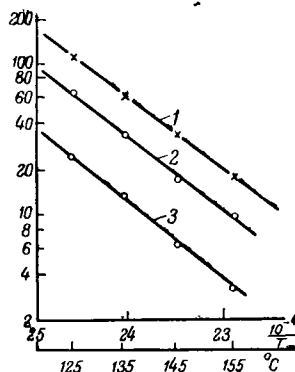


Рис. 9. Длительность старения хлопчатобумажной ткани (сутки) до определенного состояния прочности на разрыв (30, 50 и 75% — кривые 1, 2, 3) в зависимости от величины, обратной абсолютной температуре.

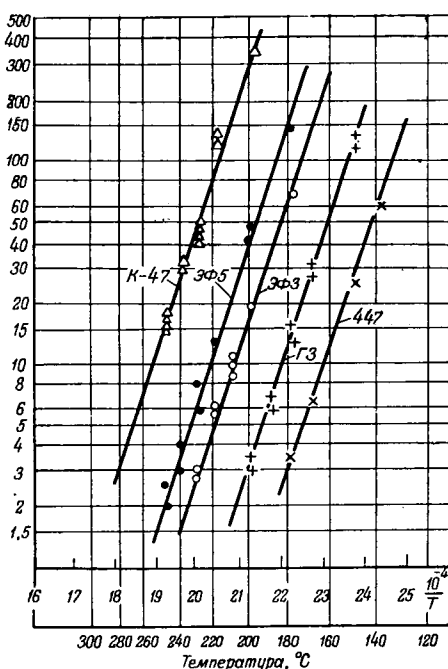


Рис. 10. Срок жизни (часы) лаковых пленок, определенный по потере эластичности, в зависимости от температуры.

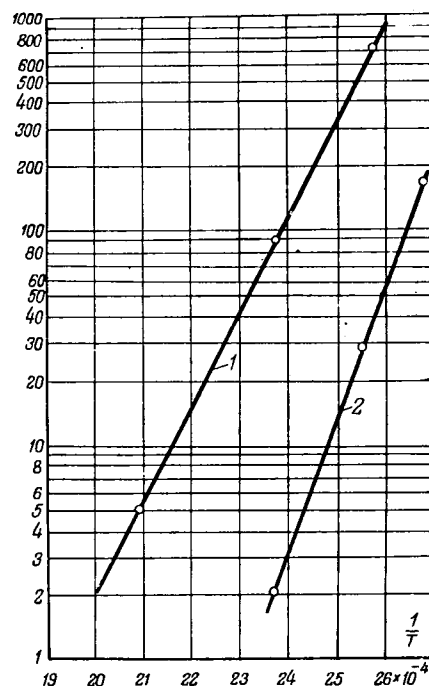


Рис. 11. Срок жизни высокополимерных диэлектриков (сутки), в зависимости от величины, обратной температуре.

1 — винилфлексовая изоляция; 2 — органическая резина.

Величина A характеризует число сталкивающихся молекул, взаимную их ориентацию в момент столкновения и другие факторы, влияющие на эффективность столкновений молекул.

Учитывая, что

$$k = \pm \frac{f(P) + S}{t},$$

можно установить связь между характеристикой полимерного диэлектрика P , временем теплового старения t и абсолютной температурой T :

$$\ln k = \ln \frac{f(P) + S}{t} = -\frac{B}{T} + A,$$

откуда

$$\ln t = \frac{B}{T} + \ln [f(P) + S] - A.$$

Если выбрать как меру теплового старения определенное значение какой-либо характеристики полимерного диэлектрика, например процент исходной механической прочности, эластичности, пробивной напряженности или др., то время t_n , спустя которое диэлектрик достигнет этого состояния, может быть определена из последнего уравнения. В этом случае $f(P)$ есть вполне определенная величина, не зависящая от времени и температуры теплового старения. В таком случае

$$\ln t_n = \frac{B}{T} + Y.$$

Следовательно, логарифм времени теплового старения полимерного диэлектрика, спустя которое его характеристика, например механическая прочность, достигнет данного значения (например, 50% первоначального), пропорционален абсолютной температуре.

Приводимые ниже экспериментальные данные, полученные в работах автора, а также в других исследовательских работах, подтверждают правильность приведенной зависимости.

На рис. 9 приведена зависимость времени теплового старения хлопчатобумажной ткани до 30, 50 и 75% исходной прочности на разрыв от величины, обратной абсолютной температуре. Зависимость — прямолинейная. Зависимости условных сроков жизни от величины, обратной абсолютной температуре пленок лаков (битумномасляного 447, жирного глифталевого Г-3, полиэтилфенилсилоксанового ЭФ-3 и ЭФ-5 и полиметилфенилсилоксанового К-47), определенные по потере эластичности, также прямолинейны (рис. 10). Такой же характер имеют зависимости сроков жизни от величины, обратной абсолютной температуре, для винилфлексовой изоляции, органической резины (рис. 11), а также других полимерных диэлектриков.

Можно было бы сколь угодно увеличить число примеров, подтверждающих наличие при тепловом старении линейной зависимости логарифма сроков жизни полимерных диэлектриков от величины, обратной температуре.

Выводы. Исходя из анализа экспериментальных данных, характеризующих изменение состава, структуры и свойств полимерных диэлектриков, а также кинетики физико-химических процессов, происходящих в них в процессе теплового старения, установлено наличие следующих закономерностей:

1. Логарифм величины, характеризующей

О частичных разрядах в лобовых частях обмоток крупных электрических машин

Инж. Б. В. ВАНИН и кандидат техн. наук В. Б. КУЛАКОВСКИЙ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Известно, что в воздушном промежутке между наружными поверхностями изоляции проводников возникает коронный разряд, если напряжение между этими поверхностями достаточно для ионизации в воздушном промежутке. В лобовых частях обмоток электрических машин корона может возникать в местах, где стержни разных фаз расположены близко друг к другу, в местах крепления обмоток к поддерживающим кольцам и т. п. Корона в указанных местах наблюдается во время профилактических испытаний, когда к обмотке прикладывается повышенное испытательное напряжение, но в данном случае она не вызывает опасений, так как практически не оказывает никакого влияния на изоляцию.

Наличие на поверхности изоляции вблизи места разряда полупроводящего слоя, имеющего сравнительно небольшое удельное поверхностное сопротивление, существенно изменяет характер разряда. Вместо свойственного короне голубоватого свечения, равномерно заполняющего весь разрядный промежуток, появляется отчетливая искра, которая все время остается в одном месте разрядного промежутка. При сравнительно слабом разряде искра имеет фиолетовый цвет, при более сильном — красный или желтый. В том месте, где столбик разряда соприкасается с поверхностью изоляции, на последней наблюдается яркая светящаяся точка желтого или белого цвета. Поверхность изоляции вблизи места разряда заметно нагревается. Как будет видно из дальнейшего, в эксплуатации такие разряды могут приводить в некоторых случаях к неприятным последствиям.

Описанный разряд представляет собой периодически повторяющиеся пробои воздушного промежутка между двумя полупроводящими участками поверхности изоляции обмотки. Частота этих пробоев кратна частоте рабочего напряжения машины. Кроме того, она зависит от размеров полупроводящих участков, удельного поверхностного сопротивления, удельной емкости изо-

ляции, разрядного напряжения промежутка и приложенного к изоляции напряжения. При разряде выделяется вся или значительная часть энергии, запасенной в конденсаторе, обкладками которого являются медь стержня и полупроводящие участки поверхности изоляции, а диэлектриком — изоляция обмотки под указанными участками.

Повидимому, рассматриваемые разряды по своему характеру аналогичны пазовым разрядам, возникающим при потере контакта между полупроводящей поверхностью стержня обмотки и стенками паза электрической машины. Описание пазовых разрядов имеется в обзоре Е. В. Калинина [Л. 1].

Судя по всем данным, возникновение рассматриваемых разрядов не связано с состоянием пазовой части обмотки. Их возникновение в лобовых частях обмоток крупных электрических машин может быть объяснено протеканием емкостных токов лобовых частей через небольшие воздушные промежутки между поверхностями различных изолированных частей обмотки. Возможен также разряд вдоль поверхности изоляции при наличии на ней участков с резко неравномерным поверхностным сопротивлением.

Для возникновения разрядов необходимо, чтобы емкостные токи лобовых частей были достаточно велики, чему способствует, например, загрязнение поверхности изоляции, и чтобы на пути этих токов встречались короткие участки поверхности с большим удельным поверхностным сопротивлением или незашунтированные никакими деталями малые воздушные промежутки, например зазоры между верхним и нижним стержнями обмотки, щели между изоляционными прокладками и поверхностью изоляции стержня и т. п.

Если на пути разряда находятся какие-либо легко подверженные тлению материалы, например непитанный бандажный шпагат или хлопчатобумажная лента, то возможно тление этих материалов; во время работы машины, при дей-

свойство диэлектрика, изменяется пропорционально времени, и эта зависимость имеет вид:

$$\ln P = -Kt + \ln P_0.$$

2. Зависимость логарифма срока жизни полимерных диэлектриков или же логарифма времени, спустя которое они приобретают определенное состояние, от величины, обратной температуре, является прямолинейной:

$$\ln t_{ж} = \frac{B}{T} + Y.$$

В отличие от чисто эмпирических формул, которые предлагались ранее, носящих формальный

характер, приведенные закономерности теплового старения полимерных диэлектриков основаны на анализе кинетики тех процессов, которые наблюдаются в полимерных диэлектриках при тепловом старении.

Литература

1. G. L. Moses. Synthetic Insulation and the 10-Degree Rule, Westinghouse Eng., стр. 106—107, July 1945.
2. И. А. Сыромятников. Режимы работы асинхронных двигателей, стр. 107, 1950.
3. А. Г. Меклер. Определение мощности двигателей при повторно-кратковременном графике с учетом старения изоляции. ВЭП, № 6, 1947.
4. В. А. Киреев. Курс органической химии, гл. XVI, 1951.

[30.9.1954]



ствии вентиляции такое тление может быть опасным.

В последние годы наблюдалось несколько случаев разрядов в лобовых частях обмоток крупных электрических машин.

Случай 1. При испытании повышенным напряжением статора генератора 50 тыс. *кв*а, 10,5 *кв*, прошедшего полную перемотку на заводе, в лобовых частях его обмотки появился дым. Причиной его появления, как показал детальный осмотр, явилось тление хлопчатобумажной ленты, которой были укреплены гетинаксовые прокладки, расположенные близ выхода стержней из пазов в зоне полупроводящего покрытия. После удаления прокладок вместе с крепящей их лентой и замены крепежной хлопчатобумажной ленты в этой части обмотки стеклянной, тления не наблюдалось. У генераторов того же типа во время их испытаний повышенным напряжением дважды отмечались случаи появления видимых разрядов в лобовых частях, вызывавших тление изоляции.

Случай 2. После аварии, которую потерпел крупный генератор напряжением 15,75 *кв* и которая сопровождалась обгоранием изоляции лобовых частей с одной стороны обмотки, было обнаружено, что в лобовых частях с другой стороны, не затронутой пожаром, выгорел неопитанный лаком бандажный шпагат. Повидимому, это выгорание произошло в результате действия разряда во время работы генератора.

Случай 3. Статорная обмотка генератора мощностью 50 тыс. *кв*а с номинальной скоростью вращения ротора 3000 *об/мин* и непрерывной компаундированной изоляцией была подвергнута испытаниям повышенным напряжением. Испытания проводились во время очередного капитального ремонта генератора без выемки ротора. Испытательное напряжение поддерживалось равным 1,5 U_n .

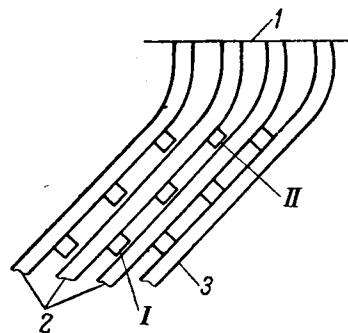
На 10-й секунде после начала испытаний в лобовых частях обмотки, в одном из промежутков между стержнями, показался дым, который шел из узкой щели между шпагатом, крепящим одну из дистанционных прокладок, и поверхностью изоляции соседнего стержня (рис. 1). Между остальными дистанционными прокладками в этом промежутке и поверхностью соседнего стержня также имелись щели.

В соседних промежутках между стержнями, расположенных справа от указанного (если смотреть со стороны головок), таких щелей не было, так как дистанционные прокладки были плотно зажаты между боковыми сторонами стержней. В соседних же промежутках, расположенных слева, напротив, имелись щели шириной до нескольких миллиметров. Стержни, между которыми появился дым, были крайними стержнями одной из фаз, заземленной на время испытаний; справа от них были расположены стержни фазы, на которую подавалось напряжение.

При осмотре было обнаружено, что лобовые части обмотки были покрыты почти миллиметровым слоем смеси масла со щеточной пылью. Этой смесью были частично забиты и промежутки между стержнями. Удельное поверхностное сопро-

Рис. 1. К третьему случаю разряда в лобовых частях обмотки генератора.

I — место первоначального разряда; *II* — место появления разряда после очистки изоляции в месте первоначального разряда; *1* — активная сталь; *2* — стержни заземленной фазы; *3* — стержни фазы, подвергавшейся испытанию.



тивление слоя смеси, измеренное при помощи мегомметра, было порядка $10^6 \dots 10^7$ *ом*.

Неплотное прилегание прокладок и сильное загрязнение поверхности изоляции и явились причинами появления разряда. Вследствие сравнительно высокой проводимости загрязненной поверхности изоляции емкостные токи лобовых частей обмотки, замыкающиеся через активную сталь статора, при испытании достигли довольно значительной величины. По поверхности изоляции они протекали по двум путям: частично вдоль лобовых частей испытываемой фазы непосредственно на активную сталь и частично поперек лобовых частей, переходя со стержня на стержень через загрязненные поверхности дистанционных прокладок, а затем вдоль поверхности стержней заземленных фаз на активную сталь. На втором пути находилась щель *I* (рис. 1), которая, повидимому, была меньше других щелей этого промежутка. Напряжение на щели *I* и величина емкостных токов оказались достаточными, чтобы вызвать в ней разряд и тление крепежного шпагата.

После того как прокладка была удалена и близлежащие к ней участки изоляции промыты бензином, испытание было возобновлено. Однако разряд возник снова; на этот раз он наблюдался в том же промежутке, что и ранее, но в щели *II* (рис. 1), отстоящей от щели *I* на расстоянии около 100 *мм*. Вначале разряд имел вид короткой красной искры; затем, после снижения испытательного напряжения с 1,5 U_n до $U_n = 10,5$ *кв*, искра стала голубой.

В дальнейшем между дистанционными прокладками и стержнем в указанном промежутке была введена тонкая миканитовая прокладка, после чего разряды прекратились, и фаза была испытана повышенным напряжением, равным 1,5 U_n , в течение 1 *мин*. На остальных двух фазах разрядов во время испытания не наблюдалось.

После капитального ремонта и включения генератора в эксплуатацию никаких ненормальных явлений в его изоляции не наблюдалось.

Во время нормальной работы машины разряд может возникнуть между участками антикоронийных покрытий в том месте, где лобовые части верхнего и нижнего стержней, принадлежащих к разным фазам, расположены близко друг к другу. Для его возникновения необходимо, чтобы напряжение между этими стержнями было достаточно для пробоя разделяющего их воздушного промежутка. Кроме того, указанные стержни

должны лежать в пазах, расположенных недалеко друг от друга по окружности статора, так как в противном случае место сближения их лобовых частей окажется вне участков, покрытых полупроводящим лаком. Такое расположение стержней иногда может встретиться в корзиночных обмотках. Напряжение между ними в этом случае может оказаться почти равным линейному напряжению машины.

Полупроводящие покрытия делаются таким образом, чтобы потенциал края покрытия оказывался почти равным потенциалу меди стержня. Ввиду этого между краями покрытий верхнего и нижнего стержней действует напряжение порядка U_n . Искровой разряд появится в том случае, если это напряжение окажется достаточным для пробоя воздушного зазора между указанными стержнями.

Ввиду того что удельное сопротивление покрытий в лобовых частях обмотки значительно и они с одного края заземлены через сталь статора, действие разряда на изоляцию сравнительно невелико. Это подтверждается следующим опытом.

Две секции синхронного компенсатора были уложены в специально изготовленный станок так, как они лежат в статоре машины. В местах, соответствующих выходу из паза, на секции было нанесено полупроводящее покрытие длиной около 200 мм с удельным сопротивлением 10^8 ом. В месте, где края покрытий разных секций сближались, воздушный зазор составлял приблизительно 1,5 мм. При напряжении между секциями 9 кВ в зазоре возникал емкостный разряд, который, воздействуя на изоляцию около 60 мин, обугливал непросушенную бумагу и светлую лакоткань; однако тления при этом не наблюдалось.

Из сказанного следует, что емкостный разряд, возникший между участками антикоронийных покрытий при нормальной работе машины, представляет опасность лишь в редких случаях, когда напряжение машины выше 10 кВ и в зоне разряда случайно окажутся непросушенные детали крепления. Применение при сборке обмотки крепежных материалов, пропитанных лаком, полностью исключает опасность от возникновения указанных

разрядов. Во время испытаний изоляции обмотки повышенным напряжением следует вести наблюдение за лобовыми частями при снятых торцевых крышках. Это позволит во время обнаружить разряды и принять против них меры.

Для исследования условий возникновения разряда и действия его на бандажный шпагат был произведен ряд опытов¹.

Два отрезка секций обмотки крупного электродвигателя напряжением 10 кВ с компаундированной изоляцией были подвешены горизонтально один над другим (рис. 2); оси их в плане пересекались; между верхним и нижним отрезками оставался небольшой зазор (2,2 мм). Поверхность изоляции отрезков была покрыта слоем графитовой пыли; на нижнем отрезке был закреплен бандажный непросушенный шпагат от турбогенератора. При напряжении между проводниками отрезков 7,5 кВ в зазоре появился разряд белого цвета; при напряжении 15 кВ шпагат начал тлеть и через несколько минут перегорел.

Опыт был повторен, но при измененных условиях: проводники обоих отрезков секций обмотки были заземлены; на поверхности нижнего отрезка на расстоянии 160 мм от места пересечения отрезков был наложен бандаж из фольги, присоединенный к испытательному трансформатору; зазор между отрезками составлял 2,5 мм.

При напряжении 9 кВ в зазоре появился разряд белого цвета; хлопчатобумажная нить, закрепленная на нижнем отрезке, начала тлеть и через несколько минут перегорела.

В результате дальнейших опытов было выяснено, что разряд неизменно вызывает перегорание непросушенного шпагата. Однако ни разу не удалось вызвать тление шпагата, пропитанного лаком. По окончании опытов изоляция отрезков секций была испытана напряжением 15 кВ в течение 1 мин и выдержала испытание.

Таким образом, описанные опыты подтвердили возможность возникновения разрядов между поверхностями частей обмоток электрических машин за счет емкостных токов сравнительно небольших участков изоляции. Как показали измерения, действующее значение тока разряда при этих опытах не превышало нескольких миллиампер.

Были также проделаны опыты, имевшие целью изучение действия емкостного разряда на компаундированную изоляцию. В опытах использовались секции обмотки синхронного компенсатора напряжением 6 кВ.

Первый опыт должен был воспроизвести разряд, возникающий между двумя полупроводящими участками поверхности изоляции одной и той же секции в том случае, когда эти участки отделены друг от друга узкой полоской поверхности изоляции, имеющей нормальное для участков, не покрытых полупроводящим лаком, значение удельного поверхностного сопротивления. Схема испытаний приведена на рис. 3.

При напряжении около 4...5 кВ на поверхности секции появлялась дорожка из искр, замы-

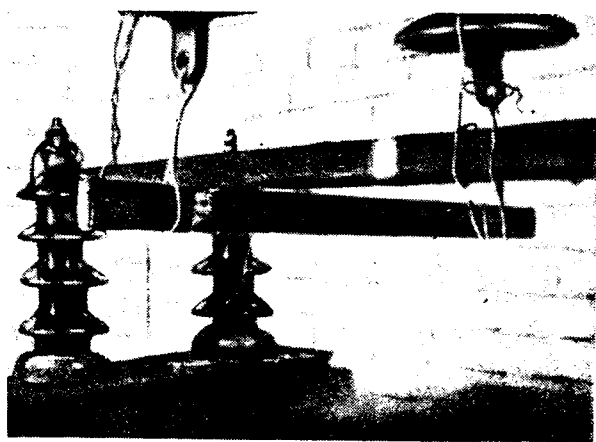


Рис. 2. Расположение отрезков секций обмотки двигателя при опыте, имеющем целью воспроизведение разряда.

¹ Лабораторные опыты проводились при участии И. В. Эзриной.

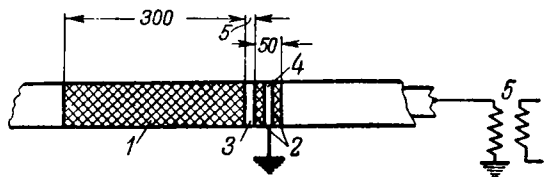


Рис. 3. Схема опыта, воспроизводящего разряд по поверхности изоляции.

1 и 2 — полупроводящие участки поверхности изоляции; 3 — полоска поверхности изоляции, имеющая нормальное значение удельного поверхностного сопротивления; 4 — заземленная полоска фольги; 5 — испытательный трансформатор.

кающая участки 1 и 2. При удельном сопротивлении поверхности участков изоляции 1 и 2, равном $10^4 \dots 10^5$ ом, изоляция через несколько минут после начала опыта вспыхивала и продолжала гореть после отключения напряжения.

Как видно, емкостный разряд, происходящий вдоль поверхности изоляции, оказывает на нее большее действие, чем разряд через воздушный промежуток. Это, новидимому, объясняется тем, что сравнительно большая часть энергии поверхностного разряда, передаваясь непосредственно изоляции, разрушает ее.

На практике разряд по поверхности может иметь место, например, в том случае, когда антикоррозийное полупроводящее покрытие теряет контакт со сталью статора. Вероятность такого случая, очевидно, очень мала. Поверхностный разряд может возникнуть также при наличии на лобовых частях слоя грязи, образовавшегося в результате оседания графитовой пыли от щеток ротора, втянутой вентиляцией внутрь машины. При оседании пыли участками, отделенными друг от друга узкими полосками незагрязненной поверхности изоляции, емкостный разряд может идти поперек этих полосок.

Однако практика показывает, что загрязнение лобовых частей, приводящее к очень низким значениям удельного поверхностного сопротивления изоляции, встречается редко. Поэтому редко бывают и случаи горения изоляции лобовых частей из-за поверхностных емкостных разрядов, так как для того чтобы изоляция загорелась, удельное поверхностное сопротивление, как показывает описанный выше опыт, должно быть порядка $10^4 \dots 10^6$ ом.

Цель второго опыта состояла в том, чтобы выяснить влияние емкостного разряда на слюду. Для этого на пазовую часть секции обмотки было нанесено полупроводящее покрытие длиной около 800 мм с удельным сопротивлением 10^4 ом. Покрытие не соприкасалось с заземленными частями. Против средней его части был установлен заземленный стержень так, что между стержнем и покрытием оставался воздушный зазор, пробивное напряжение которого составляло около 4 кВ. За 2 часа нахождения меди секции под напряжением, равным 9 кВ, на поверхности изоляции рядом была выжжена круглая лунка диаметром около 12 мм. Глубина лунки была такой, что оголилась слюда. В середине дна лунки была вторая лунка, образовавшаяся уже в слюде, диаметром около 4 мм; она была покрыта белым на-

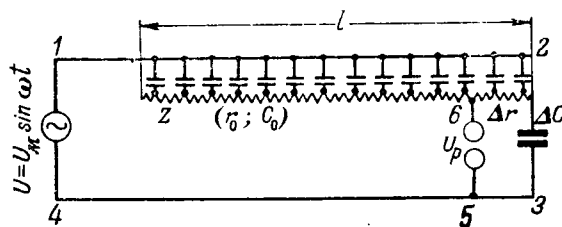


Рис. 4. Схема замещения цепи разряда.

том. При напряжении 6 кВ и при тех же прочих условиях опыта разряд не оказал заметного действия на слюду. Как видно, слюда сравнительно мало разрушилась под действием разряда, даже в условиях описанного опыта, которые были более тяжелыми, чем это имеет место на практике.

Очевидно, увеличение поверхности полупроводящего покрытия, приложенного напряжения и удельной емкости обмотки приводит к усилению разряда, а увеличение удельного сопротивления покрытия ослабляет его. Зависимость интенсивности разряда от величины разрядного напряжения промежутка более сложна.

Опыты показали, что при условиях, имеющих место на практике, т. е. при напряжении 10...15 кВ и удельном поверхностном сопротивлении, не меньшем 10^4 ом, максимальная интенсивность разряда наблюдается в том случае, если разрядное напряжение промежутка несколько меньше напряжения, приложенного к секциям, которые этот промежуток разделяет. Объяснение этого явления для случаев, когда удельное сопротивление покрытия велико (практически более 10^8 ом), можно найти, если рассмотреть схему замещения, изображенную на рис. 4.

На указанной схеме U означает мгновенное значение напряжения, приложенного к частям обмотки, между которыми действует емкостный разряд; Z — сопротивление цепи разряда со стороны разрядного промежутка; Δr и ΔC — эффективное сопротивление и емкость разрядного промежутка. Физически ΔC является емкостью участка электрического поля воздушного зазора, непосредственно примыкающего к месту разряда. В момент, когда через промежуток проскакивает искра, этот участок поля отдает свою энергию частично искре и частично полупроводящему покрытию, прилегающему к месту разряда. Этот последний поглотитель энергии и представлен на схеме замещения сопротивлением Δr .

Энергия, выделяющаяся в искре и сопротивлении Δr , разрушающим образом действует на изоляцию, поэтому по ее величине, рассеиваемой в 1 сек, можно судить о степени вредности емкостного разряда для изоляции. Чем меньше время, в течение которого существует искра, тем меньше Δr и ΔC .

Для определения мощности искры обратимся к схеме замещения рис. 4. Под действием напряжения источника U в течение малого промежутка времени Δt через контур 1234 заряжается малая емкость ΔC . Процесс зарядки

происходит до тех пор, пока напряжение на разрядном промежутке не достигнет пробивного. После этого запас энергии, приблизительно равный величине

$$\frac{\Delta C U_p^2}{2} = \frac{\Delta q \cdot U_p}{2},$$

мгновенно рассеивается в контуре 2356, т. е. в искре и частях покрытия, непосредственно прилегающих к месту разряда. Ток через разрядный промежуток прекращается, затем снова происходит заряд емкости ΔC и т. д.

Так как при зарядке емкости ΔC на Δq такой же заряд Δq проходит через участок 1-6, полную величину энергии, выделенной вблизи места разряда за четверть периода, можно подсчитать по формуле

$$W = \frac{q \cdot U_p}{2},$$

где q — максимальная величина заряда, проходящего через участок 1-6 и источник.

Мощность получим, умножая W на $4f$:

$$P = \frac{q \cdot U_p}{2} \cdot 4f = \frac{q U_p}{2} \cdot 4 \cdot \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\omega q U_p}{\pi}.$$

Заряд q монотонно возрастает от $q=0$ при $U_p=U_m$ (U_m — амплитуда напряжения источника) до $q=q_m$ при $U_p=0$. Следовательно, мощность разряда имеет максимум при некотором значении U_p , удовлетворяющем условию $0 < U_p < U_m$, т. е. можно предполагать, что между U_p и U_m существует оптимальное соотношение, при котором действие разряда на изоляцию наиболее сильно.

Выводы. Сильное загрязнение лобовых частей обмотки у машин напряжением 10 кВ и выше может привести к возникновению емкостного раз-

ряда вдоль поверхности изоляции, который способен вызвать загорание хлопчатобумажной ленты.

При загрязненной изоляции возможен также разряд в щели между дистанционной прокладкой и стержнем, если они неплотно прилегают друг к другу. Такой разряд может вызвать тление неопитанного лаком бандажного шпагата.

Не вполне исключено появление емкостного разряда и при совершенно чистой изоляции. В этом случае разряд может иногда возникнуть между антикоронийными покрытиями лобовых частей обмотки машин напряжением выше 10 кВ. Можно предположить, что он способен в некоторых случаях вызвать тление неопитанных крепежных материалов при работе машины.

Емкостный разряд в лобовых частях обмотки не оказывает заметного действия непосредственно на слюду. Его разрушающее действие сказывается лишь на материалах органического происхождения, не пропитанных лаком. Поэтому следует считать недопустимым применение этих материалов в машинах напряжением 10 кВ и выше.

Как показал опыт эксплуатации, емкостный разряд наблюдается очень редко. Достаточно эффективной мерой для своевременного выявления его может быть проведение испытания изоляции обмотки повышенным напряжением во время профилактических испытаний при снятых с машины торцевых крышках. Устранение обнаруженного разряда может быть в простейшем случае произведено путем разделения поверхностей, между которыми он возник, при помощи диэлектрической прокладки.

Литература

1. Е. В. Калинин. Определение частичных разрядов в пазах обмоток высоковольтных вращающихся машин. Электричество, № 3, 1954.
2. Ф. А. Квитнер и А. Петерсон. Разрушение диэлектриков поверхностными разрядами. Электричество, № 14, 1933.

[9.11.1954]



О процессах разрушения диэлектрика бумажно-масляных конденсаторов для импульсных схем

Инж. Ю. В. БАГАЛЕЙ

Харьковский политехнический институт им. Ленина

Введение в стандарт импульсных испытаний высоковольтных трансформаторов и практикуемые сейчас исследования поведения изоляции линий, машин и аппаратов при импульсных воздействиях высокого напряжения заставляют повысить требования к конденсаторам в части надежности их работы в импульсных установках.

В настоящей работе сделана попытка выяснения причин разрушения бумажно-масляной изоляции при импульсном режиме и установления количественных характеристик процесса разрушения, которые могли бы быть использованы для создания надежной и рациональной конструкции конденсатора.

Процессы разрушения изоляции в импульсном режиме и при переменном напряжении промышленной частоты во многом сходны. Поэтому результаты исследования могут быть использованы и при конструировании конденсаторов других типов, прежде всего конденсаторов, предназначенных для продольной компенсации линии передачи.

Данные исследования. Пробой конденсатора в импульсном режиме обычно происходит в процессе разряда или при подъеме напряжения вслед за разрядом.

В импульсном режиме с ростом числа осуществленных разрядов падает значение напряжения, при котором наступает разрушение диэлектрика

(рис. 1). Кривая рис. 1 представляет собой своеобразную кривую жизни изоляции.

При одном и том же значении напряжения, при импульсных воздействиях процесс разрушения развивается намного быстрее, чем в случае приложения постоянного напряжения. У секции с 24 листами при постоянном напряжении $U = 62$ кВ пробой наступает спустя 10 мин после приложения напряжения, а в импульсном режиме при том же напряжении — через 80 сек (16 импульсов через 5 сек). Постоянное напряжение 50 кВ та же секция выдерживает неограниченно долго, а в импульсном режиме при этом же напряжении пробой наступает после 40 импульсов.

Характер зависимости рис. 1 позволяет сделать заключение, что при разряде конденсатора путем его закорачивания происходит ряд необратимых процессов, интенсивно разрушающих изоляцию.

Наблюдение за секцией конденсатора, зажатой между прозрачными пластинами и помещенной в бак со стеклянными стенками, позволило установить, что в момент разряда, осуществляемого путем закорачивания, на краях секции возникают скользящие разряды (рис. 2, а). Такие же скользящие разряды при достаточных градиентах возникают и при переменном напряжении частоты 50 гц (рис. 2, б). При вскрытии секции после серии разрядов обнаруживалось, что масло у края секции отсутствует и разряд, следовательно, происходит не в масле, а в среде газа, образующегося при разложении масла и бумаги под действием электрических разрядов. Образование газа, связанное с началом ионизационных процессов в изоляции, служит признаком начала процесса разрушения. Газообразование наблюдается при всех видах напряжения: переменном, импульсном и в меньшей степени при постоянном напряжении.

В. М. Файницкий и Г. С. Кучинский описали метод обнаружения начала ионизации путем осциллографической регистрации частичных разрядов в изоляции.

Регистрация частичных разрядов позволяет установить начало процесса ионизации. Как только в изоляции появляется газ, условия ионизации облегчаются, что ведет к еще более интенсивному образованию газа. Наиболее интенсивное газообразование наблюдается в местах наибольшей напряженности поля; там образуются полости, заполненные газом, на границах которых и идет дальнейший процесс разрушения изоляции.

Процесс разрушения зависит не только от значения напряженности поля, но и от свойств самого газа. Ниже приводятся данные о газе, выделяющемся в бумажно-масляной изоляции при скользящих разрядах. По условиям опытов сбор газа производился в конденсаторной секции, набранной из кабельной бумаги¹ при переменном напряжении частоты 50 гц и напряженности поля порядка 20 кВ/мм.

¹ Кабельная бумага оказалась более стойкой к воздействию длительных разрядов, чем конденсаторная, что облегчило сбор газа.

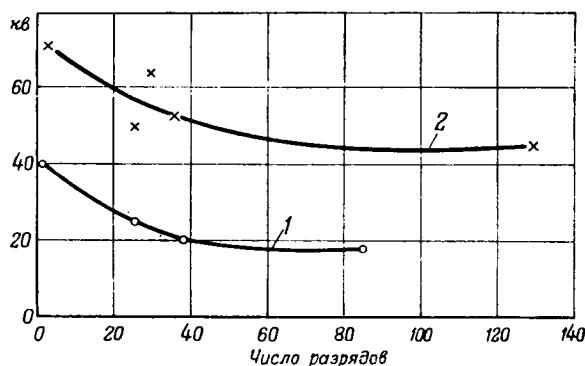


Рис. 1. Разрушающее диэлектрическое напряжение в зависимости от числа разрядов (импульсный режим работы, длительность цикла заряд-разряд 5 сек).

1—12 листов в секции, $C=4100$ мкф; 2—24 листа, $C=2050$ мкф.

Химический состав газа (см. ниже) позволяет судить, какая из составных частей изоляции больше разрушается — бумага или масло. Состав газа определяет также электрические характеристики газа и, следовательно, интенсивность процессов разрушения изоляции.

Составные части	H ₂	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	Остаток	NO	NO ₂
Объем составных частей, %	61,92	7,64	0,86	0,76	9,04	0,71	19,07	Нет	Нет

Смесь водород — метан — кислород, составляющая основную часть газа, при определенных условиях может давать взрыв.

Скорость выделения газа. Скорость выделения газа зависит от напряженности поля (рис. 3), частоты, давления внутри конденсатора, сорта бумаги и масла, степени их сушки и дегазации.

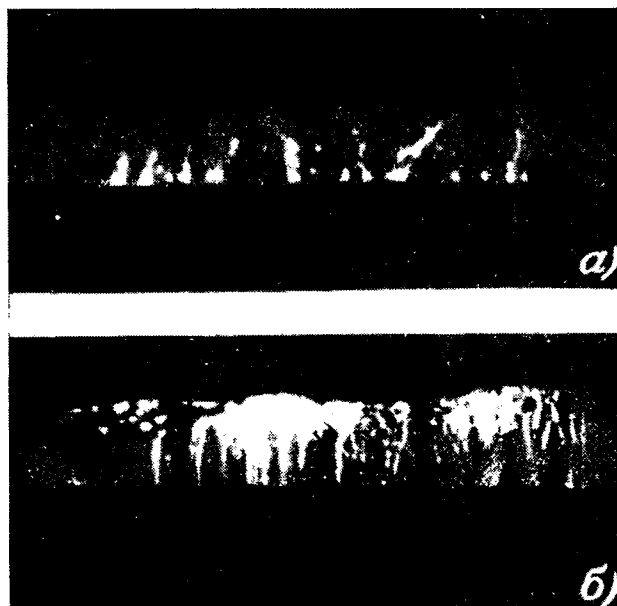


Рис. 2. Скользящие разряды на краю конденсаторной пластины.

а — два разряда, осуществленные путем закорачивания конденсатора при приложении выпрямленного напряжения $U = 54$ кВ, (в секции 32 листа бумаги толщиной 15 мкм); б — разряды при напряжении $U = 35$ кВ, 50 гц (в секции 16 листов кабельной бумаги толщиной 120 мкм).

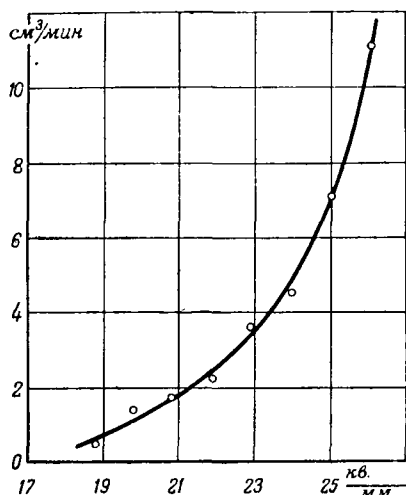


Рис. 3. Скорость выделения газа в секции конденсатора, изготовленной из кабельной бумаги, при различных значениях напряженности поля частоты 50 гц (действующие значения).

В опытах рис. 3 напряжение на образце поднималось ступенями в 1 кв, после того как выделялись 1...2 см³ газа. Все точки кривой были получены за 5 мин при общем количестве выделившегося газа 12 см³. Первые видимые выделения газа из секции начинались при напряженности поля $E = 8,35$ кв/мм; при $E = 18...19$ кв/мм происходило уже бурное выделение газа. Рабочая напряженность поля силовых конденсаторов обычно того же порядка (8...12 кв/мм), а толщина диэлектрика составляет 40...120 мкм. Толщина секции, на которой были получены данные рис. 3, была больше (480 мкм) и, следовательно, условия ионизации были в ней сравнительно облегчены. Все же данные рис. 3 позволяют предполагать, что во время приложения испытательного напряжения и у силовых конденсаторов происходит выделение газа, что снижает значения начальных ионизационных напряженностей поля и уменьшает срок службы конденсаторов.

Растворимость газа. Образующийся около обкладок газ растворяется в масле. Срок службы конденсатора в большой степени зависит от скорости рассасывания пузырьков газа в местах наибольшей напряженности поля в диэлектрике. По нашим данным, в образце секции, пропитанной хорошо дегазированным маслом, после 100 разрядов, осуществляемых путем закорачивания, ионизирующее напряжение полностью восстановилось за 23 часа; начало повышения ионизирующего напряжения было зарегистрировано только через 30 мин.

Можно полагать, что проведение дегазации масла силовых конденсаторов и конденсаторов, работающих в импульсных схемах, после 1—2 лет их работы, снижая концентрацию газа в масле, повышает скорость растворения вновь образующихся порций газа и благоприятно отражается на сроке службы конденсаторов.

Температура газа. Для процессов старения и пробы бумажно-масляной изоляции существенно важно значение средней температуры в газовой полости, где происходит процесс ионизации. Термopара, помещенная в зоне разряда, на краю конденсаторной секции, работавшей при напряже-



Рис. 4. Максимальная протяженность светящейся области в зависимости от приложенного напряжения при разрядах, осуществляемых путем закорачивания конденсатора (n — число разрядов).

нии 20 кв, 50 гц, позволила зафиксировать установившуюся среднюю температуру 75°С при температуре масла в испытательном баке 15°С, что близко к литературным данным [Л. 2].

Нагрев пропитанной бумаги, соприкасающейся с газовой полостью, до температур 75...100°С вызывает резкое увеличение электропроводности бумаги, что в свою очередь благоприятствует развитию теплового пробоя.

Напряжение начала ионизации в газе. Большой процент водорода в составе газа создает условия ионизации, отличные от условий ионизации в воздухе. Осциллографирование тока, возникающего при разряде между двумя острыми электродами, помещенными в стеклянный сосуд, наполненный газом или воздухом, показало, что для различных проб газа напряжение возникновения коронного разряда было на 25...46% ниже, чем для воздуха. Серия осциллограмм тока в газе и воздухе, снятых при одних и тех же напряжениях, позволила установить, что пик коронного тока возрастает примерно в 1,5 раза скорее в газе, чем в воздухе.

Возможность выделения значительных количеств газа при сравнительно невысоких напряженностях поля, медленный процесс растворения газа в масле в сочетании с явлением уменьшения напряжения ионизации в газе по сравнению с воздушной средой, а также сравнительно высокая температура в газовой полости — все это создает условия, благоприятные для интенсивного разрушения изоляции.

Процесс разрушения после начала газообразования. При увеличении как числа разрядов конденсатора, так и напряжения разряда область, занятая газом, постепенно увеличивается. Рис. 4 показывает увеличение светящейся области в направлении от края фольги по мере возрастания напряжения и числа импульсов. Данные для построения кривых рис. 4 получены фотографированием разряда на краю секции.

С ростом числа разрядов, осуществляемых путем закорачивания конденсатора, снижается также ионизационное напряжение; особенно резко ионизационное напряжение падает после первых 10...20 импульсов (рис. 5).

При разложении масла наряду с газообразными продуктами выделяются и твердые углеводороды, так называемый X-воск. Изучение образований X-воска позволяет определить те места, где иони-

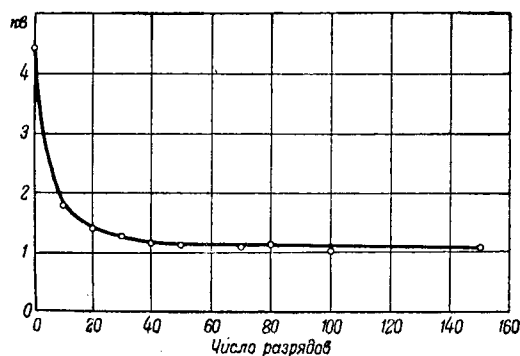


Рис. 5. Напряжение ионизации (действующие значения) в зависимости от числа разрядов, осуществляемых путем закорачивания конденсатора.

зационные процессы проходят более интенсивно, и выяснить влияние различных внешних факторов на условия ионизации.

В [Л. 1] указано, что воскообразование, как правило, наблюдалось под обкладками. В [Л. 3] предполагается, что процесс ионизации начинается у края фольги, затем уже распространяется в зазор между фольгой и прилегающим к ней листом бумаги. Осмотр в Харьковском политехническом институте значительного числа образцов секций конденсаторов, работавших как при переменном напряжении, так и в импульсном режиме, показал, что процесс воскообразования в основном идет у закраины конденсатора.

Секции, исследованные в [Л. 1], были сравнительно слабо сжаты, чем объясняется наблюдавшееся воскообразование под обкладками. Автор исследовал секции плоской конструкции, в которых затягивание ионизированного газа в места наибольшей напряженности поля (под обкладки) исключалось сжатием секции под давлением $2...8 \text{ кг/см}^2$.

Газо- и воскообразование на краю конденсаторной секции подтверждает предположение [Л. 3] о начальной стадии ионизации на краю фольги, чему способствует не только повышенная напряженность поля у края, но и возможность развития скользящего разряда в масляной прослойке по закраине, в плоскости фольги.

Процессы разрушения бумажно-масляной изоляции, работающей в импульсном режиме, сходны с процессами разрушения при переменном напряжении, если там есть условия для образования ионизационных процессов.

В конденсаторе, работающем при напряжении промышленной частоты 50 гц, при наличии ионизационного процесса вспышки происходят каждые полпериода, в импульсном режиме — только в момент разряда. Иначе говоря, при одном и том же сроке работы длительность процессов разрушения импульсных конденсаторов значительно меньше, чем силовых конденсаторов.

Интенсивность развития скользящего разряда при импульсном режиме выше, чем при напряжении промышленной частоты, чему способствует более высокая скорость нарастания напряжения при импульсе $\frac{dU}{dt}$.

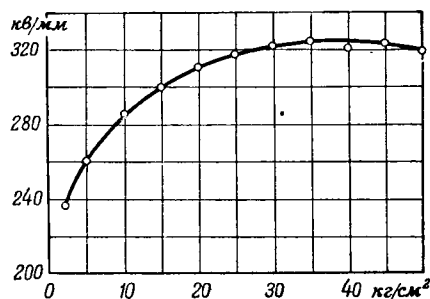


Рис. 6. Кратковременная электрическая прочность в зависимости от степени сжатия пакета конденсатора (испытание выпрямленным напряжением).

Данные исследования, в частности микроскопического изучения мест разрушения, позволяют предложить следующую схему процесса разрушения диэлектрика в импульсном режиме:

1. Образование газовых включений и X-воска на краю конденсаторной секции.

2. Увеличение размеров газовой области и развитие в ней скользящего разряда.

3. Разложение (науглераживание) X-воска и образование повреждений в первом от фольги листе бумаги.

4. Образование повреждений в первом, а затем и последующих листах бумаги. Процесс разрушения идет от листа к листу до тех пор, пока напряженность в наиболее слабом месте изоляции не достигнет пробивного значения; тогда пробой завершается.

Предполагается, что значительную роль в процессе разрушения диэлектрика играют местные взрывы в газовой полости при возникновении на краю фольги достаточно мощной искры.

Повышение давления в конденсаторе как средство увеличения его электрической прочности. Воскообразование на краю фольги еще раз подтверждает существенное влияние давления в конденсаторной секции на процессы газообразования: более интенсивно эти процессы протекают там, где сжатие секции слабое. Если у края фольги образовывались складки, произошли местные изменения давления, то в местах с повышенным давлением воскообразования не отмечалось.

В последнее время появились конструкции конденсаторов с повышенным давлением внутри бака, что обеспечивает увеличение его кратковременной электрической прочности и повышение начальных напряжений ионизации. В такой конструкции повышается давление в масляных прослойках, при сохранении размера этих прослоек.

Конденсаторы с большой запасаемой энергией для импульсных схем, как правило, изготавливаются из плоских секций. При такой конструкции секции можно повысить давление в самом пакете за счет увеличения давления при прессовке и соответствующего усиления стяжного устройства пакета конденсатора. Увеличение давления при прессовке уменьшает толщину масляных прослоек под фольгой и уменьшает область возможного газообразования. Начиная с определенного давления, газообразование происходит толь-

ко на закраинах. Одновременно увеличение давления при прессовке ведет к возрастанию удельной емкости конденсатора за счет повышения диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги и, снижению активного удельного объема вследствие повышения пробивной напряженности.

На рис. 6 показана зависимость пробивной напряженности от степени сжатия пакета при постоянном приложенном напряжении. При достижении удельных давлений порядка 40 кг/см^2 пробивная напряженность поля начинает снижаться, что, вероятно, связано с частичным разрушением бумаги у краев фольги. Применять давление больше $20 \dots 30 \text{ кг/см}^2$ нецелесообразно также по причине увеличения веса стяжного устройства.

При повышении давления растет также начальное напряжение ионизации. В секции конденсатора с десятью листами бумаги КОН-2 и А-15 при изменении удельного давления при прессовке от 1 до 30 кг/см^2 было получено возрастание начального напряжения ионизации от 19 до 26 кв/мм .

Выводы. 1. Основной причиной пробоя диэлектрика конденсатора, работающего в импульсном режиме, являются ионизационные процессы, приводящие к появлению скользящих разрядов на краю секции и постепенному разрушению диэлектрика. При расчете электрической прочности импульсных конденсаторов, кроме кратковременной электрической прочности, необходимо учесть и ионизационные характеристики.

2. Для увеличения срока службы конденсаторов, работающих в импульсном режиме, можно рекомендовать увеличение давления при прессовке до $20 \dots 30 \text{ кг/см}^2$ и периодическую дегазацию масла в баке конденсатора.

Литература

1. В. Т. Ренне, В. М. Файницкий и Д. С. Варшавский. Воскообразование в изоляции бумажно-масляных конденсаторов. Электричество, № 12, 1953.
2. Д. Н. Андреев. Органический синтез в электрических разрядах. Издательство АН СССР, 1953.
3. Г. С. Кучинский, В. Т. Ренне и В. М. Файницкий. Выбор толщины диэлектрика для бумажных силовых конденсаторов. Электричество, № 6, 1954.

[11.10.1954]



Устройство для измерения угла выбега синхронной машины

Доктор техн. наук В. Л. ИНОСОВ, инж. В. Н. ШЕСТОПАЛОВ и инж. В. Е. РЫБИНСКИЙ

Институт электротехники АН УССР

При исследовании устойчивости энергосистем наиболее важным параметром является угол между векторами э. д. с. генераторов. Поэтому при работе на динамической модели энергосистемы необходимо иметь устройство, которое позволило бы наблюдать за изменениями относительных углов между станциями и производить запись их значений на ленту осциллографа. Известно довольно много устройств подобного рода. Однако большинство из них отличается сложностью и малой надежностью.

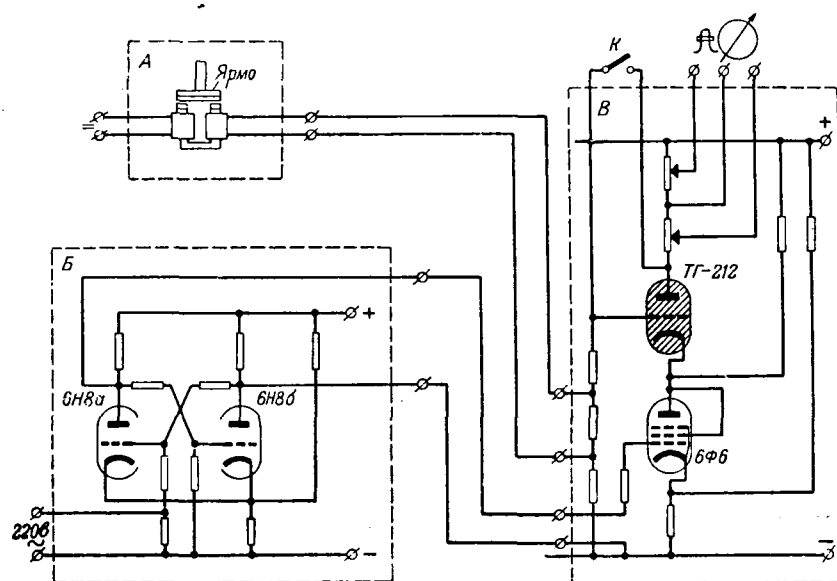
В лаборатории электростанций и энергосистем Института электротехники Академии наук УССР разработано устройство с электромагнитным датчиком для измерения угла выбега синхронной машины, схема которого показана на рис. 1. Устройство состоит из трех блоков: электромагнитного датчика А, триггера В и электронного реле В.

Электромагнитный датчик выполнен в виде электромагнита с сердечником, набранным из трансформаторной стали П-образной формы. Ярма электромагнита в количестве, равном числу пар полюсов синхронного генератора, жестко прикреплены к его полумуфте. При вращении синхронного генератора ярма электромагнита, проходя мимо полюсов сердечника, замыкают собой магнитное поле сердечника и резко увеличивают величину магнитного потока. На стержнях сердечника размещены две обмотки, одна служит для намагничивания, а во второй

наводится э. д. с. при изменении магнитного потока. Питание первичной обмотки может быть осуществлено от любого источника постоянного тока и, в частности, от возбудителя синхронного генератора. Импульсы э. д. с. вторичной обмотки управляют работой исполнительного органа устройства — электронного реле.

Электромагнит укреплен на специальной дуге, вдоль которой он может перемещаться на 180° электрических градусов, занимая любое положение в пределах одного полюсного деления. При этом сохраняется постоянным воздушный зазор между полюсами сердечника и ярмами. Это приспособление дает возможность изменять в широких пределах начальную фазу импульсов э. д. с., что очень важно в условиях лабораторной работы, а также может быть полезно при первичной наладке устройства.

На работу устройства существенное влияние оказывает форма ярем и полюсов электромагнита. Ее следует выбрать таким образом, чтобы изменение магнитного потока происходило на возможно меньшей длине пути ярма. Этого можно достичь, применяя узкие ярма и полюса электромагнита и малый воздушный зазор между ними. Вполне удовлетворительные результаты были получены при зазоре порядка $0,3 \dots 0,5$ ширины полюса и при отношении ширины полюса к длине полюсного деления по окружности ярем порядка $0,02 \dots 0,01$. При этих соотношениях изменение э. д. с. от максимального положительного



1. Схема устройства с электромагнитным датчиком для измерения угла выбега синхронной машины.

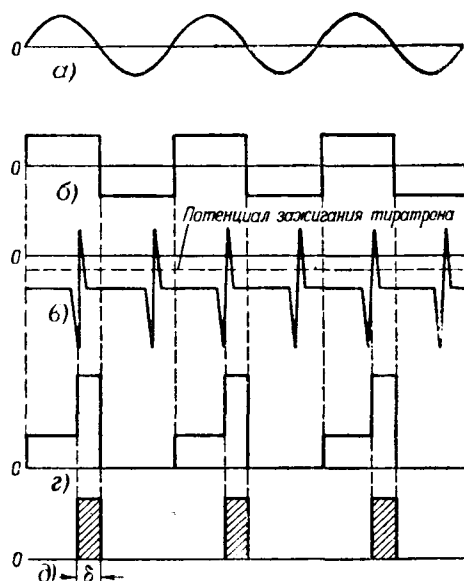


Рис. 2. Напряжения и токи в схеме рис. 1. а — напряжение сети; б — напряжение выхода триггера; в — напряжение на сетке триггера; г — ток электронной лампы 6Ф6; д — ток тиратрона ТГ-212.

до максимального отрицательного значения происходит при повороте ротора на 5...6 электрических градусов, что приводит к образованию импульса с достаточно крутым фронтом.

Амплитуда импульса в значительной мере зависит от сопротивления внешней цепи, на которую нагружен датчик. Если применить измерительное устройство, выполненное на электронных лампах, то потребление измерительного устройства может быть практически сведено к нулю, а сопротивление цепи датчика может быть выбрано весьма большим. Однако при ударном нарастании э. д. с. в цепи вторичной обмотки датчика возбуждаются колебания, обусловленные самоиндукцией и распределенной емкостью витков обмотки датчика и соединительных проводов. Эти колебания могут быть погашены при увеличении нагрузки датчика. В прилагаемой ниже таблице приведены значения амплитуды и крутизны фронта импульса в зависимости от величины сопротивления внешней цепи датчика.

Сопротивление внешней цепи, ком	13	15	22	33
Амплитуда импульса, в	170	184	204	220
Крутизна фронта импульса, $\frac{в \cdot 10^5}{сек}$	6,1	6,6	7,4	7,9

В описываемом устройстве входное сопротивление исполнительного органа равно 22 ком. При этом указанные колебания полностью погашены, а амплитуда импульса вполне достаточна для работы устройства.

Напряжение сети, по отношению к которому определяется положение ротора синхронного генератора, подается на вход триггера измерительного устройства, выходное напряжение которого

совместно с импульсами датчика управляет электронным реле.

В качестве триггерного устройства использован симметричный реостатный триггер, построенный на двойном триоде 6Н8. На сетку первого триода триггера подается напряжение сети или любой точки схемы, относительно которой требуется измерять угол выбега. Минимальное напряжение срабатывания триггера составляет около 10 в. Следовательно, при подаче на сетку 220 в переменного тока постоянное запаздывание триггера не превышает двух электрических градусов. Оно не сказывается на работе схемы, так как может быть учтено при настройке. Величина напряжения может колебаться в довольно широких пределах, не приводя к сколько-нибудь заметному изменению угла запаздывания триггера. Так, при изменении напряжения сети на $\pm 10\%$ запаздывание триггера изменяется всего на $\pm 0,15$ электрических градуса. Для получения отрицательного смещения в триггере используются общее катодное и балластное сопротивления. Триггер допускает управление несколькими электронными реле.

В электронном реле последовательно включены электронная лампа 6Ф6 и тиратрон ТГ-212. Работа схемы поясняется рис. 2. Разность потенциалов анодов триггера подается на сетку электронной лампы, надежно отпирая или запирая ее в зависимости от полярности импульсов триггера. Отпертая лампа prepares цепь для включения тиратрона. Зажигается тиратрон импульсами электромагнита. Полярность импульсов, подаваемых на сетку тиратрона, выбирается таким образом, чтобы отпирание тиратрона производилось на наиболее крутой части импульса, т. е. на фронте второй полуволны э. д. с. Гасится тиратрон запирающим электронной лампы. Таким образом, время горения тиратрона ограничивается поло-

жительным импульсом электромагнита и отрицательным импульсом триггера. Так как время возникновения импульса электромагнита связано с положением ротора машины, а импульса триггера с напряжением сети, то длительность горения тиратрона зависит от величины угла выбега синхронной машины. Ввиду того, что импульсы анодного тока имеют прямоугольную форму, среднее значение анодного тока тиратрона находится в линейной зависимости от значения угла выбега. Это обстоятельство является чрезвычайно важным для осциллографирования. В схему введены катодное и балластные сопротивления для получения отрицательного смещения. Ключ K (рис. 1) предназначен для проверки настройки

прибора. При замкнутом ключе тиратрон отперт и ток в его анодной цепи управляется только сигналами триггера. Показание прибора в этом случае будет максимальным.

Настоящее устройство отличается большой надежностью и не требует присоединения к валу генератора какого-либо сложного оборудования. Устройство может найти применение в лабораторной технике — при исследовании режимов энергосистем на динамических моделях, а также на электростанциях при необходимости производить управление по внутреннему углу генератора. С применением телепередачи возможно будет производить управление и по полному углу выбега синхронного генератора.

[24.8.1954]



Графическое вычисление комплексных сопротивлений

Инж. Б. А. ХАНОВ

Москва

Вычисление смешанного соединения комплексных сопротивлений при помощи геометрических построений не пользуется тем вниманием, которого оно заслуживает. Объясняется это тем, что способ вычисления полного сопротивления, эквивалентного двум параллельно включенным, сопоставимый по простоте и наглядности с построением диагонали параллелограмма, — мало известен. Целью настоящей статьи является описание такого способа — *способа пяти перпендикуляров*.

Для более полной оценки удобств применения метода пяти перпендикуляров в расчетной практике напишем аналитическое решение поставленной задачи:

$$\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = Z_0 \frac{R_1(R_2^2 + X_2^2) + R_2(R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2(X_1 + X_2)^2} + j \frac{X_1(R_2^2 + X_2^2) + X_2(R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2(X_1 + X_2)^2}. \quad (1)$$

Левой частью равенства (1) пользуются при теоретических анализах, а правой, требующей для вычисления многих арифметических операций, — при решении числовых примеров.

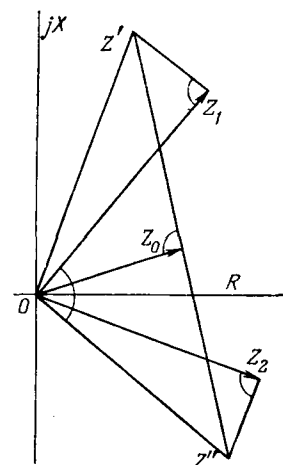


Рис. 1.

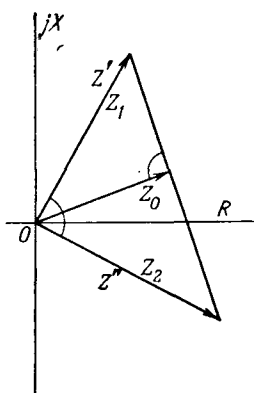


Рис. 2.

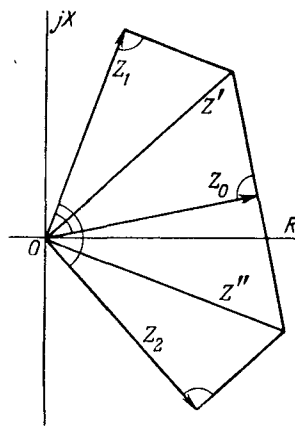


Рис. 3.

Рис. 1, 2 и 3 показывают применение способа пяти перпендикуляров для определения полного сопротивления Z_0 в случаях, когда угол между векторами Z_1 и Z_2 — острый, прямой или тупой. Способ состоит в следующем.

1. Находят точки Z' и Z'' пересечения двух пар прямых, где в каждой паре одна прямая перпендикулярна одному из векторов в его начале, а другая — другому вектору в его конце. Например, точка Z' определяется пересечением прямой, перпендикулярной вектору Z_1 в его конце, и прямой, перпендикулярной вектору Z_2 в его начале.

2. Из начала координат опускают перпендикуляр на прямую, проходящую через точки пересечения Z' и Z'' , который и является искомым вектором Z_0 .

Справедливость описанного способа докажем средствами аналитической геометрии. Уравнения прямых, перпендикулярных вектору Z_1 в его конце, а вектору Z_2 в его начале, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} R_1 R + X_1 X &= R_1^2 + X_1^2; \\ R_2 R + X_2 X &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Совместное решение этих уравнений дает координаты точки пересечения первой пары прямых:

$$\begin{aligned} R' &= \frac{X_2(R_1^2 + X_1^2)}{R_1 X_2 - R_2 X_1}; \\ X' &= -\frac{R_2(R_1^2 + X_1^2)}{R_1 X_2 - R_2 X_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения прямых, перпендикулярных век-

тору Z_2 в его конце и вектору Z_1 в его начале, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} R_2 R + X_2 X &= R_2^2 + X_2^2, \\ R_1 R + X_1 X &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Совместное решение этой системы дает координаты точки пересечения второй пары прямых:

$$R'' = -\frac{X_1(R_2^2 + X_2^2)}{R_1 X_2 - R_2 X_1}; \quad X'' = \frac{R_1(R_2^2 + X_2^2)}{R_1 X_2 - R_2 X_1}. \quad (5)$$

Далее, уравнения прямой, проходящей через точки Z' и Z'' , и прямой, к ней перпендикулярной и проходящей через начало координат, будут:

$$\left. \begin{aligned} (X'' - X')R - (R'' - R')X &= R'X'' - R''X'; \\ (R'' - R')R + (X'' - X')X &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решение этой системы дает координаты конца искомого вектора Z_0 :

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{(X'' - X')(R'X'' - R''X')}{(R'' - R')^2 + (X'' - X')^2}; \\ X_0 &= -\frac{(R'' - R')(R'X'' - R''X')}{(R'' - R')^2 + (X'' - X')^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

◇ ◇ ◇

Из истории электротехники

Карл Фридрих Гаусс

К 100-летию со дня смерти

23 февраля 1955 г. исполнилось 100 лет со дня смерти одного из выдающихся математиков прошлого — Карла Фридриха Гаусса, обессмертившего свое имя исследованиями не только в различных областях математики, но и в таких отраслях точного знания, как физика, геодезия и астрономия.

Гаусс родился 30 апреля 1777 г. в Брауншвейге в семье водопроводчика. Уже в раннем возрасте Карл Фридрих Гаусс обнаруживал исключительную одаренность. Он получил образование сначала в гимназии в Брауншвейге и затем в университете в Геттингене, который закончил в 1798 г. После этого, в 1799 г., он получил докторскую степень в Гельмштеде и звание приват-доцента в Брауншвейге. С 1807 г. и до конца своей жизни Гаусс был ординарным профессором кафедры математики и астрономии Геттингенского университета



Подстановка в эти выражения соответствующих значений из (3) и (5), при условии что $R_1 X_2 - R_2 X_1 \neq 0$, дает как раз те компоненты, которые написаны в правой части (1).

При $R_1 X_2 - R_2 X_1 = 0$ векторы коллинеарны, и к ним с учетом знака применима формула для активных сопротивлений.

Между прочим, для векторов, совпадающих с осями координат, из рис. 2 следует простой способ пересчета последовательно соединенных активного и реактивного сопротивлений в параллельно соединенные, и наоборот. Далее, последовательность рис. 1, 2 и 3 дает очень хорошее представление о возрастании активного сопротивления при параллельном резонансе. Комбинируя способы пяти перпендикуляров и двух параллелей (с построением параллелограмма), можно графически решать задачи на вычисление полных сопротивлений и эквивалентных комбинаций последовательных и параллельных соединений комплексных сопротивлений.

В заключение заметим, что тем же способом вычисляется проводимость, эквивалентная двум последовательно соединенным проводимостям.

[23. 10. 1954]

и директором университетской обсерватории. В 1802 г. Гаусс был избран членом-корреспондентом (а с 1824 г. — иностранным членом) Петербургской академии наук.

Такова небогатая внешними событиями биографическая канва жизни Гаусса, на которой развевалась его необычайно плодотворная научная деятельность. Уже в самом ее начале Гаусс получил широкую известность среди ученых всего мира в связи с выходом в свет исключительного по своему значению исследования в области теории чисел, высшей алгебры и других вопросов теоретической математики «Disquisitiones Arithmeticae» и

расчетов орбиты малой планеты Цереры. Но эта известность в научных кругах и его растущая слава как «первого математика» того времени не избавили Гаусса от материальных невзгод, житейских трудностей и непонимания окружающими

значения и роли проводимой им работы; они упрекали Гаусса в неумении устраивать свою жизнь и напрасной трате сил и времени на бесцельную, по их мнению, работу.

Занимаясь в первый период своей научной деятельности вопросами математики, главным образом применительно к задачам астрономии, а позднее геодезии, Гаусс внес неоценимый вклад в теоретическую и вычислительную математику, предложив ряд методов приближенных вычислений. За период с 1798 по 1827 г. им были выпущены такие фундаментальные труды, как «Арифметические исследования», «Теория движения небесных тел», «О гипергеометрических рядах», «Теория кривых поверхностей». Наряду с многочисленными исследованиями абстрактных теоретических вопросов им был разработан способ наименьших квадратов для нахождения наилучшего приближения функций, даны основы теории возмущений, получена имеющая исключительное значение и носящая его имя функция распределения вероятностей для случайных некоррелированных событий и предложен ряд новых идей и понятий. Все это определило на долгое время пути развития многих отраслей математики.

Гауссу принадлежат важные работы, связанные с определением декремента затуханий, динамикой успокоения стрелки измерительных приборов. Следует отметить вклад Гаусса в теорию колебаний.

Труды Гаусса фактически создали высшую геодезию, превратив существовавшее до этого землемерное ремесло в большую отрасль науки, которая в своем развитии до наших дней опирается на пути и методы, развитые Гауссом и изложенные в его труде «Исследования о предмете высшей геодезии», вышедшем в свет в 1842—1847 гг.

Научное творчество Гаусса обессмертило его имя не только в различных областях математики, астрономии, геодезии, оптики, но и в области учения об электричестве и магнетизме.

Примерно с 1830 г. Гаусс приступил к углубленному изучению электрических и магнитных явлений. Интересы Гаусса к этим вопросам возникли в значительной мере под влиянием А. Гумбольдта — одного из крупных ученых того времени, являвшегося характерным представителем описательного естествознания. А. Гумбольдт заинтересовал Гаусса проблемами земного магнетизма; при содействии Гумбольдта произошло знакомство Гаусса с В. Вебером — знакомство, приведшее впоследствии к многолетней совместной научной работе.

К этому времени уже были известны результаты опытов Эрстеда (1820 г.) по действию тока на магнитную стрелку; законы этого действия, сформулированные Био и Саваром в 1821 г.; работы Ампера (1822—1826 гг.) и Ома (1827 г.). Теоретические же работы Грина, положившие основы теории потенциала, выполненные в 1828 г., долгие годы оставались неизвестными и увидели свет лишь спустя много времени, когда они были переизданы Томсоном.

Но эти первые шаги на пути создания электро-

динамики еще не были сведены в одну систему, что позднее удалось сделать К. Максвеллу. Даже в области теории статических явлений не было единых методов анализа. Взявшись за эти вопросы в связи с измерениями земного магнитного поля, Гаусс со свойственным ему умением рассматривать частные задачи как области применения общих методов начал с «наведения порядка» в основных определениях и единицах. И уже в 1832 г. появился трактат Гаусса, содержащий изложение основных положений разработанной им абсолютной системы единиц. Трудно переоценить значение этой работы, впервые приведшей к логически безупречной системе единиц, основанной на трех фундаментальных понятиях — массы, длины и времени. В своем первом варианте абсолютная система единиц, получившая впоследствии название системы единиц Гаусса, исходила из массы 1 мг, длины 1 мм и единицы времени, равной 1 сек. Лишь в 1881 г. на Парижском конгрессе электриков в основу этой абсолютной системы единиц были положены грамм, сантиметр и секунда; эта система единиц носит название CGS с обозначением соответственно CGSE или CGSM.

Введение единой абсолютной системы единиц позволило сопоставлять величины, характеризующие совершенно различные на первый взгляд процессы, и приводить в стройную систему получающиеся из экспериментов частные количественные связи и соотношения.

В процессе выполнения магнитных измерений Гауссом были созданы методы расчета поля земного магнетизма, методы аппроксимации компонент этого поля и методы обработки результатов магнитных измерений. Характерно, что и в экспериментальную методику магнитных измерений Гаусс внес такие усовершенствования, как метод зеркального отсчета и подвеса вращающихся частей прибора на тонкой нити, сохранившие и до наших дней свое исключительное значение в точных измерениях.

Создавая в 30-х годах XIX в. первую в мире магнитную обсерваторию (открыта в 1836 г.), Гаусс последовательно разработал методы, обеспечивающие высокую точность проводимых измерений, в частности путем работы в помещениях, построенных без применения магнитных материалов.

Основные результаты работ в области исследования магнитного поля земли и ряда магнитных явлений изложены в капитальном труде Гаусса «Общая теория магнетизма», вышедшем в 1838 г.

К этому же периоду относится создание Гауссом совместно с Вебером (1833 г.) системы электромагнитного телеграфа, который связывал одно из помещений университета в Геттингене с обсерваторией. Это изобретение было сделано спустя год после создания Шиллингом в России первого в мире электромагнитного телеграфа.

Особое значение для теоретической физики и в первую очередь для теории электрических и магнитных явлений имеет развитая Гауссом теория потенциала. Независимо от Грина и не зная о его работах, Гаусс в 1837—1840 гг. в своем трактате «О силах, действующих обратно пропор-

ционально квадрату расстояния» строго развил теорию потенциала как основу для построения математической теории полей, для которых силы взаимодействующих тел, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними. Развита Гауссом теория потенциала легла в основу теории электрических полей.

Еще раньше, до Гаусса, были известны уравнения Лапласа $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$ и уравнение Пуассона $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -4\pi\rho$, которые были созданы для решения задач в теории тяготения. При этом уравнение Лапласа применимо в той части пространства, которая свободна от действующих масс. Уравнение Пуассона позволяет решать ту же задачу при наличии в данной точке плотности ρ действующих масс. Уже Грин, опираясь на родственность зависимости сил тяготения и электрического взаимодействия от расстояния, применил уравнения Лапласа и Пуассона к расчетам электрических полей и электрических зарядов на проводниках. Однако Гаусс, повторив независимо от Грина эти выводы, дал понятию потенциала (V —в уравнениях Лапласа и Пуассона) другое, чем Грин, толкование и связал значение этой величины с работой, совершаемой при переносе заряда из данной точки в бесконечность.

Гауссом было введено понятие эквипотенциальных поверхностей, или поверхностей равного уровня, и дано определение линий сил, нормальных к этим поверхностям.

Уточнив основные определения, относящиеся к теории потенциала, Гаусс далее доказал ряд новых принципиальных положений и теорем, определявших основные контуры теории потенциалов и вытекающей из нее теории потенциальных полей. Среди этих теорем заслуживает особого упоминания одно из фундаментальных соотношений электрического поля, также носящее имя Гаусса. Это соотношение устанавливает связь между потоком вектора электрического поля через замкнутую поверхность и общим зарядом, заключающимся внутри этой поверхности, и записывается в современных обозначениях так:

$$\oint_S E_n dS = 4\pi \sum_i e_i.$$

Здесь E_n — компонента поля, нормальная к поверхности S , и $\sum_i e_i$ — сумма всех зарядов, заключенных внутри замкнутой поверхности S . Эта теорема Гаусса может рассматриваться как частный случай общей теоремы Гаусса, полученной им в той же работе. В этой, более общей форме теорема Гаусса — одно из фундаментальных соотношений в векторном анализе — дает:

$$\oint_S a_n dS = \int_V \left(\frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} \right) dv = \int_V \operatorname{div} a dv,$$

где величина $\frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$, являющаяся скаляром, представляет собой то, что называется дивергенцией вектора $\mathbf{a}$.

Следует отметить, что эта классическая формула в виде соотношения между поверхностным и объемным интегралами от некоторых функций за несколько лет до ее опубликования Гауссом была получена нашим соотечественником, одним из крупнейших математиков М. В. Остроградским. Формула Остроградского в современных обозначениях имеет вид:

$$\begin{aligned} \iiint_V (X dy dz + Y dz dx + Z dx dy) = \\ = \iiint_V \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) dx dy dz, \end{aligned}$$

где X, Y, Z — функции координат x, y, z , применительно к векторным полям, представляющие собой проекции вектора $\mathbf{a}$ на оси координат.

Вполне справедливо поэтому приведенную выше формулу называют формулой Гаусса-Остроградского.

Исключительное значение развитых Гауссом идей в дальнейшем развитии теории потенциала и потенциальных полей позволяет считать Гаусса одним из создателей теории электрического поля. Следует подчеркнуть, что Гаусс, развивая свою теорию применительно к законам электростатического взаимодействия, отчетливо сознавал применимость всех выведенных соотношений только для статики. В то время как Вебер в 1846 г. пытался дать математическую формулировку для взаимодействия движущихся зарядов, исходя из идеи мгновенного дальнего действия, и его формула в дальнейшем послужила тормозом к широкому распространению идей Фарадея-Максвелла, Гаусс в 1845 г. в одном из писем к Веберу замечает, что добавочные силы взаимодействия движущихся частиц электричества должны быть выведены из воздействия, имеющего конечную скорость распространения.

К сожалению, это замечание Гаусса не было воспринято Вебером для разработки соответствующей теории, и он, оставшись на своих позициях мгновенного воздействия электрических сил, долго и упорно противодействовал распространению электродинамики Максвелла-Герца.

Приведенный пример с высказанным вскользь замечанием Гаусса вообще характерен для этого исключительного мыслителя. Вплоть до самого последнего времени в его рукописях и записях, которые, к сожалению, неполностью дошли до наших дней, обнаруживаются отдельные высказывания и выводы, показывающие необычайно глубокое предвидение Гауссом путей развития разнообразных разделов математики и математической теории физических явлений. Стремление Гаусса публиковать только вполне законченные результаты своих исследований — дань традициям того времени и предшествующей эпохи, когда каждый исследователь стремился хранить у себя все

секреты своего творчества и «сырье» — идеи, которые становились драгоценностями только после их обработки руками самого мастера. Однако развитие общества того времени не могло не оказывать влияния на творчество Гаусса, который жил в эпоху, чрезвычайно богатую крупнейшими историческими событиями. В дни его юности произошла буржуазная революция во Франции; он был в расцвете сил, когда по Европе прокатилась волна наполеоновских войн, и на склоне лет он был свидетелем революции 1848 г. При этом Гаусс, оставаясь в стороне от общественных событий и никак не характеризуя своего отношения к политическим вопросам, логикой исторического хода развития был привлечен к решению ряда практических вопросов. Он принимал участие в организации и проведении картографических и геодезических работ. Проводимое им изучение магнитного поля земли также было связано с практическими вопросами навигации. И здесь для Гаусса особенно характерно то, что он умел применить безупречные и строгие математические методы к решению практических задач и, наоборот, решая многочисленные практические задачи, находил в них основу для общих абстрактных построений, не забывая разрабатывать бесценные приемы практической вычислительной математики. Недаром мы встречаемся с именем Гаусса и

в области практики численных расчетов (например, Гауссовы логарифмы разностей и сумм) и при рассмотрении случайных процессов в технике, статистике, теоретической физике, электродинамике, геодезии и многочисленных разделах математики. В системе единиц гауссом (гс) названа единица магнитной индукции, входящая в абсолютную систему единиц Гаусса.

Заслуги Гаусса в различных отраслях знания позволяют нам видеть в его лице не только «короля математиков», как гласит надпись на его могиле и на выбитой в его честь в 1855 г. медали, но и широкого мыслителя, связанного с практикой, физика-теоретика, всеми своими трудами способствовавшего прогрессу научных знаний.

Литература

1. C. F. Gauss. Werke. Bd 1—11, Göttingen (издается с 1908 г. по настоящее время).
2. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Leipzig (вып. 2, 5, 14, 19, 53, 55, 122, 135 и 177), 1899.
3. Ф. Клейн. Лекции о развитии математики в XIX столетии. ОНТИ, 1937.
4. Ф. Даннеман. История естествознания, ОНТИ, т. III, 1938.
5. Ф. Розенбергер. История физики. ОНТИ, ч. III, вып. 1, 2, 1935—1936.

Доктор физ.-матем. наук, проф. В. В. Мизулан
Московский государственный
университет имени Ломоносова



Дискуссии

ПОЛЕ КАК ВИД МАТЕРИИ

(Статья О. Б. Брона, *Электричество*, № 7, 1954; № 2, 1955)

Инж. И. Е. КОЖЕМЯКИН

г. София, Болгария

Понятие «силовое поле» представляет интерес также и с терминологической точки зрения. Всякий термин, конечно, условен. Но его условность вторична, и термин должен иметь смысловую связь с языком. К сожалению, этот принцип не всегда соблюдается, и встречаются термины, при которых означенное понятие не соответствует, а иногда противоречит обыкновенному смыслу употребленного слова. В одних случаях это объясняется тем, что сложность некоторых физических понятий не может быть точно выражена одним словом или кратким сочетанием слов, что необходимо для термина. В других же — тем, что с течением времени данное понятие эволюционирует, а термин по традиции остается тот же, хотя уже и не соответствует новому понятию.

Нечто подобное произошло и с термином поле. Само слово поле в обыкновенной речи означает определенную часть пространства; это одно из частных понятий пространства, как, например, объем, место, область и т. д. Но пространство хотя и является атрибутом материи и, как правильно указывает автор статьи, не существует без материи, все же необходимо как понятие и не может быть отрицаемо. Точно так же нельзя отрицать и его частных понятий, например понятия поле как пространства, в котором проявляются определенные силовые действия

(гравитационные или электромагнитные). Это классическое определение является в языковом отношении самым правильным. Правда, для краткости выражений мы часто приписываем полю свойства, лишь проявляющиеся в нем (например, напряженность), и таким образом смешиваем место с содержанием этого места. Однако эти неизбежные неточности языка не должны смущать нас при определении понятий первостепенной важности. Если же доказано, что поле содержит особого вида материю, то ради правильности терминологии необходимо найти другое, более подходящее название для этой материи, а термин поле сохранить для обозначения лишь соответствующего пространства. Ведь в рассматриваемой статье вводится понятие «пространство данного вида материи» (стр. 7, пп. «а» и «б»). Вот это пространство и есть поле.

В связи с поднятым вопросом нужно также отметить и то обстоятельство, что весьма часто смешиваются понятия «дальнодействие» и «действие на расстоянии». Но в целях большей дифференциации в терминологии желательно было бы их разделять, так как первое из них условно означает действие без посредства какой-либо материальной среды и является пережитком прошлого физики, тогда как второе есть всякое действие, которое количественно зависит от расстояния. Следовательно, термин «действие на расстояние» правильно характеризует категории центральных сил притяжения и отталкивания.

Инж. Г. П. АБРАМОВИЧ

Белорусский институт инженеров железнодорожного транспорта

Рассмотрение вопросов строения электромагнитного поля приводит к проблеме поля вообще. С другой стороны, всякая попытка разрешить проблемы взаимодействия неизбежно вызывает необходимость анализа строения поля. В этом вопросе теоретическая электротехника и физика соприкасаются самым непосредственным образом.

Рассматривая проблему структуры поля с позиции материалистической науки, следует исходить из вошедшего уже в современные учебники физики понятия о поле как виде материи. Поскольку на достигнутом наукой уровне развития материальность поля не вызывает сомнений, встал в свою очередь и постепенно разрешается вопрос об особенностях строения т.с. многообразного материального процесса, который носит наименование поля.

Если поле образуется другими видами вещества и может превращаться в другие виды вещества, то не дает ли нам все это оснований видеть в поле лишь одну из возможных вещественных структур? Утверждение о принципиальном отличии поля от вещества возникло на прошлой ступени развития науки и приобретает в настоящее время при углубленном изучении вещества агностический характер, поскольку кладет непреодолимую преграду для рассмотрения структуры поля и способов взаимоперехода полевых и неполевых форм вещества, материи. Возьмем, например, атом любого вещества. Известно, что он не является сплошным образованием, а отдельные составляющие его частицы находятся в подвижной материальной связи через посредство полей: электромагнитного, гравитационного, нуклонного и др. Если поля невещественны, то в объеме вещественного образования — атома — большую его часть составляет невещественная структура, что явно нелепо. У нас также нет веских оснований считать сами элементарные частицы ни сплошными шариками, ни безразмерными материальными точками; неоднородность внутреннего строения с присущими ей противоречиями может иметь место и в этом случае. Правильное теоретическое представление должно органически включать учет неизбежно существующих противоречий строения; это возможно, если поле считать вещественным. Поэтому решительного предположения заслуживает точка зрения, принимающая вещественность поля, причем остается открытым путь к дальнейшему развитию теории.

Рассмотрение структурных особенностей поля — задача большой сложности и трудности. Разрешение этой задачи не может быть дано сразу или изложено в рамках одной работы. Однако наступила пора перейти к конкретным попыткам решения вопроса о строении поля или по крайней мере сформулировать основные, принципиальные его положения. Понятно, что дело идет здесь не о механической модели, которая и не может быть построена, но о некотором определенном физическом представлении, соответствующем фактическим данным и удовлетворяющем теоретическим требованиям.

Анализируя положения статьи О. Б. Брона, следует отметить несколько необычный аспект рассмотрения вопроса. Нет необходимости оспаривать закономерность той постановки проблемы, которая принята в рассматриваемой статье и является безусловно назревшей. К сожалению, автор статьи не отмечает (или не улавливает), что его подход к делу относится к несколько иным сторонам действительности, чем обычно встречающийся. Поэтому получается, что местами борьба ведется с ветряными мельницами. В самом деле, отметая некоторые распространенные идеалистические определения поля, автор не учитывает, что в этих определениях не шла речь и не ставился вопрос о структуре поля; поэтому следовало прежде всего прямо заявить о такой постановке вопроса.

Сделаем за ограниченностью места несколько замечаний. Утверждение: «Там, где находится атом одного вещества, не может одновременно находиться атом другого вещества», строго говоря, не имеет оснований. Если объемом атома считать весь объем его до внешних электронных оболочек включительно, то при химических реакциях, как известно, происходит наложение объемов. Не говоря уже о том, что если даже для макроскопических материальных сред и имеет смысл старое квазиклассическое свой-

ство «непроницаемости», то лишь весьма относительный и если оно применимо, то со многими допущениями и в узких пределах. Даже если бы в качестве объема атома рассматривался объем его ядра, то и в этом случае, принимая во внимание ядерные реакции, следовало бы допустить возможность известного наложения объемов, например когда в ядро попадает нейтрон. Следовательно, делая общее теоретическое заключение, что в объеме, занимаемом одним телом, не может находиться другое, мы совершили бы существенную ошибку, совершили бы отход на позиции физики XVIII в.!

Вторая часть первого пункта рассуждения о различиях между полем и веществом еще менее обоснована, чем первая, и содержит другие прямые фактические ошибки. В самом деле, на каком основании следует согласиться с тем, что «... в одном и том же объеме может существовать много различных полей, не оказывающих обнаруживаемых влияний друг на друга»? Уже со времен Фарадея известно о вращении плоскости поляризации света в магнитном поле, о существовании эффекта двойного магнитного лучепреломления и т. д. Не говорит ли все это против утверждения об отсутствии воздействия полей друг на друга? Кому из лиц, знакомых с современной физикой, не известно о влиянии гравитационного поля на световое электромагнитное, влиянии, выражающемся в отклонении луча света мощным гравитационным полем? Разве этот факт говорит в пользу независимости полей друг от друга?

Следующая неточность допущена из-за абсолютизации релятивистской формулы массы¹. Эта абсолютизация приводит к сомнительному в настоящее время утверждению, будто фотоны не имеют массы покоя. Впрочем, здесь виноват не столько О. Б. Брон, сколько некоторое несовершенство и предварительный характер самой физической теории в том, что вообще касается этого пункта. Фактически, с принципиальной стороны, дело обстоит следующим образом: при учете уравнения неразрывной связи массы и энергии $W = mc^2$ мы должны принять, что фотоны, переносщие некоторую определенную энергию, обязательно должны переносить также и некоторую массу, связанную неразрывно с переносимой энергией. Это совершенно неизбежно и не зависит от теоретических взглядов на природу массы или причинную обусловленность взаимосвязи массы и энергии. Никакое другое заключение не может быть сделано, если только не отступать либо от закона сохранения массы, либо от взаимосвязи массы и энергии, или от законов логики.

Утверждение о чисто корпускулярном характере поля не соответствует новейшим научным данным, ибо известно, что действия могут передаваться в вакууме в отсутствие фотонов. С другой стороны, корпускулярный характер поля оставляет открытым вопрос о взаимосвязи и взаимодействии его частиц. Не дальное действие же — между частицами поля? Предлагаемый в анализируемой статье полуответ только запутывает дело.

Мимоходом, не вдаваясь в особые объяснения, О. Б. Брон отмечает рассмотрение электрического и магнитного полей как частных случаев состояния электромагнитного поля. Все, что в этом отношении известно и покоится на незыблемом фундаменте научного опыта и технической практики, объявляется вдруг несуществующим, хотя это делается и в неявной форме.

Надуманным является разделение в статье электромагнитной индукции на две самостоятельные: электромагнитную и магнитноэлектрическую индукции. Как будто можно отделить фактически одну из этих индукций от другой, например в работающей электрической машине?!

В довершение неожиданностей природа магнитного поля в электромагнитной волне признается иной, чем природа магнитного поля, создаваемого током в проводе. Аналогично автор поступает и с электрическими полями. Автор не замечает, что у него одна часть статьи противоречит другой: описывая процесс образования электромагнитной волны, он указывает, что при быстром изменении направления тока в проводе «энергии и массы» не успевают вернуться и излучаются. Но если магнитное поле электромагнитной волны вообще не то, которое создает

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

провод с током, то следовало бы предусматривать особый процесс превращения одного магнитного поля в другое магнитное же (!). Это что-то новое в науке? К сожалению, эта новость не подтверждается никакими фактами!

Неизвестно, для чего и почему утверждается, что к магнитному и электрическому полям в электромагнитной волне понятие ускорения неприменимо. А замедление (ускорение со знаком минус) применимо или нет? Если применимо понятие замедления, то как же может быть неприменимо ускорение? Может ли электромагнитное поле в узком смысле преобразоваться в другой вид энергии? Может ли электромагнитное поле перейти в среду, где скорость его распространения уменьшится?

В п. 9 раздела о различиях между полем и веществом утверждается, что «силы в электромагнитном поле ничтожны по сравнению с силами в механических системах». Спросим автора: в обычном асинхронном электродвигателе существует электромагнитное поле или нет? Так ли уж ничтожны силы в этом электромагнитном поле? Подъемные электромагниты — это просто механическая система или нет? Утверждать безоговорочную малость сил в электромагнитном поле по меньшей мере неосновательно, если также иметь в виду, что в так называемых «механических системах» структурная целостность тел определяется в весьма значительной степени именно силами электромагнитного поля!

В п. 10 этого же раздела отмечается: «электромагнитное поле не может служить системой отсчета». Это различие между полем и веществом необосновано хотя бы потому, что в определенных условиях любая заведомо вещественная среда может оказаться непригодной в качестве системы отсчета. Для аэронавта воздух не может быть системой отсчета, для дрейфующей станции «Северный полюс» вода океана не может быть системой отсчета. Даже белый лист бумаги не может быть системой отсчета для его внутренних точек, без рассмотрения контура листа!

«Электромагнитное поле нельзя ни создать, ни уничтожить», — утверждает О. Б. Брон на стр. 8, забыв о предыдущей, 7-й странице, где он установил, что, ударившись о поглощающую преграду, электромагнитная волна «перестает существовать». На самом деле, если электромагнит-

ное поле — вид материи, то он действительно может перейти в другой вид и перестанет существовать как данный. Значит, уничтожить поле можно, создать — тоже, но, конечно, все это — на материалистической основе, когда соблюдаются объективно существующие в природе законы сохранения массы и энергии. Свидетельство тому — электротехническая практика.

Неверно трактовано О. Б. Броном понятие емкости. Написав из уравнения энергии для единицы объема поля

$$C = \frac{2}{U^2} W_e, \text{ где } W_e \text{ — энергия электрического}$$

поля, и полагая энергию переменной, автор делает заключение, что емкость есть «способность заряженных тел и окружающей их среды накапливать энергию и массу электрического поля». Здесь забыто о том, что формулировка пригодна для некоторого конкретного постоянного напряжения. Какого же? Можно ли выдавать полученную таким образом формулировку за общую? Простой пример показывает, что нельзя. Пусть некоторый конденсатор

$$\text{накопил энергию } W_k = \frac{CU^2}{2}; \text{ ясно, что конденсатор}$$

вчетверо меньшей емкости может накопить то же количество энергии при вдвое большей разности потенциалов

$$\text{между обкладками: } W'_k = \frac{C}{4} (2U)^2 \cdot \frac{1}{2} \frac{CU^2}{2} = W_k. \text{ Два этих}$$

различных конденсатора по приведенному выше определению автора будут иметь... одну и ту же емкость!..

Столь же необоснована и формулировка для индук-

$$\text{тивности. Записав } L = \frac{2}{I^2} W_m, \text{ где } W_m \text{ — энергия электри-}$$

ческого поля, автор затем считает, что во всех возможных индуктивностях протекает один и тот же ток, т. е. недопустимо упрощает этим обычную формулировку для энергетического коэффициента индуктивности, где говорится о свойстве накапливать энергию электромагнитного поля.

Приходится сделать вывод, что задача, поставленная автором статьи, в надлежащей мере не выполнена.



По страницам технических журналов

СХЕМА ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ СРЕЗАННОЙ ВОЛНОЙ

Импульсные испытания трансформаторов предусматривают испытания срезанной волной определенной длительности. Так как величина продольных градиентов данного трансформатора зависит от времени, при котором происходит срез, то важно обеспечить заданное время среза.

При стандартной форме волны срез осуществляют обычно за фронтом последней. В этом случае применение шаровых разрядников, дающих небольшой разброс, но малое время запаздывания, невозможно, и приходится применять игольчатые разрядники, дающие значительный разброс пробивных напряжений и времени среза. Кроме того, во избежание испытаний чрезмерно высоким напряжением настройку генератора импульсов производят при отключенном объекте. Последующее подключение испытуемого трансформатора приводит к изменению формы волны генератора импульсов, степень которого трудно учесть, что может вызвать отклонение условий испытания от заданных.

Автором разработана схема генератора импульсов, показанная на рис. 1, позволяющая легко регулировать время до среза, практически без изменения напряжения на испытуемом объекте.

Объект T подсоединен к точке X . Емкости C_1, C_2 в комбинации с сопротивлениями R_1, R_2, R_5, R_6 образуют обычную схему генератора импульсов, дающую на объекте и шаре S волну стандартной формы, представленную кривой b рис. 2. К точке Z подключен вспомогательный контур R_3, C_3 , а к точке Y через R_4, C_4 — срезающий шаровой

разрядник 1. Постоянные R_3, C_3, R_4, C_4 и емкости шаров R и U относительно земли подобраны так, чтобы фронт волны на срезающем разряднике 1, представленной кривой a рис. 2, был положе, чем на объекте.

Разрядник 1 отделен от объекта шаровым разрядником 2, что позволяет на объекте и срезающем разряднике иметь волну разной формы. Если разрядники 1 и 2 не срабатывают, то разность напряжений на разряднике 2, определяемая разностью кривых b и a рис. 2, невелика (кривая b , рис. 2).

В случае пробоя срезающего разрядника 1 (в примере автора при 3 мксек), разность напряжений на разряднике 2 в момент пробоя резко подскакивает, достигая в пределе (если разрядник 2 широко раздвинут) полного значения напряжения на объекте. Но так как разрядник 2 установлен в соответствии со значением разности напряжений без среза на относительно небольшое напряжение, то в момент пробоя разрядника 1 четко срабатывает и разрядник 2, осуществляя срез на объекте. Возможность получения пологой волны на разряднике 1 при стандартной волне на объекте позволяет применить для среза при любой длительности шаровой разрядник, работающий, как было указано, с гораздо меньшим разбросом, чем игольчатый.

Следует заметить, что при больших R_3 и R_4, C_4 может не применяться. R_4 может отсутствовать, если R_3 велико и C_3 мало. Так как срезающий разрядник подсоединен к ударной емкости генератора импульсов до «фронтного» сопротивления R_2 , то подключение объекта практически не сказывается на форме волны на разряднике 1, т. е. на времени среза.

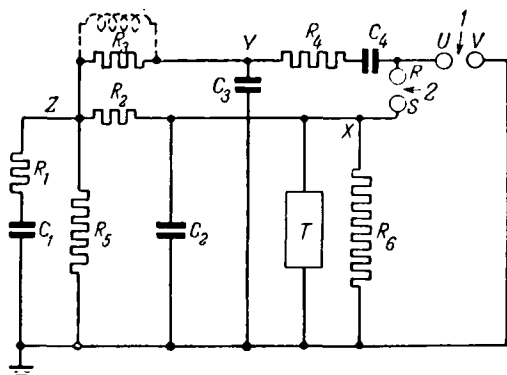


Рис. 1. Схема импульсного генератора с регулировкой времени среза волны (пунктиром показана индуктивность, включаемая при втором варианте схемы).

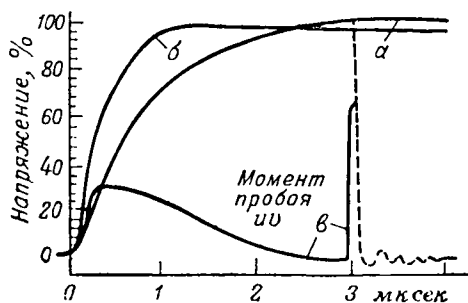


Рис. 2. Напряжение в разных точках импульсного генератора.

a — в точках U, R по отношению к земле; $б$ — в точках X, S по отношению к земле; $в$ — разность напряжений между R, S .

В дискуссии по статье приведен другой вариант схемы генератора импульсов, отличающийся наличием индуктивности, включенной параллельно сопротивлению R_3 , и отсутствием емкости C_4 .

При этой схеме регулировкой параметров контура, практически не изменяя форму волны на объекте, можно регулировать время срабатывания разрядника 1 в любых пределах. На рис. 3 схематично показано соотношение стандартной волны на объекте и волн на разрядниках 1 и 2 при двух значениях параметров контуров (сплошная и пунктирная линии) и отсутствии срабатывания разрядника 1. В случае пробоя последнего напряжение на разряднике 2 аналогично рис. 2 подскакивает до полного значения напряжения на объекте, вызывая четкое срабатывание разрядника 2, т. е. срез волны на объекте. Помещаая разрядники рядом, чтобы ультрафиолетовый свет при пробое разрядника 1 действовал на разрядник 2, можно уменьшить разброс срабатываний схемы. Указывается, что равномерно нарастающая форма волны напряжения на разряднике 1 и наличие «подсвечивания» позволяют применять в качестве срезающих разрядников обычные стержневые промежутки, обеспечивающие стабильность работы схемы (около $\pm 0,01 \dots \pm 0,03$ мксек при уровне среза около 110 кВ при 3 мксек).

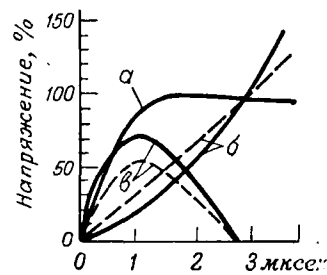


Рис. 3. Напряжение в разных точках схемы с добавочной индуктивностью.
 a — на объекте; $б$ — на разряднике 1; $в$ — на разряднике 2.

бывании разрядника 1. Необходимо отметить, что при схеме с добавочной индуктивностью напряжение на разряднике 2 несколько выше. При времени среза, близком к длительности фронта волны, обе схемы примерно равноценны, но если срез нужно осуществить при времени, значительно большем, чем длина фронта, то схема рис. 1 дает большую четкость срабатываний, так как в ней при пробое разрядника 1 на разряднике 2 остается значительное перенапряжение.

Применение этих схем для области очень высоких напряжений затруднено наличием двух разрядников на полное напряжение импульсного генератора, причем у одного из них (разрядник 2) оба электрода должны быть изолированы на это напряжение от земли, что не всегда возможно по конструктивным соображениям, а также снижением коэффициента использования импульсного генератора ввиду добавления второй нагрузочной емкости C_3 .

(С. Н. Johnson. Tr, AIEE, т. 72, ч. III, стр. 839—843, 1953).

Кандидат техн. наук, доц. Е. В. Калинин

УЛУЧШЕНИЕ УСЛОВИЙ РАДИОПРИЕМА ВБЛИЗИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Обеспечение удовлетворительных условий радиоприема в северной части Швеции представляет собой серьезную проблему. Ввиду малой плотности населения сооружение большого числа мощных радиовещательных станций в этой части страны не было целесообразным, и основная часть радиостанций сосредоточена на юге страны.

Радиостанции, предназначенные для вещания внутри страны, работают на длинных и средних волнах. Поэтому напряженность поля радиосигналов в дневное время только на половине территории страны превышает 1 мВ/м в дневное время суток. На значительной части территории северной Швеции напряженность поля самых мощных радиостанций днем составляет не более 100, а в некоторых районах даже 10 мкВ/м. При этих условиях заметные помехи радиоприему могут оказывать поля с напряженностью порядка долей мкВ/м, так как удовлетворительный прием обеспечивается при соотношении между уровнями принимаемых сигналов и помех, равном 30:1, а для свободного от помех приема необходимо, чтобы напряжение принимаемого сигнала превосходило напряжение помех в 100 раз.

Большая часть источников водной энергии Швеции находится в северной части страны, и снабжение южных районов электрической энергией производится по линиям 220 и 380 кВ. Возникающая на поверхности проводов, изоляторов и арматуры этих линий корона является источником электромагнитных колебаний, охватывающих широкий спектр частот и создающих помехи радиоприему в непосредственной близости от линии электропередачи.

Для выяснения условий распространения радиопомех, создаваемых линиями электропередачи, и оценки их значений при различных условиях были произведены многочисленные измерения на линиях различных напряжений.

Результаты исследований показали, что радиопомехи зависят от многих факторов и могут изменяться в широких пределах. Наибольшее влияние на величину помех оказывают изменения погоды. Напряжение помех в условиях сухой погоды может превышать напряжение помех при сухой погоде в 10...50 раз. Дождь вызывает значительно большие помехи, чем снег, густой туман или загрязнение атмосферы.

При опытах было установлено, что старение проводов приводит к снижению помех. Это объясняется, повидимому, постепенным сглаживанием поверхности проводов под влиянием атмосферных воздействий.

Уровень радиопомех, возникающих в линии электропередачи, определяется напряженностью поля промышленной частоты. Критическое значение ее, по измерениям на шведских линиях 220 и 380 кВ, составляет около 15 кВ/см. При расщепленных проводах этому значению должна соответствовать максимальная величина напряженности поля на проводах. Таким образом, радиопомехи возникают при напряжениях, при которых потери на корону еще незначительны. Однако при повышении напряжения потери на корону растут быстрее, чем радиопомехи.

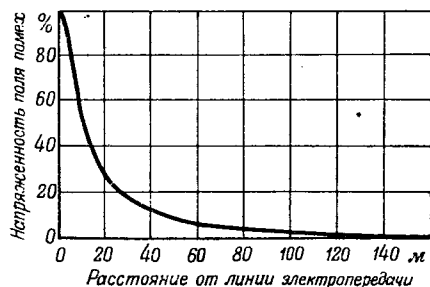


Рис. 1. Зависимость напряженности поля радиопомех, создаваемых линией 220 кВ, от расстояния до линии.

Увеличение диаметра проводов способствует уменьшению напряженности поля радиопомех на поверхности провода. Однако, как правило, для линий очень высокого напряжения выбор проводов, позволяющих полностью предотвратить возникновение радиопомех, экономически не оправдывается. Практически наиболее целесообразно по возможности ограничить уровень помех и уменьшить их влияние на радиоприем другими средствами.

По мере удаления от линии электропередачи напряженность поля помех уменьшается сначала быстро, а затем более медленно. Зависимость относительной напряженности поля помех от расстояния между приемной антенной и линией 220 кВ — источником радиопомех — изображена на рис. 1.

Опыт показал, что на расстоянии 200...300 м от линии электропередачи помехи могут быть сравнительно велики. Пересекающие линию электропередачи или идущие параллельно ей другие воздушные линии (линии высокого и низкого напряжения, линии связи) могут вызвать распространение радиопомех на еще большие расстояния. Для предотвращения распространения помех следует избегать сближения воздушных линий с линией электропередачи, являющейся источником помех. Участки пересечения желательнее кабрировать на расстоянии до 50 м. В некоторых случаях целесообразно на линиях, являющихся источником помех, ставить высокочастотные фильтры.

Удаление антенны от линии передачи, создающей помехи, и выполнение ввода антенны к приемнику экранированным кабелем способствуют снижению помех. Однако этот метод неприемлем при низком напряжении сигнала и слабой чувствительности приемника.

Наиболее радикальной мерой является увеличение напряженности поля радиовещательных станций. Дальнейшее сооружение новых радиостанций, работающих на длинных и средних волнах, затрудняется отсутствием свободных волн. Применение коротких волн не является надежным решением, так как, хотя помехи в этом диапазоне слабы, прием коротких волн часто неустойчив, а иногда и невозможен, из-за того, что приемная антенна оказывается в «мертвой» зоне. Переход на ультракороткие волны связан со значительными затратами, так как потребуются большое количество передающих станций и замена радиоприемников.

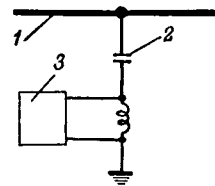
В связи с тем что интенсивные помехи возникают в сравнительно узкой полосе вдоль линии электропередачи, было предложено использовать провода линии в качестве антенны для передачи радиовещательных программ. Принципиальная схема включения передатчика показана на рис. 2. В качестве конденсаторов связи могут быть использованы конденсаторы высокочастотных телефонных постов или емкостные делители напряжения.

Передачи производятся на волнах радиовещательного диапазона (1500...2000 м), и настройка приемника осуществляется обычным способом. В случае необходимости по линии электропередачи можно передавать несколько радиопрограмм.

В 1947 г. были начаты опытные передачи по линии 220 кВ Стадсфорсен — Халлсберг. Впоследствии опыты были продолжены и проводились в течение нескольких лет на линиях 220 и 380 кВ. На расстоянии до 160 км от передатчика были достигнуты удовлетворительные условия приема в полосе вдоль линии электропередачи шириной до 250 м. Опыты показали, что для получения удовлетвори-

Рис. 2. Схема присоединения радиопередатчика к линии электропередачи.

1 — линия электропередачи; 2 — конденсатор связи; 3 — радиопередатчик.



тельного радиоприема напряженность поля сигнала должна превышать напряженность поля радиопомех примерно в 50 раз. Оба поля создаются электромагнитными волнами, излучаемыми в окружающее пространство одной и той же линией. Поэтому, измеряя напряженности обоих полей, можно точно определить соотношения между ними в любой точке окружающего пространства.

При данных условиях погоды и определенных значениях напряжения и частоты линии электропередачи напряжение помех вдоль линии будет оставаться постоянным. Напряжение сигнала зависит от затухания линии электропередачи и убывает по мере удаления от передатчика.

Затухание линии растет с частотой. Поэтому, несмотря на то, что напряжение помех убывает по мере увеличения частоты, целесообразно вести передачи на самой низкой частоте диапазона.

Затухание линий несколько увеличивается при ухудшении погоды и в условиях сырой погоды для линий 220...380 кВ и в диапазоне частот 150...200 кГц равно 11,5...16 мкВ/км.

Зная величину линейного затухания и минимально допустимое соотношение между уровнями сигнала и помех, можно определить необходимую мощность передатчика, которая выбирается с таким расчетом, чтобы обеспечить практически полное подавление помех.

Произведенные опыты показали возможность присоединения передатчика к грозозащитным тросам. В этом случае тросы в пределах 1,5...3 км от места установки передатчика подвешиваются на изоляторах. Для предотвращения заметного снижения грозозащитного действия тросы должны быть снабжены шунтирующими искровыми промежутками, перекрываемыми при достаточно низком напряжении.

Результаты опытных радиопередач по линиям высокого напряжения показали действенность этого способа подавления радиопомех. В 1953 г. было установлено девять передатчиков мощностью 700 Вт. В настоящее время на линиях 220 и 380 кВ устанавливаются передатчики мощностью 0,7...2 кВт.

Литература

1. B. G. Ratsman, S. Parding, C. A. Endström. Power Apparatus and Systems, стр. 1037, № 13, 1954.
2. G. Jancke, B. Holmgren, G. A. Peterssen, P. Akerlind. CIGRE, доклад, № 338, стр. 16, 1954.
3. B. G. Ratsman, G. Jancke. Trans. AIEE, т. 72, стр. 1089, 1953.

Инж. А. И. Гершенгорн

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Метод измерения сопротивлений порядка 10^{10} ... 10^{13} Ом, положенный в основу описываемого прибора, предусматривает измерение при помощи электрометра величины падения напряжения на исследуемом сопротивлении, которая создается при протекании по нему известного постоянного тока. При этом погрешность за счет нелинейности сопротивления может быть сведена к минимуму выбором такого значения протекающего тока, которое будет иметь место при последующем использовании измеряемого сопротивления. В качестве постоянного тока I , протекающего через измеряемое сопротивление R_x (рис. 1), служит зарядный ток образцового воздушного конденсатора с емкостью C . При линейном изменении разности потенциалов u со временем, когда

$$\frac{du}{dt} = \text{const}, \quad (1)$$


$$I = C \frac{du}{dt} \left[1 - e^{-\frac{t}{R_x (C + C_E)}} \right],$$
$$I = -C \cdot \frac{U_1}{T}. \quad (2)$$

Если несколько видоизменить схему и использовать электрометрический указатель нуля (рис. 2), то положение движка на сопротивлении R_4 необходимо установить так, чтобы поддержать нулевую разность потенциалов между точками 1 и 2, отклонение от которой и фиксируется

$$R_x = \frac{E}{I} = \frac{x(R_1 + R_2)TR_4}{CR_2(R_3 + R_4)},$$

В реальном приборе, состоящем в основном из блока питания, источника постоянного тока, основанного на использовании тока заряда конденсатора, и электронного автоматического потенциометра, поддержание нулевой разности потенциалов между точками 1 и 2 осуществляется автоматически. Для этой цели указанная разность потенциалов подается на вход потенциометра, серводвигатель которого управляет положением движка на сопротивлении R_4 , устанавливая величину x соответствующей нулевому напряжению на входе потенциометра. Значение измеряемого сопротивления может быть отсчитано по потенциометру и записано регистрирующим устройством. Примененный потенциометр отличается от известных конструкций тем, что для преобразования входных постоянных на-



1 — динамический конденсатор на входе каскада предварительного усиления; 2 — образцовый воздушный конденсатор; 3 — серводвигатель автоматического потенциометра; 4 — двигатель для перемещения бумаги.

СОВЕЩАНИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БЫТОВЫХ ПРИБОРАХ, ПРОВЕДЕННОЕ ЛОНИТОЭ

Ленинградское отделение ВНИТОЭ провело в декабре 1954 г. в Ленинграде научно-техническое совещание по электрическим бытовым приборам. Одной из главных целей совещания было определение направления дальнейшего развития конструирования и производства бытовых электроприборов.

В совещании приняли участие свыше 150 представителей различных учреждений, заводов, промысловой кооперации, институтов, электросетей и т. д. от 35 городов Советского Союза.

Работа совещания проходила в секциях бытовых нагревательных приборов и бытового электропривода. На пленарном заседании кандидат техн. наук **Д. С. Чукаев** (МИСИ им. Куйбышева) в докладе «Современное состояние и перспективы применения электрической энергии для бытовых целей» отметил ожидающееся в недалеком будущем еще более широкое, чем в настоящее время, использование электрических бытовых приборов. В быту появятся новые мощные приборы: плиты на 5—7 кВт, стиральные машины с водонагревом на 4—5 кВт, сушильные шкафы на 4—5 кВт и др. Выпускаемые промышленностью бытовые приборы (плитки, утюги, чайники и пр.) имеют заниженную мощность и недостаточную производительность. Качество приборов как по сроку их амортизации, так и по внешней отделке требует значительного улучшения. До настоящего времени отсутствуют ГОСТ на основные виды бытового оборудования, что усложняет борьбу за высокое качество электробытовых приборов. Оборудование необходимо выпускать в виде отдельных взаимосвязанных агрегатов для создания комплексного оборудования кухни. При строительстве новых жилых домов необходимо предусматривать на кухне (в стенах) специальные шкафы для хранения бытовых электрических приборов. Докладчик выразил желание о введении пониженного тарифа для бытовой электрической нагрузки.

Инж. **Е. Е. Бахмутский** (ЛПИ им. Калинина) в докладе «Бытовые электрические нагревательные приборы и направление их дальнейшего развития» рассмотрел основные технико-экономические и эксплуатационные показатели бытовых нагревательных приборов, в частности: условия теплопередачи, влияние конструктивных элементов на к. п. д. и время разогрева, срок службы нагревательных элементов и др.

Инж. **А. И. Веселов** (ЦНИИПО) в докладе «Вопросы пожарной безопасности при эксплуатации электроприборов и электросетей бытового назначения» указал на организационно-технические мероприятия, которые должны снизить пожарную опасность при эксплуатации бытовых электрических приборов и сетей.

Доктор техн. наук, проф. **И. П. Ермолин** (ЛЭТИ им. Ульянова) прочел доклад «Маломощные элек-

тродвигатели и их применение для бытовых приборов». Применяемые для различных бытовых электроприборов маломощные двигатели постоянного и переменного тока в диапазоне мощностей от нескольких ватт до нескольких сотен ватт еще имеют ряд недостатков (шумность, неусовершенствованное коммутирование и др.). Перед предприятиями и организациями, выпускающими бытовые приборы с электрическим приводом, стоит ответственная задача по разработке полностью современных и надежных модификаций.

Доктор техн. наук, проф. **Ю. С. Чечет** (МЭИ им. Молотова) в докладе «Применение для бытового электропривода однофазных асинхронных двигателей с массивным стальным ротором» проинформировал о работе лаборатории микромашин МЭИ; он указал на целесообразность замены коллекторных двигателей асинхронными однофазными с массивным ротором для целей привода бытовых машин.

Инж. **Ф. Э. Ильгекит** (ЦЛИР) в докладе «Индустриальные радиопомехи, создаваемые бытовыми электроприборами» привел схемы устройств и методы их применения для подавления радиопомех от бытовых электроприборов.

В секции бытовых нагревательных приборов были заслушаны и обсуждены доклады: кандидата техн. наук **А. Д. Свенчанского** (МЭИ им. Молотова) «Конструирование и расчет нагревателей электронагревательных бытовых приборов»; кандидата техн. наук **В. И. Смирнова** (ВИЭСХ) «Расчет трубчатых электрических нагревательных элементов»; кандидата техн. наук **В. С. Равдоника** и инж. **Е. Е. Бахмутского** (ЛПИ им. Калинина) «Методы испытания и стандарты на бытовые нагревательные приборы»; инж. **А. М. Дымкова** (МТЗ им. Куйбышева) «Электроутюги конструкции МТЗ им. Куйбышева и проект нового государственного стандарта на утюги электрические, бытовые»; инж. **Б. В. Мегорского** (Лаборатория УПО Ленинграда) «Результаты работы лаборатории ЛУПО по пожарной опасности бытовых электроприборов»; инж. **Б. А. Семашко** (ВТИ) «Электрические бытовые утюги».

На секции бытового электропривода были заслушаны и обсуждены доклады: кандидата техн. наук **Г. С. Сомихиной** (МЭИ им. Молотова) «Электрические машины малой мощности для привода бытовых приборов»; инж. **А. Р. Деро** (ЛЭТИ им. Ульянова) «Электрический привод бытовых вентиляторов, пылесосов и фенов» и «Электропривод полотерных машин»; инж. **А. И. Кричко** (РЭЗ) «Работа Рижского электромашиностроительного завода в области электрифицированных стиральных машин»; инж. **Н. А. Астахова** (МЭИ им. Молотова) «Проблема борьбы с шумом электрических микромашин для бытового электропривода».

Выступая в прениях, представитель МЭП СССР инж. **Г. К. Иванов** сообщил участникам совещания о задачах, поставленных директивными органами перед Министерством электротехнической промышленности на 1955 г. по производству бытовых электрических приборов. Общий выпуск приборов 1955 г. по сравнению с 1954 г. должен быть уве-

пращений в усиливаемые переменные используется не вибрационный контактный прерыватель, а специальное устройство с периодически изменяющейся емкостью (динамический конденсатор).

Принципиальная схема электрометра с динамическим конденсатором приведена на рис. 3.

Потенциометр имеет четыре предела измерения: 10 и 100 мВ, 1 и 10 В; выбор каждого осуществляется при помощи переключающего устройства.

Величина подаваемого напряжения U_1 может быть установлена при помощи делителя в пределах 0,03—300 В. При выбранных значениях емкости образцового воздушного конденсатора C , равной $5 \cdot 10^{-12}$ ф, и 6 об/мин синхронного двигателя ток заряда конденсатора может быть в зависимости от выбора U_1 установлен в пределах 10^{-11} — 10^{-15} А.

Точность измерений сопротивления определяется точностью элементов схемы и стабильностью частоты питающей сети.

Так как входная емкость электрометра C включена параллельно измеряемому сопротивлению R_x , то падение напряжения на R_x повышается экспоненциально с постоянной времени $R_x C_E$. Поэтому для фиксации положения равновесия должно пройти время, большее, чем $5R_x C_E$.

Для наибольшей достигнутой на приборе точности 0,5...1% необходимое время измерения T_1 может быть найдено из выражения $T_1 = 6R_x \cdot 10^{-11} + 10$ сек.

(Rev. Sci. Instr., т. 25, стр. 251, № 3, 1954.)

М. Ш. Капник

личен в 2 раза при снижении себестоимости и улучшении качества изделий. Должен быть расширен и ассортимент. Это потребует создания в самое ближайшее время мощных цехов, установок конвейеров и поточных линий, оборудованных по последнему слову техники, с переводом производства бытовых электроприборов на новую, современную технологию.

Представитель Государственного универсального магазина (Москва) Л. И. Жолковский на примере работы ГУМ за 1954 г. подчеркнул непрерывно растущее в нашей стране потребление бытовых электроприборов. Спрос потребителей, однако, удовлетворяется и сейчас еще далеко неполностью не только по количеству, но и по ассортименту изделий. Качество приборов часто оставляет желать лучшего. Промышленностью не освоено выпуск ряда приборов, на которые покупатели предъявляют огромный спрос, например: электромясорубки бытовые, электросковороды и электроблинницы, электромельницы бытовые для кофе, электродуховки и камины, электробаки емкостью 50...10 л, новые бесшумные модели электробритьев и т. д.

С рядом замечаний и рекомендаций выступили в прениях инж. П. Г. Метелицын (Министерство связи СССР), инж. Д. А. Рейпольский (Ленинградское отделение Торговой палаты), инж. И. Б. Рубинштейн (Тамбовский завод «Ревтруд»), инж. Н. А. Козловский (Орехово-Зуевский завод «Карболит»), инж. В. С. Невельсон (УПК Ленинграда), инж. И. А. Волкомирский (Прокопьевский завод ПЭМЗ) и др.

В решениях совещания отражены предложения по дальнейшему развитию номенклатуры и качества электрических бытовых приборов, а также по вопросам развития электробытовых сетей и установочных электроизделий. В частности, совещание рекомендовало следующие мероприятия: 1) организацию при Министерстве электротехнической промышленности СССР консультативного и научно-исследовательского центра, который обеспечивал бы общее руководство исследованиями и разработкой электробытовых приборов; 2) создание в составе МЭП СССР, Центрпромпособа и ММП республик новых специализированных предприятий по выпуску бытовых приборов; 3) поощрение со стороны МВО СССР и МЭП СССР инициативы учебных заведений и заводов в отношении проводимой ими проектной и научно-технической работы в области электробытовых приборов; 4) увеличение удельных норм (Госплан и МЭС СССР) бытовой нагрузки и увеличение сечения бытовых сетей; 5) расширение в системах МХП СССР и МЭП СССР производства и ассортимента электрических установочных изделий.

Совещание обратилось в Правление ВНИТОЭ с предложением организовать всесоюзное совещание по вопросам производства бытовых электрических приборов.

Совещание признало необходимым увеличить издание Госэнергоиздатом научно-технической и популярной литературы по бытовым электрическим приборам.

Для участников научно-технического совещания была устроена выставка лучших образцов электрических бытовых приборов, на которой было представлено свыше 200 действующих экспонатов отечественного и иностранного производства.

*Инж. В. А. Козлов
Ленинград*

СОВЕЩАНИЕ ПО ТРОЛЛЕЙВОЗНОМУ ТРАНСПОРТУ

26—27 ноября 1954 г. в Киеве состоялось созданное Институтом горного дела Академии наук УССР и Киевским межобластным отделением ВНИТО совещание по применению троллейвозного транспорта на карьерах. На совещании присутствовали представители ряда проектных институтов (Тяжпроэлектропроект, Промтранспроект, Гипроцветмет, Гипроруда, Гипронеметруд), Богуславского карьера, эксплуатирующего троллейвозный транспорт, и других ведомств и организаций, связанных с троллейвозным транспортом.

На совещании были заслушаны восемь докладов, из которых наиболее интересными были: В. И. Пацыбина (Богуславское рудоуправление) «Опыт эксплуатации троллейвозов», Г. Я. Саложникова (Харьковское трамвайно-троллейбусное управление) «Оборудование троллейвозов», И. Н. Сердиновой (Институт горного дела АН УССР) «Рас-

четные показатели троллейвозов в различных горнотранспортных условиях» и А. С. Фиделева (Институт горного дела АН УССР) «Результаты исследований троллейвозного транспорта и дальнейшие задачи».

Троллейвозный транспорт, предложенный Институтом горного дела Академии наук УССР, представляет собой новый вид транспорта, обладающий положительными свойствами электровозов и автосамосвалов. Троллейвоз выполняется на базе автосамосвала грузоподъемностью 5...25 т с тяговым двигателем смешанного возбуждения. Этот двигатель мощностью 86...250 квт через штанговые токоприемники питается от двух контактных проводов, подвешенных вдоль трассы перевозки горной массы.

Из докладов выяснилось, что троллейвозный транспорт для открытых горных работ имеет большую мобильность по сравнению с рельсовым транспортом, допускает применение меньших радиусов закруглений дороги и имеет возможность преодолевать более значительные подъемы по сравнению с электровозным транспортом. При этом виде транспорта отсутствуют рельсовые пути и не расходуется дорогостоящее жидкое топливо.

Троллейвоз имеет более легкое управление по сравнению с автотранспортом и лучшие тяговые характеристики, чем у автомобильных двигателей. На троллейвозах применяется, кроме аварийного механического тормоза, также электрическое торможение.

Коэффициент полезного действия троллейвоза относительно высок. Ремонт и обслуживание троллейвозов просты.

Введение троллейвозного транспорта на Богуславском известняковом карьере в 1952 г. и работа его на карьере около 2½ лет позволили снизить себестоимость перевозок до 10%, увеличить производительность карьера и пробеги машин, снизить аварийность оборудования.

В настоящее время троллейвозы, выполняемые на базе самосвалов Минского автозавода грузоподъемностью 25 т, внедряются на ряде карьеров и с успехом заменяют автотранспорт.

После заслушивания докладов и обмена мнениями совещание пришло к выводу, что работа троллейвозного транспорта вполне обеспечивает перевозки горной массы, а сам вид транспорта достаточно маневренен для горных условий, причем передвижка контактной сети не нарушает нормальной работы карьера. Троллейвозный транспорт может с успехом конкурировать с распространенными на открытых горных разработках рельсовым и автомобильным видами транспорта. Предпочтение рельсовому транспорту следует отдавать только при больших грузопотоках и сложности строительства автодорог.

Условия труда у водителя троллейвоза более гигиеничны, чем у водителя автосамосвала.

Культура работы карьера в целом повышается, электрифицируются все звенья технологического процесса (бурение, экскавация, трансифт, дробление).

Троллейвозный транспорт будет особенно эффективен при расстояниях откатки 2—3 км и более, а также при крутых уклонах и подъемах. В этих случаях большое значение приобретает возможность применения рекуперации энергии, а также более высокого напряжения в контактной сети. Последнее обеспечит значительную экономию в стоимости контактной сети и тяговых подстанций.

Совещание пришло к выводу о необходимости широкого внедрения троллейвозного транспорта на карьерах.

Инж. В. Н. Стасюк

ДИССЕРТАЦИИ

Московский энергетический институт им. Молотова

В Ученом совете Московского энергетического института имени Молотова защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период с февраля 1952 г. по сентябрь 1953 г.¹

Ф. Ф. Галтеев защитил 8 февраля 1952 г. диссертацию на тему «Исследование режимов синхронного поворота и синхронного вращения трансформаторных сельсинов применительно к их работе в следящих системах». Официальные

¹ Диссертации за предшествующий период см. Электричество, № 7, 1946; № 4, 1947; № 3 и 11, 1948 и № 2, 1955.

оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. С. Гольдфарб и доктор техн. наук, проф. Д. А. Городский.

Изложены теоретические и экспериментальные исследования работы сельсинов в установках, осуществляющих передачу синхронного вращения на больших скоростях. Предложенный метод дает возможность исследовать процессы в сельсинах в общем виде и позволяет анализировать их характеристики в зависимости от параметров.

В. Б. Кулаковский защитил 7 марта 1952 г. диссертацию на тему «Емкостные методы контроля влажности изоляции». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Ю. Ломоносов и кандидат техн. наук, доц. П. В. Борисоглебский.

Рассмотрены методы контроля влажности изоляции и разработан новый метод контроля влажности изоляции трансформаторов. Предложен прибор, при помощи которого устанавливается связь емкостной характеристики трансформатора с влажностью изоляции.

М. С. Рыбаков защитил 4 апреля 1952 г. диссертацию на тему «Исследование режима давления и начального напряжения ионизации газонаполненных кабелей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Б. М. Тареев, кандидат техн. наук, доц. П. В. Борисоглебский и инж. Е. Ф. Клибанов.

Детально проанализировано явление перекрытия газа при изменении теплового состояния газонаполненных кабелей. Выведены формулы для практических расчетов в случае стационарного режима и намечены пути решения вопроса в различных более сложных случаях. Основные выводы подтверждены экспериментально.

А. Г. Мельников защитил 16 мая 1952 г. диссертацию на тему «Анализ технических средств управления подстанциями метрополитена». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд, кандидат техн. наук, доц. О. А. Горяинов и кандидат техн. наук Н. А. Загайнов.

Рассмотрены средства автоматического и телемеханического управления тяговыми подстанциями метрополитена на основе опыта проектирования систем управления, а также монтажа, наладки и эксплуатации систем с автотелеуправлением. Даны обобщающие выводы и рекомендации по проектированию основных узлов систем автотелеуправления тяговых подстанций.

В. П. Олексевич защитил 16 мая 1952 г. диссертацию на тему «Электромагнитное поле двухпроводной линии и ее параметры». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. А. Кошечев и кандидат техн. наук, доц. К. Е. Кульбацкий.

На основе анализа вопросов структуры электромагнитного поля двухпроводной линии сделан вывод об условности применения в случае двухпроводной линии понятий, используемых в теории электрических цепей. Получено выражение для постоянной распространения при весьма высоких частотах и больших отношениях расстояния между проводами к радиусу провода.

А. А. Сиротин защитил 16 мая 1952 г. диссертацию на тему: «Схема для получения широкого диапазона регулирования скорости асинхронного двигателя с кольцами». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов и кандидат техн. наук, доц. И. И. Петров.

На базе теоретических и экспериментальных исследований показана практическая возможность осуществления широкого и плавного регулирования скорости асинхронного двигателя при помощи колебательных контуров, включенных в ротор.

Н. А. Чеботарев защитил 16 мая 1952 г. диссертацию на тему «Исследование изоляции электрических машин импульсным методом». Официальные оппоненты: проф. П. Г. Грудинский и кандидат техн. наук, доц. Л. Ф. Дмоховская.

Дан обзор существующих методов испытания изоляции электрических машин. Сделаны рекомендации по усовершенствованию метода и прибора для обнаружения повреждений изоляции электрических машин при помощи импульсных испытаний. Предложена оригинальная схема включения обмоток и осциллографа, повышающая чувствительность испытаний.

И. Н. Гацанский защитил 6 июня 1952 г. диссертацию на тему «Некоторые вопросы теории и расче-

та измерительных элементов переменного тока». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. С. Гольдфарб и кандидат техн. наук А. В. Михайлов.

Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование измерительных элементов универсального регулятора возбуждения мощных генераторов, предложены рациональные схемы этих элементов. Рекомендованные для оценки инерционности и чувствительности отдельных звеньев измерительных элементов формулы достаточны для инженерных расчетов при проектировании. Рассмотрены вопросы взаимосвязи коэффициента фильтрации и эквивалентной постоянной времени для некоторых простейших фильтров.

И. М. Витенберг защитил 13 июня 1952 г. диссертацию на тему «Усилители для электрических моделей и счетно-решающих устройств». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов и кандидат техн. наук Ю. Д. Рагозин.

Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой методов расчета схем усилителей для электрических моделей и счетно-решающих схем. Даны методы расчета схем усилителей, работающих в режимах управляемых выпрямителей. Приведены расчетные графики.

Н. Д. Анисимова защитила 1 июля 1952 г. диссертацию на тему «Подъем с нуля напряжения дальних электропередач в условиях самовозбуждения генератора гэс». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Ю. С. Четчет и кандидат техн. наук Н. А. Поляк.

Рассмотрены вопросы теории самовозбуждения синхронных генераторов при работе их на длинные линии при холостом ходе. Основные выводы работы проверены исследованиями на динамической модели с применением методов моделирования и теории подобия.

В. М. Казанский защитил 1 июля 1952 г. диссертацию на тему «Энергетический метод исследования электрических бесколлекторных машин». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук Г. К. Салгус.

На основании общего уравнения мощностей электрической индукционной машины выведены формулы для расчета синхронных реактивных сопротивлений, дающих возможность учесть любую степень насыщения магнитной системы. Предложен метод построения статических характеристик синхронной машины при помощи реактивного энергетического треугольника. Этот метод позволяет учитывать насыщение и дает хорошее совпадение с экспериментом.

А. М. Ланген защитил 1 июля 1952 г. диссертацию на тему: «Некоторые режимы работы синхронного реактивного двигателя». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Т. Г. Сорокер и кандидат техн. наук Н. З. Мастяев.

Объектом изучения принят реактивный двигатель малой мощности с полюсами, не снабженными полюсными башмаками, с равномерным воздушным зазором под полюсом и пусковой клеткой на роторе. Изучение переходных режимов проводилось при помощи системы уравнений движения ротора в переходном режиме синхронной машины Парка-Горева. В результате решения этой системы для постоянного скольжения, не равного нулю, получена формула синхронного момента реактивного двигателя.

Д. И. Минковский защитил 1 июля 1952 г. диссертацию на тему «Синхронный переключатель для измерительных целей». Официальные оппоненты: проф. А. В. Талицкий и кандидат техн. наук В. Т. Прытков.

Исследована методика измерения механических погрешностей синхронного переключателя и регулирования его. Исследовано влияние индуктивности в измерительной цепи синхронного переключателя. Разработаны оригинальные схемы возбуждения и мероприятия по повышению перегрузочной способности вектормерных приборов.

Е. Д. Сапир защитил 1 июля 1952 г. диссертацию на тему «Высокочастотные защиты линий электропередачи с применением фильтров симметричных составляющих». Официальные оппоненты: проф. А. Е. Федосеев и кандидат техн. наук М. И. Царев.

Исследованы направленные и дифференциальные высокочастотные защиты. Рассмотрены вопросы, связанные

с теорией фильтров симметричных составляющих, анализом поведения защит в различных режимах — при переходных процессах и в условиях сложных коротких замыканий. Специально рассмотрены вопросы выполнения высокочастотных защит для линий 400 кВ большой протяженности.

И. А. Тютин защитил 1 июля 1952 г. диссертацию на тему «Поверхностный эффект в стержнях ротора асинхронного электродвигателя». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Н. Ларионов и кандидат техн. наук, доц. А. В. Нетушил.

Дано теоретическое и экспериментальное исследование поверхностного эффекта в стержнях ротора, расположенных в пазах различной формы.

Г. Л. Арешян защитил 13 февраля 1953 г. диссертацию на тему «К теории синхронного двигателя с монолитным ротором». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и доктор техн. наук, проф. Т. Г. Сорокер.

Разработан аналитический метод расчета параметров асинхронного двигателя с монолитным ротором с учетом влияния гистерезиса, насыщения и краевого эффекта. Произведена экспериментальная проверка теоретических формул.

В. И. Левитов защитил 13 февраля 1953 г. диссертацию на тему «Перенапряжения в длинных линиях с учетом насыщенных индуктивностей и короны». Официальные оппоненты: доктор техн. наук В. И. Попков и кандидат техн. наук А. А. Акоюн.

Рассмотрены вопросы внутренних перенапряжений в длинных линиях типа «Куйбышев — Москва». Рассмотрены перенапряжения при отключении коротких замыканий и в установившихся холостых режимах. Исследования проведены на модели и путем теоретического анализа. Основное внимание уделено явлениям феррорезонанса.

А. Б. Матвеев защитил 24 апреля 1953 г. диссертацию на тему «Принципы моделирования в светотехнике». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. Л. Дашкевич и кандидат техн. наук Н. Н. Горбачев.

Проведено исследование для теоретического обоснования и практического решения некоторых светотехнических задач. Предложено ряд оригинальных методов.

Я. А. Шнейберг защитил 24 апреля 1953 г. диссертацию на тему «Зарождение электротехники в трудах В. В. Петрова, его учеников и современников в России в первой четверти XIX в.». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Г. Дроздов и кандидат техн. наук, доц. В. А. Голубцова.

Исследован начальный период развития электротехники в России. Подробно рассмотрены результаты научной деятельности акад. Василия Владимировича Петрова, его учеников и современников.

В. Д. Афанасьев защитил 29 мая 1953 г. диссертацию на тему «Новая система электропривода летучих ножиц и ее исследование». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. В. Горохов и доктор техн. наук, проф. А. И. Целиков.

Представлено теоретическое и экспериментальное исследование синхронно-следящего электропривода сложного механизма — ножиц непрерывного тонколистостого стана.

Н. А. Калужников защитил 30 июня 1953 г. диссертацию на тему «Автоматические регуляторы возбуждения с магнитными усилителями». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Н. Ларионов и доктор техн. наук И. А. Будзко.

Рассмотрен обширный и многообразный круг вопросов, связанных с применением магнитных усилителей в качестве усилительного и регулирующего органов. Исследованы процессы в дросселях с подмагничиванием. Даны рекомендации по выбору параметров магнитных усилителей, применяемых в схемах автоматического регулирования возбуждения электрических машин.

В. А. Лабунцов защитил 30 июня 1953 г. диссертацию на тему «Ионный преобразователь частоты для питания асинхронных двигателей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Г. Комар и кандидат техн. наук Ф. И. Бутаев.

Проведено исследование работы ионных преобразователей частоты, предназначенных для питания асинхронных

двигателей, установлены основные соотношения для токов, напряжений и параметров преобразователя, намечены пути борьбы с колебательными процессами, возникающими в схеме. Описан авторский опытный образец ионного преобразователя частоты.

И. С. Наяшков защитил 30 июня 1953 г. диссертацию на тему «Вопросы расчета механических усилий в обмотках силовых трансформаторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Г. С. Аронзон и кандидат техн. наук, доц. А. В. Корицкий.

Предложена новая методика расчета осевых усилий. Приведены результаты экспериментального исследования магнитных полей рассеяния.

Е. Ф. Наяшкова защитила 30 июня 1953 г. диссертацию на тему «Влияние и учет продольной компенсации при расчете процесса трехфазного короткого замыкания». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Городский и кандидат техн. наук Л. Г. Мамиконянц.

Рассмотрен вопрос об учете емкости при расчете токов трехфазного короткого замыкания. Решение проведено для нескольких вариантов компенсации линии точным и приближенным методами. Сравнение устанавливает полную практическую пригодность рекомендуемого метода расчета.

В. А. Параил защитил 30 июня 1953 г. диссертацию на тему «Регулирование скорости асинхронного двигателя при подмагничивании постоянным током». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Т. Голован и кандидат техн. наук, доц. И. И. Петров.

Рассмотрены известные ранее и предложенные автором схемы, в которых по обмоткам односкоростного двигателя протекает как переменный, так и постоянный ток. Результатом работы являются установление физической картины процесса, разработка методики расчета, оценка энергетических показателей схем.

Л. М. Твердин защитил 30 июня 1953 г. диссертацию на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование новой схемы следящего привода». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук А. С. Филатов.

С применением современных методов исследования синхронно-следящих систем рассмотрены: распределение тока между генератором и возбудителем, переходные процессы, стабилизирующие звенья и др. Установлено, что путем осуществления соответствующей внешней характеристики генератора можно в очень значительной мере уменьшить ошибку слежения.

Г. И. Шарохин защитил 30 июня 1953 г. диссертацию на тему «Измерение магнитных характеристик с помощью феррометра и анализ опытных кривых с применением шаблонов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. К. М. Поливанов, доктор физ.-матем. наук, проф. Н. А. Леднев и кандидат техн. наук М. А. Розенблат.

Намечены пути дальнейшего усовершенствования феррометров — отказ от электронных ламп с заменой их электродинамическими и электростатическими усредняющими приборами с управляющим возбуждением. Разработан феррометр, пригодный для анализа несимметричных кривых. Усовершенствована система шаблонов для гармонического анализа.

А. И. Абрамов защитил 25 сентября 1953 г. диссертацию на тему «Межвитковые перенапряжения в обмотках высоковольтных электрических машин переменного тока». Официальные оппоненты: доктор техн. наук И. А. Сыромятников и кандидат техн. наук В. Д. Мажуга.

Произведено исследование распределения напряжений по виткам и секциям обмоток электрических машин при падении на них волн перенапряжений, имеющих различные параметры. Подробно рассмотрен вопрос о витковых перенапряжениях, возникающих в момент включения электрической машины в сеть. Дан ряд ценных выводов и предположений в части нормирования импульсных напряжений для испытания витковой изоляции.

Доцент А. С. Сергеев

В. Л. ИНОСОВ и Л. В. ЦУКЕРНИК. КОМПАУНДИРОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОРРЕКТОР НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ. 152 стр.,

ц. 4 руб. 40 коп. Госэнергоиздат, 1954.

Устройства компаундирования с электромагнитным корректором напряжения применяются в настоящее время в качестве основного вида автоматического регулирования и форсирования возбуждения синхронных генераторов. Эти устройства за последние годы широко внедрены в энергосистемах.

Вместе с тем в технической литературе вопросы принципов действия, расчетов и эксплуатации этих устройств не имеют должного освещения. Несколько статей, появившихся в разное время в периодической литературе, носили преимущественно информационный характер. Поэтому понятен интерес, проявленный к выходу данной книги. Ее авторы разработали устройства компаундирования с электромагнитным корректором и были основными инициаторами их внедрения.

Рецензируемая книга состоит из шести глав и имеет приложения. В гл. I «Компаундирование и электромагнитный корректор напряжения для синхронных генераторов» дано описание устройства и принципов действия компаундирования и электромагнитных корректоров напряжения разных типов. Описаны также устройство и принцип действия автоматического ограничителя тока, разработанного специально для использования его совместно с электромагнитным корректором напряжения. Ограничитель имеет весьма важное значение для электромагнитных корректоров напряжения, установленных на синхронных компенсаторах или генераторах несблуживаемых станций, и позволяет избежать длительных перегрузок этих машин реактивным током при снижении напряжения в сети. В конце главы весьма кратко затронут вопрос о групповом регулировании возбуждения генераторов многоагрегатных электростанций, не получившем пока широкого практического внедрения.

Гл. II «Методика расчета режимов компаундирования и электромагнитного корректора напряжения», гл. III «Методика расчета устойчивости работы электромагнитного корректора напряжения» и гл. IV «Расчеты режимов компаундирования и электромагнитного корректора напряжения» посвящены расчету режимов компаундирования и режимов и устойчивости работы электромагнитных корректоров напряжения разных типов. В этих главах описана методика расчета указанных устройств, разработанная Институтом электротехники Академии наук УССР, и даны примеры расчета для турбогенератора завода «Электросила» типа Т-2-25-2.

В гл. V «Релейная форсировка возбуждения и релейное развозбуждение генераторов в сочетании с компаундированием и корректором» доказан и подтвержден оциллограммами тот факт, что дополнение релейного форсирования устройством компаундирования и электромагнитным корректором весьма положительно отзывалось на процессе форсирования возбуждения генератора.

Гл. VI «Методика расчета токов и напряжений в цепях обмоток возбуждения возбудителя при форсировке или развозбуждении» освещает ранее опубликованный авторами вопрос о расчете процессов в цепях возбуждения возбудителя, содержащих выпрямительные элементы. Методика расчета пояснена примером расчета на конкретных цифрах.

В качестве приложения к книге дан справочный материал о различных типах устройств компаундирования и корректоров, а также о трансформаторах тока и напряжения, используемых для компаундирования и корректора.

К достоинствам рецензируемой книги следует прежде всего отнести то, что в ней сконцентрирован, обработан и обобщен ценный материал по устройствам компаундирования с электромагнитным корректором, опубликованный авторами в разное время в виде отдельных статей. Весьма своевременным явилось рассмотрение методики расчета

компаундирования и электромагнитного корректора напряжения, так как широкие круги работников эксплуатации и проектирования до этого вообще не были знакомы с законченной методикой расчета. Ценно также и то, что авторы кратко осветили в книге новые разработки, еще не внедренные в массовую эксплуатацию (например, автоматический ограничитель тока и предложения по групповому регулированию возбуждения генераторов многоагрегатных станций).

Остановимся на недостатках книги.

Эту книгу необходимо оценивать как пособие для практической деятельности широких кругов инженерно-технических работников эксплуатации и проектирования. Однако скупое и местами мало доступное изложение материала препятствует использованию в полной мере книги для этой цели. Описание устройств дано с чрезмерной лаконичностью, а местами (например, в § 1-3 и во всей главе VI) без развития темы использованы статьи авторов в журнале «Электричество». В книге не рассмотрена физическая сторона работы устройств компаундирования с электромагнитным корректором в целом и отдельных элементов этих устройств (измерительного элемента, выпрямительной схемы и др.).

Трудно воспринимается также изложение материала и в § 1-7, 1-8 и в гл. VI. Режимы синхронных генераторов в § 2-10 определяются по формулам, которые приведены без выводов и пояснений. Используемый при этом метод Г. И. Шермана описан недостаточно подробно.

Авторы не дают сравнительного анализа различных типов устройств; например, не указывают, какой способ регулирования уставки корректора по напряжению лучше — при помощи автотрансформатора или при помощи применяемого заводом «Электросила» установочного реостата, и т. п.

Хотя опубликование в книге методики расчета компаундирования и корректора принципиально весьма полезно, однако предложенная методика, основанная на громоздких вычислениях по сложным формулам, затемняющим физический смысл, весьма трудоемка и при этом дает лишь приближенные результаты. Авторам следовало разработать для широкого пользования упрощенную методику с использованием графоаналитических способов расчета.

Собранный в гл. III материал по проверке устойчивости работы корректора не может быть признан исчерпывающим, так как авторы не учитывают влияния сопротивления соединительных кабелей между трансформатором напряжения и корректором, а также сопротивления самого трансформатора напряжения. Этот недостаток должен быть подчеркнут в связи с тем, что, как показала практика, эти факторы могут оказаться решающими для оценки устойчивости.

В книге не рассмотрен вопрос об устойчивости работы компаундирования и мерах ее достижения, хотя при наладочных работах часто приходится сталкиваться с неустойчивостью компаундирования вблизи «порога».

Бесспорно недостатком книги является также и то, что в ней совсем не освещен большой опыт эксплуатации рассмотренных устройств в энергосистемах, а равно накопленный опыт наладочных работ. Можно не сомневаться, что наличие таких данных в книге было бы весьма ценным для работников эксплуатации и позволило бы лучше оценить достоинства и особенности описываемых устройств.

Текст книги содержит много незамеченных опечаток и, что особенно недопустимо, — в формулах; ряд неточностей может привести к неправильному пониманию вопроса и к ошибкам в расчетах.

Например: обозначения в формулах (2) и (3) на стр. 50 не соответствуют принятым авторами (i_a вместо i_a' и

I_k вместо I'_k); в формуле (2-25) вместо i_a стоит U_a ; в формуле (3-2) пропущен оператор P ; в формуле (2-54) пропущено ΔU_a ; в формуле на последней строке стр. 98 дважды пропущено i ; в формуле для определения $i'_{вк}$ на стр. 104 пропущено $r_a \cdot R$; на стр. 76 дана неправильная ссылка на формулу (3-1) и т. д. Всего нами замечены 24 опечатки.

В качестве существенных неточностей можно привести и такие примеры:

1. На стр. 90—91 в § 4-3 при выборе числа последовательно соединенных элементов в плече выпрямительной схемы расчет для нормального режима работы дал десять элементов. Однако для дальнейшего расчета без обоснования была принята схема выпрямителей с всею элементами в плече, полученная из расчета форсировки при толчке возбуждения, сниженном на 10%.

2. На стр. 106 при выборе типа корректора напряжения был принят корректор ЭМК 2/2, имеющий по девять

элементов селеновых выпрямителей в плече выпрямительной схемы и допускающий работу на противонапряжение до 90 в (см. табл. п—3), хотя несколькими строчками выше указано, что на шунтовой обмотке возбуждения возбуждителя, на которую включается корректор, в некоторых режимах длительно может быть напряжение до 106,5 в.

Следует отметить, что в недостатках книги повинны не только авторы, но и издательство, не поставившее перед ними задачу создать книгу, доступную для широких масс работников эксплуатации и проектирования и в большей мере удовлетворяющую их требования, а также выпустившее книгу с большим количеством невыправленных опечаток. Необходимо при переиздании книги выправить указанные недоработки и возможно несколько увеличить объем книги.

**Инженеры М. А. Беркович, Н. В. Виноградов
и В. А. Семенов**
Мосэнерго



НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

(издания 1954 г.)

Беклемишев А. В. МЕРЫ И ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. 284 стр., ц. 5 руб. 60 коп. Гостехиздат.

ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Сборник статей. Отв. ред. Б. Е. Патон. 183 стр., ц. 7 руб. 25 коп. Гостехиздат УССР.

Изомов Н. М. РАДИОРЕЛЕЙНАЯ СВЯЗЬ. 104 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

Иофе В. К. ЭЛЕКТРОАКУСТИКА. Учебное пособие для техникумов. 184 стр., ц. 5 р. Связьиздат.

Иофе Е. Ф. ОПЕРАТИВНАЯ РАБОТА НА ПОДСТАНЦИЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. Изд. 2-е (переработ.). 280 стр., ц. 8 руб. Госэнергоиздат.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ. Сборник статей. Под ред. Е. Т. Чернышева. 128 стр., ц. 4 руб. 50 коп. Машгиз.

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени УЛЬЯНОВА—ЛЕНИНА. 1804—1954 (150 лет). Альбом под ред. М. В. Маркова. 60 стр., ц. 50 р. Таткингониздат.

Курицкий Е. И. и Фошин С. В. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ НА ЗАВОДАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Учебник для техникумов. 336 стр., ц. 7 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.

Левитин Е. А. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ. Под ред. Л. В. Кубаркина. С рис. Д. П. Мощевитина. 103 стр., ц. 2 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.

Меклер А. Г. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН. Учебное пособие для машиностроительных техникумов. 372 стр., ц. 9 руб. 85 коп. Машгиз.

Нестеренко А. Д. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ УРАВНОВЕШИВАНИЯ. 447 стр., ц. 22 руб. 80 коп. Академиздат УССР.

Петрович С. и Дивов Д. АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ. 107 стр., ц. 1 руб. 25 коп. Воениздат.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ. (Сборник статей). Пер. с англ. под ред. В. М. Тучкевича. 368 стр., ц. 18 руб. 30 коп. Изд. иностр. лит.

Попков С. Л. ОСНОВЫ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА. Учебное пособие для техникумов. 272 стр., ц. 7 руб. 75 коп. Оборонгиз.

Попов Е. П. ДИНАМИКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. 799 стр., ц. 24 руб. 50 коп. Гостехиздат.

Разиков М. И. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ. 84 стр., ц. 1 руб. 10 коп. Свердловское издательство.

Спирин А. А., Цекун Н. А., Салам-Заде М. М. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ОТ КОРРОЗИИ. 264 стр., ц. 9 руб. 30 коп. Азнефтенздат.

Степанов Д. В. ИМПУЛЬСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ. 256 стр., ц. 8 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

Шац Е. Л. БЕЛОЯРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ «СЕЛЬЭЛЕКТРО» (Свердловская область). 8 стр., ц. 10 коп. Госкультпросветиздат.

Шляндин В. М. ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ. Учебник для техникумов. Изд. 2-е, переработ. 464 стр., ц. 12 руб. Оборонгиз.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ. Общий курс (для энергетич. и электротехн. вузов и факультетов). Под ред. А. В. Фремке. Изд. 2-е, перераб. 496 стр., ц. 12 руб. Госэнергоиздат.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ. Обработка Е. Я. Гурвича. 24 стр., ц. 85 коп. Госэнергоиздат.



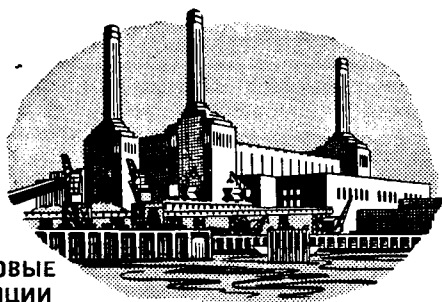
ПОПРАВКА

В журнале «Электричество», № 7, 1954 г. в статье Л. Г. Мамиконян на стр. 13, левая колонка, формулу (13) следует читать:

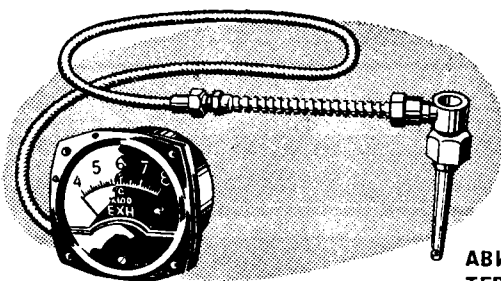
$$x_{d_0}' = \frac{x_d (T_d' + T_d'') - (x_d + x_d'') T_{d_0}''}{T_{d_0}' - T_{d_0}''} \quad (13)$$

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

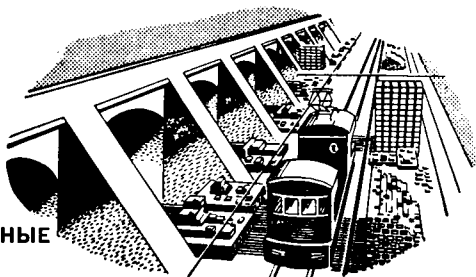
**Н. А. Андрианов, Г. В. Бутневич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова,
Н. Г. Дроздов (главный редактор), Е. Г. Комар, М. П. Костенко,
И. А. Сыромятников (зам. главного редактора), А. М. Федосеев,
М. Г. Чиликин, М. А. Шателен**



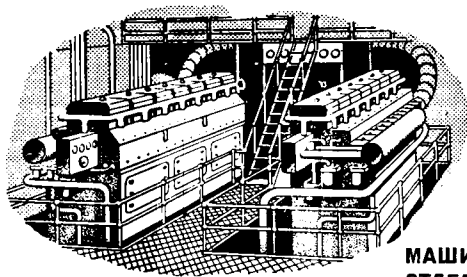
**СИЛОВЫЕ
СТАНЦИИ**



**АВИАЦИОННЫЕ
ТЕРМОПАРЫ**



**СУШИЛЬНЫЕ
ПЕЧИ**



**МАШИННЫЕ
ОТДЕЛЕНИЯ СУДОВ**

Как избежать порчи кабелей

в установках с высокой температурой

Вы можете быть уверены в получении долгой бесперебойной службы, если на установках в условиях высокой температуры Вы пользуетесь кабелями «ВІСС», изолированными резиной с кремнийорганическим наполнителем. Эти кабели выдерживают варьирование температуры в пределах от -50°C до 120°C и имеют широкое применение в условиях, где обычного типа кабели показали свою несостоятельность.

Резина с кремнийорганическим наполнителем не термопластична и сохра-

няет удовлетворительные механические и электрические свойства в рабочих температурах значительно выше, чем это было возможно с изоляциями обычного типа. Этот резинообразный материал не издает запаха при высоких рабочих температурах и противостоит вибрации и сырости.

Разрешите выслать Вам дальнейшую информацию относительно этих кабелей или посоветовать Вам относительно возможностей применения их для разрешения возникающих затруднений с установками в условиях высокой температуры.

Запросите брошюру № 261



**КАБЕЛИ, ИЗОЛИРОВАННЫЕ
КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКОЙ РЕЗИНОЙ**

BRITISH INSULATED CALLENDER'S CABLES LIMITED

21, BLOOMSBURY STREET, LONDON, W.C.1 · АНГЛИЯ

ГРАФИЧЕСКОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

В электро- и радиотехнической практике параллельное включение двух комплексных сопротивлений встречается весьма часто. Определение численного значения эквивалентного сопротивления такого соединения приводит к формуле, требующей многих арифметических операций. Но эту же задачу можно решить графически: векторы Z_1 и Z_2 изображают исходящими из начала координат плоскости комплексных сопротивлений. Затем при помощи линейки и чертежного угольника: 1) находят пересечения двух пар прямых, перпендикулярных одному вектору в его начале, а другому — в его конце; 2) опускают из начала координат перпендикуляр на прямую, проходящую через точки пересечения этих пар прямых. Этот пятый по счету перпендикуляр и будет искомым эквивалентом Z_0 .

Справедливость предлагаемого способа пяти пер-

ПРИМЕНЕНИЕ ДУГОГАСЯЩИХ УСТРОЙСТВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ (ОТЧЕТ КОМИТЕТА АИЕЕ)

Дугогасящие устройства устанавливаются в США на воздушных и кабельных линиях 2,4... 230 кв.

Эффективность применения дугогасящих устройств в сетях высокого напряжения зависит от соотношения между числом однофазных замыканий на землю и общим числом коротких замыканий в рассматриваемой системе. Это соотношение зависит от многих факторов и в первую очередь от расположения проводов на опорах, линейной изоляции и сопротивления заземления опор. В тех случаях, когда число однофазных замыканий на землю велико, дугогасящие средства обеспечивают снижение числа отключений линий на 80...90%.

Применение дугогасящих устройств в кабельных сетях приводит к значительному уменьшению повреждений кабеля в месте короткого замыкания на землю

А. П. Златковский и Я. С. Теплицкий

ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ ПО СОЗДАНИЮ НОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В статье приводятся и обосновываются технические требования к промышленности в области создания нового электрооборудования для сельского хозяйства.

В связи с освоением гидромашиностроительными заводами производства новой серии наиболее экономичных поворотно-лопастных гидротурбин с двойным регулированием электропромышленность должна наладить выпуск вертикальных гидрогенераторов с полным валом, снабженных, помимо возбуждателя, регуляторными генераторами, автоматическими регуляторами напряжения с форсированием возбуждения и автоматами гашения поля.

Силовые трансформаторы 35/6 (10) кв мощностью от 560 кВА и выше должны снабжаться устройствами

Н. М. Ellis

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРОЗОЗАЩИТЫ НА ПОДСТАНЦИЯХ 115/230 кв

В течение 5 лет Гидроэлектрическая компания ОНТАРИО производила исследование эффективности грозозащиты двух подстанций 115/230 кв. Оборудование подстанций и все заходящие на подстанции линии 115 и 230 кв были защищены от прямых ударов молнии тросами.

На одной из подстанций на зажимах 230 кв трансформаторов были установлены разрядники. Со стороны 115 кв защитной аппаратуры на зажимах трансформаторов установлено не было. Защита трансформаторов на второй подстанции осуществлялась координирующими искровыми промежутками 450 мм на зажимах 115 кв и 1000 мм на зажимах 230 кв.

С момента установки разрядников и промежутков не было отмечено ни одного случая их работы. Во время исследований на подстанциях и на семи пролетах линий вблизи подстанций были установлены клидоно-

А. Б. Чернин

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ НА ЛИНИЯХ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ 400 кв

В связи с постановкой вопроса о применении на линиях большой протяженности 400 кв однофазного отключения и автоматического повторного включения (ОАПВ), а также длительных неполнофазных режимов работы возникает необходимость исследовать соотношения, имеющие место при коротких замыканиях в неполнофазном режиме длинных линий. В данной статье изложены разработанные для этих случаев методы вычислений, учитывающие наличие распределенной емкости линий.

В статье дан метод составления расчетных схем положительной последовательности, применение которых позволяет привести сложные несимметричные повреж-

J. Liden, E. Uhlmann, S. Sviden.

ГОТЛАНДСКАЯ ПЕРЕДАЧА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Подробно описывается оборудование подводной кабельной линии передачи 100 кв постоянного тока между материковой Швецией и островом Готланд, первая очередь которой введена в опытную эксплуатацию в марте 1954 г.

Выпрямительная подстанция будет нормально работать без дежурного персонала и управляться по радио дежурным на приемной инверторной подстанции. Помимо обычной аппаратуры местного и телемеханического измерения и управления, на пульт управления приемной подстанции вынесена сигнализация нарушений в работе преобразователей с указанием их характера и последовательности их возникновения. Для автоматической записи переходных процессов в установке в течение нескольких периодов до и после аварии исполь-

А. И. Гершенгорн и Н. А. Мельников

ТРАНСПОЗИЦИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 35... 220 кв

В статье рассматриваются условия работы линии электропередачи с удлиненными циклами транспозиции в сложных электрических сетях.

Отсутствие транспозиции линий в сетях 110—220 кв приводит к появлению несимметрии токов порядка нескольких процентов. Осуществление только одного цикла транспозиции на линиях 110... 220 кв оказывается достаточным для снижения коэффициентов несимметрии токов и напряжений в цепи до приемлемых величин. Применение транспозиции линий в сетях 35 кв не вызывается необходимостью. Симметрирования емкости фаз можно добиться путем соответствующего расположения проводов на отдельных линиях.

Токи прямой последовательности оказывают заметное влияние только при небольшом расстоянии между линиями связи и электропередачи. Практически транспозиция может снизить мешающее влияние, создаваемое токами прямой последовательности, только в случае

L. M. Alexander, O. K. Mangum

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРТОЛЕТОВ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В тех случаях, когда трасса линии электропередачи проходит по горной или лесистой местности или пересекает водные пространства, обходы и производство ремонтных работ связаны с серьезными трудностями. Описывается опыт применения транспортных вертолетов в крупной электрической системе, охватывающей около 2500 км сетей высокого напряжения.

При помощи вертолетов возможны осуществление профилактических осмотров линий, доставка ремонтного персонала и оборудования к месту работы. Места, которые недоступны для любых наземных транспортных средств, легко и быстро достигаются вертолетами. Посадка вертолета совершается на небольшой площадке. В случае отсутствия такой площадки персонал и снаряжение могут быть спущены на землю без приземления.

При помощи транспортных вертолетов, рассчитан-

и ограничению амплитуды динамических перенапряжений.

В воздушных сетях для успешного гашения дуги обычно не требуется полная компенсация тока замыкания на землю. В подземных кабельных сетях при устойчивых замыканиях на землю желательное снижение остаточного тока до минимальной величины.

Приводятся кривые для определения примерных значений номинальных токов дугогасящих катушек для одноцепных бестросовых воздушных линий электропередачи в зависимости от длины и напряжения линии. Для двухцепных линий ориентировочное определение номинальных токов дугогасящих устройств производится по тем же кривым в зависимости от эквивалентной длины одноцепной линии. При наличии тросов эквивалентная длина линии определяется путем умножения на коэффициент 1,08 для одного троса и 1,15 — для двух.

Тг. АИЕЕ, т. 72, ч. III, стр. 183, 1953

(Э-во, 3, 1955)

графы и ферромагнитные регистраторы тока молнии. Разработка клидонографа, предназначенного для непосредственной подвески на провод, исключала необходимость применения емкостных делителей напряжения.

Во время исследований было зарегистрировано несколько случаев появления значительных перенапряжений (до 1300 кВ) на подходах линий, сопровождавшихся токами в тросах, превышавшими 25 кА.

Среднегодовое число прямых ударов в трос составило на подстанции приблизительно 0,1 на 1 га, а на линиях электропередачи — около 0,25 на 1 км линии при 20 ... 25 грозových днях в году.

По результатам исследований вероятность появления на зажимах 230 кВ трансформаторов напряжения выше 800 кВ равна 1 раз в 10 лет (на каждую трансформаторную группу), а на зажимах 115 кВ напряжения более 400 кВ — 1 раз в год.

Тг. АИЕЕ, т. 72, ч. III, стр. 337, 1953

(Э-во, 3, 1955)

зается электронный осциллограф с длительным послесвечением экрана. При нарушениях электронный луч выключается с выдержкой времени в несколько периодов, и экран автоматически фотографируется.

Синхронный компенсатор 30 000 квар, 1 000 об/мин на приемной подстанции имеет низкоомную успокоительную обмотку. Обмотка снижает сверхпереходную реактивность компенсатора до 10% и тем самым снижает угол перекрытия инвертора; одновременно она поглощает большую часть высших гармонических анодного тока.

Собственные нужды инвертора питаются нормально от вспомогательного синхронного генератора 200 кВА, 400 В на валу компенсатора; питание их, следовательно, не нарушается при коротких замыканиях в присной сети.

ASEA Jour., т. 27, стр. 141, № 10, 1954

(Э-во, 3, 1955)

ных на полезную нагрузку 680 кг, доставлялись на место аварии персонал, инструмент и необходимое снаряжение для замены под напряжением гирлянды изоляторов на линии 230 кВ и траверзы на линии 161 кВ, ликвидации обрывов проводов и других ремонтных работ. Накопленный в течение нескольких лет опыт эксплуатации показал, что применение вертолетов позволяет организовать патрулирование линий при значительно меньшей затрате времени и обеспечить при этом более высокое качество осмотров, чем при наземных обходах.

Перевозка ремонтного персонала, инструмента и оборудования на мощных вертолетах позволяет ускорить выяснение местоположения повреждения и ликвидацию аварий и сократить количество ремонтных бригад на линии и грузового автотранспорта. Восстановление линий при применении вертолетов потребовало значительно меньше времени, даже при сокращении численности персонала на 40%.

Тг. АИЕЕ, т. 72, ч. III, стр. 1045, 1953

(Э-во, 3, 1955)

пендикуляров легко доказать, пользуясь аналитической геометрией.

Если векторы Z_1 и Z_2 взаимно перпендикулярны, что имеет место, например, при параллельном включении активного и реактивного сопротивлений, то эквивалент Z_0 будет равен перпендикуляру, опущенному из вершины прямого угла на прямую, соединяющую концы векторов, — на гипотенузу. Когда угол между векторами Z_1 и Z_2 приближается к 180° , что имеет место, например, при параллельном резонансе, то способом пяти перпендикуляров исключительно наглядно демонстрируется возрастание эквивалентного сопротивления Z_0 .

В сочетании с общеизвестным способом диагонали параллелограмма способ пяти перпендикуляров позволяет сравнительно просто находить эквивалент смешанного соединения комплексных сопротивлений. Между прочим, этим же способом можно вычислять проводимость, эквивалентную двум последовательно соединенным проводимостям.

Электричество, № 3, 1955.

автоматического встречного регулирования напряжения в зависимости от нагрузки в пределах $\pm 10\%$ ступенями по 2,5%.

В статье приводятся требования к комплектным потребителем подстанциям, комплектным станционным и подстанционным распределительным устройствам и аппаратам для наружных установок; затрагиваются вопросы об изготовлении специальных алюминиево-стальных проводов для воздушных линий и специальных облегченных и дешевых кабелей с хлорвиниловой оболочкой для подземных линий.

Сельское хозяйство нуждается также в специальной аппаратуре и однофазных трансформаторах для применения экономичной трехфазно-однофазной системы передачи и распределения электроэнергии.

Электричество, № 3, 1955.

дения к трехфазным коротким замыканиям. Составленные в соответствии с приведенными указаниями расчетные схемы положительной последовательности используются для исследования устойчивости параллельной работы электропередач 400 кВ и изучения поведения релейной защиты при коротких замыканиях в неполнофазных режимах при расхождении э. д. с. генераторов по фазе. Рассмотрен метод расчета токов короткого замыкания на линиях с распределенной емкостью в неполнофазном режиме при помощи комплексных схем последовательностей, отличающийся простотой и удобный для инженерных расчетов и анализа поведения релейной защиты в указанных системах.

Показаны также способы составления расчетных выражений для случаев коротких замыканий с двумя разрывами на длинных линиях; эти расчетные выражения имеют наиболее общее применение.

Электричество, № 3, 1955.

параллельного сближения линий на длине полного цикла.

Основное действие на цепи связи оказывают токи нулевой последовательности, замыкающиеся через землю. Поскольку в сетях с заземленной нейтралью транспозиция линии приводит к снижению токов нулевой последовательности только основной частоты, она не может рассматриваться в качестве мероприятия для снижения мешающих влияний на низкочастотные телефонные каналы. Для устранения мешающих влияний на телеграфные цепи практически достаточно осуществления одного цикла транспозиции на линиях электропередачи. Для расчета мешающих влияний на телеграфные цепи требуется нахождение распределения токов нулевой последовательности в сетях.

В статье приводится метод определения несимметрии токов и напряжений в сложных сетях.

Электричество, № 3, 1955.

МАЧТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЯГИ ИЗ ВИБРОБЕТОНА

Управление по электрификации Австрийских объединенных железных дорог при производстве работ по восстановлению и строительству электротяги в целях замены металлических решетчатых опор из дефицитной профильной стали установило 7000 железобетонных опор из вибробетона. Испытания мачт новой конструкции и их эксплуатация с 1947 г. показали их хорошие качества.

Монтируемая опора состоит из монолитной мачты прямоугольной формы с конусностью в средней части 1,2 см/м. Нижним своим концом длиной 1,9 м мачта вставляется в конусное гнездо фундамента. Металлическая арматура каркаса опоры состоит из стальных прутьев разной длины. Поперечное крепление прутьев осуществляется стальной отожженной проволокой диаметром 4,5 мм. Общая длина мачты нормального профиля составляет 9,7 м. Вес арматурной стали равен 110 кг, т. е. около четверти веса цельнометаллической

**УСИЛИЯ ОТ ТЯЖЕНИЯ ПОЛЮСОВ В КЛИНЬЯХ
КРЕПЛЕНИЯ АКТИВНОЙ СТАЛИ
ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ**

Сварные швы, крепящие клинья активной стали к ребрам корпуса, являются одним из наиболее напряженных узлов статора. В практике эксплуатации известен ряд случаев обрыва этих швов при нормальных эксплуатационных нагрузках. Поэтому необходим анализ сил, действующих на швы, для повышения эксплуатационной надежности гидрогенераторов. Силы тяжения полюсов создают одну из основных частей механической нагрузки швов. Обычный способ расчета этих сил, целесообразный при изготовлении генератора и обеспечивающий необходимый запас прочности, оказывается грубым при анализе случаев обрыва швов, имевших место в эксплуатации, так как он не соответствует круговой форме кольца активной стали, которая обычно сохраняется в эксплуатируемых машинах.

**СУХИЕ БАТАРЕИ ИЗ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ**

Взамен цилиндрических сухих элементов, в которых цинковый корпус служит одновременно электродом, в Германии все шире внедряются пластинчатые элементы. Элемент состоит из плоской цинковой пластины, слоя, пропитанного электролитом, и пластины из двуокиси марганца, служащей деполяризатором. Элемент заключен в корпус из пластмассы. Цинковый электрод прикрыт проводящей синтетической пленкой. Для соединения нескольких элементов в батарею, электрод из двуокиси марганца каждого элемента, выступающий из кожуха, прижимается к проводящей пленке следующего элемента. Размеры пластин от $11 \times 11 \times 1,7$ мм до $50 \times 60 \times 8$ мм.

Использование объема в батареях из пластинчатых элементов выше, чем в батареях из цилиндрических элементов: так, удельный запас энергии в батарее 110 в из 75 пластинчатых элементов общим объемом 875 см³,

**О ВОЗНИКНОВЕНИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ
В ЛОБОВЫХ ЧАСТЯХ ОБМОТОК КРУПНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ОТ ЕМКОСТНЫХ
ТОКОВ**

За последние годы наблюдались случаи, когда в лобовых частях обмоток высоковольтных электрических машин возникали частичные разряды, отличные от коронного разряда.

Возникновение этих разрядов может быть объяснено протеканием емкостных токов между участками поверхности изоляции, обладающими низким удельным сопротивлением и отделенными друг от друга небольшим воздушным зазором или участком поверхности изоляции с большим удельным сопротивлением.

Искра, замыкающая промежуток, может вызвать тление находящихся на пути разряда легко воспламеняющихся материалов (наружной хлопчатобумажной ленты, бандажного шпагата и т. п.), особенно если они не пропитаны.

**В. Л. Иносов, В. Н. Шестопалов и В. Е. Рыбинский 3
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА ВЫБЕГА
СИНХРОННОЙ МАШИНЫ**

При исследовании устойчивости энергосистем наиболее важным исследуемым параметром является угол между векторами э. д. с. генераторов. Поэтому при работе на динамической модели энергосистемы необходимо иметь устройство, которое позволило бы наблюдать за изменениями относительных углов между станциями и осциллографировать их. Такое устройство с электромагнитным датчиком разработано в лаборатории электростанций и энергосистем Института электротехники АН УССР.

Устройство состоит из трех блоков: электромагнитным датчиком разработано в лаборатории электромагнитный датчик выполнен в виде электромагнита с сердечником П-образной формы из трансформаторной стали. Ярма электромагнита в количестве, равном числу

**СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДАХ**

Надежность трансформаторов, применяемых в металлургической промышленности, очень высока: статистика указывает одно повреждение на 2500 трансформаторо-лет работы. Напряжения для трансформаторов стандартизованы: первичные напряжения — от 120 до 110 000 в (16 ступеней), вторичные напряжения от 120 до 13 800 в (12 ступеней). Кроме того трансформаторы нормально снабжаются четырьмя ответвлениями на 2½% каждое; два из них повышающих, а два — понижающих относительно номинального напряжения.

Почти во всех случаях группы однофазных трансформаторов вытесняются трехфазными, имеющими меньшие габариты, потери и стоимость. Естественное охлаждение трансформаторов усиливается установкой наружных вентиляторов, которые действуют в две ступени

**КОММУТАЦИОННАЯ РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ
В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Излагается метод опытного исследования коммутационной реакции якоря в машинах постоянного тока, основанный на определении результирующей н. с. машины по кривым намагничивания. Показывается пригодность этого метода как для установившихся, так и для переходных режимов. Однако большую точность метод дает при определении коммутационной реакции в переходных режимах и перегрузках, когда коммутация расстраивается и н. с. коммутационной реакции F_k достигает больших значений. Как показало экспериментальное исследование, коммутационная реакция якоря, возникающая при внезапном коротком замыкании, оказывается весьма значительной. Наряду с другими факторами, как возрастание переходного напряжения под щетками, поперечной реакции якоря в некомпенсированных машинах и т. п., коммутационная реакция яко-

**МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССАХ**

Фирма «Дженерал Электрик» широко применяет при проектировании крупных трансформаторов предварительное экспериментальное исследование импульсных перенапряжений на так называемых «электромагнитных моделях» этих трансформаторов. Последние представляют собой сочетание:

а) «Геометрической модели», т. е. уменьшенной копии магнитопровода и обмоток, воспроизводящей их в определенном масштабе (порядка $1/8 \dots 1/10$) с соблюдением соотношений всех размеров.

б) «Эквивалентной емкостной цепи», т. е. емкостной схемы, воспроизводящей все емкости отдельных катушек обмотки высшего напряжения на землю и между собой в некотором увеличенном масштабе.

Все точки эквивалентной емкостной цепи соединяются с соответствующими межкатушечными переходами на обмотке геометрической модели; последняя

В статье изложен метод расчета с учетом круговой формы цилиндра активной стали, различных модулей упругости шихтованного сердечника активной стали и цельных ребер корпуса. Задача решена в предположении плоского напряженного состояния. Это упрощение, не учитывающее заделки одного из торцов активной стали, очевидно, обеспечивает запас.

По полученным формулам произведен расчет сил тяжения полюсов, передающихся на клинья типичной конструкции гидрогенераторов среднего и крупного габаритов, в предположении равенства модулей упругости шихтованной активной стали и сплошных ребер корпуса. Показано, что при этом силы на клиньях составляют примерно 30—35% полного усилия тяжения полюсов. Учитывая, что полные усилия тяжения полюсов обычно не приводят к большим напряжениям в швах, можно на основе полученного результата считать, что в обычных эксплуатационных режимах напряжения в швах от сил тяжения поля невелики.

Электричество, № 3, 1955.

Причиной образования полупроводящих участков поверхности изоляции на практике может быть сильное загрязнение лобовых частей, например маслом, смешанным со шеточной пылью.

Опыты, произведенные в лаборатории, показали, что для возникновения разряда мощностью, достаточной для того, чтобы вызвать тление органической изоляции, требуется напряжение около 10 кВ. Удельное сопротивление изоляции должно составлять при этом величину порядка $10^6 \dots 10^9$ ом. На практике такое сильное загрязнение встречается редко, что объясняет редкость появления опасных емкостных разрядов.

Для ликвидации разряда необходимо устранить непитанные материалы, установить миканитовые прокладки и т. п.

Электричество, № 3, 1955.

пени: добавление первой ступени позволяет повысить нагрузку трансформатора на 15...33%, при помощи второй ступени повышение нагрузки доводится до 67%.

Трансформаторы с залитой маслом, как правило, применяются в наружных установках. Внутри помещения устанавливаются трансформаторы с синтетическими негорючими жидкими диэлектриками или сухого типа: преимущество последних заключается в малом весе. Однако этому противостоит ряд недостатков сухих трансформаторов: более низкий уровень импульсной прочности (поэтому их применение исключено в установках, подверженных действию атмосферных перенапряжений), быстрая загрязняемость пылью и копотью, в результате чего требуется частая чистка и повышаются эксплуатационные расходы.

Iron and Steel Eng., т. 31, стр. 124, № 8, 1954

(Э-во, 3, 1955)

воспроизводит все индуктивности и взаимные индуктивности реальной обмотки.

Роль эквивалентной емкостной цепи заключается в том, что она дает возможность сохранить масштаб времени близким к единице при сильном уменьшении пространственного масштаба. Без нее оба эти масштаба должны были бы стать одинаковыми, т. е. уменьшение линейных размеров в 10 раз требовало бы 10-кратного ускорения всех процессов; во столько же раз нужно было бы сократить фронты и длины воздействующих на обмотку импульсов, что практически невозможно. Кроме того, сохранение масштаба времени близким к единице дает возможность получить реальную индукцию в магнитопроводе при достаточно малой амплитуде импульса, удобной для исследований.

Среднее расхождение импульсных градиентов, измеренных на трансформаторе и на его электромагнитной модели, составляет около 11% измеряемой величины; максимальное расхождение примерно вдвое больше.

Trans. AIEE, т. 72, ч. III, стр. 469, 1953

(Э-во, 3, 1955)

мачты. Общий вес нормальной опоры в зависимости от длины составляет 1200...1800 кг. Запас прочности опоры на изгиб 2,5...3.

Механические испытания мачты производились в опорном фундаменте, исключившем осевое перемещение, и заключались в статическом и динамическом изгибе. При испытаниях фиксировались стрела прогиба вершины, остаточная деформация и отмечался характер трещин на поверхности граней.

Испытания установили, что мачты из виброжелезобетона способны выдержать как длительную, так и ударную перегрузку без разрушения. В соответствии с требованиями дорог о создании опор повышенной прочности для участков пути сложного профиля были созданы, кроме нормальных типов, еще и усиленные типы опор высотой до 14,4 м.

Е и М, стр. 49, № 3, 1954.

(Э-во, 3, 1955)

составляет 0,154 втч/см³ или 82 втч/кг против 0,07 втч/см³ и 52 втч/кг для батарей того же объема из цилиндрических элементов. Батарея 1200 в с током короткого замыкания 0,3...0,4 а имеет размеры 9,8 × 7 × 19,3 см³. Пластинчатые элементы отличаются высоким сроком службы.

В США изготавливаются сухие элементы, в которых одним электродом служит амальгированный цинк, вторым — смесь окиси ртути с 10% графита. Электролитом служит водный раствор едкого калия с добавлением цинката. Удельный запас энергии на единицу объема — порядка 0,3 втч/см³, т. е. в 2...4 раза больше, чем в элементах с двуокисью марганца. Однако вес и стоимость элементов с окисью ртути в несколько раз выше. Еще большая концентрация энергии достигается в элементах, в которых деполяризатором служит атмосферный кислород в присутствии катализаторов.

ETZ—A, стр. 513, № 16, 1954

(Э-во, 3, 1955)

пар полюсов синхронного генератора, жестко прикреплены к его полумуфте. На стержнях сердечника укреплены две обмотки, одна намагничивающая, а во второй наводится э. д. с. при изменении потока. Первичная обмотка может питаться от возбуждателя. Импульсы э. д. с. вторичной обмотки управляют работой электронного реле. В качестве триггерного устройства использован симметричный реостатный триггер, построенный на двойном триоде 6Н8. В электронном реле последовательно включены электронная лампа 6Х6 и тиратрон ТГ-212. Устройство в целом отличается большой надежностью и не требует присоединения к валу генератора какого-либо сложного оборудования. Устройство может найти применение в лабораторной технике — при исследовании режимов энергосистем на динамических моделях, а также на электростанциях при необходимости производить управление по внутреннему углу генератора.

Электричество, № 3, 1955.

ря способствует существенному ограничению всплеска тока при коротком замыкании в цепи якоря.

Полученные автором зависимости позволяют сделать следующие выводы:

1. При внезапном коротком замыкании и одном и том же всплеске тока н. с. коммутационной реакции F_K изменяется прямо пропорционально скорости вращения.

2. При постоянстве скорости вращения можно приближенно принять, что н. с. F_K изменяется в зависимости от максимального тока якоря по степенной функции с показателем степени, равным 2.

Электричество, № 3, 1955.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С БОЛЬШИМ МАСШТАБОМ ВРЕМЕНИ

Развивая технику построения «электромагнитных моделей» трансформаторов, авторы пришли к выводу о целесообразности применения моделей с масштабом времени, значительно превышающим единицу.

В исследованных моделях применялись масштабы времени от 30 до 1000. При этом значительно упрощаются техника исследований и аппаратура. В частности, устранение высоких частот из спектра применяемых импульсных воздействий дает возможность использовать неискажающий усилитель с коэффициентом усиления до 1000, при помощи которого можно измерять градиенты на весьма малых участках обмотки модели, соответствующие междувитковым градиентам в реальном трансформаторе. При этом амплитуда волны, подаваемой на модель, не превышает 10 в (вместо напряжения порядка 1 кВ при отсутствии усилителя), что обеспечивает полную безопасность работы и воз-

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Предлагается следующая схема соединений механического контактного выпрямителя: каждая фаза трехфазного питающего трансформатора соединяется по мостовой схеме через насыщающийся дроссель с 4 контактами выпрямителя. Получаемые таким образом 3 двухполупериодные выпрямляющие системы включены на общие шины постоянного тока. Из 12 контактов одновременно замкнуты вне периодов перекрытия 2 контакта. Режим выпрямления — шестифазный.

Преимущество предлагаемой схемы заключается в малой общей типовой мощности насыщающихся дросселей. Для проведения сравнения выведены законы подобия, управляющие изменением веса насыщающихся дросселей и потерь в них при изменении относительной длительности протекания тока, величины коммутационного напряжения и длительности ступени.

К ИЗМЕРЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ И РАСЧЕТУ СЕЛЕНОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

В эксплуатации часто возникает необходимость в измерении параметров селеновых вентилей. Когда поверяемый столбик представляет собой выпрямитель, соединенный по одной из однофазных или трехфазных схем, тогда возможно измерить падение напряжения в каждом плече как в элементарном вентиле, а обратный ток можно определить для выпрямителя в целом. В статье рассматривается вариант схем измерения классификационных параметров.

Порядок ошибки измерения прямого падения напряжения U

$$\delta = \frac{A}{\pi \sqrt{2U}} \frac{A + A_1}{U_{av}} 100\%,$$

где A — ориентировочное значение порога напряжения измеряемого вентиля;

САМОРАЗОГРЕВНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

Электронные лампы, описанные в статье, представляют собой диоды и триоды, предназначенные для работы в цепях переменного тока. В этих условиях электроды лампы оказываются попеременно анодом и катодом. Следовательно, появляется возможность использовать мощность, рассеиваемую на аноде, для разогрева электродов, выполняющих поочередно функцию катода. Эта особенность позволяет использовать описываемые лампы без отдельного источника тока, необходимого для подогревания катодов.

Саморазогревные электронные лампы требуют лишь разогрева катодов в момент включения схемы. При запуске схемы катоды разогреваются либо за счет пропуска тока в подогревателе подогревного катода, либо при помощи индукционного нагрева токами высокой частоты. При использовании последнего способа нагревающимся катодам придается форма замкнутого

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА КАЛИБРОВКУ ШАРОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Градуировочные таблицы шаровых разрядников дают одинаковые пробивные напряжения для постоянного тока и импульсов той же полярности; иными словами, коэффициент импульса шаров принимается равным единице. При этом предполагается, что шары малых диаметров (меньше 250 мм) при измерении облучаются для поддержания постоянной ионизации при помощи ртутно-кварцевой лампы (ультрафиолетовое излучение) или радиоактивных препаратов.

Авторы статьи, ссылаясь на эксперимент, указывают, что в случае 20-мм шаров промежутки меньше 2 мм имеют значительный коэффициент импульса даже при сильном радиоактивном облучении (1 мГ радия). Коэффициент импульса, а также влияние облучения возрастают по мере уменьшения промежутка, как это видно из нижеследующей таблицы, относящейся к волне 1/5 мксек.

ЕМКОСТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ

Для целей измерения и защиты шведская фирма АСЕА выпускает емкостные делители оригинальной конструкции, заменяющие трансформаторы напряжения для сетей от 120 до 380 кВ.

Делители состоят из стандартных элементов — конденсаторов в стальных баках на напряжение $22/\sqrt{3}$ кВ каждый; эти элементы крепятся вместе с разделяющими их опорными изоляторами в виде колонны. Делители на различные напряжения сети отличаются друг от друга только числом элементов (до 18 элементов при 380 кВ).

Нижний конденсатор, с которого снимается напряжение, не отличается от остальных; это обеспечивает независимость коэффициента деления от температуры, так как емкости и углы потерь всех элементов изменяются с нагревом одинаково. Напряжение $22/\sqrt{3}$ кВ с нижнего элемента подается на трансформатор-

РАСЧЕТ ПУСКОВОГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ ГЕНЕРАТОР—ДВИГАТЕЛЬ

Рассматривается процесс пуска двигателя при параметрической схеме генератор—двигатель, имеющей постоянную форсировку поля генератора (пуск в одну ступень).

Нахождение максимума пускового тока двигателя по заданной форсировке (или наоборот), а также времени пуска требует производства трудоемких расчетов по выражениям, имеющим вид показательной или логарифмической функций.

Оценка качества получаемого процесса требует дополнительных расчетов и не дает общего представления о влиянии отдельных параметров на пуск двигателя. Качество процесса пуска предложено определять отношением времени разгона двигателя при форсировке генератора к идеальному времени разгона до той же скорости при неизменном моменте, равном максимальному.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МУФТ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Кратко описаны конструкция и области применения муфт.

Приведены экспериментальные характеристики муфт и осциллограммы переходных процессов. Показана возможность регулирования скорости ведомого вала в передаваемом моменте, а также устойчивого поддержания величины передаваемого момента при различных скольжениях. Отмечено влияние на зависимость момента от ампервитков возбуждения, размера рабочих зазоров, их числа и концентрации наполнителя. На основании экспериментальных характеристик рассчитана зависимость удельной силы сцепления от индукции в рабочих зазорах.

В качестве наиболее целесообразной конструкции рекомендована цилиндрическая муфта с двумя рабочими зазорами, обладающая простотой устройства и хорошими характеристиками.

В предлагаемой схеме, благодаря малому коммутационному напряжению и малой длительности протекания тока, общий вес дросселей при равных потерях в три раза меньше, чем в трехфазной мостовой схеме. Напротив, типовая мощность питающего трансформатора на 22% больше.

Падение напряжения в предлагаемой схеме выше, чем в обычных схемах: наклон вольтамперной характеристики достигает 11... 12%. Это обстоятельство благоприятно для параллельной работы выпрямителей, но снижает коэффициент мощности анодного тока при полной нагрузке примерно до 0,9.

В предлагаемой схеме разрыв цепи при коммутации производится одновременно двумя последовательно включенными контактами. В связи с этим схема допускает вдвое более высокое выпрямленное напряжение, чем схема Ларионова (требующая, однако, вдвое меньшего числа контактов).

ETZ—A, стр. 339, № 10, 1954

(Э-во, 3, 1955)

контура, легче нагреваемого высокочастотным электромагнитным полем. Диод с двумя накаливаемыми электродами целесообразно использовать в качестве реостата активного сопротивления для цепей переменного тока. Его важными достоинствами являются: широкие пределы изменения сопротивления при относительно малом перемещении подвижного электрода, отсутствие трущихся контактов, небольшие механические усилия, необходимые для работы реостата, а также высокая надежность действия.

Вследствие нелинейной вольтамперной характеристики электронной лампы, включенной в цепь переменного тока, в последней при прохождении переменного тока синусоидальной формы появляются гармоники. Отношение амплитуды основной частоты к амплитудам ближайших нечетных гармоник составляет 1 : 0,111 : 0,026.

Proc. IEE., т. 101, ч. III, стр. 77, № 70, 1954

(Э-во, 3, 1955)

Отношение этих времен всегда больше единицы и характеризует неравномерность пускового момента двигателя при его разгоне.

Показано, что относительное время пуска равно обратной величине коэффициента заполнения диаграммы пускового тока (момента).

Формула для относительного времени пуска в сочетании с выражением для максимума пускового тока, но представленного несколько в ином виде, дает возможность связать между собой четыре величины, полностью характеризующие пуск двигателя: форсировку генератора, максимальный пусковой ток, относительное время пуска и отношение электромеханической постоянной времени двигателя к постоянной времени генератора.

Взаимная связь этих четырех величин представлена в виде универсальных кривых.

Для наглядности расчетов с использованием универсальных кривых в статье даны четыре примера.

Электричество, № 3, 1955.

Изложен инженерный метод расчета муфт, содержащий определение основных размеров, электромагнитный и тепловой расчеты. Сделаны рекомендации по геометрии муфт и приведены уравнения, связывающие диаметр муфты с передаваемым моментом.

Для расчета магнитной цепи рекомендован метод расчета по участкам; показаны разбивка цепи на участки и эквивалентная схема замещения. Сделано сопоставление расчетных и экспериментальных кривых намагничивания; предложен поправочный коэффициент для корректирования расчетных кривых.

Дана методика расчета крутящего момента муфты. Приведены зависимости для определения диаметра провода, числа витков и температуры нагрева катушки возбуждения. Предложена методика и уравнения теплового расчета муфт, работающих со скольжением. Даны экспериментальные значения коэффициентов теплоотдачи для катушки и корпуса муфты.

Электричество, № 3, 1955.

возможность производить пересоединения под напряжением.

При увеличении масштаба времени возрастает глубина проникновения магнитного потока в сердечник модели ввиду фактического увеличения длительности воздействий. Для компенсации этого эффекта активное сечение сердечника делается меньше, чем требуется по масштабу (за счет снижения коэффициента заполнения).

Увеличение масштаба времени достигается при помощи значительного возрастания как всех емкостей эквивалентной емкостной цепи, так и всех индуктивных обмоток (путем увеличения числа витков).

Сравнение результатов измерений для электромагнитных моделей одного и того же объекта с увеличенным и с близким к единице масштабами времени показывает приблизительно одинаковую величину расхождений с оригиналом для обоих случаев (до 20... 25% по градиентам).

El. Eng. т. 73, стр. 543, № 6, 1954

(Э-во, 3, 1955)

A_1 — то же вспомогательных вентилей 6 и 7 (рис. 3); $U_{\text{н}}$ — переменное напряжение на входе схемы измерения. Порядок ошибки в определении обратного тока $I_{\text{рв}}$

$$\delta \approx \frac{0,32}{U_{\text{рв}}} \cdot \frac{A_1 \cdot \lg \theta \cdot 100}{1 - 0,5\pi \sin \theta + \theta \sin \theta},$$

$$\sin \theta = \frac{0,45 \cdot A_{\text{об}}}{\sqrt{2} U_{\text{рв}}};$$

$A_{\text{об}}$ — ориентировочное значение порога обратного напряжения измеряемого вентиля; A_1 — порог напряжения вспомогательных вентилей 6 и 7 (рис. 4); $U_{\text{рв}}$ — классификационное значение обратного напряжения.

Даются указания к использованию классификационных параметров для целей расчета выпрямителей.

Электричество, № 3, 1955.

Промежутков, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	10,0
Коэффициент импульса	2,18	1,46	1,23	1,15	1,055	—	—
	1,79	1,24	1,11	1,06	1,035	1,02	1,02

С уменьшением промежутка растет также разброс пробивных напряжений.

Волна $1/50$ мксек дает для промежутка 0,5 мм на 10% меньший коэффициент импульса, чем волна $1/5$ мксек; для промежутков 1 мм и выше коэффициенты импульса для обеих волн совпадают. Волна с длительностью около 1 мксек при промежутке в 1 мм также не отличается по пробивному напряжению от волны $1/5$ мксек.

Proc. IEE, т. 101, ч. II, стр. 438, 1954

(Э-во, 3, 1955)

ное устройство, понижающее его до $110/\sqrt{3}$ в. Это устройство состоит из двух одинаковых трансформаторов, первичные и вторичные обмотки которых включены последовательно; одна из вторичных обмоток шунтирована активным сопротивлением, назначение которого — демпфировать высшие гармонические тока холостого хода. Ток нагрузки, включенный на зажимы, не проходит через это сопротивление.

Трансформаторы обладают повышенным рассеянием между первичными и вторичными обмотками. Создаваемое этим рассеянием индуктивное падение напряжения, доходящее до 2,4% при полной измерительной нагрузке, компенсирует емкостное падение напряжения на делителе.

Измерительная мощность делителя 150 в в классе точности 0,6 (погрешность напряжения в пределах $\pm 0,6\%$). Допустимая силовая нагрузка 1,5 кВА.

ASEA Journal, стр. 99, № 7—8, 1954

(Э-во, 3, 1955)

Дается анализ работы электропривода петледержателей и методы его расчета.

До настоящего времени задача, связанная с работой петледержателя и его привода, рассматривалась как статическая. Такое рассмотрение приводило к парадоксу: при малых углах подъема и принятом двигателе в полосе неизбежно возникали бы чрезмерно большие усилия, приводящие к ее разрыву, что в действительности не имеет места.

В статье показано, что задача должна рассматриваться с позиций динамики, с учетом зависимости опережения металла от его натяжения.

Решение уравнения движения показало, что при включении петледержателя на натянутую движущую полосу имеет место образование петли. Высота подъема петледержателя в этом случае зависит от величины начального натяжения полосы T_0 и ее веса G и от уси-

В. Г. Зусман и О. Н. Татур 5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Приводятся преимущества электромагнитных муфт для релейного управления движениями в машинах в сравнении с другими типами муфт и электродвигателями. Дается оценка сухих и смазываемых фрикционных электромагнитных муфт. Приводится пример конструкции однодисковой реверсивной смазываемой муфты для автоматизированного токарно-револьверного станка. Рассматриваются распространенные в машиностроении многодисковые смазываемые электромагнитные муфты. Излагаются некоторые данные по серии многодисковых электромагнитных муфт серии ЭМ, широко применяющихся в отечественном станкостроении, и приводятся фотографии деталей муфт ЭМ первого и шестого габаритов.

Излагается также материал по порошковым электромагнитным муфтам. Оцениваются применяющиеся

В. И. Калитвянский 6
ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛОВОГО
СТАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

В полимерных диэлектриках при тепловом старении происходят следующие основные процессы: 1) полимеризация и конденсация; 2) окисление; 3) термическая деструкция. В результате этих основных, а также побочных процессов в полимерных диэлектриках происходит два вида структурных изменений: 1) изменения, приводящие к укрупнению структуры макромолекул (разветвление, сшивание с образованием сетчатых и трехмерных структур); 2) изменения, приводящие к распаду (деструкции) макромолекул.

Базируясь на изучении кинетики процессов, происходящих при тепловом старении, автор утверждает, что логарифм меры характеристики (например, разрывного усилия) P полимера связан со временем теплового старения t прямолинейной зависимостью:

$$\ln P = -kt + N,$$

где k и N — константы.

Н. М. Bachara 6

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКИХ ФТОРИСТЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Некоторые фтористые соединения представляют интерес как жидкие диэлектрики. Были изучены в основном фтористоуглеродные соединения типа: дифторгексилэфир, триперфторбутиламин, циклические эфиры и их смеси, имеющие различные точки кипения. По сравнению с минеральными маслами эти соединения отличаются устойчивостью при высоких температурах. Так, например, чистые образцы одного циклического эфира при 300°C в автоклаве сохраняли нормальные свойства и не обнаруживали пробоа. Усиленная теплопередача конвекцией дает возможность повысить подводимую мощность на 50...300% в зависимости от рода жидкости в пределах $75\ldots100^\circ\text{C}$. Вследствие большой летучести этих жидкостей можно получить весьма плотный пар с повышенной электрической прочностью. Они не влияют на металлы и пластмассы (при 90°C) и по-

СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ С ПОКРЫТИЕМ СЕРЕБРОМ

Малый удельный вес и низкая стоимость способствуют широкому применению алюминия в электротехнике. Вместе с тем алюминий обладает слабой устойчивостью против коррозии. Оксидная пленка, образующаяся на поверхности алюминия, обладает высоким омическим сопротивлением. Интенсивная коррозия и увеличение переходного сопротивления являются причиной многих аварий соединений алюминиевых проводов.

Покрытие контактной поверхности алюминиевого провода серебром устраняет коррозию контактной поверхности даже в соединениях алюминия с медью и позволяет создать надежный контакт. Для установления характеристики соединений алюминиевых проводов с покрытой серебром контактной поверхностью были произведены специальные испытания. Испытуемые об-

А. L. Ashton. 6

МАСЛОНАПОЛНЕННЫЕ КАБЕЛИ

За время, прошедшее с момента изготовления первого маслонаполненного кабеля в 1924 г., в конструкцию кабелей, соединительных и концевых муфт и вспомогательного оборудования были внесены значительные усовершенствования.

Первоначально максимальная расчетная напряженность поля в кабелях 132 кВ принималась равной 75 кВ/см. В современных конструкциях напряженность поля доходит до 90...100 кВ/см. Улучшение техники производства изоляционной бумаги дало возможность уменьшить толщину бумажной изоляции в кабелях, что привело к уменьшению размеров и веса кабеля, а также к уменьшению размеров подпитывающей аппаратуры.

В 1930—1937 гг. большая часть маслонаполненных кабелей изготавливалась с двумя свинцовыми оболочками. В настоящее время кабели обычно изготавливаются только с одной свинцовой оболочкой. Защита этих кабе-

Ю. В. Багалея
О ПРОЦЕССАХ РАЗРУШЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКА
БУМАЖНО-МАСЛЯНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ
ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ СХЕМ

Определено, что в импульсном режиме процессы разрушения изоляции развиваются намного быстрее, чем при том же значении постоянного напряжения.

Наблюдение за секцией конденсатора, зажатой между прозрачными пластинами, позволило установить, что в момент разряда на краях секции возникают скользящие разряды, вызывающие образование газа. Последующие разряды происходят уже не в масле, а в газовой среде. Размеры газовой полости увеличиваются с ростом числа импульсов. В составе газа найдены: водород (61, 92%), кислород (7,64%), метан (9,04%), образующие взрывчатую смесь, что создает благоприятные условия для интенсивного разрушения изоляции.

Предложена следующая схема процесса разрушения диэлектрика в импульсном режиме:

С. М. Брагин и М. М. Маркосян 6

ВЛИЯНИЕ УВЛАЖНЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛЯЦИОННОЙ РЕЗИНЫ

Излагаются результаты экспериментального исследования влагопоглощаемости изоляционных резиновых смесей, а также электрических характеристик этих смесей ($\lg \delta$ и ϵ и пробивной прочности) при переменном напряжении в зависимости от степени увлажнения. Эксперименты были проведены на образцах изоляционной резины марок: ТС-30, ТС-35, ТС-45 и ТСШМ-35 с содержанием каучука, соответственно, 30, 35 и 45%.

Получены следующие результаты:

1. В атмосфере воздуха, ненасыщенного парами (20 и 50% относительная влажность), образцы практически не увлажняются, а электрические характеристики не претерпевают заметных изменений.

2. При 100% относительной влажности воздуха первые сутки увлажнения $\lg \delta$ резины всех марок быст-

разцы были подвергнуты значительным кратковременным токовым нагрузкам и длительным циклам нагрева, а также проверке на устойчивость против коррозии.

Результаты испытаний показали, что покрытие серебром контактной поверхности алюминиевых проводов улучшает качество электрического соединения, создавая прочную связь между обоими металлами и снижая переходное сопротивление в месте соприкосновения. Испытания, произведенные в атмосфере, насыщенной соленой водяной пылью, показали, что при смазке контактной поверхности, покрытой серебром, хромоокислым цинком с добавкой специальных замедлителей коррозии, обеспечивается высокая устойчивость характеристик соединения. При испытаниях большими токами покрытые серебром контактные поверхности алюминиевых соединений оставались неповрежденными даже при температурах, вызывавших размягчение алюминия.

Г. АИЕЕ, т. 72, ч. III, стр. 702, 1953

(Э-во, 3, 1955)

лей от коррозии осуществляется при помощи полихлорвинилового или резинового покрытия. Достижимая благодаря отказу от второй свинцовой оболочки и уменьшению толщины изоляции экономия веса настолько значительна, что, например, вес кабеля 132 кв сечением 125 мм² уменьшился с 14 кг/м в 1930 г. до 4,5 кг/м в настоящее время.

Максимальная допустимая температура на поверхности проводящей жилы увеличилась с 75 до 85° С. Для снижения потерь на трение в маслопроводящих каналах и уменьшения гидродинамического падения давления в современных конструкциях кабелей применяется масло пониженной вязкости.

Применение алюминиевой оболочки дает значительную экономию расхода металла, в особенности в трехжильных кабелях, в результате увеличения прочности и жесткости оболочки.

ГЕС Journal, т. XXI, № 4, стр., 199, 1954

(Э-во, 3, 1955)

1) Образование на краю конденсаторной секции газовых полостей и развитие в них скользящих разрядов. 2) Образование повреждений в первом, затем в последующих листах бумаги. Процесс разрушения идет до тех пор, пока напряженность в наиболее слабом месте изоляции не достигнет пробивного значения.

Исследование мест воскообразования показало, что процессы разрушения происходят интенсивнее там, где секция сжата слабее. Для увеличения электрической прочности конденсатора и снижения его удельного объема можно рекомендовать увеличение давления при прессовке до 20...30 кг/см². Периодическая дегазация масла в баке конденсатора также способствует увеличению срока службы.

Сходность процессов разрушения изоляции в импульсном режиме и при работе при переменном напряжении позволяет использовать полученные результаты при конструировании конденсаторов для продольной компенсации линий передач и др.

Электричество, № 3, 1955.

ро увеличивается, затем рост замедляется, даже убывая к концу испытаний.

3. Диэлектрическая проницаемость образцов всех марок изменяется по мере увлажнения одинаково.

4. Удельное сопротивление высушенной резины исследованных марок лежит в пределах $10^{13} \dots 4 \cdot 10^{15}$ ом и снижается на одну—две степени после первых 5—6 дней увлажнения, стабилизируясь затем.

5. Электрическая прочность снижается заметно только в начальный период увлажнения. После длительного увлажнения пробивная прочность уменьшается в среднем с 29 кв/мм для высушенной резины до 13...14 кв/мм после длительного увлажнения.

Электричество, № 3, 1955.

лия, развиваемого двигателем. При установленном двигателе, момент которого фиксирован, величина подъема петледержателя прямо пропорциональна натяжению полосы.

Отсюда следуют два вывода: 1) мощность двигателя петледержателя не определяет величину натяжения полосы; 2) петледержатель с его приводом может быть использован в качестве указателя величины натяжения при прокатке горячей полосы, чем и пользуются операторы одного из металлургических заводов Советского Союза.

Приведенный анализ позволил рекомендовать методу расчета и выбора электропривода петледержателей.

Помимо теории и методов расчета, статья включает краткое описание экспериментального исследования, проведенного на одном из заводов Советского Союза.

Электричество, № 3, 1955.

наименования этих муфт и рекомендуется наименование «порошковые». Даются сведения о материалах сцепляющего слоя порошковых муфт. Рассматриваются вопросы классификации порошковых муфт и схемы их электромагнитной системы. Освещаются возможности шихтовки магнитопровода порошковых муфт и получения весьма крутых динамических характеристик муфт на основе применения многополюсных схем. Анализируются приведенные схемы и рекомендуются наиболее целесообразные из них для реального конструирования.

Приводятся конструкции порошковых муфт: динамометрической муфты на закручивающий момент в 120 кгм и порошкового тормоза к арматурно-навивочной машине для железобетонных изделий с тормозным моментом около 600 кгм и др. Оцениваются некоторые свойства порошковых электромагнитных муфт и излагаются соображения о целесообразных областях применения их в машиностроении.

Электричество, № 3, 1955.

Когда в полимерном диэлектрике в процессе теплового старения протекает несколько реакций, приводящих к изменению исходных характеристик полимера, уравнение, связывающее логарифм меры характеристики со временем, будет иметь более сложный характер.

Если выбрать как меру теплового старения определенное значение какой-либо характеристики полимерного диэлектрика, например процент от исходной механической прочности, эластичности, пробивной прочности или др., то время t_n , через которое диэлектрик достигнет данного состояния, связано с абсолютной температурой T уравнением:

$$t_n = \frac{B}{T} + G,$$

где B и G — константы.

Электричество, № 3, 1955.

ти не растворяются хлористыми и минеральными растворителями и маслами. Они пожаро- и взрывобезопасны и при возникновении дуги почти не дают сажи. Ядовитые вещества в них обнаружены только при температурах выше 500° С при опытах в горячих трубках, но не при испытаниях на стойкость против действия электрической дуги или короны.

При 25° С эти соединения имеют следующие характеристики: плотность 1,7...1,9 г/см³, вязкость 0,5...3,0 сст, поверхностное натяжение 13...16 дн/см, электрическая проницаемость 1,85...1,90, коэффициент мощности меньше 0,0005, сопротивление $10^{15} \dots 10^{17}$ ом·см, электрическая прочность в среднем 40 кв, а коэффициент преломления наименьший из известных (1,26...1,29).

Проведенные исследования показали, что фтористые соединения могут быть использованы в выключателях вместо минеральных масел.

El. Eng., т. 72, стр. 424, № 5, 1953.

(Э-во 3, 1955)

НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ФОРМОЙ ВОЛН



Оборудование завода КРОМПТОН ПАРКИНСОН, изготавливающего 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



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