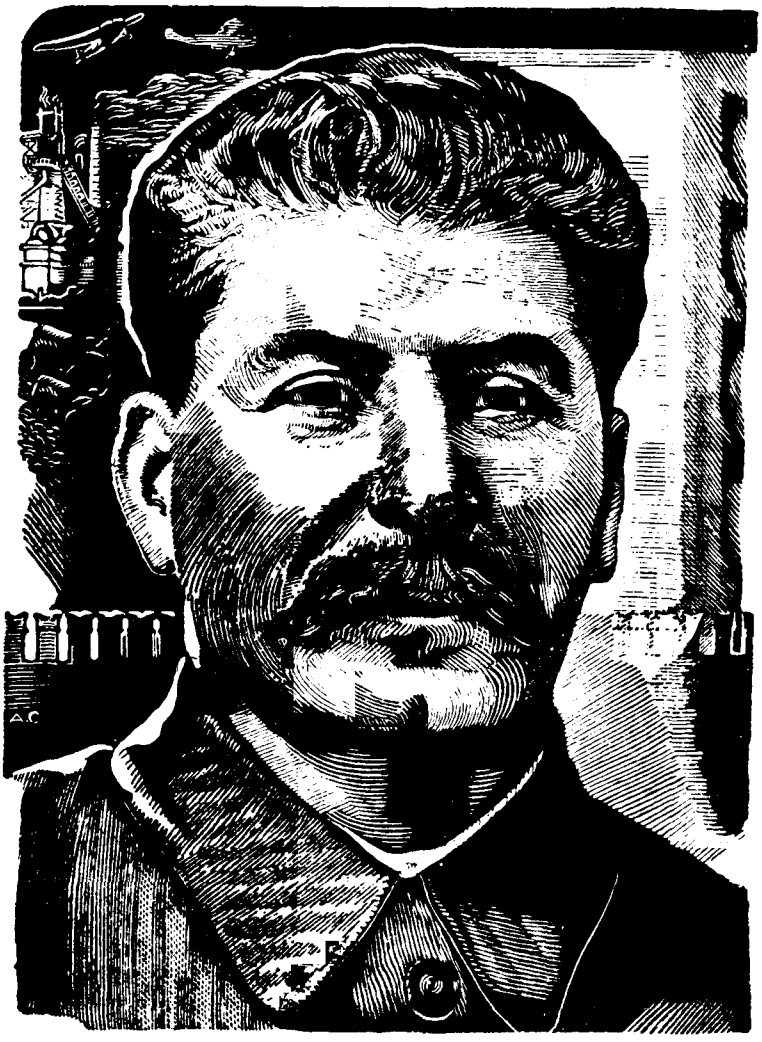


ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

6

1938

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

КОММУНИЗМ ЕСТЬ СОВЕТСКАЯ ВЛАСТЬ
ПЛЮС ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ВСЕЙ СТРАНЫ (Ленин)

Пролетарии всех стран, соединяйтесь!

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ГОД ИЗДАНИЯ 59-й

6
1938
ИЮНЬ

Журнал НАРКОМАТОВ ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ И АКАДЕМИИ НАУК СССР.
Адрес редакции: Москва, Бол. Калужская, дом 67. Энергетический ин-т, 1 этаж, комн. 144, тел. В 5-32-79
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648

Высоковольтные генераторы переменного тока [1]

К. И. Шенфер
Академия наук СССР

В НАСТОЯЩЕЕ время развитие крупного электромашиностроения совершается под влиянием тенденций к росту мощности электростанций и энергосистем, что влечет за собой увеличение мощности отдельных станционных агрегатов — турбо- и гидрогенераторов.

При проектировании электрических генераторов больших мощностей — порядка 60, 100 MVA и выше — возникает ряд затруднений, связанных с теми громадными токами, которые обтекают обмотки статора машины. Для преодоления этих затруднений приходится прибегать к усложнению конструкции машины (параллельные ветви обмотки статора, борьба с токами Фуко в меди статорной обмотки путем создания «перевитых» стержней и пр.). Необходимо также иметь в виду, что одновременно с ростом мощности станционных генераторов растут также требования к выключающей аппаратуре, при удовлетворении которых аппаратура получается чрезвычайно громоздкой. При таком положении могут возникнуть трудности конструирования достаточно надежных распределительных устройств.

Поэтому возрастающая мощность синхронных генераторов требует соответственного увеличения напряжения машины для ограничения величины тока. Так, синхронные генераторы большой мощности обычно строятся на напряжения 11—13 kV.

Однако такое напряжение часто является недостаточным, коль скоро речь идет о генераторах, питающих непосредственно городскую кабельную или воздушную сеть большого протяжения.

В этом случае возникает вопрос о постройке высоковольтных синхронных генераторов на напряжение 33—35 kV.

Мощные промышленные комбинаты, теплоэлектроцентрали, черная металлургия и др. промышленные объединения требуют генерации огромного количества энергии. Весьма велика также часто бывает потребность таких комбинатов в паре, горячей воде и тепловой энергии. Для примера здесь можно привести Магнитогорский металлургический комбинат и Сталинскую теплоэлектроцентраль в Москве.

Требования таких промышленных объединений диктуют свои условия в отношении местоположения электростанции.

В целях экономии меди кабельной сети приходится по возможности располагать такую генераторную станцию ближе к потребителям электрической энергии.

Имея в виду большую территорию промышленного комбината, которую приходится обслуживать энергетически, и громадные количества передаваемой энергии, следует признать, что применение высоковольтных генераторов на напряжение порядка 35 kV, при котором отпадает необходимость в трансформации тока, должно во многих случаях вполне себя оправдать. Конечно, серьезным конкурентом такой схемы может быть также система: генератор плюс высоковольтный трансформатор или автотрансформатор. Необходимым условием, облегчающим на наших заводах тяжелого электромашиностроения наладку производства высоковольтных турбогенераторов, должна явиться предварительная работа по изысканию наиболее совершенных изоляционных материалов и типов изоляции высоковольтных машин.

Задача генерации электроэнергии с напряжением 35 kV допускает ряд вариантных решений: 1) высоковольтный генератор на 35 kV; 2) генератор плюс повысительный трансформатор; 3) генераторы на 15 kV плюс автотрансформатор на 35 kV.

Техно-экономическое сравнение всех трех вариантов с точки зрения к. п. д. и стоимости приводит к такому результату, что на последнем месте оказывается второй вариант и на первом — первый, т. е. высоковольтный генератор на 35 kV.

При создании конструкции высоковольтного генератора на 35 kV наибольшее внимание приходится уделять изоляции статорной обмотки.

Конструкторы высоковольтных машин сталкиваются с затруднениями, связанными с явлением короны, для уничтожения которой в свое время был предложен ряд типов и систем изоляции обмотки в пазовой и лобовой части.

Явление коронирования особенно неприятно при

[1] В связи с совещанием бригады Электромашиностроения Академии наук СССР, состоявшемся 19 февраля 1938 г.

замкнутой системе вентиляции, так как может привести к образованию значительного количества окиси азота, которая образует кислоты в присутствии водяных паров.

Для уничтожения коронирования в современных высоковольтных машинах в качестве изоляции находит применение сложная миканитовая изоляция со связывающим компаундом и асбестовая полупроводящая лента, которой обматывается часть обмотки, лежащая в пазах. Что касается лобовой части обмотки, то ее предохранение от короны достигается соответствующим распределением поверхностного сопротивления изоляции обмотки от края железа статора (например, путем нанесения полупроводящего слоя на изоляцию или путем «шихтованного» расположения изоляционных и проводящих слоев поверх рабочих проводников).

Применение проводящих и полупроводящих материалов на внешней поверхности изоляции обмотки позволяет создать распределение электрического поля вокруг высоковольтных обмоток наиболее благоприятной формы, исключаются резкие сгущения линий электрических сил, что дает возможность избежать явления короны.

Таким образом проблема борьбы с явлением короны сводится к созданию подходящей изоляции и поверхностной проводимости изоляционных покровов. Может быть, существует возможность вести борьбу с явлением короны, применяя конструкции, несколько напоминающие конструкцию конденсаторной проходной втулки, где мы имеем дело с чередованием слоев изоляции с проводящими слоями.

В применении к изоляции проводов высоковольтных машин вместо проводящих слоев конденсаторных втулок используются внутренние полупроводящие оболочки.

В настоящее время тип и конструкции изоляции обмоток высоковольтных машин все время изменяются и совершенствуются. Эта отрасль техники динамостроения сейчас находится в состоянии непрерывных поисков наилучшего решения задачи. Изучение процессов электрического пробоя, изоляции, короны и картины электростатического поля вокруг обмоток высоковольтных машин должно явиться темой исследовательских работ не только лабораторий наших электромашиностроительных заводов, которые ведут подготовительную работу к постройке высоковольтных машин («Электросила» и ХЭТЗ), но также исследовательских институтов промышленности, втузов и Академии наук.

Вопрос о стойкости изоляции высоковольтных генераторов с точки зрения воздействия на обмотки перенапряжений является чрезвычайно важным и заслуживает самого тщательного исследования.

С точки зрения экономии изоляции и повышения коэфициента использования типа машины заслуживает большого к себе внимания новый тип так называемый «ступенчатой» изоляции обмотки статора, предложенный недавно Laffoon и Calvert в Америке. В основу этого типа положен принцип усиления изоляции в зависимости от возрастания электрического напряжения стержней относительно корпуса.

Эта система изоляции заключается в общих чертах в том, что вся обмотка статора разбивается на несколько ступеней, причем каждая ступень обмотки располагается в отдельных пазах. При такой системе первая ступень — низковольтная, расположенная ближе к нулевой точке и размещенная в отдельных пазах, получает изоляцию, соответствующую половинному напряжению.

Вторая же ступень обмотки, также расположенной в своих отдельных пазах, получает изоляцию повышенной прочности на полное линейное напряжение.

Стоимость изоляции высоковольтных машин составляет весьма значительный процент от общей стоимости генератора. Поэтому приходится проектировать высоковольтные генераторы с минимальным числом пазов.

Следует отметить, что коэфициент заполнения медью паза в высоковольтных машинах вообще получается ниже, чем в низковольтных, что ведет к сравнительному увеличению их габаритов.

Габариты высоковольтной машины возрастают также еще и по причине увеличения вылетов торцевых частей высоковольтных обмоток, вызывающих увеличение аксиальных размеров.

Это обстоятельство не приходится упускать из виду при сравнении двух вариантов — одного высоковольтного генератора и низковольтного генератора, работающего совместно с повысительным трансформатором.

Теснейшим образом с вопросами создания высоковольтных турбогенераторов на 35 kV связаны вопросы защиты от перенапряжений обмоток электрических машин и трансформаторов. Если речь идет о работе генератора на кабельную сеть, то вопрос влияния атмосферных разрядов на обмотки машины отпадает. При работе на воздушную сеть, однако, опасность воздействия атмосферных перенапряжений велика.

За последнее время все же техника в области защиты от перенапряжений сделала большие успехи. Что касается нашей электроаппаратной промышленности, то в этой области наблюдается еще значительное отставание.

Правда, нашими заводами в 1935—1936 гг. были выпущены крайне нужные деионные и тиритовые разрядники, однако темпы освоения заводами этой аппаратуры еще нельзя считать достаточными.

Правильно поставленные опыты и широкая научно-исследовательская работа могут оказать очень большое влияние на повышение грозоупорности сетей высокого напряжения машин и аппаратов. Последнее доказывает пример США, где за последнее время достигнута почти абсолютная грозоупорность сетей высокого напряжения.

Хотя на наших заводах и в институтах и ведется исследовательская работа в области разработки новых типов защитной аппаратуры, однако нужно требовать ускорения темпов и увеличения масштаба этих работ. К вопросам высоковольтного турбогенераторостроения должны быть привлечены научные силы Академии наук СССР.

Ввиду большого значения для энергетики Советского Союза вопросов высоковольтного турбогенераторостроения в Академии наук (бригада

электромашиностроения) 19 февраля с. г. было созвано совещание по высоковольтным турбогенераторам, на котором были заслушаны доклады:

1) построение высоковольтных турбогенераторов за границей и наши задачи (канд. техн. наук инж. М. В. Смирнов, директор ВЭИ); 2) проблема создания высоковольтного турбогенератора с масляным охлаждением (проф. А. Н. Ларионов и инж. С. В. Крауз — ВЭИ); 3) проблема повышения генераторного напряжения на паровых электростанциях и высоковольтный турбогенератор (проф. А. Я. Бергер и инж. Грицко, ЛИИ); 4) информационное сообщение завода «Электросила» (проф. Р. А. Лютер).

Совещание признало необходимым форсировать в исследовательских институтах и на заводах темпы работ, связанных с вопросами расчетов, конструирования, производства, испытания и применения высоковольтных турбогенераторов.

Задачу создания высоковольтного турбогенератора с масляным охлаждением статора и специальным охлаждением ротора совещание отметило как заслуживающую интереса и подлежащую разработке в ВЭИ совместно с ХЭТЗ.

Для практической оценки целесообразности применения высоковольтных турбогенераторов на 33 kV совещание признало необходимым произвести полное техно-экономическое комплексное сравнение следующих двух вариантов с соответствующим блоком генератор-трансформатор, а именно: 1) высоковольтный генератор на 33 kV с жестким заземлением и ступенчатой изоляцией обмотки; 2) низковольтный генератор с жестким заземлением и с автотрансформатором на 33 kV.

В заключение совещание признало желательность разработки на заводе «Электросила» рабочих проектов высоковольтных генераторов на 50—100 MW к концу 1938 г.

Электромеханический факультет ЛИИ решено просить взять на себя предварительную разработку проблемы силами кафедр электромашиностроения, техники высокого напряжения, аппаратостроения, гэс и изоляции при условии оказания всемерного содействия в этой работе заводом «Электросила».

Проблема повышения напряжения на зажимах турбогенераторов [1]

А. Н. Ларионов
ВЭИ

В ТЕЧЕНИЕ последнего десятилетия успешно развивается тенденция повышения напряжения на зажимах турбогенераторов. Смелое решение применить высоковольтные турбогенераторы для непосредственного питания кабельной сети осуществлено в Англии с 1928 г. Опыт в течение десяти лет выявил надежность эксплоатации генераторов на 36 kV.

Генераторы, выпущенные в 1937 г. английскими фирмами Метро-Виккерс и Парсонс, в большинстве случаев выполнены на напряжение 22 и 36 kV (250 MVA). Общая мощность установленных и устанавливаемых в 1938 г. генераторов на 36 kV превышает 800 MVA. Над вопросом повышения напряжения на зажимах генераторов усиленно работают и другие фирмы США и Европы.

Повышение напряжения турбогенераторов имеет свои техно-экономические преимущества: возможность непосредственного питания кабельной сети без промежуточного звена—трансформатора, удешевление стоимости распределительного устройства и уменьшение в связи с этим кубатуры помещений электростанций.

Напряжение генератора обычно выбирается соответственно напряжению масляного выключателя той же разрывной мощности. Для иллюстрации можно привести таблицу из британского стандарта на масляные выключатели (табл. 1).

Таблица 1

Номинальное рабочее напряжение kV	Максимальная разрывная мощность масляного выключателя MVA	Максимальный номинальный ток A	Номинальное рабочее напряжение kV	Максимальная разрывная мощность масляного выключателя MVA	Максимальный номинальный ток A
3,3	250	2400	66	2500	1200
6,6	500	3000	88	2500	800
11	1000	4000	110	2500	800
22	1500	2400	132	2500	400
33	1500	2000	165	2500	400
44	1500	1200	220	2500	400

Выбор более низкого напряжения у генератора, чем это соответствует стандарту на выключатели, возможен только в системах прямого соединения генератора с трансформатором при помощи кабелей без промежуточного выключателя. При большой мощности потери энергии и стоимость соединительной кабельной сети настолько значительны, что и для этого случая вызывается необходимость более высокого напряжения, чем 11 kV для мощностей 50 000 kW и 15 kV для 100 000 kW. В США генераторы мощностью порядка 100 MVA выполняются на напряжение 22 kV и выше (30 kV).

Выполнение генераторов на напряжение 36 kV и выше открывает возможность широкого применения их для непосредственного питания кабельной сети. Это особенно важно для городских и районных сетей напряжением 33—66 kV, так как позволяет удешевить стоимость энергии и повысить надежность эксплоатации. Применение системы генератор-трансформатор менее надежно,

[1] В связи с совещанием бригады Электромашиностроения Академии наук СССР по высоковольтному турбогенераторостроению, состоявшимся 19 февраля 1938 г.

так как промежуточное звено — трансформатор — является само по себе возможной причиной аварии системы, в частности, существует опасность взрыва и воспламенения большого количества трансформаторного масла.

Десятилетний опыт эксплоатации 36-kV турбогенераторов доказал надежность их работы и способность выдерживать тяжелые к. з. сети. Статорные обмотки подобных генераторов имеют реактанц того же порядка, что и система генератор — повысительный трансформатор, вследствие этого кратность мгновенного тока к номинальному получается не больше, чем в обычной системе.

Значительная экономия получается в капитальных затратах и стоимости эксплоатации при непосредственном питании сети от высоковольтного генератора. Техно-экономическая сторона этого вопроса требует дальнейшего уточнения с учетом стоимости высоковольтного генератора и его энергетических показателей. При выполнении высоковольтного генератора с миканитовой изоляцией, вследствие крайне высокой стоимости высококачественной слюды, стоимость его значительно повышается по сравнению со стоимостью генератора низкого напряжения. Однако применение охлаждения статора негорючей изолирующей жидкостью с высокими диэлектрическими свойствами, как совол или типа пиранол, клорен, инертин или пермитол, позволяет выполнить изоляцию обмотки из дешевого материала — бумажной массы или кабельной бумаги.

Вследствие этого стоимость высоковольтного генератора может быть значительно снижена, в особенности если обратить внимание на лучшее использование активного и конструктивного материалов, возможное при жидкостном охлаждении.

До сего времени высоковольтные турбогенераторы выполняются с миканитовой изоляцией и с воздушным охлаждением у английских фирм и водородным в Америке (GEC, Вестингауз).

Однако и в этом дорогом выполнении получается экономия в пользу высоковольтных турбогенераторов, что может быть иллюстрировано табл. [2] 2.

Таблица 2

Сравнение стоимости установленного киловатта турбогенератора на 36 kV и системы генератор-трансформатор

Номинальная мощность	30 MW при $\cos\varphi = 0{,}8$
Напряжение генераторов	11 и 36 kW
Потери в трансформаторе (kW)	
Постоянные потери	75
Переменные потери при номинальной нагрузке	180
При нагрузке 80% от номинальной	115
Потери на охлаждение трансформаторного масла	11
Годовая стоимость потерь (фунтов стерлингов)	
Постоянные потери, включая потери на охладитель	578
Переменные потери	854
Общие (ф. ст.) . . .	1432

Сравнение капитальных затрат (ф. ст.)		
Добавочная стоимость высоковольтного генератора, примерно . . .		4500
Стоимость трансформатора	9500	
Стоимость кабелей (100 ярдов) . .	1900	800
Добавочная стоимость монтажа и установки трансформатора . . .	350	—
Капитализируя потери в трансформаторе из расчета 7,5% в год . .	19 100	
Всего . . .	30 850	5300
Всего на 1 kW	1,03	0,177

Экономия при 36-kV турбогенераторе составляет по английским данным 25 550 ф. ст., или 17 шиллингов на 1 kW.

Коэфициенты полезного действия генераторов английских фирм на 36 и 11 kV одинаковы, а для некоторых установок даже несколько выше у высоковольтных машин, что обусловлено большими добавочными потерями 11-kV генераторов старых конструкций, а также применением ряда усовершенствований в новых конструкциях высоковольтных генераторов.

Таким образом табл. 2 нуждается в корректировании, учитывая некоторое снижение к. п. д. у турбогенераторов на 36 kV по сравнению с к. п. д. 11-kV турбогенераторами. Однако поправка не так велика, чтобы изменить общий вывод о целесообразности повышения напряжения на зажимах генератора, как это позволяет судить табл. 3, составленная по данным завода «Электросила», и табл. 4.

Таблица 3

Номинальная мощность MVA	Напряжение kV	$\cos\varphi$	Охлаждающая среда	к. п. д. %	Разница в к. п. д.
58,9	10,5	0,85	Воздух	97,78	0,51%
58,9	33	0,85	»	97,27	
62,5	33	0,8	Водород	98,16	
112,5	15,75	0,9	Воздух	98,13	0,29%
112,5	33	0,9	»	97,84	
125	33	0,8	Водород	98,4	

К. п. д. трансформаторной группы

Номинальная мощность MVA	К. п. д. при номинальной нагрузке %	К. п. д. при 0,5 номинальной нагрузки %
60	99,13	99,21
120	99,25	99,31

Таблица 4

Номинальная мощность генератора MVA	Напряжение kV	$\cos\varphi$	Охлаждающая среда	К. п. д.* установки %	Разница в к. п. д. в пользу высоковольтного генератора %
58,9	10,5	0,85	Воздух	96,83*	0,44
58,9	33	0,85	»	97,27	
112,5	15,75	0,9	»	97,39*	0,45
112,5	33	0,9	»	97,84	

* К. п. д. генератора в месте с повысительным трансформатором.

[2] Материал Международной конференции по передаче больших мощностей при высоком напряжении, состоявшейся в 1937 г. в Париже (Розен—Англия).

Обмотка высоковольтных турбогенераторов. Характерной особенностью высоковольтных турбогенераторов является обмотка статора. В 36-kV турбогенераторах фирмы Парсонс [3] применена обмотка концентрического типа кабеля. Другие фирмы выполняют обмотки с тремя ступенями изоляции.

Обмотка со ступенчатой изоляцией может быть осуществлена однослойной или двухслойной, и каждая из ступеней может быть расположена как в одном пазу, так и в отдельных пазах, как это предусмотрено в проекте 33-kV турбогенератора завода «Электросила». Требования особой надежности эксплоатации турбогенератора диктуют необходимость глубокого изучения вопроса перенапряжений, возникающих при включении обмотки на полное напряжение и при коммутационных явлениях в сети.

При создании грозоупорных машин, работающих на воздушную сеть, необходимо учитывать перенапряжения атмосферного происхождения. Ориентировочно требуемую диэлектрическую прочность витковой изоляции и выбор ее размеров можно обосновать расчетными и опытными данными Calvert, Boehne, Beck, проф. Лютера, инж. Швеца, ХЭТЗ и ВЭИ.

Для витковой изоляции наибольшую опасность представляет большая крутизна фронта набегающей волны, так как наибольшее мгновенное напряжение импульсного характера между витками пропорционально длине витка и нарастанию напряжения на единицу длины по пути распространения волны.

В установках, работающих на воздушную сеть, в которой можно ожидать возникновения блуждающих волн, испытательное напряжение на первые витки должно выбираться для машин длиною около 3 m порядка 0,8—0,9 от линейного напряжения [4]:

$$l_в = \frac{\xi}{t_a}\,\xi_в E_ф l_e \frac{1}{160}\left[0{,}2 + \frac{\frac{l_m}{l_e} - 2}{125}\right] 10^{-6},$$

где $l_в$ — испытательное витковое напряжение в kV,

$E_ф$ — номинальное напряжение в kV,

l_m — полная длина витка в cm,

l_e — длина витка в железе в cm,

$\xi = \frac{E_a}{E_a\sqrt{2}}$ и E_a — напряжение волны в kV,

$\xi_в$ — коэфициент, учитывающий снижение напряжения между витками в зависимости от емкости витка на корпус и емкости витков между собой с учетом числа витков в катушке,

t_a — крутизна фронта волны.

Эти условия требуют, чтобы грозоупорная машина имела витковую изоляцию на первой ступени, почти одинаковую с корпусной, что легко выполнимо при охлаждении статора жидкостью с высокими диэлектрическими свойствами. Для генераторов, работающих на кабельную сеть, испытательные напряжения на виток значительно понижаются.

Концентрическая обмотка 36-kV генератора Парсонса [5] имеет три слоя: центральный, промежуточный, средний.

Центральные провода каждой фазы находятся под наивысшим напряжением, а наружные под наименьшим. Максимальная разность потенциалов между концентрически расположенными проводами и между наружным слоем и корпусом равна $\frac{36}{\sqrt{3}\cdot 3} = 7$ kV. Перед укладкой наружный, средний и центральный слои испытываются напряжением 100, 67 и 34 kV соответственно в течение 5 min.

Готовая обмотка статора испытывается напряжением 116 kV, т. е. 3,2-кратным номинальному. На наружный слой подается напряжение 50 kV относительно корпуса в течение 1 min [6]. При изолированной нейтральной точке обмотки Парсонса это дает достаточную гарантию надежности и для случая замыкания сети на землю.

В отношении защиты от перенапряжений, коронирования, отвода тепла, использования паза концентрическая обмотка имеет значительные преимущества перед изоляцией, предложенной Герингом, или перед изоляцией паза, выполненной с ступенчатой изоляцией катушек.

Концентрическая конструкция обмотки не требует специальных эквипотенциальных слоев в изоляции, и ее можно применить с наибольшим эффектом для напряжений 66 kV и выше, в особенности при жидкостном охлаждении статора. Применение экранов в изоляции паза типа Геринга или в обычной ступенчатой обмотке является обязательным.

С другой стороны, нельзя не отметить сложность технологического процесса изготовления и намотки концентрической обмотки. Поэтому при создании высоковольтного турбогенератора в СССР необходимо проработать варианты как с концентрической обмоткой, так и с двухступенчатой двухслойной обмоткой, причем ступени могут быть расположены в отдельных пазах по типу двойных обмоток.

Опыты выполнения эквипотенциальных слоев в изоляции однослойных или двухслойных обмоток при помощи тонких медных лент, обмотанных асбестовой лентой, в свою очередь обработанной аквадаком [7], дали отрицательные результаты. Испытания обнаружили значительные уравнительные токи в медных щитах. Эта конструкция эквипотенциальных слоев исследовалась в следующих направлениях: наблюдалась корона в темноте, измерялось напряжение между щитами, коэфициент мощности и емкость, определялись напряжения, при которых наблюдается образование короны, и проверялась электрическая проч-

---

[3] Charles Parsons et I. Rosen, High Voltage Alternators, IEE, 1928.

[4] Р. А. Лютер и Г. Г. Швец, Витковая изоляция электрических машин, Сборник материалов „Электрическая изоляция", выпуск 1, ОНТИ, 1937.

[5] Parsons, „E и M" № 50, 1936.

[6] I. Rosen, Production Directe, Sans Transformateur Intermédiaire, du Courant A Haute Tension, изд. Международной конференции 1937 г.

[7] Copper woven asbestos tape treated with aqhadag.

ность при температурах 20, 60 и 100°C при длительном воздействии напряжения.

Необходимо поставить исследование полупроводящих экранов, выполненных из асбестовой ленты, покрытой аквадаком или графитом. Подлежит проверке возможность выполнения изоляции паза с двумя экранами. Есть основание полагать, что при удалении внешнего экрана получаются несколько лучшие результаты, нежели при его наличии, что нуждается также в проверке.

Форма проводника имеет существенное значение для высоковольтной машины. С точки зрения диэлектрической и механической прочности и отвода тепла наиболее идеальным решением является выбор проводника круглой формы, сплетенного из изолированных переплетенных проволок. При небольшом токе высоковольтного генератора возможно применение и сплошных проводников.

Необходимо считаться с тем, что коэфициент Фильда для круглого проводника больше, чем для проводника прямоугольной формы. Для круглого проводника можно применить для расчета формулу:

$$k_w = 1 + \frac{0{,}7\ d^2}{\Delta_s^2}\left[B^2_0 + \frac{\Delta B^2}{72}\right]10^{-3}.$$

Например, для $d = 0{,}7$ cm; $\Delta_s = 3$ A/mm^2; $\Delta B = 580$ G, $k_w = 1{,}034$.

При тех же условиях, но для проводника и паза прямоугольной формы $k_w = 1{,}02$.

Наиболее равномерная и плотная изоляция осуществляется на проводнике круглого сечения, при этом достигается непрерывная кривизна поверхности, обеспечивающая компактную изоляцию, и устраняются пустоты, легко образующиеся в изоляции прямоугольного сечения. Однако технологическое освоение изоляции концентрической обмотки сложнее, чем обычной. Целесообразно заимствовать для этой обмотки опыт кабельной техники.

Условия охлаждения круглого проводника, расположенного в пазу круглой формы, более благоприятны, чем для проводов и паза прямоугольной формы.

Например, для проводника $d = 7$ mm при $\Delta_s = 3$ A/mm^2 перепад температуры в изоляции толщиной 12 mm составляет 14,2°C, что значительно меньше, чем при прямоугольной форме. Это обстоятельство позволяет иметь температурные градиенты в изоляции концентрической обмотки Парсонса допустимыми. При жидкостном охлаждении возможно применить круглые полые проводники с отверстием в центральном слое, используя опыт построения высоковольтных маслонаполненных кабелей. Такую обмотку, выполненную по типу кабеля Пирелли с центральным круглым каналом, функцией которого является пропуск совола к изоляции и отвода тепла непосредственно от меди внутреннего слоя, целесообразно применить для генераторов на 66 kV и выше. В генераторах на 36 kV может быть осуществлен отвод тепла с наружной поверхности.

Непосредственный отвод тепла соволом от меди достаточно сложен по выполнению, требует специальной конструкции лобовых соединений для пропуска совола в центральные каналы обмотки.

Все эти вопросы требуют исследовательской проработки и экспериментирования на опытных моделях для выяснения диэлектрических и механических свойств изоляции, изучения условий теплоотвода и выяснения допустимых тепловых градиентов.

Жидкостное охлаждение. Основные преимущества жидкостного охлаждения статора следующие.

Применение невоспламеняющейся жидкости типа совол с высокими диэлектрическими свойствами дает возможность непосредственно охлаждать токоведущие части машины, разгружая изоляцию от теплового потока.

Применение совола улучшает диэлектрические свойства витковой изоляции и изоляции паза, так как совол предупреждает образование пустот. Такая изоляция может выдерживать бо́льшие рабочие градиенты по сравнению с изоляцией машин воздушного или водородного охлаждения.

Использование дешевого материала бумажной массы или кабельной бумаги для изоляции значительно удешевляет стоимость генератора и позволяет осуществить компактную экономическую конструкцию машины высокого напряжения, большой мощности. Возможно применение для лобовых соединений обмотки комбинированной жидкой и твердой изоляции — соволо-барьерная изоляция.

Потери на жидкостное охлаждение статора ничтожно малы по сравнению с воздушной системой теплоотвода. Например, для турбогенератора на 55 MVA 36 kV порядок этих потерь составляет 5—10 kV.

Простая аксиальная система охлаждения статора дает значительное сокращение длины машины и лучшее использование активных материалов, чем в машинах с одной системой охлаждения, при помощи водорода или воздуха.

По сравнению с водородным жидкостная система охлаждения, возможно, является более дешевой. При водородном охлаждении стоимость высоковольтного генератора возрастает благодаря применению дорогостоящей слюды для изоляции, сложной конструкции корпуса, выполненного из стальной оболочки, в целях взрывобезопасности, сложной конструкции уплотнений, контрольной аппаратуры.

Водородное охлаждение требует ряда специальных мер для обеспечения надежности и безопасности работы. Особые предосторожности должны соблюдаться при заполнении машины водородом или при выпуске его из машины. Заполнение машины производится сначала каким-нибудь инертным газом — азотом или углекислотой, а после этого водородом.

Жидкостное охлаждение позволяет создать грозоупорные машины и высоковольтные генераторы на 66 и 110 kV.

Ввиду вышеизложенного целесообразно приступить в 1938 г. совместно с турбогенераторным заводом ХЭТЗ к исследованию и созданию изоля-

ции генератора на напряжение 36 и 66 kV с жидкостным охлаждением.

Жидкостное охлаждение генераторов при своем осуществлении встречает, однако, ряд весьма крупных затруднений конструктивного и эксплоатационного характера. Для устранения огромных потерь на трение вращения ротора в жидкости статор помещается в баке и должен быть отделен от ротора изоляционным цилиндром, расположенным в воздушном зазоре.

Применение длинного изоляционного цилиндра между статором и ротором является сложной задачей, требующей исследования как в части уплотнений, так и в отношении механической прочности и надежности цилиндра, соответственно условиям длительной эксплоатации и аварийным случаям у генератора.

Возможно также применение специальной запрессовки железа статора до соволо-непроницаемого состояния. Баки в этом случае выполняются по торцам статора полностью металлическими без изоляционного цилиндра. Задача создания жидкостного бака для статора разрешима. В качестве примера можно привести высоковольтную машину постоянного тока 80 kV, 50 kW, разработанную по идее автора совместно с инж. Крауз. Статор машины, изготовленной опытным заводом ВЭИ, погружен в масло. Можно сослаться также на опыт эксплоатации расщепителей фаз системы Кондо на электровозах, успешно эксплоатируемых в течение последних 8 лет на венгерских железных дорогах. Эти примеры показывают, что конструктивные затруднения при осуществлении жидкостного охлаждения статора могут быть разрешены. Вопрос о рациональной системе охлаждения ротора требует всестороннего исследования: возможны варианты воздушного, водородного или водяного охлаждения. Представляет интерес исследовать охлаждение ротора в воздушной среде, насыщенной водяными парами при давлении ниже атмосферного. Эти вопросы должны быть разрешены в 1938 г. с тем, чтобы в 1939 г. начать изготовление высоковольтных генераторов на 33 kV.

Совол как охлаждающая среда. Совол — продукт хлорирования дефинила, обладает высокими диэлектрическими свойствами. Совол — жидкость с удельным весом 1,5, не горит и не поддерживает горения. Точка кипения совола при обычном давлении 360—400°. При температурах меньше 400° С совол не разлагается, теплопроводность его выше, чем у минерального масла. Количество газа, выделяемое соволом под влиянием мощной вольтовой дуги, в 3—4 раза меньше, чем у трансформаторного масла.

Для заливки трансформатора или статора с жидкостным охлаждением может быть применена смесь совола и трихлорбензола, которая имеет вязкость, близкую к трансформаторному маслу.

По своим физико-химическим и электрическим свойствам, поведению при продолжительном прогреве, гигроскопичности эта смесь вполне может заменить трансформаторное масло. Недостатком смеси является органическое воздействие на изоляцию: бакелит, гетинакс, эмаль, бакелитовые смолы, резину.

Такая изоляция не может быть применена в смеси совола с трихлорбензолом. Изоляция типа кабельной, т. е. бумага, пропитанная соволом с применением хорошей сушки и вакуума, ближе всего соответствует поставленной цели. Бумага может быть применена спрессованная в размоченном виде, допустима проклейка пиктином или козеином.

Высокая стоимость совола не является препятствием для заливки статора такой дорогой машины, как турбогенератор. В США в настоящее время изготовляются трансформаторы, заливаемые пиранолом, несмотря на то, что пиранол примерно в 6 раз дороже трансформаторного масла. Преимуществом является — повышение надежности, взрывобезопасность, возможность устанавливать непосредственно в цехах заводов и общественных местах; еще большее значение, чем для трансформаторов, имеет совол для высоковольтных машин.

Заливка статора трансформаторным маслом ввиду взрывоопасности требует установки брандмауэра между генератором и турбиной или бак статора должен быть стальным и рассчитанным на давление 12 at.

Общие выводы. Для каждой мощности генератора имеется напряжение, при котором может быть осуществлена наиболее экономичная установка генератора в целом совместно с распределительным устройством станции при наивысшем коэфициенте полезного действия.

Повышение напряжения на зажимах генераторов мощностью 50—100 MVA свыше 11—15 kV, принятых в Союзе в качестве стандарта, имеет большое техно-экономическое значение с точки зрения экономии капитальных затрат, цветных металлов и получения более высокого коэфициента полезного действия в эксплоатации.

Современной тенденцией передовой техники является создание генераторов на напряжение 36,66 и выше киловольт для непосредственного питания кабельных и воздушных линий. Наиболее надежно и экономично такая задача решается при жидкостном охлаждении статора смесью совола и трихлорбензола. С точки зрения отвода тепла, коронирования, механической и электрической прочности наибольшее преимущество имеет концентрическая обмотка типа маслонаполненного кабеля.

В 1937 г. должна быть проведена исследовательская работа по выяснению наиболее эффективной системы охлаждения ротора генератора с жидкостным охлаждением.

Защита от перенапряжений вращающихся машин, работающих на воздушную сеть

Е. В. Калинин
Ленинград

ЗАЩИТА вращающихся машин от грозовых перенапряжений имеет свою специфику. Так, коэфициент импульса изоляции вращающейся машины близок к единице, и, следовательно, недопустимы перенапряжения, превосходящие амплитуду испытательного напряжения нормальной частоты. Величина же испытательного напряжения, по соображениям экономии изоляции, относительно невелика (от $2U+1000$ до $2U+3000$) и лежит в зоне возможных значений внутренних перенапряжений.

С другой стороны, при многих эксплоатационных схемах нельзя обеспечить защиту вращающихся машин без наличия на шинах разрядника вентильного действия [1]. Пробивное напряжение искрового промежутка разрядника такого типа нельзя установить ниже верхнего уровня перенапряжений внутреннего происхождения; если допустить его действие при внутренних перенапряжениях, то разрядник может потерпеть аварию.

Таким образом в эксплоатации возможно и достаточно ограничить величину перенапряжения в любой точке машины относительно земли до значения, не превосходящего испытательное напряжение машины.

В машинах с многовитковыми катушками испытательные и соответственно допустимые напряжения между витками относительно невелики, составляя в некоторых случаях всего 300 V на виток [1, 2]. Чтобы исключить междувитковые пробои, крутизна волны должна быть сглажена до такой степени, при которой величины междувитковых перенапряжений [3, 4] с учетом рабочего напряжения будут меньше испытательных.

При машинах с изолированной нейтралью или включенных треугольником при набегании волны по двум или трем фазам величина перенапряжения внутри обмотки может достигнуть двукратного значения по сравнению с амплитудой перенапряжения на вводе машины, т. е. на шинах. Учитывая, что часто практически нельзя ограничить величину волны на зажимах машины ниже допустимого для изоляции машины значения, нельзя, как правило, допустить в машинах положительных отражений в нейтрали и средине обмотки, что можно сделать посредством сглаживания волны.

Параметры вращающейся машины при блуждающих волнах. Обмотка вращающейся машины ведет себя как линия передачи конечной длины. Волновое сопротивление обмоток меняется для разных машин в широких пределах, приблизительно от 100 до 1600 Ω. Связывать волновое сопротивление с рабочим напряжением, как это сделали Rudge, Wiesemann и Lewis [5], — нельзя. Действительно, согласно мнению авторов, сопротивление обмоток 6-kV машины составляет 790 Ω, в то время как, например, Kopeliowitch и Fourmarier [6] получили для исследованных ими двух 6-kV моторов сопротивление 1500 Ω.

Волновое сопротивление обмоток — величина непостоянная. Для исследованной Calvert и Fielder машины в первый момент времени по приложении волны оно составляло 400 Ω, доходя через микросекунду до 800 Ω, через 2 μ sec до 1000 и до 1200 Ω, спустя 5 μ sec. Kopeliowitch и Fourmarier те же явления представили в виде влияния входной емкости машины около 300—500 cm при постоянном волновом сопротивлении машины.

Скорость распространения волны по обмотке значительно меньше, чем по линии и кабелю, составляя от 15 000 km/sec [5] до 50 km/sec [6]. При этом скорость распространения волны вдоль обмотки непостоянна. Например, в одном случае скорость после прохождения 10% обмотки упала с 150 km/sec до 50.

Время прохождения волны вдоль всей обмотки зависит от конструкции обмотки. Для тихоходных машин малой мощности оно равно нескольким десяткам микросекунд, а для мощных быстроходных машин оно составляет всего несколько микросекунд.

Коснемся еще влияния рабочего напряжения сети.

Если полярность волны совпадает с полярностью полволны рабочего напряжения и попадает на максимум, результирующее перенапряжение при отсутствии вентильного разрядника равно сумме амплитуд рабочего напряжения и волны. Поэтому допустимая величина налагающегося перенапряжения при отсутствии вентильного разрядника не должна превосходить разницы между амплитудой испытательного напряжения машины и рабочего напряжения сети. При наличии вентильного разрядника такого положения практически не будет ввиду регулирующего действия его.

Типичная схема подстанции или станции с вращающимися машинами, работающими непосредственно на воздушную сеть, изображена на рис. 1. Машины и трансформаторы подсоединены к шинам обычно без реакторов, при помощи одного или нескольких параллельных коротких кабелей. Воздушные фидера отходят от шин или непосредственно или присоединены посредством коротких кабельных выходов. На мощных подстанциях во всех отходящих фидерах включены токоограничивающие реакторы.

Расчетная схема подстанции, эквивалентная эксплоатационной, при блуждающих волнах, набегающих по линии, изображена на рис. 2.

Для набегания волны по одной фазе линии $Z_1 = 500$ Ω, по трем фазам — около 270 Ω; по одной фазе кабеля — 50 Ω, по трем фазам — 17 ÷ 20 Ω.

Следует учесть, что одним эквивалентным фидером Z_2 можно заменить только фидера, имеющие одинаковые реакторы и волновое сопротивление. Если в действительной схеме есть фидера с разными волновыми сопротивлениями и реакторами, их следует учесть особой дополнительной ветвью.

Определение численного значения Z_3 и L_1 затруднений не встречает.

Под емкостью шин можно считать суммарную емкость всех нереактированных коротких кабелей, изоляторов, втулок, специальных концентрированных емкостей (если они

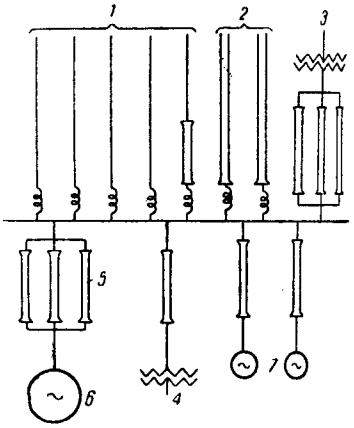


Рис. 1.
1 — воздушные фидера; *2* — кабели; *3* и *4* — трансформаторы силовой и собственных нужд; *5* — короткие кабели; *6* — генератор; *7* — моторы

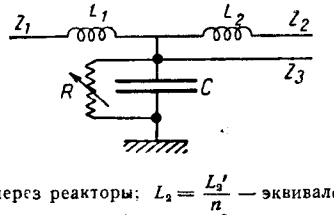


Рис. 2.
Z_1 — волновое сопротивление линии, по которой набегает волна (подводящий фидер); L_1 — индуктивность реактора в подводящей линии; $Z_2 = \frac{Z_2'}{n}$ — эквивалентное сопротивление всех n отходящих фидеров Z_2', включенных через реакторы; $L_2 = \frac{L_2'}{n}$ — эквивалентная индуктивность реакторов во всех n отходящих фидерах; C — емкость шин; R — сопротивление вентильного разрядника

[1] Разрядником вентильного действия мы будем называть не только действительные разрядники внутреннего действии, как-то — катодного падения, autovalve, но и всякие разрядники переменного сопротивления.

подключены) и входных емкостей трансформаторов и машин. Емкость всей аппаратуры подстанции за исключением кабелей редко достигает 0,01 μF на фазу. Такую же емкость имеет кабель длиною всего 30—40 m. Поэтому при наличии на шинах коротких кабелей или специальных концентрированных емкостей, емкостью всей остальной подстанции можно пренебречь. Что касается длины кабелей, которые можно заменить при расчете емкостью, то нужно в каждом частном случае учитывать особенности индивидуальной схемы. Ориентировочно можно заменить емкостью только кабели такой длины, при которых волна успеет многократно отразиться, прежде чем результирующее напряжение на шинах перейдет через максимум. Почти во всех случаях кабели, присоединяющие генераторы, моторы и трансформаторы к шинам, имеют длину, не превосходящую 100—200 m. Такие кабели практически всегда можно заменить при расчете концентрированной емкостью. Наибольшие трудности представляет учет кабелей и фидеров средней длины от 200—300 m до 1 km. Здесь наиболее правильный ответ может дать экспериментальное исследование.

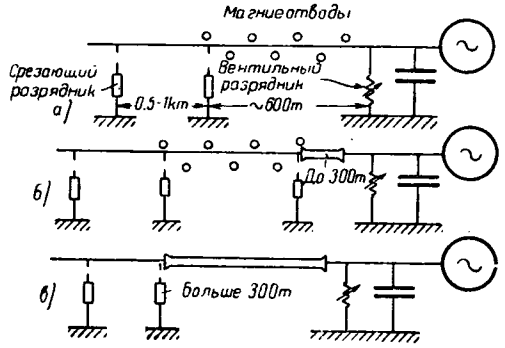


Рис. 3

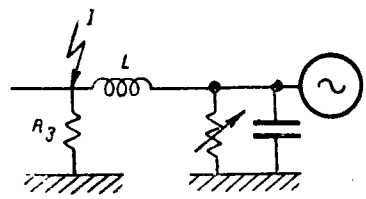


Рис. 4

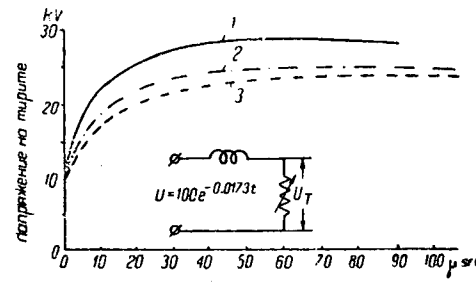


Рис. 5.
1 — 6 дисков, $L = 1$ mH; *2* — 6 дисков, $L = 2$ mH; *3* — 4 диска, $L = 1$ mH

Подстанции без дросселей в подводящих фидерах. Рассмотрим сперва случай, когда воздушные фидера выходят с шин непосредственно, без кабельного выхода.

В этом случае необходимо подход воздушной линии на некотором протяжении от подстанции защитить от прямого удара молнии, а на линии, в месте перехода в незащищенный участок, установить срезающий трубчатый разрядник (он может быть шунтирован или заменен координирующим промежутком). Кроме того, на шинах подстанции, как правило, необходимо установить вентильный разрядник, а в некоторых случаях и защитную емкость. Тогда защитная схема изобразится так, как показано на рис. 3, *а*.

Определим необходимые параметры защитной схемы.

Если удар молнии произошел в опору, на которой установлен срезающий разрядник или близко от него, то через заземление разрядника пройдет почти весь ток молнии.

Так как токи молнии достигают значений 30—100 kA, то каждому ому сопротивления заземления срезающего разрядника соответствует падение напряжения 30—100 kV. Пробивные напряжения срезающих разрядников обычно меньше этих значений. Поэтому при близком прямом ударе молнии при расчете можно пренебречь процессом до разряда на срезающем разряднике.

Под воздействием этого падения напряжения между заземлением и подстанцией устанавливаются многократные последовательные отражения волн. Последовательные отражения можно приближенно учесть, если подход линии заменить при расчете катушкой самоиндукции, индуктивность которой равна индуктивности подхода, емкость же подстанции увеличить на значение емкости подхода [7].

Соответствующая расчетная схема изображена на рис. 4. Индуктивность линии передачи при движении волны по одной фазе равна приблизительно 1,6 $\frac{\text{mH}}{\text{km}}$ и при движении по трем — около 0,9 $\frac{\text{mH}}{\text{km}}$.

Так как сколько-нибудь приемлемую защиту можно будет осуществить только при очень малых сопротивлениях заземления срезающего разрядника, то через заземление пройдет почти весь ток молнии и на подход к подстанции ответится лишь очень его небольшая часть. Далее при напряжениях, близких к максимально допустимому для машины, сопротивление разрядника невелико, и через него течет почти весь ток, идущий через подход. Поэтому мы можем еще более упростить расчетную схему, представив, что на вентильный разрядник через дроссель воздействует источник бесконечно большой мощности напряжения IR_3.

Тогда расчетная схема примет вид, изображенный на рис. 5. На том же рисунке даны кривые напряжения на тиритовом разряднике, рассчитанные в предположении, что ток молнии имеет отвесный фронт, экспоненциальный хвост и длину 40 μ sec, а произведение $I_m R_3 = 100\,000$ V.

Кривые рассчитаны приближенно, методом конечных разностей по уравнению:

$$U = L\frac{\Delta I}{\Delta t} + U_T,$$

где U — приложенное напряжение;
I — ток через разрядник;
U_T — напряжение на вентильном разряднике.

Расчет по этому уравнению можно вести методом угадывания ΔI при заданном Δt, изменяя Δt до тех пор, пока уравнение не удовлетворится. Кривые рис. 5 построены для случая защиты 6-kV машины тиритовым разрядником, имеющем официальные американские характеристики. Допускаемое напряжение для 6-kV машины — 24 kV. Из рис. 5 видно, что при произведении $I_m R_3 = 100$ kV напряжение на шинах может быть ограничено до этого значения катушкой в 2 mH при 6 дисках *2* тирита (разрядник старого выпуска GEC) и катушкой в 1 mH при 4 дисках *3* тирита (разрядник последнего выпуска с повышенным обрывным током).

Рис. 5 построен для случая набегания волны по 1 фазе; при набегании по 3 фазам линии все разрядники будут включены параллельно, и тот же эффект произведут катушки в 3 раза меньшей индуктивности. Эти значения индуктивности при движении волны по 3 фазам имеют длины подхода около 600 и 300 m соответственно.

Исключая возможность непосредственного удара молнии в опору, где установлен срезающий разрядник, например посредством установки срезающего разрядника не у границы защищенного участка, но в 100—150 m от нее, можно ограничить ток молнии через заземление до 20 000—30 000 A, а, следовательно, и падение напряжения в заземлении до 20—30 kV на каждый ом сопротивления заземления. Тогда падение напряжения не выше 100 kV произойдет при сопротивлениях заземления 3—5 Ω.

Следует также отметить, что уменьшение сопротивления заземления до требуемых значений может быть произведено и при помощи относительно протяженных заземлителей, так как процесс развития перенапряжения при последовательных отражениях длительный.

Влияние числа отходящих длинных кабельных фидеров на максимальное напряжение на шинах при близком прямом ударе молнии показано на рис. 6. Эквивалентная расчетная схема показана в правом нижнем углу рисунка. Как было выяснено раньше, при отсутствии разрядника максимально допустимое импульсное напряжение должно быть меньше испытательного на значение амплитуды рабочего напряжения машины. Поэтому допустимые напряжения составляют для 3-kV машин — 9 kV, для 6,6-kV — 13,5 kV, для 11-kV машин — 20 kV.

По рис. 6 можно судить, что при 600 m защищенного подхода (пунктирная кривая) разрядника можно не ставить при 9 фидерах для 3-kV машин, 6 фидерах для 6-kV и 4 фидерах для 11-kV машин. При подходе в 300 m нужно

значительно большее число фидеров, а именно: 7 для 11-kV машин, 13 для 6-kV и 20 для 3-kV машин.

До сих пор мы пренебрегали влиянием емкости шин, между тем она оказывает существенный эффект на крутизну напряжения на шинах до момента пробоя последовательного промежутка вентильного разрядника.

В реальной эксплоатационной схеме можно рассчитать форму и амплитуду волны напряжения на шинах и, таким образом, определить и наибольшую крутизну волны и необходимость установки разрядников и емкостей. До момента пробоя последовательного промежутка вентильного разрядника приближенно расчет можно вести, пользуясь эквивалентной схемой рис. 7. Крутизну волны в момент пробоя разрядника можно приближенно определить в предположении, что емкость шин разряжается на активное сопротивление, равное сопротивлению вентильного разрядника, при напряжении, на которое установлен последовательный промежуток разрядника. Это значение сопротивления легко рассчитать по вольтамперной характеристике разрядника. После пробоя промежутка вентильного разрядника расчет крутизны волны вести нет особой надобности, так как она будет меньше, чем без разрядника, ввиду его регулирующего действия.

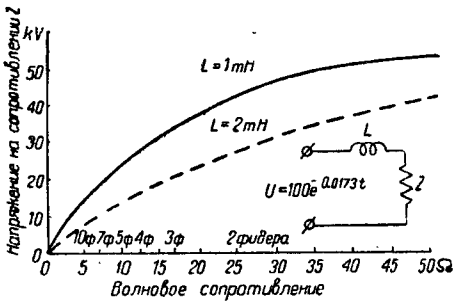


Рис. 6

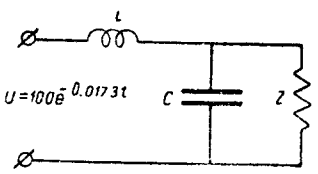


Рис. 7

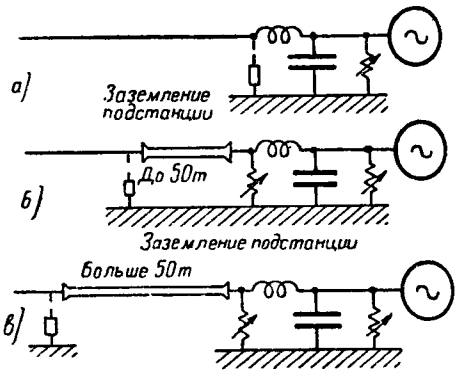


Рис. 8

Индуктивность и волновое сопротивление кабеля значительно меньше, чем для линии, поэтому эффективность защиты подхода кабелем заметно меньше, чем при защите подхода линии. Следовательно, при наличии короткого кабельного выхода (до приблизительно 300 m) его влиянием можно пренебречь, за тем исключением, что емкость кабеля следует при расчетах присоединить к емкости шин. Защитная схема подхода остается неизменной (рис. 3, *б*), но в месте перехода кабеля в линию следует дополнительно установить трубчатый разрядник для защиты кабельной муфты.

При длинных кабельных выходах — от 300 m и выше — иногда можно отказаться от защиты подхода линии. Действительно такой подход будет работать удовлетворительно при индуктированных перенапряжениях или отдаленных прямых ударах молнии, так как он не пропустит в кабель длинных несрезанных волн бо́льших, чем напряжение, на которое установлен срезающий разрядник на муфте кабеля, потому что на срезающем промежутке волна будет в течение 4 или больше микросекунд сохранять полное значение, прежде чем придет отраженная от подстанции волна и снизит напряжение в месте установки разрядника.

При близких же ударах молнии можно до некоторой степени уменьшить влияние падения напряжения в заземлителе, присоединяя брони и свинцовую оболочку кабеля к заземляющему спуску срезающего разрядника. Но даже при длинных подводящих кабелях защитную аппаратуру на подстанции допустимо не устанавливать только тогда, когда расчет покажет достаточную самозащищенность схемы. И, кроме того, весьма желательно хотя бы 200—300 m линии защитить молниеотводами.

Подстанции с дросселями в воздушных фидерах. При наличии дросселя в воздушном фидере срезающий искровой промежуток можно поместить непосредственно на выводе фидера у подстанции и присоединить его заземляющие спуски к заземлению подстанции. Тогда (рис. 8, *а*) падение напряжения в заземлении почти не будет воздействовать на изоляцию машины, так как корпус машины присоединен к тому же заземлению. Поэтому изоляцию подстанции нужно защищать только от напряжения, могущего быть на зажимах срезающего разрядника.

Срезающий разрядник можно установить на напряжение, лишь немного превышающее допустимое для машины. За счет же отсасывающего действия отходящих фидеров и вентильного разрядника на шинах (если он установлен) и емкости подстанции легко уменьшить амплитуду напряжения на шинах по сравнению с амплитудой напряжения, пропускаемого разрядником. Поэтому при защитной схеме с дросселями в воздушных фидерах можно обеспечить защиту вращающих машин от грозовых перенапряжений, что не всегда можно сказать про схемы без дросселей в воздушных фидерах.

Дополнительной защиты подхода линии при наличии дросселей в подводящих фидерах не требуется.

Индуктивность дросселя может быть меньше определенной выше индуктивности подхода, так как изоляцию подстанции нужно защищать от меньшего напряжения, к тому же действующего через волновое сопротивление линии; но значительно уменьшать его ниже 1 mH на фазу не следует. Конструкция дросселя должна быть проверена на импульсной схеме.

При наличии кабельного ввода необходимо установить вентильный или трубчатый разрядник между кабельной муфтой и дросселем, так как иначе возможно перекрытие изоляции подстанции на этом участке. Для уменьшения влияния падения напряжения в заземлении срезающих разрядников, расположенных на линейной муфте кабеля, их заземляющие спуски необходимо присоединить к оболочке и броне кабеля, а при коротких кабелях — и к заземлению подстанции. Так как емкость и волновое сопротивление кабеля снижают напряжение волны, то при наличии кабельного выхода срезающий разрядник может подействовать при волнах в линии с амплитудой, значительно большей, чем без кабельного выхода (в пределе при длинных кабельных выходах при 4,5-кратной). Поэтому защиту подстанции следует рассчитывать на волны в линии приблизительно 4,5-кратной величины по сравнению с напряжением начала действия срезающего разрядника на кабеле.

При наличии реактора в воздушном фидере эквивалентная расчетная схема может быть изображена рис. 2 В том случае, если от шин отходят несколько фидеров, особенно кабельных, то L_2 и Z_2 значительно меньше Z_1 и L_1. Поэтому очевидно, что в этих условиях напряжение на шинах значительно меньше напряжения на срезающем разряднике, и устанавливать вентильный разрядник на шинах часто нет необходимости.

Выбор емкости. Разные авторы [3—9] рекомендуют отличающиеся величины емкостей — от 0,075 до 5 μF. Величину емкости нужно выбирать в соответствии с типом и характеристиками машины и с учетом эксплоатационной схемы установки. При машинах с одновитковыми катушками и нейтралью, заземленной наглухо или через сопротивление не более одной трети от волнового сопротивления фазы обмотки (около 300 Ω), нет опасности межвиткового пробоя изоляции или повышения напряжения в нейтрали, поэтому нет необходимости устанавливать емкость (конечно, при наличии вентильных разрядников или благоприятной схеме установки).

При машинах с многовитковыми катушками и нейтралью, заземленной наглухо или через сопротивление не бо́льше одной трети от волнового сопротивления фазы, необходимо сгладить фронт волны до такой степени, чтобы напряжение между витками не превзошло допустимой величины. Обычно величина емкости порядка 0,075—0,1 μF будет вполне достаточна для защиты междувитковой изоляции. Наконец, при машинах, включенных треугольником или заземленных через сопротивление, зна-

чительно превышающее одну треть волнового сопротивления фазы обмотки ($\gg$300 Ω) необходимо предупредить колебания обмотки.

Колебания будут почти полностью исключены, если длина фронта волны превзойдет период колебания обмотки, т. е. четырехкратного времени пробега волны по обмотке в случае звезды и двухкратного при треугольнике. Для этого нужно значительное сглаживание фронта. В таких случаях многими авторами рекомендуется емкость порядка 0,5 μF, но часто достаточна меньшая емкость; в некоторых случаях волна будет достаточно сглажена и самой эксплоатационной установкой.

Специальные емкости нужно включать только тогда, когда емкость шин подстанции заметно меньше указанных выше значений.

В заключение раздела о специальных емкостях следует упомянуть, что внезапное подключение конденсатора к шинам вызывает разрядную волну крутого фронта. Поэтому, если емкость подключена на зажимах машины при машинах с многовитковыми катушками, иногда опасно подключать конденсаторы под полное напряжение разъединителями или предохранителями. Это явление можно сгладить установкой емкости на некотором расстоянии от машины или включением ее через зарядное сопротивление, например, сделав сопротивление плавкой проволочки предохранителя такой величины, чтобы постоянная времени цепи конденсатора составила 1—2 μ sec.

Литература

1. Брон, Выбор системы изоляции электрических машин переменного тока. «Электричество» № 7, 1935.
2. Вопросы изоляции машин. Труды 3 конференции по изолирующим материалам.
3. Calvert и Fielder, Коммутационные перенапряжения во вращающихся машинах. El. Engng. № 4, 1936. Реф. «Электричество» № 4, 1937.
4. Calvert, Защита машин от грозовых волн. El. Engng., 1934, январь.
5. Rudge, Wiesemann и Lewis, Защита вращающихся машин переменного тока от грозовых волн. Tr. AIEE, 1933, июнь, стр. 431—440.
6. Kopeliowitch и Fourmarier, Изучение при помощи катодного осциллографа распространения волн в сетях и их проникновения в обмотки электрических машин. RG d'El. 6 август 1936.
7. Palujeff, Haggenguth, Переход грозовых перенапряжений через трансформаторы AIEE Trans, сентябрь 1932.
8. Calwert, Moneith and Beck, Защита от перенапряжений вращающихся машин El. J., т. 30, 1930, стр. 91.
9. Heuhous и Striegel, Распространение волн в обмотках электрических машин и их защита от грозовых перенапряжений, Arch. f. El. № 10, 1935.
10. Haggenguth, Защита от грозовых перенапряжений агрегата генератор-трансформатор, El. W. № 5, 1/II 1936.

Увеличение селективности искрового промежутка тиритового разрядника

Л. И. Иванов
ВЭИ

ИСКРОВОЙ промежуток 35 и 110-kV тиритовых разрядников завода «Электроаппарат» не отличается стабильностью своего разрядного напряжения, и его коэфициенты импульса заключаются в пределах 1 ÷ 1,6 для практически важного диапазона времени разряда.

Между тем конструкция искрового промежутка, содержащая шунтирующие сопротивления и емкости, по самой идее ее схемы должна была бы обладать регулярными коэфициентами импульса, существенно меньшими единицы.

К приближенной оценке оптимального коэфициента импульса рассматриваемой конструкции можно подойти следующим путем. Каждая емкость C схемы замещения одного элемента искрового промежутка разрядника (рис. 1) представляет пару элементарных промежутков. Разрядное напряжение одного элементарного промежутка при 50 Hz составляет около 4,4 kV. Пробивное напряжение пары промежутков будет мало отличаться от 8,8 kV. Нормальная величина шунтирующих сопротивлений не обеспечивает идеально равномерного распределения напряжения по промежуткам, и пробивное напряжение всего разрядника оказывается равным примерно 37 kV вместо $8{,}8 \cdot 6 = 53$ kV. Следовательно, на первую емкость C ложится $\frac{100}{6} \cdot \frac{53}{37} = 24\%$ приложенного 50-Hz напряжения, так как пробой ее ведет к пробою всего разрядника.

При импульсном воздействии на разрядник, прежде чем шунтирующие сопротивления пересут достаточные для заряда емкостей C_0 количества электричества, схема замещения разрядника представится в виде, изображенном на рис. 2. этой схеме $K = C_0 + \sqrt{CC_0}$.

Распределение напряжений в этой схеме может быть легко измерено при произвольной частоте. Измерения показывают, что на первый элемент схемы (C_1 первая пара элементарных промежутков) ложится около 65% напряжения, воздействующего на разрядник.

Если пробивное напряжение первой пары промежутков при 50 Hz составляет U_{50}' и при импульсе U_i', то пробивное напряжение всего разрядника при 50 Hz составит

$$U_{50} = \frac{U'_{50}}{0{,}24}$$

и при импульсе

$$U_i = \frac{U_i'}{0{,}65}.$$

Отношение

$$k = \frac{U_i}{U_{50}} = \frac{U_i'}{U'_{50}} \cdot 0{,}37$$

дает коэфициент импульса всего разрядника. Отношение $\frac{U_i'}{U_{50}'}$ — представляет собственный коэфициент импульса элементарного промежутка

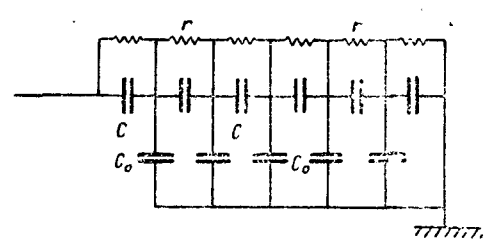


Рис. 1. Схема элемента искрового промежутка разрядника завода „Электроаппарат" выпуска 1937 г.

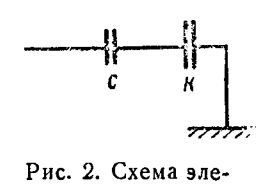


Рис. 2. Схема элемента искрового промежутка для импульса

разрядника, а число $\frac{1}{0,37}$ дает представление о кратности напряжения на первом элементе промежутка при переходе от стационарного напряжения к импульсному. Учитывая, что около 10% приложенного импульсного напряжения ложится на рабочее сопротивление разрядника (тирит) и что собственный коэфициент импульса[1] активных зубчатых электродов заключен в пределах $1,2 \div 1,3$ для времени разряда $1 \div 5$ μsec, коэфициент импульса всего разрядника может быть оценен величиной

$$k = 0,37 \cdot 1,1 \cdot (1,2 \div 1,3) = 0,49 \div 0,53.$$

Измерения вольтсекундных характеристик модернизированных разрядников, проведенные заводом «Электроаппарат», и многократные измерения в ВЭИ всегда указывали на довольно обширную зону разрядных напряжений и по времени и по напряжению. Причем коэфициент импульса разрядника всегда лежал выше единицы, приближаясь к ней в единичных крайних случаях. Причиной этому является неактивность электродов разрядника.

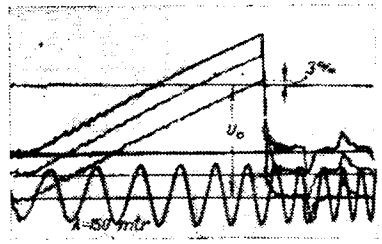


Рис. 3. Срезы волн единичным плоским промежутком, разделенным слюдой

$U_0 = 4,51$ kV_{max}; $\frac{U}{U_0} = 1,03$; $t = 3$ μ sec. Междуэлектродное расстояние d = 1 mm

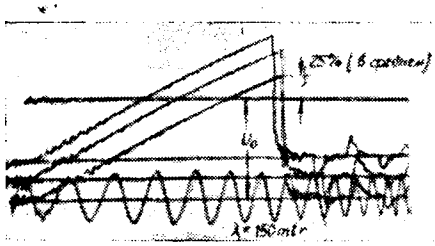


Рис 3а. Срезы волн единичным зубчатым промежутком, разделенным слюдой $d \cong 1$ mm; $U_0 = 4,06$ kV_{max}; $\frac{U}{U_0} = 1,25$; $t = 3$ μ sec

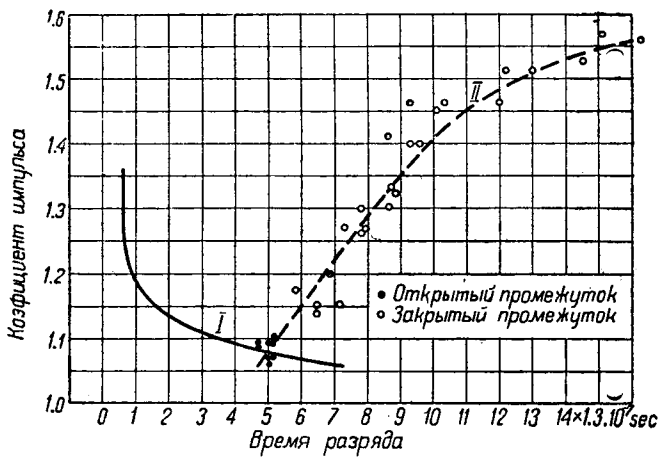


Рис. 4. Вольтсекундная характеристика элементарного промежутка ($d \approx 1$ mm).

I — промежуток освещен; *II* — промежуток закрыт от доступа внешнего освещения

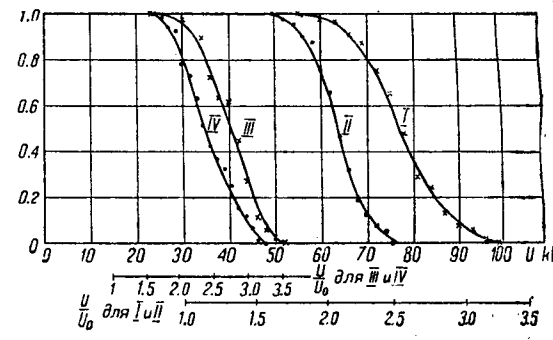


Рис. 5. Вероятность появления разрядного напряжения и коэфициента импульса, произвольно превышающего величину, указанную абсциссой для систем неактивированных промежутков. Положительная волна клинообразной формы. *I* и *II* — 8 промежутков, $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{ср}$ соответственно 105 и 85 kV/μ sec; *III* и *IV* — 3 промежутка, $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{ср} = 62$ и 45 kV/μ sec

Искровые промежутки разрядника заключены в фарфоровые кожухи и лишены доступа внешнего освещения. Фотоэлектронная эмиссия с электродов отсутствует, и разряд при импульсе происходит при напряжениях, достаточных для возбуждения автоэлектронной эмиссии с шероховатостей на электродах. Соответствующие этому условию коэфициенты импульса составляют $2 \div 3 \div 4$ в зависимости от крутизны действующего напряжения. Сказанное иллюстрируется данными рис. 4, по которым можно видеть значительное увеличение коэфициентов импульса единичного промежутка при лишении его доступа внешнего освещения. При воздействии более крутых волн вероятные коэфициенты импульса увеличиваются (рис. 5).

Таким образом разрядник с искровым промежутком, снабженным емкостно-омической шунтировкой, но составленный из единичных электродов, обладающих собственным коэфициентом импульса порядка $3 \div 4$, будет обладать коэфициентом импульса около

$$k = 0,37 \cdot 1,1\,(3 \div 4) = 1,2 \div 1,6.$$

Суммарная проверка высказанных положений была проведена на одном элементе искрового промежутка разрядника типа РТНМ-35 и 110, выпуска 1937 г., дополненным семью тиритовыми дисками и помещенным в кожух разрядника РТНМ-6. Все испытания производились на одной и той же волне, с амплитудой около 54 kV, достигавшейся в течение $15 \div 16$ μsec.

Результат измерений представлен на рис. 6 (кривая *I*). Типичная для этого промежутка осциллограмма срезов волн показана на рис. 7.

Относящиеся к выбранной форме волны минимальные коэфициенты импульса были получены индивидуальной активизацией всех электродов

[1] Коэфициент импульса зубчатых электродов существенно больше, чем электродов плоских, что можно видеть из осциллограмм рис. 3, относящихся к электродам типа AEG. Применение зубчатых электродов оправдывается большей гарантией не уменьшения разрядного напряжения промежутка при оплавлении электродов дугой сопровождающего тока.

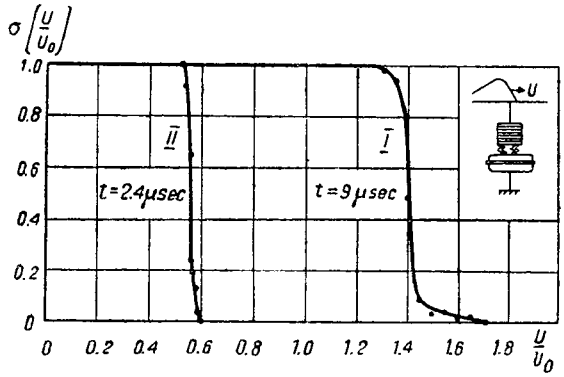


Рис. 6. Вероятность разряда с коэфициентом импульса, превышающим абсциссу.
I — один элемент искрового промежутка разрядника типа РТНМ-35 выпуска 1937 г.; *II* — то же, но нормальные электроды заменены на разделенные слюдой

промежутка. Нормальные электроды в фарфоровых колечках были при этом заменены на электроды, разделенные слюдой[2] (рис. 8), придающей промежутку свойства, мало отличающиеся от свойств открытого промежутка.

Результат измерения коэфициентов импульса всего разрядника, снабженного активными электродами, представлен кривой *II* рис. 6 и рис. 9.

Зарегистрированные в обоих случаях диапазоны вероятных коэфициентов импульса — 1,2 ÷ 1,7 для промежутка с закрытыми электродами и 0,52 ÷ 0,6 для промежутка с активными электродами—свидетельствуют о правильности изложенных выше общих соображений о работе искрового промежутка разрядника.

Повышение селективности действия существующей модели разрядника, иными словами уменьшение его коэфициента импульса, может быть достигнуто активизацией электродов искрового промежутка. Однако метод активизации, примененный выше, вряд ли можно было бы реализовать в нормальной конструкции разрядника, и его следует рассматривать как прием экспериментальный, воспроизводящий случай, близкий к крайнему. Замена типа электродов затруднена и конструктивными особенностями существующей модели промежутка (мало места для размещения электродов достаточной величины) и повела бы к перестройке технологического процесса в цехах завода.

Практически приемлемое и достаточно эффективное решение можно было найти, используя свечение, возникающее внутри коробки искрового промежутка, в местах высокой напряженности поля.

Наблюдая за поведением промежутка, при воздействии на него напряжением промышленной частоты, в совершенно затемненной комнате, можно было установить, что для ряда деталей промежутка напряжение короны лежит довольно низко. Так например, при 4,4 kV_{eff} появляется корона на кольце, на котором смонтированы промежутки и сопротивления, возле клеммы, соединенной с «полюсом». При 4,5 ÷ 5 kV_{eff} появляется свечение на краях шоопировки, образующей обкладку первого шунтирующего конденсатора. При 6 ÷ 7 kV_{eff} края шоопировки первого конденсатора коронируют уже сильно, и начинается свечение на втором и третьем конденсаторах.

Свечение в местах высокой напряженности поля возникает и при импульсном воздействии.

Использование импульсной короны для активизации промежутков достигается осуществлением прямого доступа света короны к электродам промежутков. Для этого в фарфоровых колечках, разделяющих электроды, вырезаются отверстия, и сборка кольца промежутка производится следующим образом.

Держатели искровых промежутков переносятся вниз, под кольцо, и укрепляются в перевернутом положении. Между щечками каждого держателя помещается пружина. Шунтирующие сопротивления выносятся на верхнюю плоскость кольца (рис. 10 *a*, *b*). Для правильной ориентировки кольца в коробке необходимо некоторое удлинение пружин, установка второй деревянной пробки, обращенной вверх, в части кольца, не занятой электродами, и снабжение трех болтов фибровыми трубочками длиной около 20 mm, упирающимися в верхнюю крышку коробки.

Вероятность появления коэфициентов импульса и времени разряда, произвольно превышающих заданные на разряднике, активированном по указанному выше способу, представлена на рис. 11 и 12. На рис. 13 показаны осциллограммы волн, срезанных активированным разрядником.

Сравнивая рисунки 11 и 6, можно видеть, что активизация промежутков свечением, возникающим на обкладках шунтирующих конденсаторов, дает почти тот же эффект, что и индивидуальная

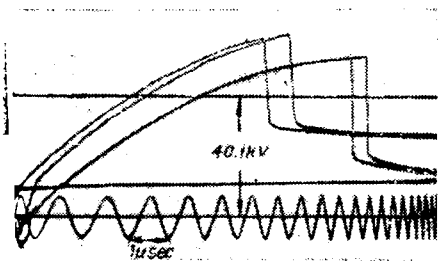


Рис. 7. Срезы волн на одном элементе искрового промежутка разрядника типа РТНМ-35 выпуска 1937 г. $U_0 = 37{,}7\ kV_{max}$

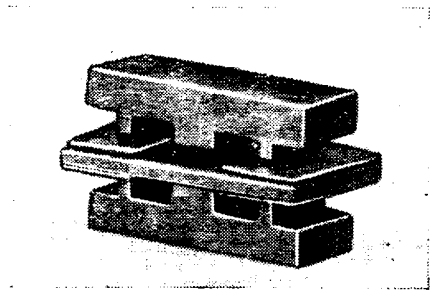


Рис. 8. Электроды, разделенные слюдой

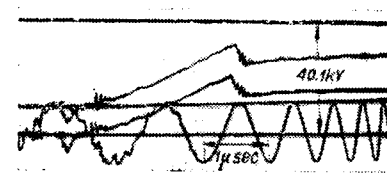


Рис. 9. Срезы волн на одном элементе искрового промежутка разрядника типа РТНМ-35, все электроды которого сменены на разделенные слюдой. $U_0 = 36{,}7\ kV_{max}$

[2] Острые края электродов не были устранены, и их характеристика, вероятно, близка к характеристике зубчатых электродов.

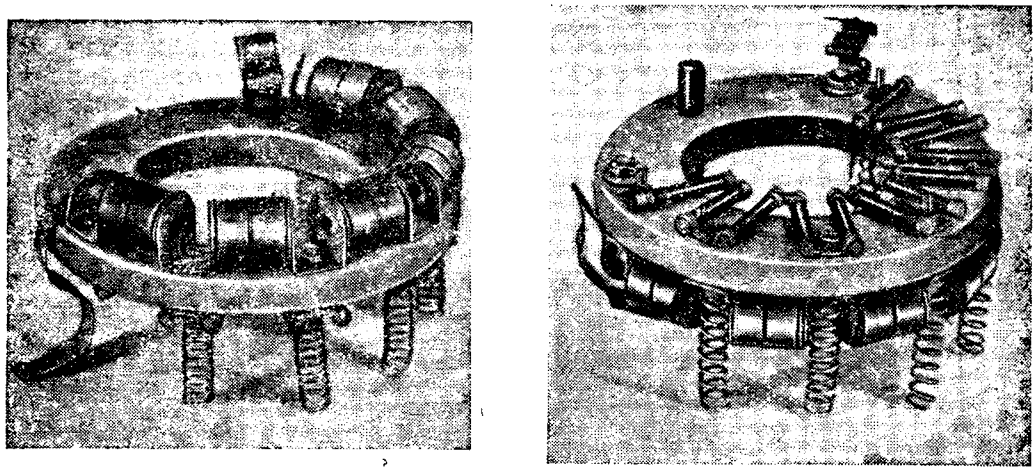


Рис. 10. Кольцо искрового промежутка тиритового разрядника.
а — в существующем исполнении; *б* — активированного свечением на обкладках шунтирующих конденсаторов

активизация всех электродов слюдяными прослойками.

В обоих случаях импульсное разрядное напряжение промежутка уменьшается почти в три раза по сравнению с неактивированным промежутком.

Эффективность предложенного метода активизации обязана не только импульсной короне на краях обкладок конденсаторов, но, вероятно, также и контактному процессу между алюминиевой обкладкой и пружиной.

Слой алюминия, наносимый на фарфор аппаратом Шоопа, всегда несколько окислен с поверхности. Пробой тонкого оксидного слоя при импульсе сопровождается свечением, на которое и реагируют электроды промежутка.

По поводу отверстий в фарфоровых колечках, разделяющих электроды, через которые свет должен проникнуть к электродам, нужно заметить следующее.

Применявшееся вначале вырезание из колечка четвертой его части оказалось излишним. Спиливание шлифованного торца кольца (рис. 14) примерно на четвертой части окружности на глубину, несколько большую одной трети высоты колечка, оказалось достаточным.

На кривой *III* рис. 11 треугольниками отмечены точки, относящиеся к разряднику с колечками со спиленными краями, и кружками — к разряднику,

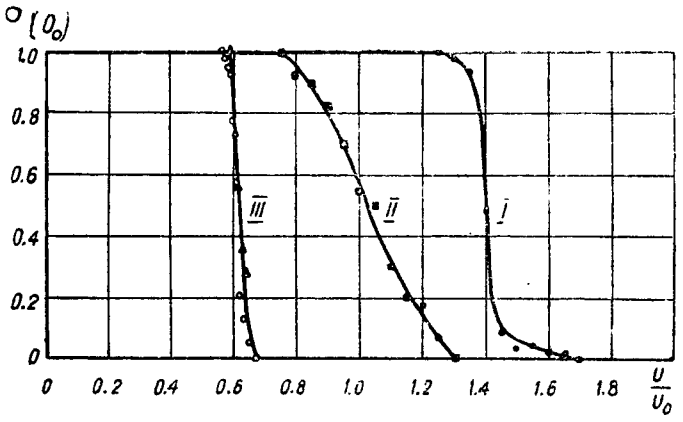


Рис. 11. Вероятность разряда с коэфициентом импульса, превышающим абсциссу.
I — один элемент искрового промежутка разрядника типа РТНМ-35 выпуска 1937 г.; *II* — то же, но первые 6 электродов от полюса активированы свечением с алюминиевых обкладок шунтирующих конденсаторов; *III* — то же, что и *II*, при активизации всех электродов

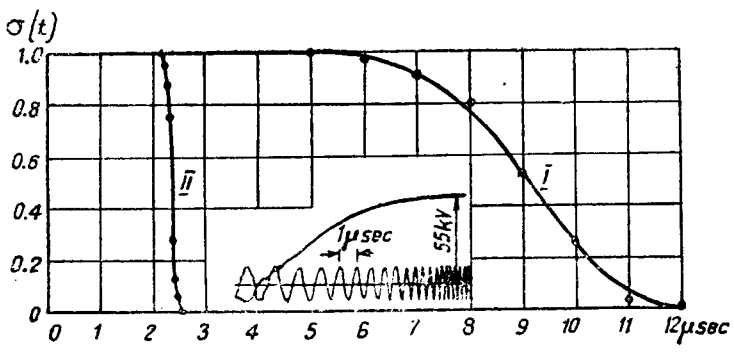


Рис. 12. Вероятность разряда с временем, превышающим абсциссу.
I — один элемент искрового промежутка разрядника типа РТНМ-35 выпуска 1937 г.; то же, но активированный свечением с шунтирующих обкладок

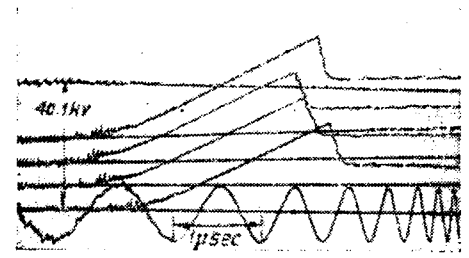


Рис. 13. Срезы волн на одном элементе промежутка разрядника типа РТНМ-35, активированного свечением с обкладок шунтирующих конденсаторов. $U_0 = 47$ kV$_{max}$

Рис. 14. Электроды активированного разрядника

в фарфоровых колечках которого вырезаны четвертинки, — существенного различия между ними нет.

Вольтсекундные характеристики одного элемента искрового промежутка разрядника, активированного свечением на алюминиевых обкладках конденсаторов, с семью тиритовыми дисками представлены на рис. 15.

Характеристики получены на положительных волнах различной крутизны. За время разряда принято время, протекшее от начала волны до момента среза.

В области малых скоростей роста напряжения шунтирующие емкости слабо участвуют в процессе; распределением напряжения, которое становится близким к стационарному, в большей мере управляют шунтирующие сопротивления. Поэтому импульсное разрядное напряжение здесь близко к пробивному напряжению при промышленной частоте.

По мере увеличения скорости роста напряжения начинает проявляться эффект емкостно-омической шунтировки промежутка. Вследствие ограниченной проводимости шунтирующих сопротивлений увеличивается доля напряжения, приходящегося на первую пару электродов промежутка. Так как электроды активны, разряд на них происходит без чрезмерного запаздывания, и разрядное напряжение всего разрядника с ростом крутизны напряжения постепенно уменьшается.

Вместе с уменьшением времени воздействия растут собственные коэфициенты импульса единичных промежутков. Поэтому снижение разрядного напряжения разрядника с ростом крутизны волны замедляется.

При дальнейшем росте крутизны волны, увеличение собственных коэфициентов импульса единичных промежутков уже не компенсируется увеличением неоднородности в распределении напряжения по цепочке промежутков, и общее пробивное напряжение разрядника начинает расти.

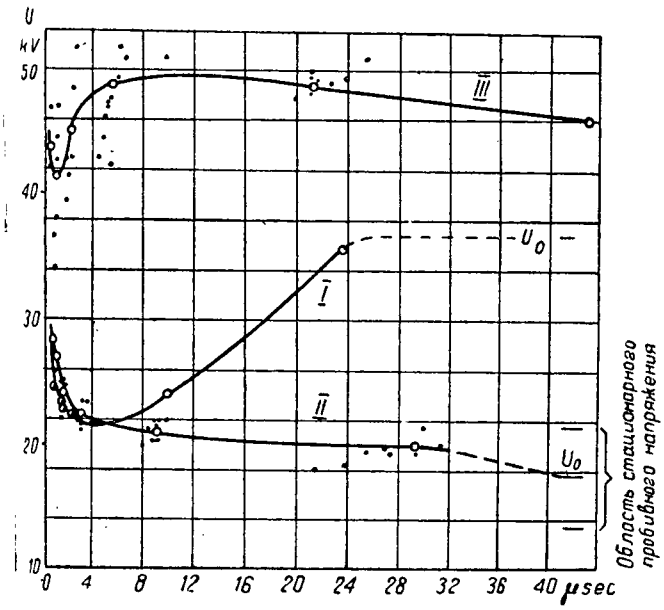


Рис. 15. Вольтсекундные характеристики.

I — один активированный элемент разрядника РТНМ-35 с нормальной шунтировкой; II — то же, но лишенный шунтирующих сопротивлений; III — то же, но с шунтировкой, усиленной против нормальной в 20 ÷ 30 раз

В этой области крутизны волн практически сливаются характеристики шунтированного и нешунтированного искровых промежутков[3], так как сопротивления в процессе распределения напряжения почти не участвуют.

Ослаблением омической шунтировки можно было бы уменьшить наклон характеристики в ее правой — возрастающей части, несколько снижая минимум разрядного напряжения и перемещая его в область большего времени. Усиление омической шунтировки привело бы к обратному.

Нужно заметить, что снижение пробивного напряжения разрядника при малых крутизнах волн может привести его к излишним срабатываниям при перенапряжениях внутреннего происхождения.

Рис. 16 дает представление о вероятности появления различных коэфициентов импульса разрядника в области пологих волн. Можно видеть, что при времени разряда 50 ÷ 60 μsec, соответствующем периодичности 5000 Hz, характеристики активированного и неактивированного разрядников совпадают.

Увеличение селективности разрядника в области меньших частот не представляется целесообразным.

Вольтсекундная характеристика 35-kV разрядника, собранного из четырех полностью активированных коробок искровых промежутков и 30 тиритовых дисков, представлена на рис. 17. Как и все предыдущие характеристики, последняя относится к разряду на фронте положительных волн различной крутизны.

В верхней части рисунка нанесены точки, соответствующие пробивным напряжениям неактивированного разрядника, измеренные на заводе «Электроаппарат». Измерения проводились со стандартной отрицательной волной на двух экземплярах разрядника. Рис. 17 относится к разрядникам с одинаковыми средними пробивными напряжениями, при промышленной частоте[4].

[3] Расстояние между электродами у обоих одинаково.

[4] Измерение стационарного пробивного напряжения проводилось путем параллельного включения к 250-kV трансформатору 200 kVA, разрядника и измерительных шаров диаметром 150 mm. Пределы и среднее пробивное напряжение разрядника устанавливались по распределению мест пробоя между разрядником и шарами при быстром возбуждении генератора (1300 kVA), питавшего трансформатор. Медленный подъем напряжения опасен для шунтирующих сопротивлений.

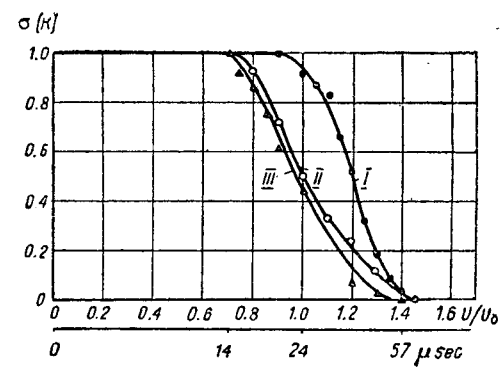


Рис. 16. Вероятность разряда с временем и коэфициентом импульса, превышающими указанные на абсциссе.

I — один элемент искрового промежутка разрядника типа РТНМ выпуска 1937 г.; II — то же, но с активизацией 50% свечением с конденсаторов; III — то же, но с активизацией 100% электродов

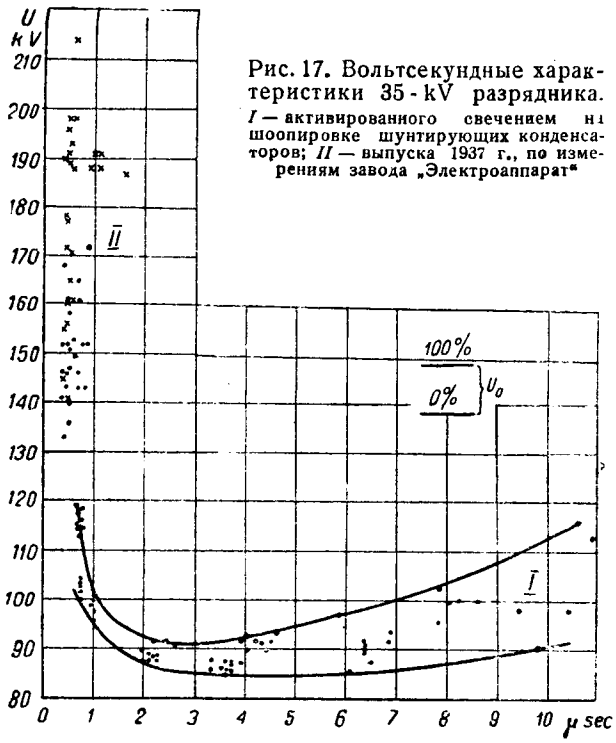


Рис. 17. Вольтсекундные характеристики 35-kV разрядника. *I* — активированного свечением на шоопировке шунтирующих конденсаторов; *II* — выпуска 1937 г., по измерениям завода „Электроаппарат"

Сравнивая рис. 15 и 17, можно видеть, что последовательное соединение активированных промежутков приводит к результатам, аналогичным наблюдавшимся на одном разряднике.

Увеличение числа включенных тиритовых дисков немного увеличило область рассеяния разряда.

Верхняя граница разрядных напряжений активированного разрядника, находясь на уровне 93 kV при времени разряда 3 μsec и около 105 kV при 1 μsec, вполне удовлетворяет требованиям эксплоатации к разряднику, работающему совместно с деионной трубкой.

Снижение пробивного напряжения разрядника в диапазоне времени $0{,}5 \div 1 \div 2$ μsec практически важно потому, что в этой области времени защитное действие разрядника в значительной мере определяется его вольтсекундной характеристикой.

Сравнивая полученные характеристики разрядников с заграничными, приходится констатировать тенденцию фирм не опубликовывать вольтсекундные характеристики своих разрядников (GEC, AEG).

Характеристики же, попавшие в фирменные проспекты, не поддаются простой расшифровке, так как они приводятся либо в функции от одного из конструктивных параметров либо выражаются в номинальных напряжениях, без указания стационарного пробивного напряжения (Siemens). Все же образцы импортных разрядников, измерявшиеся в нашей лаборатории, обнаружили далеко не блестящие свойства своих разрядных характеристик, во всяком случае гораздо худшие в сравнении с характеристикой активированного разрядника.

При сравнительной оценке характеристики рис. 17 с импульсными разрядными напряжениями разрядников иностранных фирм следует иметь в виду, что стационарное разрядное напряжение испытывавшегося активированного разрядника РТНМ-35 было 4,4 U_ϕ. Если бы в таком разряднике промежутки были установлены на 3,5 U_ϕ, как это имеет место в иностранных разрядниках, то при времени в $2 \div 3$ μsec следовало бы ожидать разрядов при напряжениях, близких к 73 kV.

К устройству заземлений в плохо проводящих грунтах[1]

Л. П. Подольский

Электропром

В ГОРИСТЫХ местностях при скалистых грунтах, в грунтах, промерзших на большую глубину, и тому подобных случаях приходится сталкиваться с большими трудностями при осуществлении заземлений.

Действительно, скалистый грунт[2] даже во влажном виде имеет удельное сопротивление до $300 \cdot 10^4$ Ω/cm³, «вечная мерзлота» — $60 \cdot 10^4$. Эти сопротивления превышают во много раз удельные сопротивления нормальных грунтов, обычно встречающихся на практике ($0{,}5 \cdot 10^4$—$2 \cdot 10^4$ Ω/cm³) Между тем выполнение заземления с достаточно малым сопротивлением растеканию представляет нелегкую задачу даже в нормальных условиях. Тем более это сложно и дорого, а в некоторых случаях просто невыполнимо при плохо проводящих грунтах.

Посмотрим, нельзя ли облегчить требования к заземлениям в грунтах с высоким удельным сопротивлением.

На рис. 1 изображена схема токопрохождения через тело человека, соприкасающегося с заземленным корпусом приемника *П* при возникновении в нем замыканий на землю. Сопротивление растеканию защитного заземления

$$R_з = \frac{U_n}{I_p}. \qquad (1)$$

где I_p — расчетный ток замыкания на землю.

Формула (1) точна лишь в том случае, когда допустимое напряжение заземленного корпуса по отношению к земле $U_з$ отождествить с «допустимым напряжением прикосновения» U_n[3]. Такое предположение правильно, если допустить, что сопротивление тела человека R велико по сравнению с сопротивлением R_x и что поэтому последним можно пренебречь при определении суммарной величины сопротивления пути тока через тело человека в землю (R_1).

В нормальных почвенных условиях, когда обслуживание установки ведется с земли, указанное соотношение, действительно, имеет место. Оно имеет место также при бетонном, при плиточном или даже деревянном поле, если учитывать возможность пропитки пола влагой или же возможность механических повреждений его.

Другое дело — плохо проводящий грунт, залегающий на большую глубину. Хотя его удельное сопротивление и может подвергаться колебаниям в зависимости от времени года, но все же оно остается значительным. Иначе говоря, такой грунт обладает надежными изолирующими свойствами.

При этих условиях нет оснований пренебрегать величиной сопротивления растеканию от ног человека в землю R_x. При этом суммарное сопротивление пути тока через тело

$$R_1 = R + R_x. \qquad (2)$$

[1] В порядке обсуждения.

[2] См. «Заземление в скалистых грунтах», «Электричество» № 10, 1931.

[3] Напоминаем: «напряжением прикосновения» называют напряжение, под которым может оказаться тело человека при соприкосновении его с заземленным корпусом приемника, оказавшимся под напряжением.

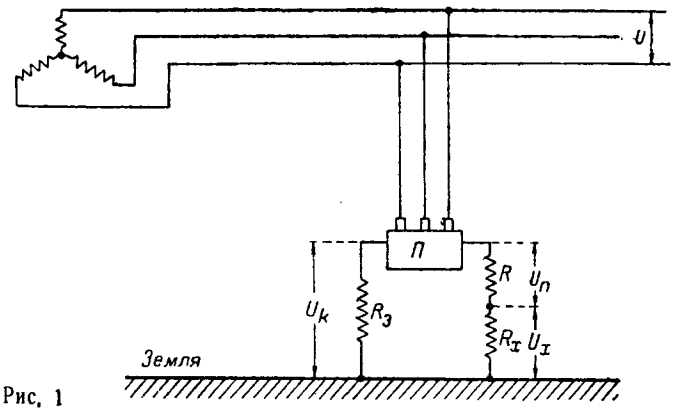


Рис. 1

Соответственно допустимое значение напряжения корпуса приемника

$$U_к = U_п + U_x, \qquad (3)$$

где U_x — падение напряжения от ног человека до „земли", а сопротивление

$$R_з = \frac{U_п + U_x}{I_p}. \qquad (4)$$

Сравнение формул (4) и (1) показывает, что учет изолирующих свойств почвы приводит к экономии при сооружении заземлителя, размер которой зависит от значения U_x.

Величину U_x нетрудно определить экспериментально (с некоторой неточностью в сторону обеспечения безопасности), задавшись предельным значением безопасного тока i_x и произведя измерения сопротивления растеканию над двумя металлическими моделями подошв, соединенных параллельно и прижатых к земле с силой, равной половине веса человека (40 kg).

Величину наибольшего тока, допустимого без ущерба для здоровья человека, примем равной 0,01 А. Тогда $U_x = 0{,}01\ R_x$. Кроме того, положим напряжение $U_п = 65$ V. После подстановки формула (4) примет такой вид:

$$U_к = 0{,}01 R_x + 65. \qquad (5)$$

Следовательно, сопротивление растеканию защитного заземления может быть подсчитано по формуле:

$$R_з = \frac{0{,}01 R_x + 65}{I_p}. \qquad (6)$$

При грунтах с достаточно большим удельным сопротивлением величина 0,01 R_x может оказаться равной величине междуфазового напряжения U или же большей ее. Это будет означать, что грунт для данного напряжения представляет собой надежное изолирующее основание и что защитное заземление в этих условиях излишне.

Следует отметить, что изолирующее действие грунта может оказаться нарушенным близостью каких-либо металлических конструкций, основание которых находится на большой глубине, где удельное сопротивление грунта уже невелико, а также и в других аналогичных случаях. Поэтому пользование формулой (6) предполагает отсутствие опасной близости между заземленными корпусами и конструкциями, имеющими фундаменты, заложенные на большой глубине.

До сих пор наши рассуждения касались защитных заземлений. Однако в значительной степени их можно распространить также и на рабочие заземления и, в частности, на заземления нулевой точки систем 380/220 V, если соблюдено следующее условие: свойства почвы в отношении величины удельного сопротивления должны быть однородны по всей площади, обслуживаемой данной сетью. Этому требованию удовлетворяют, например, районы дальнего севера с промерзшими грунтами.

Действительно, определяющими моментами при выборе величины сопротивлений эксплоатационных заземлений в сетях 380/220 V являются:

1. Предотвращение появления опасного напряжения в потребительской сети при возникновении замыканий в трансформаторе между обмотками высокого и низкого напряжения.

2. Предотвращение недопустимого повышения потенциала по отношению к земле фазных проводов сети низкого напряжения, имеющих исправную изоляцию, в случае возникновения замыканий на землю какой-либо одной фазы той же сети.

3. Предотвращение недопустимого повышения потенциала нулевого провода по отношению к земле при возникновении замыканий на землю в сети низкого напряжения.

При разрешении всех перечисленных задач наличие изолирующих свойств почвы является благоприятным фактором, который может быть учтен методами, сходными с описанным выше.

Вопрос этот требует специальной проработки и является самостоятельной задачей.

Заслуживает упоминания то обстоятельство, что оттаивание грунта в районах дальнего севера хотя и является фактором, неблагоприятно влияющим на изолирующие свойства грунта, но этому неблагоприятному моменту противостоит резкое увеличение проводимости заземлителей. Поэтому в ряде случаев условия безопасности при заземлениях, рассчитанных с учетом изолирующей действия грунта, не ухудшатся в летнее время, но еще улучшатся.

ВОЛОГОДСКАЯ
ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ
Обл. Библиотека

Электризация бумаги на печатных машинах [1]

Б. В. Беляев и А. П. Шорыгин
Московский Рентгензавод

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ заряды, возникающие на бумаге при печатном процессе, вызывают простои и брак вследствие их мешающего действия на работу машин. На ротационных машинах благодаря большой скорости печатания и значительному давлению на бумагу в момент натиска плотность зарядов бывает столь значительной, что иногда возникают искровые разряды между листом бумаги и металлическими частями машины, регулярно повторяющиеся (при постоянной скорости печатания) и способные вызвать воспламенение бумаги [2]. Эта опасность особенно велика на ротациях глубокой печати, где применяются летучие органические растворители, дающие при известных концентрациях горючую смесь с воздухом. Помимо этого, заряды на бумаге могут стать причиной несчастных случаев, — рабочий может попасть в машину вследствие неожиданного электрического удара или в результате затягивания волос, вызванного электростатическим притяжением.

Настоятельная необходимость борьбы с нарушениями технологического процесса и требования безопасности заставили разработать ряд мероприятий по ослаблению или устранению электризации, сводящихся к увеличению электропроводности бумаги (увлажнение, добавка солей сильных электролитов), воздуха (тихий разряд с заземленных металлических острий или специальных коронирующих электродов и т. д.) [3] и деталей, приходящих в соприкосновение с бумагой (увлажнение, пропитка растворами солей).

Для объективного сравнения эффективности различных способов и целесообразного их использования необходимо проводить количественное измерение зарядов на бумаге и относительной и абсолютной величины напряжения в различных местах машины, от которого в решающей степени зависит действие ряда деэлектризаторов (щетки, нейтрализаторы) и возможность установления мест возникновения зарядов.

Для измерения напряжения на бумаге применялся метод обыкновенного статического зонда, в качестве которого использовалась особая щетка из канители.

При исследовании напряжения на бумаге в печатной машине необходимо было считаться с тем обстоятельством, что поверхность бумаги не является эквипотенциальной. Следовательно, щетка при ее относительно большой длине должна искажать распределение поля в месте измерения.

Для измерения величины заряда была применена такая же щетка, но заземленная через микроамперметр. Напряжение бумаги относительно земли при ее прохождении через определенную неподвижную точку внутри машины прямо пропорционально плотности ее заряда в этой точке (отнесенной к единице площади листа). Поэтому при идеальном снятии заряда и постоянной скорости печатания ток в заземляющем проводе должен быть пропорционален напряжению той же, но изолированной щетки. Произведенные измерения показали, что такая пропорциональность существует только при больших напряжениях [кривая $I=f(U)$ рис. 1].

Испытания велись на ротации, условная схема которой, необходимая для описания экспериментов, изображена на рис. 2.

Если приблизительно считать заряд единицы площади бумаги неизменным вдоль ее длины при прохождении интервала между двумя валами, то напряжения отдельных элементарных участков бумаги будут обратно пропорциональны емкостям их относительно окружающих металлических деталей машины [4].

Это соображение подтверждает экспериментальная кривая, показывающая распределение

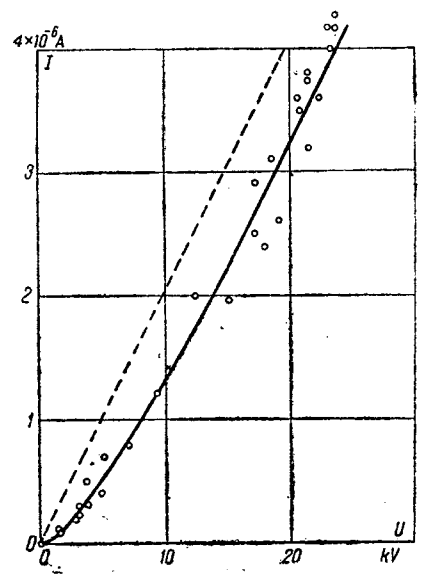


Рис. 1

[1] В статье излагается часть работы по исследованию электризации бумаги, проведенная авторами под руководством доц. А. М. Бамдас.

[2] Hodges, El. T. т. 92, 1937, стр. 683.

[3] Увлажнение воздуха понижает его электропроводность.

[4] $U=\frac{\sigma}{C}$, где U — напряжение в некоторой точке на бумаге, σ — плотность заряда и C — емкость единицы площади листа в данной точке.

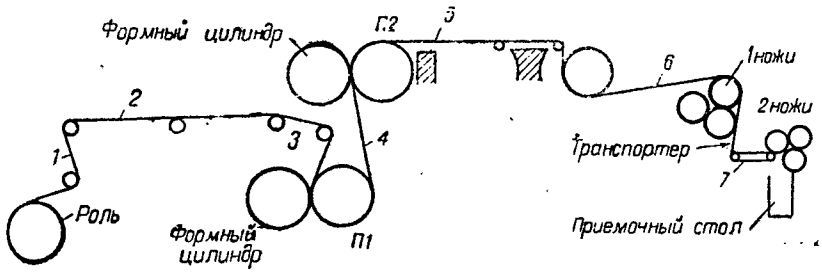


Рис. 2

напряжений на бумаге между двумя валами (рис. 3). Вблизи вала напряжение весьма мало, но уже при небольшом удалении оно быстро возрастает, достигая по середине интервала при сильной электризации нескольких десятков киловольт.

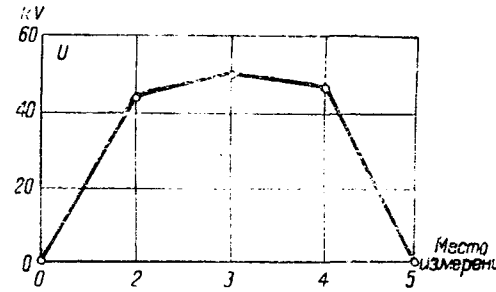
Замеры производились при неизменной скорости машины зондом, устанавливаемым по середине полосы бумаги. На рисунке ниже кривой дана схема расположения частей машины в месте измерения.

Аналогично рассмотренному действует и емкость бумаги относительно печатного и формного цилиндров. Поэтому заряд на бумаге может быть обнаружен, например, при помощи электроскопа лишь на некотором расстоянии от печатных валов [5].

Условия бумажного производства чрезвычайно благоприятны для образования электрических зарядов. Это обстоятельство, а также то, что из нескольких одинаковых ролей бумаги, полученных с одной и той же фабрики (и пускаемых в печатную машину друг за другом), одни дают сильное мешающее действие, а другие электризуются слабо,—привело к распространению взгляда, что заряды привозятся в типографию с бумажной фабрики.

Однако удаление зарядов с бумаги на бумажных машинах не решает проблемы устранения электризации на печатных машинах. В целях установления мест наиболее интенсивной электризации была предпринята серия опытов по измерению потенциалов и токов на заземленный зонд в различных местах машин. Зонды устанавливались в каждом доступном для измерений интервале между валами, в месте максимума напряжения на бумаге. Данные о местах установки зондов и цели измерения в соответствующих точках приведены в таблице.

На рис. 4 приведены типичные кривые распределения зарядов и максимальных потенциалов с их знаками вдоль машины. Сопоставляя эти кривые со схемой рис. 2, легко установить картину возникновения и распределения зарядов. Как показали многократные измерения, напряжение в месте измерения *1* при самой интенсивной



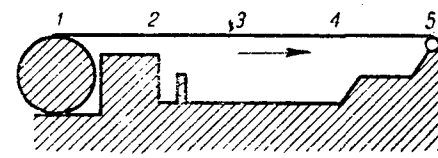


Рис. 3

Таблица

Номер места измерения	Расстояние от зонда до ближайшей заземленной детали m	Цель измерения
1	0,25	Определение электризации бумаги после ее схода с роля
2	0,50	То же, после прохода ее по различным валам до печатания
3	0,25	
4	0,25	Определение величины и знака заряда на бумаге после первого и второго печатного натиска
5	0,50	
6	0,40	Выяснение дальнейших изменений заряда при проходе бумаги вдоль машины

электризации не превышало 2—3 kV, в то время как напряжение в месте *4* превосходило 60 kV. Заряд бумаги после ее сматывания с роля составляет, таким образом, незначительную часть от того заряда, который она приобретает после первого натиска (емкости мест измерения одного порядка). Заряд, который наблюдается на бумаге в месте *1*, следует отчасти приписать взаимодействию между сматываемым листом и остальным ролем.

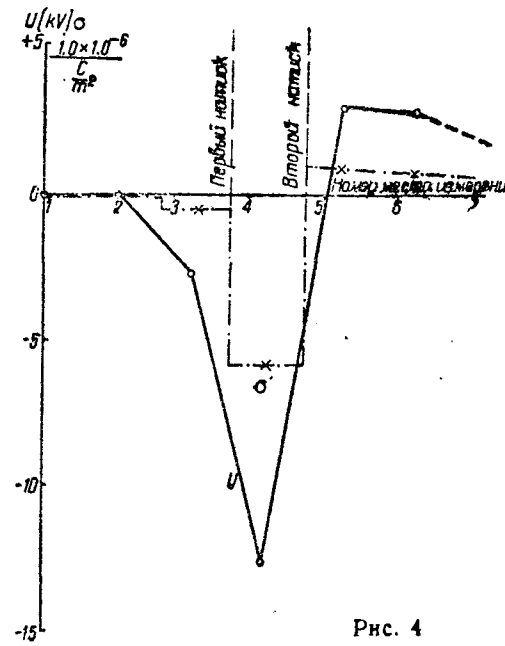


Рис. 4

[5] Сказанное здесь о влиянии емкости на распределение напряжения на бумаге относится к заряженной полосе любого другого диэлектрика (шелк, резина, фотопленка и т. д.). Вызванные изменением емкости резкие колебания напряжения на диэлектрике при его движении в машине часто ошибочно приписывают другим причинам. См., например, Н. Дроздов, „Электричество" № 5, 1935; Плехан, „Электричество" № 10, 1935; Н. Дроздов, Электричество трения как причина взрывов и пожаров, ОНТИ, 1938, стр. 11; Brecht, Papierfab. u. Cellulosechemie № 19, 1937; Rither, Amer. Pressm № 26, 1932 и др.

При дальнейшем движении бумаги в машине изменение заряда до момента прохода через первую пару печатных цилиндров незначительно. После первого печатного натиска напряжение резко возрастает, оставаясь отрицательным; соответственно увеличивается и ток на зонд; это увеличение по абсолютной величине весьма различно от случая к случаю.

При втором натиске, так же как и при первом, бумага должна сильно электризоваться, однако вместо возрастания мы имеем в данном случае резкое снижение величины заряда и напряжения, т. е. при втором печатании бумага электризовалась противоположным знаком.

Можно предполагать, что причина этого — различие в материалах валов, соприкасающихся с бумагой. И действительно, оказалось, что верхние листы декелей печатных цилиндров П1 и П2 были из разного материала: у П1 сверху была наложена белая глянцевая бумага, у П2—кабельная. Серия измерений, производившихся на той же машине при одинаковой обертке обоих декелей, показала возрастание потенциала после второго натиска.

Измерения, произведенные на других ротационных машинах, позволяют утверждать, что, кроме печатания, причиной возникновения зарядов является также трение бумаги о тесемки транспортера.

Печатная бумага при выпуске с бумажной фабрики имеет весьма разнообразное содержание влаги, причем, повидимому, довольно часто более низкое, чем воздушно-сухая.

При перевозке и хранении на складах бумага частично отсыревает; больше всего увлажняются наружная и внутренняя части роля (вблизи сквозного отверстия), и, следовательно, электризация бумаги по мере прохождения через машину различных частей роля также должна изменяться, достигая наибольшего значения у середины роля, что и подтвердилось экспериментально.

Увеличение скорости печатания увеличивает плотность электрических зарядов на бумаге. Если считать, что количество зарядов, возникающих при трении, пропорционально; при постоянной силе трения, относительной скорости движения трущихся тел и что, с другой стороны, скорость стекания зарядов пропорциональна их плотности и зависит от скорости движения, найдем для плотности заряда, остающегося на бумаге по выходе из-под печатных валов, следующее приближенное выражение:

$$\sigma = \frac{mv^p}{1+nv^p},$$

где v — скорость движения бумаги.

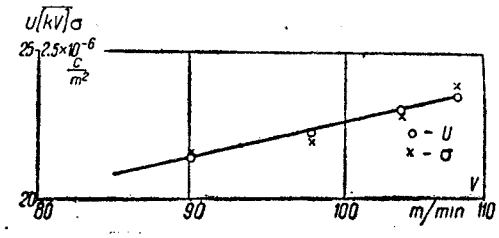


Рис. 5

Коэфициенты m, n и показатель p зависят от механических и электрических свойств бумаги, печатных валов и их поверхностей, а также от величины давления на бумагу при натиске.

Для экспериментального определения плотности заряда на бумаге в функции скорости были сняты кривые $U=f(v)$ и $I=f(v)$ в месте 4 (после первого печатного натиска). По последней кривой была затем определена (рис. 5) зависимость $\sigma=f(v)$ по формуле $\sigma=\frac{I}{bv}$.

В пределах произведенных измерений при увеличении скорости на 20% заряд возрастал на 11%. При меньших скоростях изменение электризации со скоростью должно происходить быстрее, в соответствии с уравнением, однако и при $v=100\frac{\text{m}}{\text{min}}$ плотность заряда далека до предельной, даваемой отношением $\sigma_к=\frac{m}{n}$.

***

Электризация бумаги на печатных машинах подвержена сильным колебаниям в зависимости от свойств бумаги, атмосферных условий (влажности), регулировки машины, ее устройства, материала, поверхности валов и т. п. Однако в пределах известного промежутка времени, когда эти факторы остаются практически неизменными, процесс достаточно устойчив и поддается исследованию простейшими средствами.

Наблюдавшиеся нами плотности зарядов на бумаге при самой сильной электризации на печатных машинах в три раза меньше тех, которые удавалось получать на бумаге в электростатических генераторах [6], и приблизительно раз в десять меньше теоретически возможной максимальной поверхностной плотности заряда в воздухе при нормальном давлении и температуре.

Установка щеток и других приспособлений для снятия зарядов с бумаги должна производиться в местах, удаленных от валов, где напряжение максимально; это видно непосредственно из кривой рис. 1 и 3. Щетка, установленная против вала, совершенно бесполезна.

---

[6] Tuve, Hafstad, Dahl, Physical Review т. 48, 1935, стр. 314.

К ОБСУЖДЕНИЮ ЕДИНИЦ МЕР И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Системы единиц мер в электротехнике

К. М. Поливанов

Группа технической физики
ОТН Академии наук СССР

ВОПРОС об единицах измерения в последнее время привлек к себе большое внимание, в связи с новым предложением Международной электротехнической комиссии [МЭК (см. ниже)], и предстоящим его рассмотрением Международным комитетом Мер и Весов.

Первые системы единиц электромагнитных величин — абсолютные системы CGS — M магнитная и CGS — E электрическая основаны на идеях Гаусса и Вебера и введены в шестидесятых годах XIX в. Британской ассоциацией содействия развитию науки.

В ту эпоху, когда складывались эти системы, явления, связанные с электрическим полем и полем магнитным, как правило, не рассматривались совместно, — электродинамике уделялось меньше внимания, чем магнето и электростатике.

Это обстоятельство вместе с существовавшим в то время стремлением все физические явления свести к механике привело к широкому распространению обеих абсолютных систем. Этими же системами пользовался в своих работах и Максвелл, хотя в трактате об электричестве и магнетизме, в параграфах, посвященных размерности электромагнитных величин, Максвелл указывал на необходимость введения в дополнение к основным величинам (длина, масса, время) или электрической величины q (электрический заряд) или магнитной m (магнитная масса).

В соответствии с этим взглядом в § 623 Максвелл приводит следующие две возможных системы размерностей электромагнитных величин:

$$[q] = [\mathrm{q}] = \left[\frac{\mathrm{L^2M}}{\mathrm{mT}}\right] \qquad [m] = \left[\frac{\mathrm{L^2M}}{\mathrm{qT}}\right] = [\mathrm{m}]$$

$$[u] = \left[\frac{\mathrm{L^2M}}{\mathrm{qT^2}}\right] = \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{T}}\right] \qquad [B] = \left[\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{qT}}\right] = \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{L^2}}\right]$$

$$[D] = \left[\frac{\mathrm{q}}{\mathrm{L^2}}\right] = \left[\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{mT}}\right] \qquad [H] = \left[\frac{\mathrm{q}}{\mathrm{LT}}\right] = \left[\frac{\mathrm{LM}}{\mathrm{mT^2}}\right]$$

$$[E] = \left[\frac{\mathrm{LM}}{\mathrm{qT^2}}\right] = \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{LT}}\right]$$

Очевидно, что Максвелл считал нужным различать размерности напряженности магнитного поля H и магнитной индукции B, напряженности электрического поля E и электрического смещения D.

Как известно, в основу системы CGS — E был положен закон Кулона:

$$f = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} r^\circ, \qquad (1)$$

в котором коэфициенту пропорциональности ε_0 было присвоено значение единицы.

Магнитная система единиц возникла из закона Кулона для магнитных масс, в котором полагали коэфициент $\mu_0 = 1$.

Ввиду полного подобия исходных уравнений электрический заряд в системе CGS — E и магнитная масса в системе CGS — M выражаются в одних и тех же единицах, точно так же как E и H, D и B и т. д.

В электростатической системе отношение $\frac{D}{E} = \varepsilon\varepsilon_0$ является отвлеченным числом, тогда как B и H имеют различную размерность и отношение $\frac{B}{H} = \mu\mu_0$ нельзя рассматривать как число отвлеченное. Аналогично в магнитной системе $\mu\mu_0 = \frac{B}{H}$ имеет нулевую размерность, а $\varepsilon\varepsilon_0 = \frac{D}{E}$ — нет.

Уже это в достаточной мере ясно показывает, что эти две системы при обычной форме записи основных уравнений несовместимы.

Можно указать еще на одно, часто не замечаемое следствие из принципиальной несовместимости систем CGS — E и CGS — M.

Если разделить известные соотношения между единицами количества электричества в абсолютных системах и практической (кулон):

$$1\ \mathrm{C} = 10^{-1}\mathrm{CGS - M} = 10^{-1}\cdot \mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{\circ},$$

$$1\ \mathrm{C} = 3\cdot 10^{9}\mathrm{CGS - E} = 3\cdot 10^{9}\cdot \mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1},$$

то найдем, что скорость света равна 1:

$$1 = 3\cdot 10^{10}\ \mathrm{cm\,sec}^{-1}.$$

В системе с единицами длины и времени cm и sec этот результат бессмысленен.

Симметричная система Гаусса. Несовместимость абсолютных систем, казалось бы, должна была привести к отказу от одной из них. Однако это было практически неосуществимо и нецелесообразно, так как обе системы получили одинаково широкое распространение — одна для измерения электрических величин, а другая для измерения магнитных или электрокинетических. В то же время единицы CGS — E к измерению электрокинетических, а CGS — M к измерению электростатических величин применялись исключительно редко.

Решением задачи было введение симметричной гауссовой системы, в которой электрические величины измеряются в единицах CGS — E, а магнитные — в единицах CGS — M. Такая система осуществима только при условии изменения формы записи уравнений электромагнетизма, в которые одновременно входят величины, измеряемые в электрических и магнитных единицах. Например, в этой системе закон электромагнит-

ной индукции записывается так:

$$u = -\frac{1}{c}\frac{d\Phi}{dt},$$

где c — скорость распространения электромагнитных волн в пустоте.

Эта система в настоящее время преимущественно и применяется в учебной и научной физической литературе.

В гауссовой системе величины B, H, D и E имеют одинаковую размерность. Но если целесообразность попарного приравнивания размерности B, H и D, E еще может быть обоснована, то факт совпадения размерности всех четырех величин указывает, что эта система в недостаточной мере отражает специфичность измеряемых величин.

Введение четвертой основной единицы. Абсолютные системы встречали обоснованные возражения. Казалось искусственным и противоречащим природе вещей сводить электромагнитные явления к механике — выражать электромагнитные величины через cm, g и sec. Такого рода соображения, как было упомянуто вначале, высказывал еще Максвелл. В 1889 г. Рюккер [1] предложил ввести для характеристики размерности электромагнитных величин в дополнение к единицам длины, времени и массы физические постоянные μ_0 или ε_0, характеризующие электрическую и магнитную проницаемость физического пространства.

Согласно идее Рюккера для пустоты законы Кулона и Био-Савара [2]:

$$f = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon_0 r^2} r^\circ \qquad f = \frac{m_1 m_2}{\mu_0 r^2} r^\circ$$

$$dB = \mu_0 \frac{i ds \times r^\circ}{r^2}$$

будут содержать единицы, не сводимые к L, M и T.

Введение одновременно двух физических констант, в качестве основных величин, нецелесообразно, так как ε_0 и μ_0 связаны между собой строго определенным соотношением:

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2},$$

где c — скорость распространения электромагнитных волн в пустоте.

Вопрос о 4 π. Принятая форма записи законов Кулона и Био-Савара неудобна еще тем, что в целом ряде уравнений электромагнетизма появляется величина π, в то время когда в описываемом ими явлении нет никаких геометрических оснований для этого.

Так, емкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{4\pi d},$$

энергия электрического и магнитного поля в элементе объема dV:

$$dW = \left(\frac{E^2 \varepsilon\varepsilon_0}{8\pi} + \frac{H^2 \mu\mu_0}{8\pi}\right) dV,$$

наконец:

$$\operatorname{div} \varepsilon\varepsilon_0 E = 4\pi\rho, \quad \operatorname{rot} H = 4\pi j \text{ и т. д.}$$

Чтобы избежать этого, Хевисайд предложил ввести в знаменатели основных уравнений множитель 4π:

$$f = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{4\pi r^2} r^\circ \text{ и } dB = \mu\mu_0 \frac{i ds \times r^\circ}{4\pi r^2}$$

$$f = \frac{1}{\mu\mu_0}\frac{m_1 m_2}{4\pi r^2} r^\circ.$$

Эта идея Хевисайда получила широкое признание. Так, при пользовании системой VAcm sec, как правило, записывают все уравнения в рационализованной форме [3]. В теоретических исследованиях и в учебной физической литературе получила распространение рационализованная форма абсолютной (симметричной) системы Гаусса, введенная Г. Лоренцом [4]. Ее называют обычно системой Хевисайд-Лоренца. Одновременно с Лоренцом ею начал пользоваться А. Зоммерфельд.

Практические единицы. С самого начала развития электротехники в обиход вошли практические единицы измерения. В дальнейшем для унификации их и для простоты перехода к единицам абсолютных систем сочли удобным определить практическую единицу сопротивления (Ω abs) как 10^9 единиц сопротивления в системе CGS — M и практическую единицу тока (A abs) как 10^{-1} единиц тока в этой же системе.

Тогда же (специальная комиссия, выделенная Международным конгрессом по электричеству, 1881 г.) было решено определять эти единицы по ртутному эталону сопротивления и по серебряному вольтаметру. Однако размеры ртутного эталона так же, как и количество серебра, отлагаемое в серебряном вольтаметре током в 1 A abs за 1 sec, по мере уточнения измерений, приходилось изменять. Кроме того, во времена создания практической системы оказывалось возможным более точно осуществить эталон ома и произвести измерения по серебряному вольтаметру, чем сравнить единицы, определяемые таким способом, с единицами абсолютной системы CGS—M. Ввиду этого (Международный конгресс в Чикаго, 1893 и Международная конференция в Лондоне, 1908 г.) было решено практические единицы тока и сопротивления определять непосредственно по эталонам, установив их так, чтобы определенные по ним единицы были возможно близки к A abs и Ω abs.

Единицы, определенные по этим эталонам, были названы международными практическими — ампер международный (A int) и ом международный (Ω int).

Вместе с тем было решено не вносить новых изменений в установленные эталоны даже в том случае, если будут найдены расхождения между определяемыми по этим эталонам Ω int и A int и абсолютными Ω abs и A abs.

Определение ома и ампера международных хорошо знакомы всем электрикам.

Существенно отметить, что в практической международной системе единиц мы имеем уже не

[1] A. W. Rücker, On the Suppressed Dimensions of Physical Quantities, Philos. Magazine, т. 27, 1889, стр. 104.

[2] $\times$ — знак векторного умножения.

[3] См., например, К. А. Круг, Основы электротехники, изд. 1935; Р. В. Поль, Введение в учение об электричестве, изд. 1930.

[4] Г. Лоренц, Теория электронов, ГТТИ, 1934.

три, а четыре основных единицы: A int, V int, sec и единица длины (m или cm). Тогда как абсолютную практическую систему можно считать построенной на трех основных единицах (cm, g, sec), с последующим введением десятичных кратных и дольных от ряда производных единиц этой системы (CGS — M). Или даже просто как систему, в точности подобную системе CGS—M, но с основными единицами 10^9 cm, 10^{-11} g и sec (на это указал еще Максвелл).

Единицы практической международной системы получили повсеместное распространение. Однако отдельные электромагнитные величины продолжают измерять и в единицах абсолютной системы (например, магнитную индукцию, поток и напряженность поля). Такое положение, разумеется, совершенно неудовлетворительно, так как требует введения ряда переводных множителей в физические уравнения.

За последние десятилетия было сделано несколько предложений о создании новой системы единиц [5], в которую входили бы все практические электромагнитные единицы. Из них наибольший интерес представляют системы MKS (Джорджи) и VA cm sec, которые мы рассмотрим ниже.

Измерения абсолютных ома и ампера [6] в настоящее время могут быть произведены даже с большей точностью, чем измерения соответствующих международных единиц. Кроме того, с переходом на абсолютные единицы оказывается возможным производить основные метрологические измерения, не прибегая к дополнительным электромагнитным эталонам. Поэтому Международный комитет Мер и Весов решил отказаться от международных практических единиц и перейти с 1 января 1940 г. к единицам практически абсолютным.

Система VA cm sec. Выбрав в качестве основных единиц VA cm sec, можно через них выразить единицы и размерность всех остальных механических и электромагнитных величин. Например, единица силы определяется по единице энергии (VA sec) и длины (cm). Она оказывается равной 10^7 dyn. Размерность ее $[f] = \frac{\text{VA sec}}{\text{cm}}$.

В системе VA cm sec имеется четыре, а не три основных единицы. Это ее сильно отличает от абсолютных систем CGS.

В законах Кулона для электростатического и магнитного полей значения коэфициентов ε_0 и μ_0 определяются через остальные, входящие в них величины.

Значение [7] электрической проницаемости пустоты, полученное из опыта и выраженное через международные единицы, будет:

$$\varepsilon_0 = 0{,}8859 \cdot 10^{-11} \frac{\text{A sec}}{\text{V cm}} \approx \frac{1}{c^2 4\pi \cdot 10^{-9}} \frac{\text{A sec}}{\text{V cm}}.$$

Значение μ_0 может быть определено из опыта [8] посредством сравнения результатов измерения с уравнением, являющимся следствием из закона Кулона или же из измерения скорости распространения электромагнитных волн в пустоте и определения c, так как $c^2 = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}$:

$$\mu_0 = 1{,}25598 \cdot 10^{-8} \frac{\text{V sec}}{\text{A cm}} \approx 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{\text{V sec}}{\text{A cm}}.$$

Очевидно, что в рассматриваемой системе B и H так же, как D и E, имеют различные единицы даже для пустоты.

Системой VA cm sec обычно пользуются в рационализованной форме, рассмотренной выше. Значение магнитной и электрической проницаемостей в нерационализованной системе VA cm sec:

$$\mu_0 \approx 10^{-9} \frac{\text{Vsec}}{\text{Acm}} \quad \text{и} \quad \varepsilon_0 \approx \frac{1}{c^2 10^{-9}} \frac{\text{Asec}}{\text{Vcm}}.$$

Система Джорджи. Еще в начале нынешнего века итальянский ученый Джорджи выступил с предложением ввести систему с четырьмя основными единицами: m, kg, sec и одна из электрических практических международных единиц, определяемая по своему эталону. Первоначально Джорджи предлагал принять в качестве четвертой единицы Ω int.

Система, предложенная Джорджи, весьма удобна и имеет большое число сторонников. Поэтому МЭК на пленарном собрании в 1935 г. приняла решение о введении системы Джорджи для измерения электромагнитных и механических величин.

Ввиду намеченного перехода от международных практических единиц к единицам практическим абсолютным в настоящее время следует четвертую единицу в системе Джорджи выбрать так, чтобы в получающуюся систему входили именно практические абсолютные единицы.

Относительно выбора четвертой (электрической или магнитной) единицы МЭК не пришла ни к какому определенному решению ввиду возникших разногласий и по этому вопросу было решено запросить мнение научных организаций различных стран.

При этом МЭК предложила выбирать из следующих семи единиц практической системы: ампер, вольт, ом, кулон, генри, фарада, вебер. Однако комиссия по единицам, обозначениям и номенклатуре (SUN) при Международном союзе чистой и прикладной физики высказалась за введение единицы магнитной проницаемости в качестве четвертой единицы.

На той же точке зрения стоял и Консультативный комитет по электричеству при Международном комитете Мер и Весов. Однако, учитывая то, что МЭК поставила вопрос о выборе четвертой единицы из семи единиц, в число которых не входит единица магнитной проницаемости, этот Комитет предложил выбрать ом или ампер. При

---

[5] Новейший обзор литературы по вопросу о единицах мер можно найти в статье J. Wallot, Physik in Regelmässigen Berichten № 1, 1937, стр. 1.

[6] Или двух других абсолютных единиц.

[7] В этом выражении c^2 — квадрат числового значения скорости света в пустоте, выраженной в cm/sec. Если бы в качестве основных единиц были приняты A abs и V abs, а не A int и V int, имело бы место точное равенство:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 4\pi \cdot 10^{-9}} \frac{\text{A sec}}{\text{V cm}}.$$

[8] Если бы в качестве основных единиц были приняты A abs и V abs, а не A int и V int, имело бы место точное равенство:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{\text{V sec}}{\text{A cm}}.$$

этом в Комитете голоса разделились: 4 за ампер, 3—за ом, при одном воздержавшемся.

В Союзе этот вопрос обсуждался в Комиссии по единицам мер Академии наук СССР (отделение технических наук, группа технической физики).

В результате Комиссия выступила со следующим предложением:

„1. Принять систему единиц, в которой основными являются единицы длины, массы, времени и магнитной проницаемости.

2. В качестве первых трех единиц принять метр, килограмм и секунду, определяемые установленными методами по своим эталонам.

Четвертую единицу определять как $\frac{10^7}{4\pi}$ магнитной проницаемости пустоты.

3. Присвоить особое наименование единице магнитной проницаемости, составляющей $\frac{10^7}{4\pi}$ магнитной проницаемости пустоты".

Это предложение было решено сопроводить следующим обоснованием:

„1. Абсолютные практические единицы электромагнитных величин являются, по самому определению, точными десятичными кратными или дольными соответствующих единиц именно системы CGS μ_0.

В силу этого осуществление абсолютной практической системы возможно только при том условии, что ее основные единицы также будут точными кратными основных единиц системы CGS μ_0, в которой магнитная проницаемость пустоты принимается численно равной 4π — в рационализованной системе и 1 — в нерационализованной системе.

Поэтому, выбирая в качестве основных единиц длины, массы и времени 100 cm, 1000 g и 1 sec, для осуществления абсолютной практической системы необходимо принять такую четвертую единицу, чтобы числовое значение магнитной проницаемости пустоты было точно $4\pi \cdot 10^{-7}$ в рационализованной системе или 10^{-7} в нерационализованной.

Таким образом в определение четвертой основной единицы любой величины (абсолютный ампер, абсолютный ом и т. п.) неизбежно должно входить, хотя бы в неявном виде, предположение об определенном значении единицы магнитной проницаемости.

Например, система абсолютных практических единиц, построенная на четырех основных единицах m, kg, sec и ампер абсолютный, фактически также является системой, вводящей в качестве четвертой основной единицы единицу магнитной проницаемости, так как самое определение абсолютного ампера по силе взаимодействия между проводами основано на приписывании определенного значения магнитной проницаемости пустоты, поскольку в уравнение, выражающее силу взаимодействия между проводами, неизбежно входит магнитная проницаемость.

Так, определение одного ампера как величины тока, протекающего по параллельным прямолинейным проводам, при том, что сила взаимодействия на каждый метр провода равна $2 \cdot 10^{-10}$ стена (при расстоянии между проводами $a = 1$ m и при том, что магнитное поле тока возбуждается в вакууме) тем самым является и определением единицы магнитной проницаемости, поскольку рассматриваемая сила выражается уравнением:

$$f_0 = \frac{\mu_0 i'^2}{2\pi a}.$$

...Из четырех основных единиц только m и kg определяются по искусственно созданным вещественным эталонам, хранящимся в Международном Бюро Мер и Весов. Величины двух других единиц определяются по „естественным эталонам", предоставленным природой в виде: 1) процесса вращения Земли, происходящего с точно известной закономерностью, и 2) универсальной постоянной магнитной проницаемости пустоты, характеризующей одно из свойств физического пространства.

Эти естественные эталоны определяют величину соответствующей единицы только в связи со специальными, произвольно установленными условиями:

1) секунда есть одна восемьдесят шесть тысяч четырехсотая $\left(\frac{1}{86\,400}\right)$ часть промежутка времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки небесной сферы, прямое восхождение которой, отнесенное к средней точке весеннего равноденствия:

$$\alpha_m = 18^h\,38^m\,45^s,836 + 8\,640\,184^s,542K + 0^s,0929K^2,$$

где K — частное от деления на 36 525 числа средних солнечных суток, истекших с Гриничского среднего полудня 31 декабря 1899 г.[9];

2) единица магнитной проницаемости равна $\frac{10^7}{4\pi}$ магнитной проницаемости пустоты.

При первичном определении производных единиц, таких, как ампер, вольт, ом и т. д., в предлагаемой системе единиц приходится основываться не на определенных вещественных эталонах, а на физическом эксперименте, в результате которого числовое значение измеряемой величины, а следовательно, и ее единица выражаются через известные параметры эксперимента и через принятое числовое значение магнитной проницаемости пустоты, которая, таким образом, и выполняет функцию эталона;

...3. после выбора единицы магнитной проницаемости в качестве основной было бы неверно выражать ее как генри на метр или вольтсекунду на метрампер, т. е. через другие основные и даже производные единицы.

Этим обусловлен третий пункт предложения.

Что касается конкретного выбора наименования, вопрос об этом должен подвергнуться широкому обсуждению и в настоящее время можно только высказаться за то, чтобы как и другие единицы практической системы, единица магнитной проницаемости была названа по собственному имени одного из крупнейших ученых, работавших в области изучения электромагнитных явлений.

До выбора наименования и обозначения четвертой единицы предлагаемая система может обозначаться символом MKS [μ] или MKS [μ_0], если считать, что μ — символ относительной магнитной проницаемости".

Предложенную систему MKS [μ_0] может быть

[9] См. ОСТ/ВКС 7132.

нецелесообразно называть системой Джорджи, так как специфическим для системы, известной под названием Джорджи, является ее построение по четырем независимым эталонам.

Можно надеяться, что система MKS [μ_0] в ее рационализованной форме по праву получит практическое признание в кругу наших электриков.

Принимая систему MKS [μ_0] за основную, в ряде отдельных задач можно пользоваться и системой VA cmsec или VA m sec, временно (для данной задачи) рассматривая в качестве основных единиц V и A, являющиеся в системе MKS [μ_0] производными. Это весьма существенно для электриков, так как при наличии этих двух электромагнитных единиц в числе основных все формулы размерности получают наиболее наглядное толкование[10] (до тех пор, пока речь идет о задачах из области электродинамики).

Заметим, наконец, следующее: в системе MKS [μ_0] (или VA m sec) мы имеем единицу магнитной индукции $1\,Wb/m^2 = 1\,Vsec/m^2 = 10\,000$ Gs, практически очень удобную для электротехников.

Целесообразно было бы присвоить ей собственное имя, заменяющее неудобное название (подобно тому, как ом заменяет V/A).

Это замечание относится и к ряду других, часто употребляемых составных (например дробных) единиц.

[10] См., например, К. М. Поливанов, Применение анализа размерностей к электротехнике, „Электричество" № 14, 1935.

О размерности электрических и магнитных величин

Д. И. Ойгензихт
Одесский институт связи

В ПРИНЯТОЙ практической системе единиц основные уравнения электростатики записываются следующим образом.

Теорема Гаусса

$$N = \oint D\,ds = q, \qquad (1)$$

где N — поток смещения,
D — вектор смещения,
q — заряд, расположенный внутри замкнутой поверхности.

Интеграл распространяется на всю замкнутую поверхность.

Соотношение между векторами индукции и напряженности поля

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E, \qquad (2)$$

где E — напряженность поля,
ε — диэлектрическая постоянная нулевой размерности,
ε_0 — абсолютная диэлектрическая постоянная эфира (вакуума), размерность ее: $\frac{A\,sec}{V\,cm}$.

Из равенств (1) и (2) следует, что в практической системе единиц поток смещения и заряд имеют одинаковую размерность, а вектора смещения и напряженности имеют различные размерности.

Иными словами, поток смещения отожествляется с зарядом, а вектор смещения рассматривается как величина, по физической своей сущности отличная от напряженности поля.

Эта система размерностей возникла на почве воззрений Максвелла на поле.

Максвелл рассматривает напряженность поля E как некоторую внешнюю силу, вызывающую смещение в диэлектрике D, подобно тому как внешняя сила в упругой среде создает деформацию; E рассматривается как причина, а D — как следствие. Естественно, с такой точки зрения E и D должны иметь различные размерности.

С другой стороны, поток электрического смещения Максвелл рассматривает как движение электричества, отожествляя смещение с электричеством. В § 62 «Трактата об электричестве и магнетизме» он прямо говорит:

„Какова бы ни была природа электричества и что бы мы ни понимали под движением электричества, явление, которое мы назвали электрическим смещением, представляет собой движение электричества".

Эти воззрения подверглись основательной критике и пересмотру.

Уже Герц в вводной части к «Электродинамике покоящихся тел» указывает, что в эфире между E и D нет разницы. „Это отличие (между E и D), — говорит Герц, — имело бы смысл, если бы мы, удалив из пространства эфир, могли бы сохранить там электрическую напряженность ..., что немыслимо с точки зрения тех представлений, к которым нас приводят работы Максвелла".

У Герца ε_0 — отвлеченная величина, равная единице.

Подобный взгляд на магнитную проницаемость приводит Герца к одинаковым размерностям напряженностей электрического и магнитного полей[1].

Таким образом эти поля никак не различаются, что является слабым местом системы размерностей Герца.

В электронной теории вводится только один вектор, характеризующий поле, — вектор смещения D. Напряженность E есть усредненный вектор смещения, получающийся при учете внутренних зарядов среды.

Таким образом в электронной теории нет различия в физической сущности векторов E и D. То же относится и к векторам H и B. Следовательно, диэлектрическая постоянная, как и магнитная проницаемость, всегда должны быть отвлеченными величинами.

Несмотря на это, в вопросе размерностей мы и по сей день стоим по существу на точке зрения Максвелла.

Можно, однако, построить систему размерностей, соответствующую точке зрения более современной электронной теории.

Исходные положения следующие:

1. Напряженность электрического поля, являясь усредненным смещением, должна иметь ту же размерность, что и смещение. Точно так же индукции магнитного поля следует присвоить ту же размерность, что и напряженности.

2. Заряд есть источник смещения и имеет размерность, отличную от размерности потока смещения.

Особенно ярко видно различие между зарядом и потоком смещения в случае поля в пустоте, где не может быть и речи о том, что смещается электричество.

Лоренц в „Теории электронов" говорит (§ 8): „не вполне достаточно рассматривать ρ (объемную плотность заряда) просто как символ некоторого состояния эфира. Наоборот, мы должны в известной степени наделить заряды субстанциальностью — по крайней мере в той степени, чтобы мы могли признать возможность сил, действующих на них...".

Таким образом заряд противопоставляется полю как нечто качественно от него отличное.

Из этих двух предпосылок следует, что в соотношении

$$D = \varepsilon E$$

ε должно рассматриваться как отвлеченное число.

[1] Этот результат легко получить, если вспомнить выражения для электрической и магнитной плотности энергии $A_e = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$ и $A_m = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$. Если ε_0 и μ_0, так же как и ε и μ, отвлеченные числа, то, очевидно, E и H имеют одинаковую размерность.

Величина ε_0 из этого соотношения должна быть исключена.

В теореме Гаусса должен появиться именованный коэфициент, выражающий качественную разницу между потоком смещения и зарядом:

$$N = \alpha q.$$

Размерность α:

$$[\alpha] = \frac{[N]}{[q]} = \frac{[D]\,[S]}{[q]} = \frac{[E]\,[S]}{[q]} = \frac{\frac{\text{V cm}^2}{\Omega}}{\text{A sec}} = \frac{\text{V cm}}{\text{A sec}}.$$

Таким образом размерность α обратна размерности ε_0, и при соответствующем выборе единиц теорему Гаусса можно записать в следующем виде:

$$q = \varepsilon_0 N.$$

Аналогично, в случае магнитного поля в тождестве

$$B = \mu H$$

μ представляет собой отвлеченное число, а в соотношениях, определяющих магнитное поле тока (Закон Био-Савара закон полного тока, 1-е уравнение Максвелла), должен появиться именованный коэфициент μ_0, выражающий различие между магнитным полем и током. Так например, закон полного тока запишется в следующей форме:

$$\oint H\,\mathrm{d}\,l = \mu_0 I.$$

Размерность μ_0

$$[\mu_0] = \frac{\left[\oint H\,\mathrm{d}\,l\right]}{[I]} = \frac{[H]\,[l]}{[I]} = \frac{[B]\,[l]}{[I]} = \frac{[\Phi]\,[l]}{[I]\,[s]} = \frac{V\,\text{sec cm}}{\text{A cm}^2} = \frac{\text{V sec}}{\text{A cm}}$$

совпадает с обычной принятой для нее.

Величина	Размерность в принятой системе	Размерность в предлагаемой системе
N	A sec	V cm
D	$\frac{\text{A sec}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{V}}{\text{cm}}$
H	$\frac{\text{A}}{\text{cm}}$	$\frac{\text{V sec}}{\text{cm}^2}$

В предлагаемой системе E и D имеют одинаковую размерность

$$[E] = [D] = \frac{\text{V}}{\text{cm}}.$$

Также совпадают размерности H и B

$$[H] = [B] = \frac{\text{V sec}}{\text{cm}^2}.$$

Отношение этих размерностей

$$\frac{[E]}{[H]} = \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

дает размерность скорости. Этого и следовало ожидать, если вспомнить, что E и H сливаются в релятивистской электродинамике в один тензор и между компонентами этого тензора, в которые входит E, и компонентами, которые содержат H, как раз существует соотношение скорости.

Таким образом в предлагаемой системе размерностей устранен недостаток системы, принятой Герцом.

В таблице сопоставлены предлагаемые и принятые сейчас размерности.

Условные обозначения в электрических схемах автоматики

М. П. Суслов и А. С. Горсюков

Всесоюзный институт гидромашиностроения

ВОПРОС о стандартных обозначениях в электрических схемах автоматики неоднократно обсуждался на страницах технической периодической литературы, но до сего времени еще не нашел своего конкретного разрешения. Еще в 1934 г. в «Электричестве» № 13 был помещен проект норм и стандартов, разработанный рабочей комиссией секции электрификации промышленности ВЭК — РНИТО; несмотря на правильную и своевременную постановку вопроса, этот проект не был реализован.

В статье авторы, сотрудники Всесоюзного научно-исследовательского института гидромашиностроения (ВИГМ), выносят на широкое обсуждение те обозначения, которые применяются ВИГМ в течение пяти лет. В основу нижеприводимых стандартных обозначений положена американская система, наиболее распространенная в мировой технической литературе по автоматизации и принципиально не расходящаяся с проектом названной комиссии.

Всякий рабочий процесс того или иного агрегата с автоматическим управлением состоит из серии взаимно увязанных элементов автоматики, вступающих в действие в соответствии с заданным характером работы агрегата. Взаимодействие элементов автоматики достигается путем подбора соответствующих реле и контакторов.

Весь процесс автоматического управления изображается на принципиальной схеме цепями слева направо в порядке вступления в действие того или иного аппарата. При осуществлении этого принципа схема принимает развернутое изображение и называется в целом «развернутой схемой». Развернутая схема легко читается и дает полное представление о последовательном ходе процесса автоматического управления. Независимо от расположения в схеме реле или контактора — контакты этих приборов могут находиться в любых цепях схемы, в зависимости от времени и места их работы. ВИГМ ввел для каждого элемента автоматического устройства цифровое функциональное стандартное обозначение — каждый аппарат и реле имеют свой функциональный номер. Цифра ставится справа у каждого прибора.

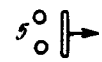
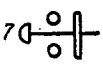
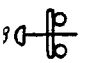
Нормально развернутая схема чертится в положении отсутствия напряжения во всех цепях и какого-либо постороннего воздействия на приборы. Для облегчения технического выполнения схемы и ее усвоения ВИГМ ввел следующие обозначения в развернутую схему.

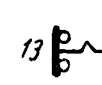
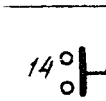
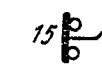
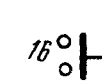
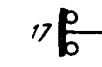
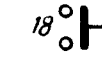
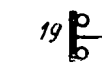
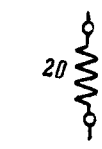
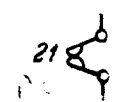
Контакты

1	Контакты замыкаются при прохождении тока через катушку контактора или реле.
2	Контакты размыкаются при прохождении тока через катушку контактора или реле.

Принадлежность контактов к тому или иному реле или контактору характеризуется проставляемой рядом, с правой стороны графического изображения контакта, цифрой соответствующего реле, причем для первого обозначения контактов цифры ставятся нечетные, а для второго — четные (рис. 1). Все обозначения контактов отделяются от обозначения реле при помощи тире.

3	Контакты замыкаются при прохождении тока через катушку контактора или реле с выдержкой времени, т. е. замедленно.

	Контакты размыкаются при прохождении тока через катушку контактора или реле с выдержкой времени — замедленно.
	При прохождении тока через катушку контактора или реле контакты мгновенно замыкаются, но при исчезновении тока контакты размыкаются с выдержкой времени — замедленно.
	При прохождении тока через катушку реле контакты размыкаются мгновенно, но при исчезновении тока контакты замыкаются с выдержкой времени — замедленно.
	При прохождении тока через катушку реле или контактора контакты замыкаются мгновенно, а размыкаются вручную.
	При прохождении тока через катушку реле контакты размыкаются мгновенно, а замыкаются вручную.
	Контакты снабжены искрогасителем.
	Контакты снабжены искрогасителем.
	Контакты замыкаются при нарушении баланса тока в катушках реле (балансное реле).
	Контакты замыкаются мгновенно под действием механических усилий (блокконтакты масляного выключателя, поплавкового контактора и т. д.) в момент срабатывания аппарата.

	Контакты размыкаются мгновенно под действием механических усилий в момент срабатывания аппарата.
	Контакты замыкаются с выдержкой времени под действием механических усилий в момент срабатывания аппарата.
	Контакты размыкаются с выдержкой времени под действием механических усилий в момент срабатывания аппарата.
	При прохождении тока через катушку реле контакты замыкаются с выдержкой времени и при исчезновении тока размыкаются с выдержкой времени.
	При прохождении тока через катушку реле контакты размыкаются с выдержкой времени, при исчезновении тока замыкаются с выдержкой времени.
	Кнопка замыкается от руки.
	Кнопка размыкания от руки.
	Катушка электромагнита или реле.
	Контакты тепловой защиты.

Таким образом все контакты разделены на четыре типа: 1) замыкающиеся при прохождении тока в реле или контакторе; 2) размыкающиеся при прохождении тока в реле (при исчезновении тока они замыкаются); 3) контакты замыкающиеся и 4) размыкающиеся при механическом воздействии.

Аппаратура

Обозначение приборов в схеме в зависимости от выполняемой работы.

1 — главный аппарат — аппарат, дающий начальный импульс для автоматического пуска или остановки агрегата (поплавок, часовой механизм и т. д.); *2* — пусковой аппарат с выдержкой времени воздействует на пуск агрегата после получения импульса от главного аппарата; *3* — главное реле, воспринимающее импульс пуска агрегата после срабатывания пускового аппарата на момент пуска; *4* — главный контактор, основной элемент автоматических установок, выполняющий основные функции включения и выключения служебного тока; *5* — аппаратура для остановки агрегата (кнопка, реле, контакторы и т. д.), — нормально останавливает агрегат и обеспечивает его последующий автоматический пуск; *6* — трехшальтер с автоматическим приводом; *7* — масляный выключатель для шин собственных нужд; *8* — рубильник в цепи управления, действующий от руки; *9* — рубильник специального назначения; *10* — переключатель числа работающих агрегатов; *11* — трансформатор, питающий автоматическую аппаратуру; *12* — аппарат защиты при угонной скорости агрегата (центробежный контактор и пр.); *13* — реле синхронной скорости, срабатывает при синхронной или 95% синхронной скорости; *14* — реле понижения синхронной скорости; *15* — прибор регулирования числа оборотов; *16* — реле для зарядки аккумуляторной батареи; *17* — плавкие предохранители; *18* — промежуточное реле; *19* — добавочное сопротивление; *20* — тормозное устройство с электроприводом; *21* — поплавок; *22* — аппарат для очистки решетки турбинной камеры; *23* — реле для регулирования температуры; *24* — межсекционный выключатель для шин; *25* — автоматический синхронизатор; *26* — указатель температуры; *27* — реле минимального напряжения переменного тока; *28* — температурный контактор; *29* — сигнальное устройство при образовании шуги; *30* — сигнальная аппаратура агрегата; *31* — контактор независимого возбуждения, контактор присоединяет шунтобмотку к независимому источнику тока; *32* — реле направления постоянного тока; *33* — выключатель конечного положения направляющего аппарата турбины; *34* — реле, шунтирующее обмотки возбуждения; *35* — прибор для управления щетками машин; *36* — реле полярности тока; *37* — реле минимального тока; *38* — температурное защитное реле при перегреве подшипников; *39* — автомат гаше-

ния поля возбуждения; *40* — реле обрыва цепи возбуждения генератора; *41* — контактор для включения возбуждения возбудителю; *42* — реле направления поля возбуждения; *43* — переключатель для опробывания системы и изменения управления системы: а) с автоматического управления на ручное; б) с автоматической работы на опытную и для испытания; *44* — аппарат последовательного пуска агрегата (оператор) в зависимости от мощности водотока, нагрузки в сети и при аварии с работающим агрегатом; *45* — реле максимального напряжения постоянного тока; *46* — балансное реле; *47* — реле реверса фаз; *48* — реле незавершенного пуска, останавливающее и блокирующее агрегат, если при пуске не выполнена строгая последовательность работы автоматической аппаратуры; *49* — термическое реле переменного тока; *50* — максимальное токовое реле селективной защиты; *51* — максимальное токовое реле переменного тока; *52* — масляный выключатель генератора; *53* — реле возбуждения возбудителя; *54* — реле частоты; *55* — реле коэфициента мощности; *56* — реле обратной мощности; *57* — реле ограничения тока; *58* — реле регулирования напряжения; *59* — реле повышения напряжения; *60* — реле баланса напряжения; *61* — реле минимальной нагрузки; *62* — реле времени; *63* — реле давления (воды, масла и т. д.); *64* — реле заземления; *65* — регулятор скорости турбины; *66* — многократное реле; *67* — аппарат для перевода генератора с режима генератора на режим синхронного компенсатора; *68* — тепловое реле постоянного тока; *69* — конечный выключатель положения щитов в аванкамере турбины; *70* — реостат с электромоторным приводом; *71* — аварийный линейный автомат постоянного тока; *72* — нормальный автомат постоянного тока; *73* — ограничитель нагрузки турбины; *74* — импеданцное реле; *75* — реактанцное реле; *76* — максимальное реле постоянного тока; *77* — фотореле; *78* — реле обратного тока для машин постоянного тока; *79* — реле повторного включения переменного тока; *80* — реле минимального напряжения переменного тока; *81* — зарядный агрегат; *82* — реле повторного включения постоянного тока; *83* — аккумуляторная батарея; *84* — реле напряжения генератора; *85* — ртутный выпрямитель; *86* — реле блокировки; *87* — диференциальное реле тока; *88* — вспомогательные моторы; *89* — электромотор центробежного маятника регулятора скорости турбины; *90* — регулятор напряжения; *91* — стопорное устройство турбины; *92* — моторчик на регуляторе турбины, регулирующий частоту турбины; *93* — ограничитель открытия регулятора скорости турбины; *94* — главный вентиль регулятора скорости турбины; *95* — мотор масляного насоса регулятора скорости; *96* — главное пусковое устройство регулятора турбины; *97* — реле защиты при обрыве ремня; *98* — защитное реле при прекращении смазки подшипников; *99* — возбудитель главного генератора; *100* — главный генератор.

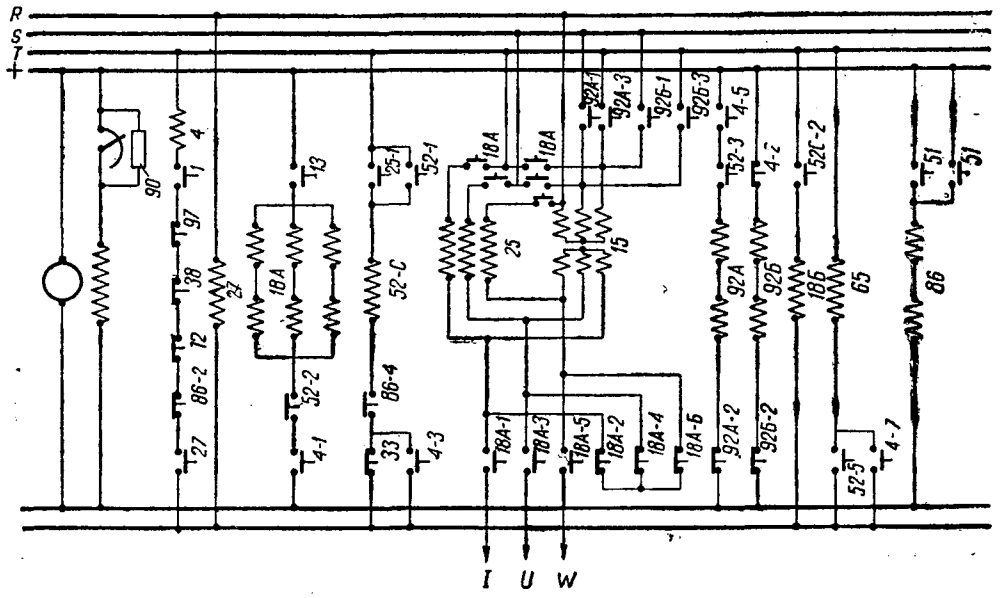


Рис. 2.

1 — контакт поплавка; *4* — главный контактор; *12* и *13* — центробежные контакторы, срабатывающие при соответственно 115 и 95% синхронной скорости; *15* — регулятор синхронизации; *25* — автоматический синхронизатор; *27* — реле минимального напряжения; *33* — конечный выключатель направляющего аппарата турбины; *38* — контакт реле защиты от перегрева подшипников; *51* — контакты максимального токового реле переменного тока; *52-1* и т. д. — блокконтакты привода масляного выключателя; *52-С* — включающая катушка масляного выключателя; *65* — соленоид гидравлического привода задвижки; *86* — реле блокировки; *92А* и *92Б* — обмотки моторчика регулятора скорости турбины; *92А-2* и *92Б-2* — конечные выключатели моторчика регулятора скорости турбины; *18А* и *18Б* — промежуточные реле; *97* — контакт реле защиты при обрыве ремня

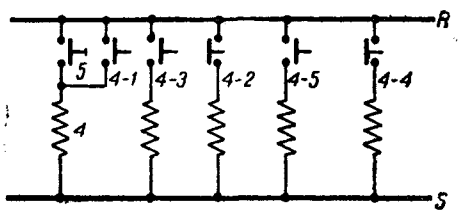


Рис. 1

Приведенные обозначения удобны при составлении развернутых электрических схем для гидростанций и могут быть легко применимы с некоторыми изменениями для других энергетических объектов. В качестве примера применения обозначений, принятых в ВИГМ, на рис. 2 приведена схема лабораторной автоматической гэс ВИГМ.

Предлагаемые обозначения имеют следующие положительные стороны: контакты механических устройств отличаются от контактов электрической аппаратуры; дается конструктивная связь между обмоткой реле и его контактами; работа контактов воспроизведена наглядно; наглядное различие между замедленными и мгновенно действующими контактами; функциональное обозначение элементов автоматики.

О статье М. П. Суслова и А. С. Горсюкова „Условные обозначения в электрических схемах автоматики"

СТАТЬЯ М. П. Суслова и А. С. Горсюкова «Условные обозначения в электрических схемах автоматики» затрагивает весьма наболевший вопрос о стандартизации схемных обозначений.

К сожалению, в области создания схемных условных обозначений для устройств телемеханики существует одна вредная тенденция. Каждая организация, столкнувшись со схемами автоматики, немедленно спешит разработать какие-то «свои» обозначения, зачастую руководствуясь принципом — «хоть похуже, да зато свое». В настоящее время почти каждая энергосистема (в том числе Мосэнерго и ЦЛЭМ Мосэнерго) и почти каждая проектная организация пользуется исключительно «своими собственными» обозначениями в схемах устройств автоматики и телемеханики. При этом каждая организация подходит к вопросу разработки условных обозначений весьма узко, руководствуясь лишь своей рабочей тематикой, благодаря чему обозначения оказываются пригодными лишь для разработавшего их учреждения.

Указанным недостатком страдают и приводимые авторами статьи условные обозначения ВИГМ. Эти обозначения разработаны применительно к сильноточной автоматике и сильноточной аппаратуре (реле и т. д.). Однако как в телемеханике, так и в автоматике наблюдаются тенденции к тому, чтобы все основные зависимости разрешать в специальных слаботочных каскадах устройства, построенных на более дешевой и дающей бо́льшие возможности слаботочной аппаратуре. Сильноточные реле и контакторы сохраняются при этом лишь в последних каскадах устройства, непосредственно связанных с управляемыми объектами.

При желании применить обозначения ВИГМ для изображения слаботочных каскадов устройств телемеханики и автоматики мы столкнемся со многими затруднениями, так как обозначения эти не дают возможности отобразить в схеме все возможные варианты как самих слаботочных реле, так и контактных устройств этих реле. Даже такая элементарная контактная группа, как трехпружинный переключающий контакт, не может уже быть правильно отображена в условных обозначениях ВИГМ, так как в этих обозначениях переключающая группа неизбежно будет выглядеть четырехпружинной (рис. 1).

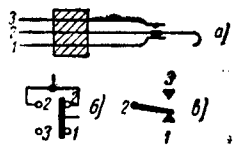


Рис. 1.

а — переключающий контакт (трехпружинный); *б* — изображение ВИГМ; *в* — нормальное американское изображение

Почти совершенно не поддаются отображению в обозначениях ВИГМ такие контактные группы, как, например, мостовой переключающий контакт (переходное переключение), двойной верхний контакт (двойное замыкание), ступенчатый двойной верхний контакт (ступенчатое замыкание) и т. д. и т. п. Неудачно также и изображение обмоток реле; подобным образом принято обычно изображать в слаботочных схемах обмотки трансформаторов и различного рода специальные катушки самоиндукции, что может повлечь различные недоразумения. На рис. 2 показаны наиболее широко распространенные обозначения обмоток реле, применяющиеся в слаботочных схемах, в сравнении с обозначениями специальных индуктивных катушек.

Всецело нужно приветствовать утверждение тт. Суслова и Горсюкова о необходимости перехода на развернутое изображение схем, так как последнее действительно сильно облегчает чтение и понимание схемы и вполне соответствует всем современным тенденциям. Однако здесь же, попутно, авторы делают ошибку, утверждая, что схемы удобнее рисовать в полностью выключенном состоянии (при отключенном питании). Это утверждение, быть может, и правильно в применении к обозначениям ВИГМ, но принципиально его нельзя считать верным.

Кроме рабочих позиций, каждая схема имеет еще две позиции: 1) схема полностью выключена (питание снято), 2) питанием включено, но схема находится в спокойном (нерабочем) состоянии. При вычерчивании схемы в первой позиции для разбора работы схемы потребуется сначала мысленно воспроизвести спокойное состояние схемы (после включения питания) и, сохраняя его в памяти, перейти уже к разбору рабочих состояний. Естественно, поэтому вычерчивать схему во включенном, спокойном состоянии.

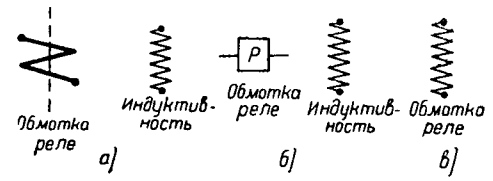


Рис. 2.

а — шведские условные обозначения; *б* - американские условные обозначения (слаботочные); *в* — обозначения ВИГМ

Наконец, следует упомянуть и о методе схемных номенклатур, даваемых аппаратуре и приборам. Принципиально существует два различных метода обозначения аппаратуры — порядковый и функциональный. В первом случае всем реле (и прочей аппаратуре) в схеме присваиваются порядковые номера, цифровые или буквенные. Во втором случае — номера или буквенные обозначения даются аппаратуре, соответственно выполняемым ею функциям. При таком функциональном обозначении аппаратуры удобнее, вообще говоря, пользоваться не цифровыми номенклатурами, а буквенными, представляющими собой сокращенное наименование основной функции данного прибора. Так например, исполнительные реле по этому принципу обозначаются буквой *И*, пусковые реле — *П* и т. д. Однако как порядковый, так и функциональный методы в чистом виде все же неудобны. Первый из них не дает представления о функциях прибора и создает разрывы в нумерации некоторых функциональных групп реле в случае расширения установки и добавления новых реле. Второй способ неудобен тем, что при наличии нескольких приборов, выполняющих в схеме одинаковые функции, все они получат совершенно одинаковые схемные номенклатуры, что весьма затруднит и запутает разбор схемы (особенно при развернутом ее начертании). Этим недостатком обладает и предлагаемый авторами статьи метод обозначения аппаратуры, так как по существу он чисто функциональный. Более рационально совместное применение обоих принципов — порядкового и функционального. В этом последнем случае отдельным функциональным группам реле присваивается функциональная номенклатура, общая для всей группы (обычно — буквенная), к которой, однако, добавляется еще цифра, указывающая порядковый номер данного реле в пределах данной функциональной группы (например пятое исполнительное реле обозначится 5*И* и т. д.).

В заключение следует еще раз упомянуть, что вопрос о введении единых схемных условных обозначений, поднятый тт. Сусловым и Горсюковым, весьма актуален. Однако я придерживаюсь того взгляда, что правильное разрешение этого вопроса должно базироваться не на кустарной разработке обозначений отдельными авторами и учреждениями.

Правильный путь для создания действительно жизненных условных обозначений для устройств автоматики, совмещающих в себе как слаботочные, так и сильноточные каскады, лежит не в разработке каких-то новых, искусственно придуманных обозначений, а в совмещении и некоторой модернизации наиболее распространенных и привившихся сильноточных и слаботочных условных обозначений. В качестве последних можно рекомендовать американские условные обозначения для развернутых схем (фирмы Union Signal and Switch Co), широко применяющиеся в нашем Союзе в схемах СЦБ и телеуправления и очень удобные для начертания схем любой сложности.

Б. К. Щукин

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

Защита сетей с незаземленной нулевой точкой от коротких замыканий

Г. И. Атабеков

Теплоэлектропроект

СПЕЦИФИЧЕСКОЙ особенностью сетей высокого напряжения, работающих с изолированной нулевой точкой или с дугогасящей аппаратурой (под углом зрения релейной защиты), является, во-первых, отсутствие к. з. при однофазном замыкании на землю и, во-вторых, возможность двойных замыканий на землю в разных точках. Как показывает практика эксплоатации, последний вид повреждения является довольно частым следствием перехода однофазных замыканий на землю в междуфазовые в результате перекрытия на землю второй фазы.

Поэтому к защите сетей с незаземленной нулевой точкой предъявляются следующие требования: 1) селективное действие при двух- и трехфазных к. з; 2) бесперебойная подача энергии при двойных замыканиях на землю в разных точках за счет отключения только одного из поврежденных участков; 3) быстрая локализация мест с однофазным замыканием на землю путем селективной сигнализации или отключения.

Соблюдение этих условий требует устройства селективной защиты от междуфазовых к. з. и специальной защиты от замыканий на землю, сигнализирующей или отключающей места однофазных заземлений.

При этом для обеспечения правильного действия защиты при двойных замыканиях на землю в разных точках требуется блокировка одной из поврежденных фаз во всей сети.

Как известно, защита от междуфазовых к. з. в сети с незаземленной нейтралью может быть выполнена либо двухфазной, либо трехфазной.

При двухфазном выполнении защиты блокировка требуется только в одном случае, — когда замкнутыми на землю в разных точках оказываются обе фазы, снабженные защитой. В остальных случаях надобность в блокировке отпадает, так как защита на одной из фаз вовсе отсутствует.

Следует иметь в виду, что при осуществлении двухфазной защиты должна строго соблюдаться четкая фазировка во всей сети, т. е. во всех пунктах сети без защиты должна быть оставлена одна и та же фаза. При трехфазном выполнении защиты блокировка в случае двойных замыканий на землю в разных точках осуществляется обычно на отстающей фазе.

Совершенно недопустимо одновременное совмещение в одной и той же сети комплектов двухфазной и трехфазной защиты, снабженных блокировкой от двойных замыканий на землю, так как при замыканиях на землю фазы, не защищенной двухрелейными комплектами и отстающей, работа защиты может быть неселективной.

В последнее время проектными и эксплоатирующими организациями разработаны различные схемы защиты сетей среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостного тока. По этому вопросу существует уже достаточно обширная литература. В числе основных работ следует отметить статьи инж. А. Б. Барзама и инж. Л. Е. Соловьева[1] и инж. А. Б. Чернина[2], а также соответствующие разделы „Руководящих указаний" по защите сетей. Большое разнообразие схем и расхождение точек зрения отдельных организаций в этом вопросе требует тщательного изучения и сопоставления схем для выявления оптимальных вариантов.

Не претендуя на полноту изложения, автор поставил своей задачей проанализировать некоторые принципиальные положения и, насколько это позволяет объем журнальной статьи, дать критическую оценку схемам защиты.

Существующие способы блокирования защиты одной из поврежденных фаз при двойных замыканиях на землю в разных точках могут быть выделены в три самостоятельные группы: по признаку используемых типов реле: 1) минимального напряжения; 2) мощности нулевой последовательности; 3) диференциальных реле напряжения.

Идея первого метода заключается в том, что с появлением токов нулевой последовательности и понижением напряжения между заземлившимися фазами защита отстающей фазы оказывается выведенной из работы (рис. 1). Имеющееся сомнение относительно четкости действия реле минимального напряжения в связи с недостаточностью понижения линейного напряжения между поврежденными фазами при двойных замыканиях на землю в разных точках не дает основания считать данный способ блокировки достаточно надежным.

Более совершенным следует признать второй метод блокировки одной из фаз, рекомендуемый „Руководящими указаниями". В отличие от первого блокировка происходит не пофазно, а всего комплекта защиты в целом: при протекании токов нулевой последовательности в действие приходит реле A_0 (рис. 2) и в зависимости от поведения реле W_0, реагирующего на направление мощности нулевой последовательности, защита либо остается в работе (если реле W_0 замыкает свои контакты), либо оказывается заблокированной в результате отключения постоянного тока (если контакты реле W_0 остаются разомкнутыми). В качестве реле W_0 могут применяться обычные реле направления энергии ваттметрового типа.

Недостаток данной блокировки — непригодность ее для дистанционной защиты, снабженной трехфазным реле направления. Действительно, рассматривая в качестве примера случай повреждения в кольцевой сети (рис. 3), нетрудно убедиться в том, что наряду с правильным действием защиты в точках *1* и *2* можно ожидать неселективного отключения в точке *3* из-за того, что дистанционное реле фазы *C* замерит малый импеданц, а трехфазное реле направления произведет выбор направления в сторону фазы *B*. Такого же рода неселективность можно ожидать и в сетях с двухсторонним питанием (рис. 4). Избежать этого можно было бы применением вспомогательной блокировки на постоянном токе, что, однако, громоздко.

Наконец, третий способ блокировки фазы — с помощью диференциальных реле напряжения — основан на использовании искажения векторной диаграммы линейных напряжений при двойном замыкании на землю в разных точках. Так, при замыкании фаз *B* и *C* напряжение $U_{BC} < U_{AB}$ (рис. 5), ввиду чего приходит в действие диференциальное реле напряжения, рабочая катушка которого включена на U_{AB}, а тормозная — на U_{BC} (рис. 6). В результате реле на фазе *C* оказывается заблокированным.

Следует отметить одно важное обстоятельство, связанное с применением блокировок.

Учитывая возможную в эксплоатации аварийную перегрузку магистральных линий, на практике приходится обычно принимать завышенные токи трогания защиты. В связи с этим при большой разветвленности сети в ряде случаев возникает опасение в отношении возможности отказа пусковых органов при двойных замыканиях на землю (в особен-

[1] Поведение дистанционной защиты при двойных замыканиях „на землю". „Электрические станции" № 2, 1935.

[2] Защита воздушных компенсированных сетей. „Электрические станции" № 4, 1936.

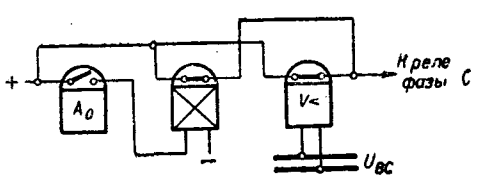


Рис. 1

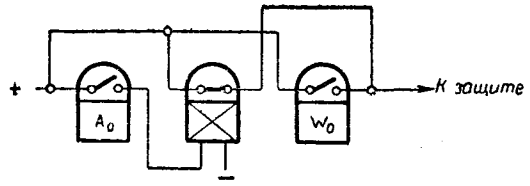


Рис. 2

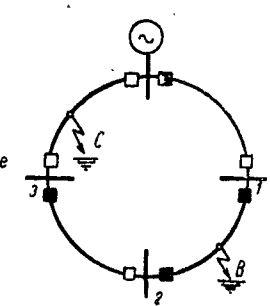


Рис. 3

ности при дуговом к. з. или при замыкании на землю в отдаленных точках). В таких случаях по нашему мнению целесообразно было бы применить специальную блокировку, предназначенную наряду с блокированием отстающей фазы также и для пуска реле опережающей фазы, помимо пусковых органов защиты. Подобное устройство изображено на рис. 7. Применение такой схемы обеспечило бы надежный пуск защиты при двойных замыканиях на землю и вместе с тем блокировку одной из фаз. Само собой разумеется, что означенная схема применима как для трехрелейных, так и для двухрелейных защит.

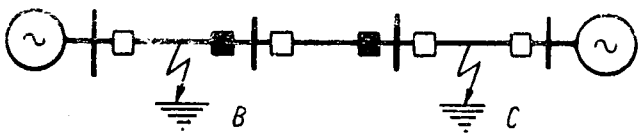


Рис. 4

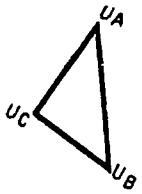


Рис. 5

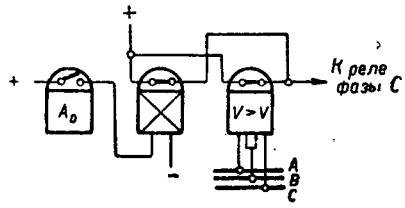


Рис. 6

Следует, однако, иметь в виду, что применение такой схемы может быть допущено только при наличии импедансных реле, надежно работающих при малых значениях токов к. з.

Во всех разобранных выше схемах блокирование одной из фаз достигалось отнятием постоянного тока от защиты. В ряде случаев может оказаться более эффективным другой способ блокировки — шунтирование токовых цепей защиты на стороне переменного тока. В частности, такой способ может быть иногда единственно возможным, как это, например, имеет место при пользовании старыми типами дистанционного реле, вроде Paul Meyer, AEG и т. д.

В целях экономии реле в сетях с незаземленной нейтралью один и тот же комплект дистанционной защиты предназначается обычно для всех видов к. з., т. е. трехфазного, двухфазного к. з. и двойного замыкания на землю в разных точках. При этом для обеспечения правильного замера импеданца при различных видах повреждений и неизменном расстоянии от места установки реле до места к. з. дистанционным реле в зависимости от вида повреждения должны подводиться либо линейные либо фазовые напряжения.

Достигается это, как известно, применением различного рода переключений в цепях напряжений.

При трехфазном к. з. к дистанционным реле может подводиться как линейное, так и фазовое напряжение в сочетании с фазовым током. В первом случае реле будет замерять $\frac{U_\Delta}{I_\lambda} = \sqrt{3}Z$, во втором случае: $\frac{U_\lambda}{I_\lambda} = Z$, где Z — импеданц прямой последовательности участка реле — место к. з.

При двухфазном к. з. правильный замер может быть получен только при подведении линейного напряжения (между больными фазами). При этом в случае одностороннего питания

$$\frac{U_\Delta}{I_\lambda} = 2Z.$$

Несколько сложнее обстоит дело с анализом замеров дистанционных реле при двойных замыканиях на землю в разных точках, в особенности при наличии двухстороннего или кольцевого питания.

Попытаемся произвести такого рода анализ, воспользовавшись для этой цели коэфициентами распределения.

В опубликованной ранее работе автора[8] было показано, что при замыкании фазы B в точке M и фазы C в N токи в больных фазах определятся по формулам:

$$I_B^{(1-1)} = (2C_1^M + C_1^N + C_0)\, I_{A_0}^M,$$

$$I_C^{(1-1)} = (-C_1^M - 2C_1^N + C_0)\, I_{A_0}^N,$$

где C_1^M и C_1^N — коэфициенты распределения для исследуемого участка при подтекании от генераторов к точке M или N единичного тока;

C_0 — то же, при подтекании от точки N к точке M единичного тока;

$I_{A_0}^M$ — симметричная составляющая тока нулевой последовательности, протекающего в точке M.

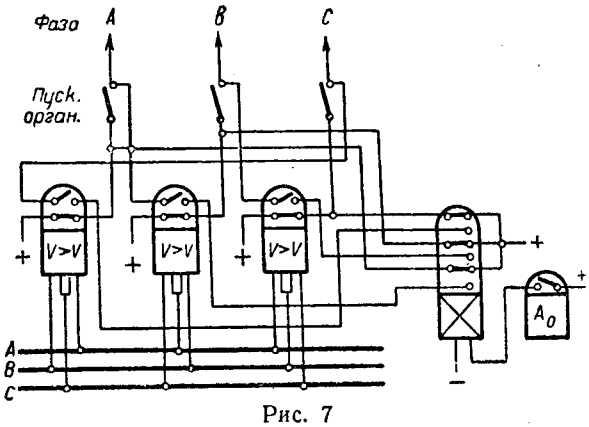


Рис. 7

Здесь предполагается равенство схем прямой и обратной последовательности, а также равенство э. д. с. генераторов.

С другой стороны, падение напряжения в фазе B на участке, имеющем поврежденной фазу B,

$$U_B^{(1-1)} = [(2C_1^M + C_1^N)\, Z_1 + C_0 Z_0]\, I_{A_0}^M,$$

где Z_1 и Z_0 — импеданцы прямой и нулевой последовательности участка от места заземления до места установки реле.

Таким образом импедансное реле, установленное в конце данного участка на фазе B, замеряет:

$$Z_B^{(1-1)} = \frac{U_B^{(1-1)}}{I_B^{(1-1)}} = \frac{(2C_1^M + C_1^N)Z_1 + C_0 Z_0}{2C_1^M + C_1^N + C_0}. \qquad (1)$$

Аналогично, на участке с поврежденной фазой C реле замерит

$$Z_C^{(1-1)} = \frac{U_C^{(1-1)}}{I_C^{(1-1)}} = \frac{(-C_1^M - 2C_1^N)Z_1 + C_0 Z_0}{-C_1^M - 2C_1^N + C_0}. \qquad (2)$$

Формулы (1) и (2) могут быть использованы для производства в общем виде анализа замеров импедансных реле, установленных в сети.

Рассмотрим в качестве примера сеть, имеющую двухстороннее питание (рис. 8). Реле, установленное в точке 1, замерит импеданц, определяемый формулой (1), причем в данном случае $C_0 = 1$, а коэфициент C_1^N отрицателен (за положительное направление токов выбираем направления от N к M).

Следовательно,

$$Z_B^{(1-1)} = Z_1 + \frac{Z_0 - Z_1}{2C_1^M - C_1^N + 1}.$$

Минимальное значение импеданца $Z_B^{(1-1)}$ соответствует случаю $C_1^M = 1$, $C_1^N = 0$ (одностороннее питание со стороны станции B). При этом получаем:

$$Z_{B\min}^{(1-1)} = Z_1 + \frac{Z_0 - Z_1}{3}.$$

По мере увеличения C_1^N и уменьшения C_1^M замер импеданца в точке 1 возрастает.

Таким образом в сетях, имеющих двухстороннее питание, замер импеданца на участке с $I_0 \neq 0$, как правило, превышает величину

$$\frac{2Z_1 + Z_0}{3}.$$

[8] «К анализу замеров импедансных реле при аварийных режимах», „Электричество" № 14, 1936.

Несколько иная картина получается в случае кольцевой сети, питаемой из одной точки (рис. 9).

Пользуясь формулой (1), записываем выражение импеданца, замеряемого реле фазы B в точке I:

$$Z_B^{(1-1)} = Z_1 + \frac{C_0(Z_0 - Z_1)}{2C_1^M + C_1^N + C_0}.$$

Минимальное значение замера получается при $C_0 = 0$, что соответствует двухфазному замыканию на землю в одной точке. При этом

$$Z_{B\min}^{(1-1)} = Z_1.$$

Поскольку переключение цепи напряжения импеданцных реле на фазовые напряжения происходит с помощью токового реле, реагирующего на I_0, минимальное значение $Z_B^{(1-1)}$ практически будет определяться наименьшим значением I_0, соответствующим току трогания переключательного реле. Поэтому практически минимальный замер будет получаться при $C \neq 0$, т. е. будет несколько превышать Z_1.

Максимальное значение $Z_B^{(1-1)}$ получается при $C_0 = C_1^M = 1$ и $C_1^N = 0$ (одностороннее питание точки M), когда

$$Z_{B\max}^{(1-1)} = Z_1 + \frac{Z_0 - Z_1}{3}.$$

Таким образом, в отличие от сети с двухсторонним питанием, в рассматриваемом случае кольцевого питания замер импеданца в точке *1*, как правило, будет меньше $\frac{2Z_1 + Z_0}{3}$, имея в качестве своего нижнего предела величину Z_1.

Поэтому, в то время как в первом случае защита имеет тенденцию затягивать время отключения, во втором случае, наоборот, имеется опасность ускорения действия защиты, вследствие чего ступени времени могут оказаться недостаточными, и защита может подействовать неселективно.

С этой точки зрения в сетях 35 kV, имеющих кольцевое питание (рис. 9), применение токовой компенсации безусловно необходимо.

В простейших сетях с двухсторонним питанием (рис. 8) отсутствие токовой компенсации на практике не создает обычно особых помех в работе защиты. Тем не менее во избежание чрезмерного затягивания времени действия защиты применение токовой компенсации и в этих случаях следует признать целесообразным. При этом, однако, не следует забывать, что даже и при наличии токовой компенсации, замер импеданца на участке, прилегающем к поврежденному, может быть несколько искажен. Так, в том случае, когда BC (рис. 10) представляет собой генерирующую ветвь, замер в точке A оказывается преувеличенным и, наоборот, когда BC — нагрузочная ветвь, следует ожидать преуменьшенных замеров. С другой стороны, способы токовой компенсации, применяемые на практике, сами по себе также таят в себе некоторую ошибку из-за неидентичности импеданцных углов сопротивлений линии прямой и обратной последовательности [4].

Данный выше анализ логически приводит к следующим трем вариантам схем выключения дистанционных реле.

Виды повреждений	Схема 1	Схема 2	Схема 3
Трехфазное к.з.	$\frac{U_\Delta}{I_\Delta} = Z$	$\frac{U_{\Delta/\sqrt{3}}}{I_\Delta} = Z$	$\frac{U_\Delta}{I_\Delta} = \sqrt{3}Z$
Двухфазное „ „	$\frac{U_{\Delta/\sqrt{3}}}{I_\Delta} = Z$	$\frac{U_{\Delta/\sqrt{3}}}{I_\Delta} = 1{,}15Z$	$\frac{U_\Delta}{I_\Delta} = 2Z$
Двойное замыкание на землю в разных точках	$\frac{U_\Delta}{I_\Delta + kI_0} = Z$	$\frac{U_\Delta}{I_\Delta + kI_0} = Z$	$\frac{U_\Delta \cdot \sqrt{3}}{I_\Delta + kI_0} = \sqrt{3}Z$

[4] Вопросы токовой компенсации при двойных замыканиях на землю более подробно рассмотрены в работе автора, помещенной в ж. „Электричество" № 14, 1936.

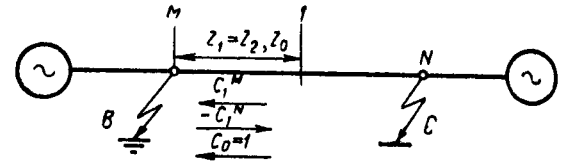


Рис. 8

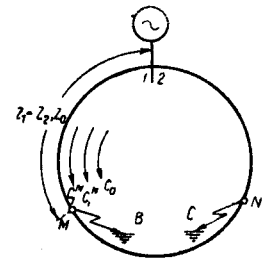


Рис. 9

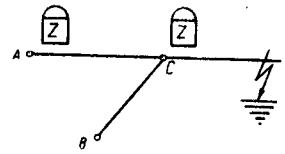


Рис. 10

Эти варианты (рис. 11, 12 и 13) встречаются в предложениях иностранных фирм и в проектах союзных организаций (Теплоэлектропроект, Мосэнерго и др.). Защита, работающая по любому из этих вариантов, может иметь как двухрелейное, так и трехрелейное выполнение.

Схемы 1 и 2 (рис. 11 и 12) были в свое время нами детально разобраны [5], причем высказывались сомнения отно-

[5] См. сноску 3, а также статью автора „Работа импеданцной защиты при двойных замыканиях на землю в разных точках". „Электричество" № 19, 1935.

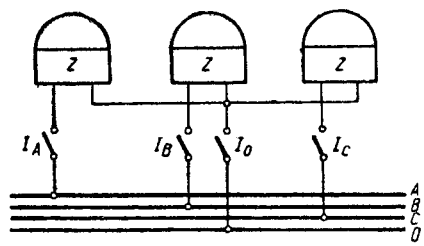


Рис. 11

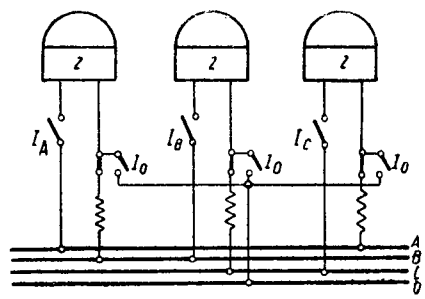


Рис. 12

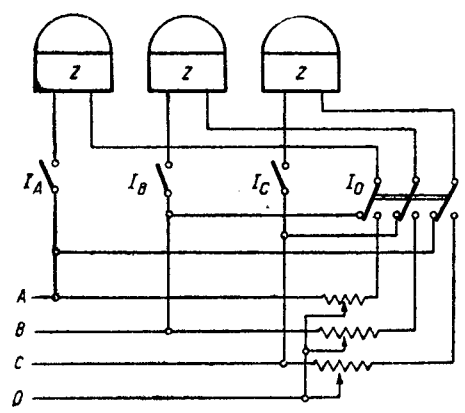


Рис. 13

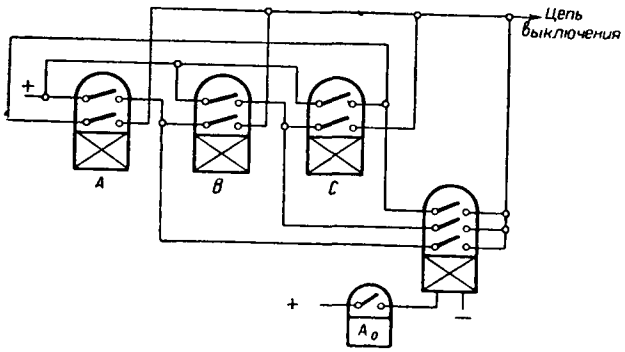


Рис. 14

сительно надежности первой схемы в связи с возможностью отказа от работы пускового органа одной из поврежденных фаз на участках с $I_0 = 0$.

Наряду с этим имеется опасение в отношении возможности неправильного действия защиты, осуществленной по первой схеме, на участке с $I_0 = 0$ вблизи места повреждения отстающей фазы (вследствие преуменьшенного замера импеданца).

Что касается схем 2 и 3, то их основным недостатком является неодинаковый замер импеданца при трехфазных и двухфазных к. з. Кроме того, схема 3 требует применения специальных повышающих автотрансформаторов.

Общим недостатком всех трех схем является возможность неправильной работы защиты на одном из участков с $I_0 = 0$ при наличии двухстороннего питания в случае, если ток неповрежденной фазы превысит ток трогания пусковых органов, а время выключения места повреждения опережающей фазы на участке с $I_0 \neq 0$ затянется (например вследствие наличия переходного сопротивления или отказа ближайшей защиты). При этом на одном из участков с $I_0 = 0$ орган направления неповрежденной фазы выберет направление в сторону ближайшего питающего конца и даст возможность защите действовать с наименьшим временем резервной ступени.

Во избежание этого автором было предложено снабдить схему 1 попарной циклической блокировкой на выходных промежуточных реле (рис. 14). В этом случае отпадают также все остальные возражения против схемы 1, высказанные выше.

Недостатком такой блокировки является в некоторых случаях отсутствие резерва на участке с $I_0 = 0$ при отказе защиты на участке с $I_0 \neq 0$ и действии пусковых органов только на одной из поврежденных фаз (на участке с $I_0 = 0$).

Однако в целом ряде случаев вероятность таких явлений практически отсутствует (из-за больших токов к. з., большого количества защищаемых последовательных участков с $I_0 \neq 0$ и т. д.). Благодаря же своей простоте и равенству замеров при всех видах повреждений схема 1 является наиболее заманчивой.

В заключение следует коснуться вопроса защиты двух параллельных линий при двойных замыканиях на землю в разных точках.

В работе, посвященной анализу поведения диференциальной направленной защиты двух параллельных линий при двойных замыканиях на землю в разных точках в сети с изолированной нейтралью, автором указывалось, что ложного действия диференциальной направленной защиты следует ожидать при каскадном отключении, в особенности при применении однофазных реле направления. При применении трехфазных реле вероятность ложного действия диференциальной направленной защиты при двойных замыканиях на землю значительно сокращается, но полностью все же не устраняется[6].

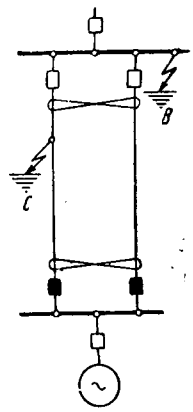


Рис. 15

В последнее время при проектировании защиты компенсированных сетей стала применяться блокировка диференциальной направленной защиты с помощью двух реле направления, реагирующих на мощность нулевой последовательности. Следует отметить, что подобная блокировка, к сожалению, имеет некоторые недостатки. Сюда относятся все те случаи, когда желательное с эксплоатационной точки зрения отключение поврежденной линии невозможно из-за блокировки диференциальной направленной защиты.

В качестве примера можно привести случай, изображенный на рис. 15. Действительно, из-за того, что при повреждении в пределах параллельных линий отстающей фазы диференциальная направленная защита бездействует, выключения происходят на головных участках (от максимальной или дистанционной защиты), и электроснабжение полностью прекращается (при наличии защиты шин выключение произойдет на приемном конце).

К сожалению, насегодня еще нет идеальной схемы диференциальной направленной защиты, полностью гарантирующей от ложных действий при двойных замыканиях на землю в разных точках и лишенной эксплоатационных недостатков.

---

[6] Поведение восьмерочной защиты Сименса при двойных замыканиях на землю в разных точках. „Бюллетень Мосэнерго" № 10, 1935.

О влиянии колебаний напряжения возбуждения на малые колебания ротора синхронной машины [1]

М. М. Ботвинник
Ленинградский индустриальный институт

ЗА ПОСЛЕДНИЕ годы проблема устойчивости установившегося движения синхронной машины стала весьма актуальной. Рост передаваемой мощности при одновременном увеличении протяженности линий заметно приближает системы передач к пределу их статической устойчивости.

Нормально коэфициент статической устойчивости системы передачи $\eta = \frac{P_{max}}{P_n} > 1$. В этом отношении P_{max} — предельная мощность, P_n — нормальная. С точки зрения использования системы передачи желательно иметь $\eta \leqslant 1$. Однако суть вопроса заключается в том, что при $\eta \leqslant 1$ машина не может устойчиво работать.

Устойчивость установившегося движения определяется знаком частной производной функции

$$\Phi(\Theta) = M_m + M_э$$

по углу Θ, где Θ — угол, составляемый поперечной осью ротора с синхронной осью системы, M_m — механический момент, $M_э$ — момент электромагнитных сил, обязанный взаимодействию токов ротора и статора. Движение будет устойчивым, когда $\frac{\partial \Phi}{\partial \Theta} < 0$.

Обычно M_m=const, следовательно, устойчивость движения определяется знаком производной $\frac{\partial M_э}{\partial \Theta}$.

Далее будет показано, что момент электромагнитных сил при малых колебаниях состоит из трех слагаемых:

$$M_э = \Delta\Theta M_s + \dot{\Theta} M_d + M_0,$$

где M_s — удельный синхронизирующий момент, M_d — удельный демпферный и M_0 — момент установившегося движения.

Отсюда видно, что при малых колебаниях $\frac{\partial M_э}{\partial \Theta} = M_s$, и устойчивость движения определяется величиной и знаком момента M_s.

Сам по себе этот момент еще не характеризует запаса устойчивости. Очевидно, что с возрастанием момента M_0 должен увеличиваться и синхронизирующий момент, чтобы запас был неизменен. Поэтому лишь коэфициент $\nu = \frac{M_s}{M_0}$ может дать представление об устойчивости движения.

Для того чтобы искусственно увеличить $\frac{\partial M_э}{\partial \Theta}$, надо изменять $M_э$, а это возможно только путем изменения возбуждения машины.

[1] Статья является изложением диссертационной работы, защищенной автором 28 июня 1937 г. на ученую степень кандидата технических наук в засед нии совета электромеханического факультета Ленинградского индустриального института.

Целью настоящей работы является исследование вопроса о влиянии колеблющегося возбуждения на устойчивость установившегося движения ротора синхронной машины.

Момент электромагнитных сил при малых колебаниях ротора. На рис. 1 изображена схема работы синхронной явнополюсной машины, соединенной линией передачи с шинами бесконечной мощности. Уравнения неустановившегося режима синхронной машины, данные проф. А. А. Горевым, для этой схемы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} &(\rho_d + p)\, x_d i_d + (1+s)\, x_q i_q + pe = U_\infty \sin\Theta, \\ &(1+s)\, x_d i_d - (\rho_q + p)\, x_q i_q + (1+s)\, e = U_\infty \cos\Theta, \\ &\mu p x_d i_d + (\rho_r + p)\, e = \rho_r E, \\ &C\dot{s} + e i_q + (x_d - x_q)\, i_d i_q = M_m. \end{aligned} \qquad (1)$$

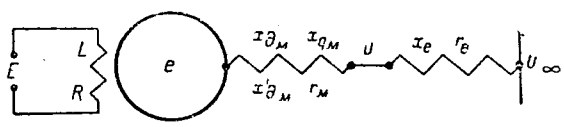


Рис. 1. Схема работы синхронного генератора с выступающими полюсами на сеть бесконечной мощности.
R — активное сопротивление и L — индуктивность цепи ротора; $x_{dм}$, $x'_{dм}$ и $x_{qм}$ продольная, продольная переходная и поперечная синхронные реактивности машины; $r_м$ — активное сопротивление статора; r_e и x_e — активное и реактивное сопротивления проводов между зажимами и шинами бесконечной мощности

Здесь i_d, i_q — продольный и поперечный токи статора;

x_d, x_q — продольная и поперечная синхронные реактивности системы с учетом внешних проводов;

$$\rho_d = \frac{r}{x_d}, \qquad \rho_q = \frac{x}{x_q}, \qquad \rho_r = \frac{R}{\omega L},$$

где r и R — соответственно активные сопротивления системы и цепи ротора, а L — индуктивность цепи ротора;

$s = \frac{\dot{\Theta}}{\omega}$ — скольжение ротора (положительное, когда ротор упреждает поле);

$p = \frac{d}{d\tau}$ — оператор ($\tau = \omega t$ — время в условных единицах);

e — амплитуда э. д. с., индуктированной в фазах статора при холостом ходе;

μ — коэфициент магнитной связи машины;

C — инерционная постоянная машины в секундах;

M_m — механический момент, действующий на вал ротора.

Предположим, что ротор машины совершает малые синусоидальные колебания:

$$\Theta = \Theta_0 + \Delta\Theta = \Theta_0 + \Delta\Theta_m \sin\gamma\tau. \qquad (2)$$

Тогда движение его задано, и в четвертом уравнении системы (1) нет надобности.

Предположим далее, что напряжение возбуждения E также колеблется с частотой колебаний ротора, но колебания его сдвинуты по фазе:

$$E = E_0 + \Delta E = E_0 + \Delta E_m \sin(\gamma\tau + \psi). \tag{3}$$

Для упрощения задачи будем считать, что активное сопротивление статора и линии передачи равны нулю [2] ($\rho_d = \rho_q = 0$).

Введем обозначения:

$$x_d i_d = u_d; \qquad x_q i_q = u_q; \qquad e = u_r, \tag{4}$$

и будем искать решение системы (1) в виде:

$$u_d = u_{d0} + \Delta u_d = u_{d0} + \sum_{n=1}^{\infty} (u_{dn} \sin n\gamma\tau + u'_{dn} \cos n\gamma\tau),$$

$$u_q = u_{q0} + \Delta u_q = u_{q0} + \sum_{n=1}^{\infty} (u_{qn} \sin n\gamma\tau + u'_{qn} \cos n\gamma\tau), \tag{5}$$

$$u_r = u_{r0} + \Delta u_r = u_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} (u_{rn} \sin n\gamma\tau + u'_{rn} \cos n\gamma\tau),$$

где u_{d0}, u_{q0} и u_{r0} не зависят от τ, а Δu — величины малые. Если еще учесть, что $s = \gamma\Delta\Theta_m \cos\gamma\tau$, то первые три уравнения системы (1) можно переписать так:

$$p(u_{d0} + \Delta u_d) + (1 + \gamma\Delta\Theta_m \cos\gamma\tau)(u_{q0} + \Delta u_q) + p(u_{r0} + \Delta u_r) = U_\infty\left(\sin\Theta_0 + \cos\Theta_0 \frac{\Delta\Theta}{1}\dots\right),$$

$$(1 + \gamma\Delta\Theta_m \cos\gamma\tau)(u_{d0} + \Delta u_d) - p(u_{q0} + \Delta u_q) +$$

$$+ (1 + \gamma\Delta\Theta_m \cos\gamma\tau)(u_{r0} + \Delta u_r) = U_\infty\left(\cos\Theta_0 - \sin\Theta_0 \frac{\Delta\Theta}{1}\dots\right),$$

$$\mu p(u_{d0} + \Delta u_d) + (\rho_r + p)(u_{r0} + \Delta u_r) = \rho_r(E_0 + \Delta E). \tag{6}$$

В правых частях первых двух уравнений системы (1) мы разложили $\sin\Theta$ и $\cos\Theta$ в ряд.

Пренебрегая величинами второго и высших порядков малости:

$$\Delta\Theta_m \cdot \Delta u;\ \sum_{n=2}^{\infty} (u_n \sin n\gamma\tau + u'_n \cos n\gamma\tau) \cdot \Delta^2\Theta \text{ и т. д.},$$

находим частное решение, которое дает вынужденные колебания системы:

$$u_d = A_1 \sin\gamma\tau + B_1 \cos\gamma\tau + C_1,$$

$$u_q = A_2 \sin\gamma\tau + B_2 \cos\gamma\tau + C_2, \tag{7}$$

$$u_r = A_3 \sin\gamma\tau + B_3 \cos\gamma\tau + C_3,$$

где

$$A_1 = \frac{b(\sigma\gamma^2 + \rho_r^2) - d(\sigma\gamma \sin\psi + \rho_r \cos\psi)}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2},$$

$$A_2 = U_\infty \cos\Theta_0 \Delta\Theta_m,$$

$$A_3 = \frac{-\sigma\mu\gamma^2 b + (\sigma\gamma \sin\psi + \rho_r \cos\psi)}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2},$$

$$B_1 = \frac{\mu\gamma\rho_r b - d(\rho_r \sin\psi - \sigma\gamma \cos\psi)}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2},$$

$$B_2 = 0, \tag{8}$$

$$B_3 = \frac{-\mu\gamma\rho_r b + d(\rho_r \sin\psi - \sigma\gamma \cos\psi)}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2},$$

$$C_1 = U_\infty \cos\Theta_0 - E_0,$$

$$C_2 = U_\infty \sin\Theta_0,$$

$$C_3 = E_0,$$

$$b = -U_\infty \sin\Theta_0 \Delta\Theta_m, \quad d = \rho_r \Delta E_m.$$

Зная u_d, u_q и u_r, можно найти момент электромагнитных сил, действующий на ротор:

$$-M_э = \frac{1}{x_q} u_q (u_r + u_d) - \frac{1}{x_d} u_d u_q; \tag{9}$$

или на основании (7) и (8):

$$-M_э = \sin\gamma\tau \left\{ \frac{1}{x_q}(U_\infty \cos\Theta_0 A_2 + bC_2) - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{x_d}\left[C_1 + C_2 \frac{b(\sigma\gamma^2 + \rho_r^2) - d(\sigma\gamma \sin\psi + \rho_r \cos\psi)}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2} \right] \right\} +$$

$$+ \cos\gamma\tau \left\{ -\frac{1}{x_d} C_2 \frac{\mu\gamma\rho_r b - d(\rho_r \sin\psi - \sigma\gamma \cos\psi)}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2} \right\} +$$

$$+ \sin^2\gamma\tau \left\{ \frac{1}{x_q} A_2 b - \frac{1}{x_d} A_2 \frac{b(\sigma\gamma^2 + \rho_r^2) - d(\sigma\gamma \sin\psi + \rho_r \cos\psi)}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2} \right\} +$$

$$+ \sin\gamma\tau \cos\gamma\tau \left\{ -\frac{1}{x_d} A_3 \frac{\mu\gamma\rho_r b - d(\rho_r \sin\psi - \sigma\gamma \cos\psi)}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2} \right\} +$$

$$+ \frac{1}{x_q} U_\infty \cos\Theta_0 C_2 - \frac{1}{x_d} C_2 C_1. \tag{10}$$

Четвертое из уравнений (1) дает:

$$C\dot{s} = M_m + M_э, \tag{11}$$

$\dot{s} = -\gamma^2\Delta\Theta_m \sin\gamma\tau$ и поэтому, очевидно, что M_m — величина переменная.

Предположим, что

$$M_m = \text{const}, \tag{12}$$

и ротор совершает малые колебания около положения установившегося движения. Тогда уравнение (2) уже не будет удовлетворяться, т. е. колебания будут несинусоидальными и могут быть затухающими.

Если же положить

$$\Delta\Theta \approx \Delta\Theta_m \sin\gamma\tau,$$

то равенство (10) даст выражение момента электромагнитных сил при малых колебаниях ротора и постоянстве механического момента на валу машины.

При дополнительном предположении, что

$$\Delta E_m = k\Delta\Theta_m \tag{13}$$

$M_э$ легко представить в виде:

$$-M_э = \Delta\Theta_m (A \sin\gamma\tau + B \cos\gamma\tau) +$$
$$+ \Delta^2\Theta_m (C \sin 2\gamma\tau + D \sin^2\gamma\tau) + F, \tag{14}$$

где A, B, C, D и F не зависят от τ.

Отсюда с точностью до квадрата малой вели-

[2] Случай $r \neq 0$ был также рассмотрен автором в диссертации.

чины $\Delta\theta_m$ получаем приближенное выражение $M_э$:

$$-M_э = \sin\gamma\tau\left\{\frac{1}{x_q}\left(U_\infty\cos\Theta_0 A_2 + bC_2\right) - \right.$$

$$\left. -\frac{1}{x_d}\left[C_1 + C_2\,\frac{b\left(\sigma\gamma^2+\rho_r^2\right) - d\left(\sigma\gamma\sin\psi + \rho_r\cos\psi\right)}{\sigma^2\gamma^2+\rho_r^2}\right]\right\} +$$

$$+\cos\gamma\tau\left\{-\frac{1}{x_d}C_2\,\frac{\mu\gamma\rho_r b - d\left(\rho_r\sin\psi - \sigma\gamma\cos\psi\right)}{\sigma^2\gamma^2+\rho_r^2}\right\} +$$

$$+\frac{1}{x_q}U_\infty\cos\Theta_0 C_2 - \frac{1}{x_d}C_2C_1. \qquad (15)$$

Преобразуем это выражение с помощью равенств (8) и (13):

$$-M_э = \Delta\Theta_m\sin\gamma\tau\left\{\frac{1}{x_d}E_0U_\infty\cos\Theta_0 + \left(\frac{1}{x_q}-\frac{1}{x_d}\right)U_\infty^2\cos 2\Theta_0 + \frac{1}{x_d}\,\frac{\mu\sigma\gamma^2}{\sigma^2\gamma^2+\rho_r^2}U_\infty^2\sin^2\Theta_0 + \right.$$

$$\left. +\frac{1}{x_d}U_\infty\sin\Theta_0\,\frac{k\rho_r\left(\sigma\gamma\sin\psi+\rho_r\cos\psi\right)}{\sigma^2\gamma^2+\rho_r^2}\right\} + \omega\gamma\Delta\Theta_m\cos\gamma\tau\left\{\frac{1}{\gamma\omega x_d}U_\infty\sin\Theta_0\,\frac{\gamma\mu\rho_r U_\infty\sin\Theta_0 + k\rho_r\left(\rho_r\sin\psi - \sigma\gamma\cos\psi\right)}{\sigma^2\gamma^2+\rho_r^2}\right\} +$$

$$+\frac{1}{x_d}E_0U_\infty\sin\Theta_0 + \left(\frac{1}{x_q}-\frac{1}{x_d}\right)\frac{1}{2}U_\infty^2\sin 2\Theta_0. \qquad (16)$$

Так как $\Delta\Theta_m\sin\gamma\tau = \Delta\theta$, а $\omega\gamma\Delta\Theta_m\cos\gamma\tau = \dot{\Theta}$, то $M_э$ можно представить в виде:

$$M_э = \Delta\theta M_s + \dot{\Theta}M_d + M_0. \qquad (17)$$

Влияние фазы колебаний напряжения возбуждения на величину синхронизирующего и демпферного моментов. Синхронизирующий момент $-M_s = f_1(\psi)$ достигает своих экстремальных значений при

$$\operatorname{tg}\psi_1 = \frac{\sigma\gamma}{\rho_r}, \qquad (18)$$

что возможно при $0 < \psi_1 < \frac{\pi}{2}$ и $\pi < \psi_1 < \frac{3\pi}{2}$. Если $0 < \Theta_0 < \pi$ и $0 < \psi_1 < \frac{\pi}{2}$, имеем максимум функции $f_1(\psi)$, при $\pi < \psi_1 < \frac{3\pi}{2}$ — минимум.

Демпферный момент $-M_d = f_2(\psi_2)$ при $\operatorname{tg}\psi_2 = -\frac{\rho_r}{\sigma\gamma}$ и $\frac{\pi}{2} < \psi_2 < \pi$ максимален; при $\frac{3\pi}{2} < \psi_2 < 2\pi$ этому значению $\operatorname{tg}\psi_2$ соответствует минимум M_d.

Легко заметить, что угол ψ_2, при котором демпферный момент максимален, на 90° больше угла ψ_1 (рис. 2).

Пример. На рис. 3 изображена схема работы явнополюсной синхронной машины на шины бесконечной мощности через линии передачи. Параметры этой схемы взяты обычно встречающиеся на практике.

Учитывая (8), напишем выражение синхронизирующего момента:

$$-M_s = \frac{1}{x_d}E_0U_\infty\cos\Theta_0 + \left(\frac{1}{x_q}-\frac{1}{x_d}\right)U_\infty^2\cos 2\Theta_0 +$$

$$+\frac{1}{x_d}\,\frac{\mu\sigma\gamma^2}{\sigma^2\gamma^2+\rho_r^2}U_\infty^2\sin^2\Theta_0 + \frac{1}{x_d}U_\infty\sin\Theta_0\,\frac{k\rho_r}{\sqrt{\sigma^2\gamma^2+\rho_r^2}}. \qquad (19)$$

Для случая *a* рис. 4:

$-M_s = 1{,}212 + 0{,}0282\,k$; при $k = 0$ $-M_s = 1{,}212$ $(\nu = 1{,}4)$.

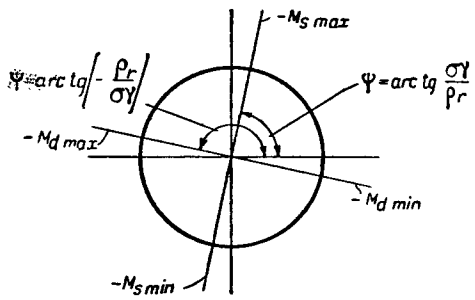


Рис. 2. Влияние на синхронизирующий и демпферный моменты фазы колебаний напряжения возбуждения

Для случая *b* — $M_s = 0{,}4 + 0{,}043\,k$. Если желательно иметь в случае *b* тот же момент — M_s, что и в случае *a*, то необходимо, чтобы

$$k = \frac{1{,}212 - 0{,}4}{0{,}043} \approx 19 \quad (\nu = 0{,}59).$$

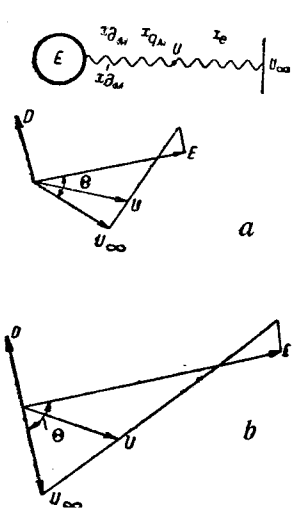


Рис. 3. Диаграммы работы явнополюсного синхронного генератора на сеть бесконечной мощности. $x_e = 0{,}457$; $x_{dм} = 1$; $x_{qм} = 0{,}6$; $x'_{dм} = 0{,}28$; $\rho_r = 0{,}00064$; $U = 1{,}1$; $U_\infty = 1$; $\gamma = 0{,}02$; *a* — $\Theta = 41°$; $P = 0{,}87$; $E = 1{,}72$; *b* — $\Theta = 90°$; $P = 2{,}06$; $E = 3$

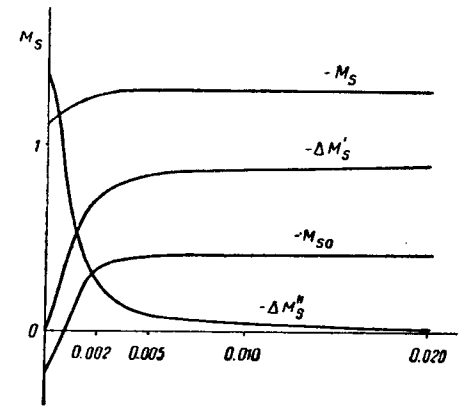


Рис. 4. Зависимость синхронизирующего момента от частоты малых колебаний при работе двойного регулятора

Для $\Delta\theta_m = 0{,}1$ $\Delta E_m = 1{,}9$. При частоте колебаний 1Hz $\gamma = 0{,}02$, имеем среднюю скорость подъема напряжения возбуждения $\frac{dE}{dt} = 7{,}6$. Если принять, например, относительную единицу напряжения равной 100 V, то средняя скорость подъема $\frac{dE}{dt} = 760 \frac{\text{V}}{\text{sec}}$.

О возможных конструкциях регулятора. Основная трудность создания регулятора, повышающего синхронизирующий момент, заключается в том, что действие его должно опережать колебания ротора. Например, для типовой схемы рис. 3 сдвиг фазы колебаний напряжения возбуждения относительно колебаний угла θ [формула (18)]:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\sigma\gamma}{\rho_r} = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}02}{0{,}00064} \approx 16$$

или

$$\psi \approx +\frac{\pi}{2}.$$

Следовательно, колебания E должны на 90° опережать колебания угла θ. Если же $\psi = 0$, увеличение синхронизирующего момента будет ничтожно. Кроме того, из рис. 2 очевидно, что при $\psi = 0$ ухудшается демпферный момент. Поэтому регулятор, работающий от величины θ, следует признать неудовлетворительным (при $\psi = 0$).

Обычно регуляторы возбуждения действуют от напряжения на зажимах машины. Напряжение на зажимах машины U колеблется относительно угла θ со сдвигом $\psi = \pi$. Так как напряжение E сдвинуто относительно U также на 180°, то в результате такой регулятор в лучшем случае (если он безинерционный) даст сдвиг $\psi = 0$, что, как уже отмечалось выше, неприемлемо.

Эти недостатки не присущи регулятору, действующему от величины скорости изменения угла θ. Действительно,

$$\Delta\theta = \Delta\theta_m \sin\gamma\tau; \quad \Delta\dot{\theta} = \gamma\Delta\theta_m \cos\gamma\tau,$$

т. е. колебания скорости на 90° опережают колебания угла θ. Если подобный регулятор вызывает колебания напряжения возбуждения, совпадающие по фазе с $\Delta\dot{\theta}$, то колебания E будут на 90° опережать колебания угла θ, и тем самым задача создания спережающих колебаний будет разрешена.

При таком регуляторе, создающем колебания возбуждения, пропорциональные скорости

$$\Delta E' = k'\Delta\theta_m = k'\gamma\Delta\theta_m$$

и коэфициент

$$k = k'\gamma \tag{20}$$

формулы (13) будет уже меняться с частотой малых колебаний ротора.

Выражение $-M_s$ (примем $\psi = 90°$) будет:

$$-M_s = \frac{1}{x_d} E_0 U_\infty \cos\theta_0 + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) U_\infty^2 \cos 2\theta_0 + \frac{1}{x_d} \frac{\mu\sigma\gamma^2}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2} U_\infty^2 \sin^2\theta_0 + \frac{1}{x_d} \frac{k'\sigma\gamma^2\rho_r}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2} U_\infty \sin\theta_0. \tag{21}$$

Легко заметить, что при значении $\gamma = \gamma_1$, где

$$\gamma_1 = \frac{\rho_r}{\sigma} \sqrt{-\frac{\frac{1}{x_d} E_0 U_\infty \cos\theta_0 + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) U_\infty^2 \cos 2\theta_0}{\frac{1}{x_d} E_0 U_\infty \cos\theta_0 + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) U_\infty^2 \cos 2\theta_0 + \frac{1}{\sigma x_d} U_\infty \sin\theta_0 (\mu U_\infty \sin\theta_0 + k'\rho_r)}}, \tag{22}$$

синхронизирующий момент равен нулю.

Таким образом при $\gamma \leqslant \gamma_1$ и $\theta_0 = 90°$ машина будет выпадать из синхронизма. Иначе можно сказать, что в этом случае машина выпадает из синхронизма с замедленной скоростью.

Следовательно, один регулятор, действующий от величины $\dot{\theta}$, не может удержать машину в синхронизме на неустойчивой части моментно-угловой характеристики.

Можно, однако, дополнить такой регулятор еще одним, действующим уже от угла θ, т. е. со сдвигом $\psi = 0$. Роль этого второго регулятора — удерживать машину в синхронизме при тех малых величинах $\gamma \leqslant \gamma_1$, при которых первый регулятор перестает действовать. Тогда удельный синхронизирующий момент (примем $\Delta E_m'' = k''\Delta\theta_m$):

$$-M_s = \frac{1}{x_d} E_0 U_\infty \cos\theta_0 + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) U_\infty^2 \cos 2\theta_0 + \frac{1}{x_d} \frac{\mu\sigma\gamma^2}{\sigma^2\gamma^2\rho_r^2} U_\infty^2 \sin^2\theta_0 + \frac{1}{x_d} \frac{(k'\sigma\gamma^2 + k''\rho_r)\rho_r}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2} U_\infty \sin\theta_0. \tag{23}$$

Величины k' и k'' должны быть так подобраны, чтобы при всех значениях γ $(0 < \gamma < \gamma_{max})$ момент $-M_s$ был бы больше заданного или равен ему.

Рассмотрим теперь действие такого двойного регулятора на конкретном примере схемы рис. 3.

Примем $k = 20$. Тогда

$$k' = \frac{k}{\gamma} = \frac{20}{0{,}02} = 1000.$$

Примем также $k'' = 2$. Исследуем, как изменяется синхронизирующий момент в функции γ для случая b рис. 3.

На рис. 4 изображен момент $-M_s = f(\gamma)$ для этого конкретного случая. $-M_{s0}$ — удельный синхронизирующий момент при отсутствии регуляторов; $-\Delta M_s'$ — приращение момента при работе регулятора, действующего от скорости $\dot{\theta}$; $-\Delta M_s''$ — приращение момента благодаря работе регулятора, действующего со сдвигом $\psi = 0$; $-M_s$ — суммарная кривая. Очевидно, что снабженная таким двойным регулятором машина не выпадет из синхронизма, так как при любом γ $-M_s > 0$.

Выясним, как влияет такой двойной регулятор на демпферный момент. В нашем случае

$$-M_d = \frac{1}{\gamma\omega x_d} U_\infty \sin\theta_0 \frac{\gamma\mu\rho_r U_\infty \sin\theta_0 + k'\gamma\rho_r^2 - k''\sigma\gamma\rho_r}{\sigma^2\gamma^2 + \rho_r^2}$$

или

$$-M_d = \frac{1}{\omega x_d}\frac{\rho_r}{\sigma^2\gamma^2+\rho_r^2}U_\infty \sin\Theta_0(\mu U_\infty \sin\Theta_0 + k'\rho_r - k''\sigma).$$

Разность $\mu U_\infty \sin\Theta_0 + k'\rho_r - k''\sigma = 0{,}122 > 0$.

Если учесть, что пренебрежение активным сопротивлением статора при угле $\Theta_0 = 90°$ уменьшает демпферный момент, то в действительности $-M_d$ будет еще больше.

В качестве второго регулятора вероятно можно использовать любой регулятор напряжения, хотя бы, например, типа Тирриля. Второй регулятор не должен быть обязательно быстродействующим, так как действие его сказывается при колебаниях ротора с периодом $10 \div 15$ sec.

Очевидно, при двойном регуляторе качания ротора складываются из двух колебаний различных периодов и имеют вид, изображенный на рис. 5.

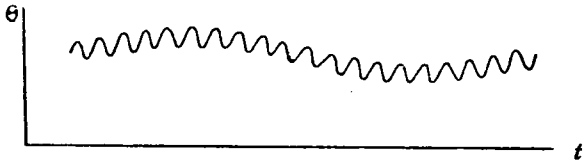


Рис. 5. Малые колебания ротора при работе машины на неустойчивой части моментно-угловой характеристики под действием двойного регулятора

Описание опыта. Эксперимент был проведен в лаборатории высокого напряжения им. проф. А. А. Смурова. Принципиальная схема опыта дана на рис. 6.

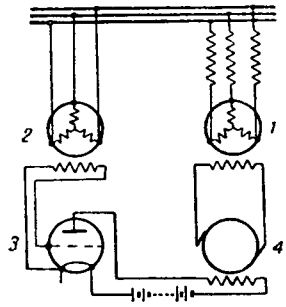


Рис. 6. Принципиальная схема опыта.
1 — синхронный генератор; *2* — вспомогательная машина; *3*—электронные лампы; *4* — возбудитель

На одном валу с генератором *1* была установлена машина *2* с трехфазным статором и однофазной обмоткой на роторе. Генератор через внешнюю реактивность приключался к шинам мощной сети; к тем же шинам приключался статор вспомогательной машины.

Обмотка статора вспомогательной машины создавала магнитный поток, вращающийся с синхронной скоростью. Поэтому, когда ротор генератора вращался синхронно, в роторе вспомогательной машины не индуктировалась э. д. с.; при качаниях вала машины в роторе вспомогательной машины наводилась э. д. с., пропорциональная $\dot{\theta}$. Эти колебания усиливались электронной лампой *3* и передавались в цепь возбуждения возбудителя *4*. Вследствие этого менялось напряжение возбуждения.

Колебания $\dot{\theta}$ на 90° опережают колебания θ. Вследствие большой индуктивности цепи возбуждения возбудителя это опережение уменьшалось до $25 \div 35°$. Так как постоянная времени цепи ротора генератора была очень малой, то величина $\psi_{max} = \operatorname{arctg}\frac{\sigma\gamma}{\rho_r}$ лежала в этих пределах. Опережение являлось достаточным для получения желательного действия схемы.

Действительная схема опыта изображена на рис. 7.

Фазорегулятор был включен для того, чтобы совмещать вращающийся магнитный поток статора машины *2* с поперечной осью ротора той же машины.

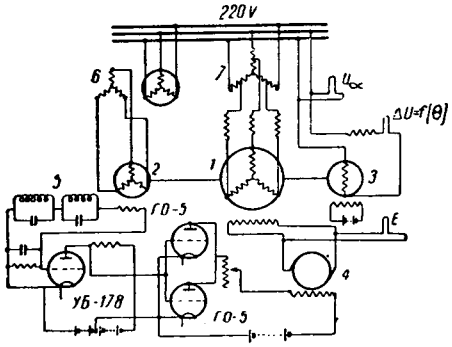


Рис. 7. Действительная схема опыта.
1 — генератор 5 kVA; *2* и *3* — вспомогательные машины; *4* — возбудитель; *5* — фильтры; *6* — фазорегулятор; *7* — автотрансформатор 220/52,4 V

При таком совмещении в обмотке ротора индуктируется наибольшая э. д. с.

Выяснилось, что в роторе машины *2*, кроме э. д. с. малой частоты, индуктируются э. д. с. частоты 25, 100 Hz и т. д. со значительными амплитудами. Вследствие этого электронные лампы детектировали, менялось среднее значение тока возбуждения возбудителя, и нормальная работа установки была невозможна. Для уменьшения амплитуд э. д. с. этих гармоник были применены фильтры[3].

Вспомогательная машина *3* служит для измерения[4] угла θ.

Во время опыта осциллографировались напряжение на зажимах возбудителя E, угол θ и напряжение шин U_∞.

Для проверки изложенной выше теории желательнее всего было бы добиться работы синхронного генератора на неустойчивой части моментно-угловой характеристики. Но, как сказано выше, для этого необходимо наличие автоматического регулятора напряжения, которого не было в распоряжении автора. Кроме того, ток возбуждения возбудителя был ограничен мощностью электронных ламп, и поэтому в условиях данной схемы нельзя было применить регулятор, поддерживающий напряжение на зажимах машины постоянным.

Ввиду этого пришлось ограничиться косвенной проверкой теории.

[3] Примененные лампы ГО-5 производства вакуумной лаборатории ЛЭТИ. Они обладают большой крутизной $\left(14\,\frac{mA}{V}\right)$; их нормальный анодный ток равен 200 mA.

[4] Этот метод измерения угла описан в работе проф. А. А. Горева и инж. С. Н. Анисимова (Труды ЛИИ № 5, 1936).

Как известно

$$\gamma = \frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{-M_s}{c}\omega - \left[\frac{M_d}{2c}\right]^2}. \qquad (24)$$

Проверка была произведена лишь для углов $\theta_0 = 30° \div 15°$. В этих пределах вторым членом подкоренного выражения можно пренебречь по сравнению с первым:

$$\gamma = \sqrt{\frac{-M_s}{\omega c}}, \qquad (25)$$

откуда

$$-M_s = \omega c \gamma^2. \qquad (26)$$

γ определялась из осциллограммы, и момент $-M_s$, полученный из формулы (26), сравнивался с его значением $-M_s$, подсчитанным по (19).

Параметры установки следующие: напряжение возбуждения $E = 35$ V; постоянная времени холостого хода $T_0 = 0{,}26$ sec; инерционная постоянная $c = 1{,}39$ sec; $x_{d\,н} = 2{,}55\ \Omega$, $x_{q\,н} = 0{,}95$ и $x'_{d\,н} = 0{,}412\ \Omega$; $r_м = 0{,}168\ \Omega$; активное и реактивное сопротивления приводов между зажимами машины и шинами $r_e = 0{,}089\ \Omega$ и $x_e = 0{,}246\ \Omega$; напряжение шин $U_\infty = 122{,}7$ V.

Если принять за относительные единицы: напряжения 29,2 V трехфазной мощности 1 kW, тока 11,4 A и сопротивления 2,56 Ω, то параметры схемы будут: $\rho_r = \frac{R}{\omega L} = 0{,}0122$; $\rho_d = \frac{r}{x_d} = 0{,}0916$; $\rho_q = \frac{r}{x_q} = 0{,}214$; $x_d = 1{,}093$; $x_q = 0{,}467$; $x'_d = 0{,}257$; $r = 0{,}1$; $\mu = 0{,}765$; $\sigma = 0{,}235$; $T_0 = 0{,}26$; $c = 6{,}95$.

Было снято восемь осциллограмм при $k = 0$ и восемь осциллограмм при $k \neq 0$. Две из них приведены на рис. 8.

Результаты обработки осциллограмм и вычислений величины $-M_s$ сведены в таблицу. На

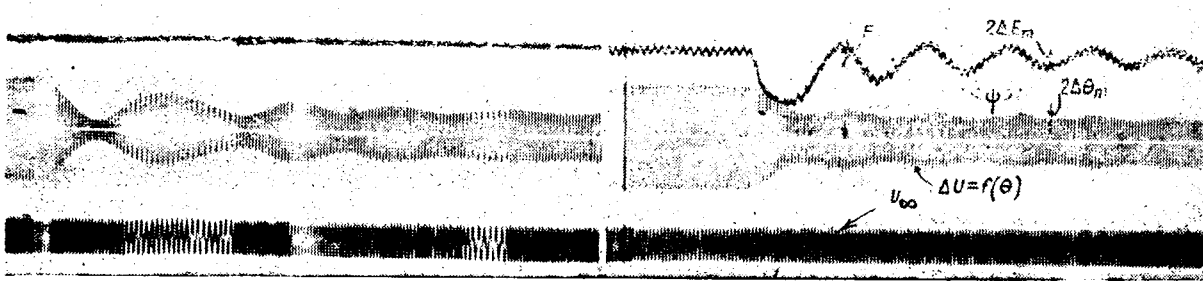


Рис. 8

рис. 9 даны расчетные и экспериментальные (обведены кружками) значения $-M_s$. Расчетная кривая $-M_s = f(\theta_0)$ при $k = 0$ совпала с экспериментом вполне удовлетворительно, что нельзя сказать о той же кривой при $k \neq 0$. Объясняется это, главным образом, тем, что обработка осциллограммы для второго случая сопряжена с большой погрешностью, так как требуется дополнительно определить из осциллограммы величины k и ϕ. Впрочем, среднее отклонение расчетных точек от экспериментальных в этом случае достигает всего лишь 7%.

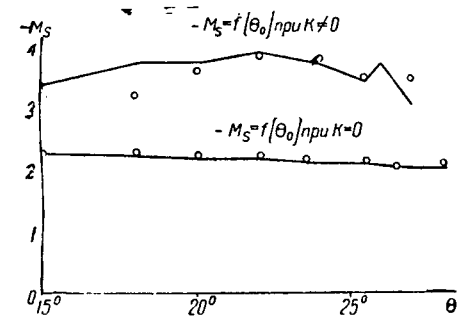


Рис. 9. Расчетные и экспериментальные значения $-M_s$

Таблица 1

Результаты обработки осциллограмм. Расчетные и экспериментальные значения $-M_s$

№ осциллограмм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
θ_0	28°	26°,5	25°,5	23°,5	22°	20°	18°	15°	27°	26°,5	25°,5	24°	22°	20°	18°	15°
γ	0,0312	0,0312	0,0316	0,0318	0,0322	0,0322	0,0324	0,0324	0,04	0,0444	0,04	0,0418	0,0423	0,0408	0,0384	0,0384
k	—	—	—	—	—	—	—	—	1,88	3,30	2,60	3,13	3,82	3,63	3,40	3,01
ϕ	—	—	—	—	—	—	—	—	30°	27°	40°	28°	34°	30°	28°	28°
$-M_{s\,эксп}$	2,12	2,12	2,18	2,21	2,26	2,26	2,29	2,29	3,49	4,30	3,49	3,82	3,89	3,63	3,22	3,22
$-M_{s\,расч}$	2,07	2,11	2,14	2,17	2,20	2,23	2,25	2,28	3,11	3,77	3,47	3,73	3,91	3,77	3,77	3,40

Величина синхронизирующего момента возросла в среднем на 65% по сравнению со значением $-M_s$ при $E=\text{const}$.

Осциллограммы рис. 10 показывают, что колебания напряжения могут иметь немалое значение и для динамической устойчивости. Действительно при $E=\text{const}$ предельное отклонение угла $\theta(\theta_{max})$ много больше [5].

Заключение. Эксперимент подтвердил теоретические соображения при работе синхронной машины на устойчивой части моментно-угловой характеристики. В результате его можно считать установленным, что:

а) синхронизирующий момент машины может быть значительно увеличен (без уменьшения демпферного момента) путем соответствующего устройства возбуждения машины, что имеет большое значение при работе синхронной машины при больших углах θ_0;

b) демпферный момент машины также может быть увеличен этим же способом (необходимо только обеспечить значения $\psi \geqslant 90°$), чем будет ликвидировано явление самораскачивания машины при малых положительных углах θ_0; самораскачивание, как известно, весьма опасно для длинных линий передач с компенсированной реактивностью.

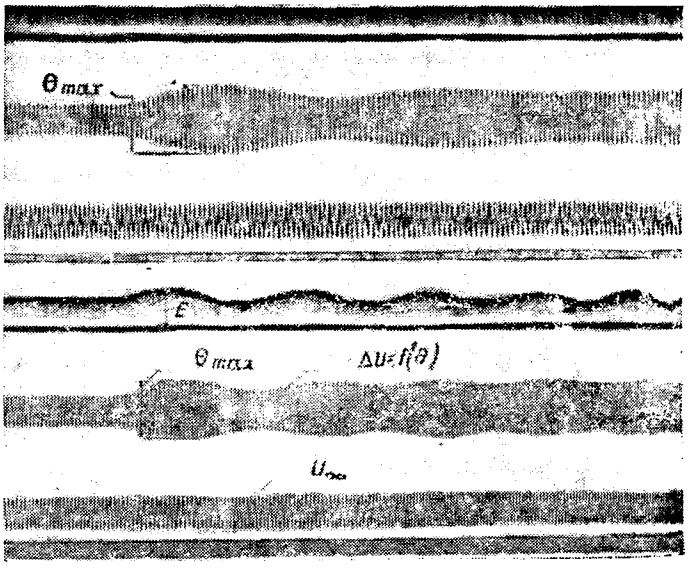


Рис. 10

[5] Автор при выполнении этой работы пользовался советами и указаниями проф. А. А. Горева. Весьма существенную помощь при проведении эксперимента оказал инж. С. С. Добротворский.

Пуск и торможение к.-з. двигателей под нагрузкой

А. А. Булгаков
Москва, завод „Серп и Молот"

РАСЧЕТ переходных процессов в электроприводах с к.-з. асинхронными двигателями, с учетом момента статического сопротивления на валу, представляет значительные трудности, обусловленные специфической формой механической характеристики асинхронного двигателя. Вследствие этого на практике обычно или пренебрегают статическим моментом или производят расчеты графическим путем для каждого частного случая, что требует много времени. В настоящей работе дается в сравнительно простой форме аналитический вывод точных формул для продолжительности пуска и торможения противотоком и для джоулевых потерь в роторе и графоаналитическим методом находятся простые формулы для практических расчетов. Момент статического сопротивления принимается постоянным.

При анализе мы будем исходить из уравнения механической характеристики Клосса, учитывающего активное сопротивление статора. Пренебрежение этим сопротивлением в случае к.-з. двигателей может привести к значительной погрешности.

Уравнение Клосса [1] имеет такой вид:

$$M = M_k \frac{2(1+as_k)}{\frac{s}{s_k}+\frac{s_k}{s}+2as_k}. \qquad (1)$$

Здесь M и M_k — момент и опрокидывающий момент;
s и s_k — скольжение и опрокидывающее скольжение;

$$a = \frac{r_1}{r'_2(1+\tau_1)^2}. \qquad (2)$$

По Клоссу опрокидывающее скольжение

$$s_k = \frac{(1+\tau_1)r'_2}{\sqrt{(1+\tau_2)^2 r_1^2 + [x_1+(1+\tau_1)x'_2]^2}} = \frac{I_{kj}r_2}{U}. \qquad (3)$$

Произведение as_k, величина которого не зависит от активного сопротивления ротора, может быть еще представлено так:

$$as_k = \frac{I_{kj}r_1}{U(1+\tau)} = b. \qquad (4)$$

Опрокидывающий момент

$$M_k = \frac{m_1 U^2}{9{,}81\omega_1} \cdot \frac{as_k}{2r_1[1+as_k]}. \qquad (5)$$

В этих формулах: r_1, r'_2, x_1, x'_2 — первичные и вторичные приведенные к цепи статора, активные сопротивления и реактанцы рассеяния; τ_1, τ_2 и τ — первичный, вторичный и общий коэфициенты рассеяния; I_{kj} — ток «идеального» к. з.; U — фазовое напряжение; ω_1 — угловая скорость вращающегося поля; m_1 — число фаз.

В области генераторного режима момент

$$M' = M'_k \frac{2(1-b)}{\frac{s}{s_k}+\frac{s_k}{s}-2b}.$$

Максимальный момент в генераторной области — M'_k выражается через опрокидывающий момент в двигательной соотношением:

$$-M'_k = M_k \frac{1+b}{1-b};$$

отсюда

$$-M' = M_k \frac{2(1+b)}{\frac{s}{s_k}+\frac{s_k}{s}-2b}. \qquad (6)$$

Дальнейшие выводы мы будем излагать в форме относительных единиц, позволяющей не только формально упростить выводы, но и сделать более наглядными и удобными для практических вычислений конечные результаты [2].

[1] A. f. E., B. 5, 1916.

[2] См. Л. Б. Гейлер, Новая форма уравнения движения электропривода, „Электричество" № 18, 1936.

В относительных единицах уравнение (1) запишется так:

$$\mu = 2(1+b)\frac{\sigma}{\sigma^2 + 2b\sigma + 1}, \qquad (7)$$

уравнение (6) —

$$\mu = 2(1+b)\frac{-\sigma}{\sigma^2 - 2b\sigma + 1}. \qquad (8)$$

В этих формулах

$$\mu = \frac{M}{M_k} \qquad (9)$$

относительный момент, а

$$\sigma = \frac{s}{s_k} \qquad (10)$$

„относительное" скольжение[3].

Вид механической характеристики в относительных единицах показан на рис. 1. Она имеет фиксированную точку $\sigma = 1$ опрокидывающего момента и перемещающуюся по кривой, в зависимости от s_k двигателя, точку начального момента, определяемую аргументом

$$\sigma_0 = \frac{1}{s_k} \qquad (11)$$

Для одного и того же значения относительного момента μ_x относительное скольжение в левой линейной ветви характеристики — σ_{x1} есть величина обратная относительному скольжению в правой, гиперболической ветви — σ_{x2}:

$$\sigma_{x1}\sigma_{x2} = 1. \qquad (12)$$

[3] Так как скольжение s — относительная величина, то термин „относительное" скольжение в применении к σ не совсем удачен. Лучше было бы пользоваться термином „числовые" единицы вместо термина „относительные" единицы.

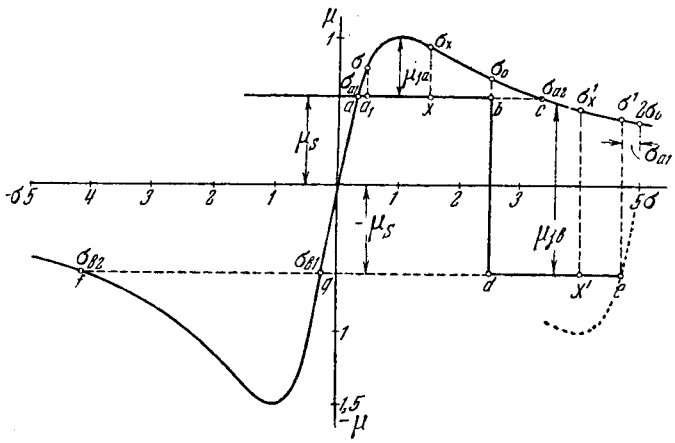
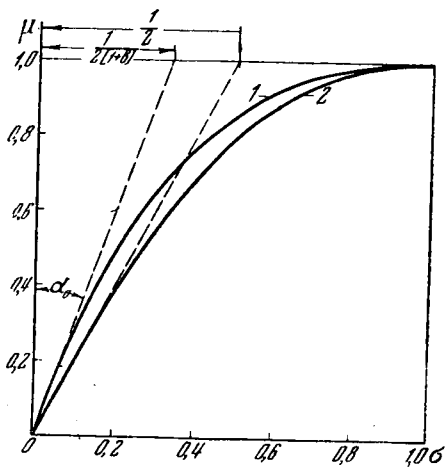


Рис. 1. К выводу формул для продолжительности пуска и торможения



с. 2. Влияние на механическую характеристику величины $b = as_к$. *1* — $b = 0{,}5$; *2* — $b = 0$

Нетрудно показать, что выражение $2(1+b)$, входящее в уравнения (7) и (8), есть величина обратная угловому коэфициенту характеристики в начальной ее точке $\sigma = 0$ (рис. 2) —

$$\frac{d\sigma}{d\mu_{\sigma=0}} = \frac{1}{2(1+b)} = \operatorname{tg}\alpha_0. \qquad (13)$$

Представим в форме относительных единиц уравнение движения электропривода:

$$M \mp M_s = J\frac{d\omega}{dt}, \qquad (14)$$

в котором M_s — момент статического сопротивления, J — момент инерции привода.

Верхний знак, здесь и ниже, относится к пуску, нижний — к торможению противотоком. Обозначим относительное время

$$\tau = \frac{t}{T_k}, \qquad (15)$$

где

$$T_k = \frac{J\omega_1 s_k}{M_k} \qquad (16)$$

постоянная времени пуска к.-з. двигателя[4].

Как будет показано ниже, эта постоянная равна времени, в течение которого двигатель, работая с опрокидывающей мощностью вращающегося поля, передаст ротору энергию, равную двойному запасу кинетической энергии инерционных масс привода, вращающихся с опрокидывающей скоростью.

Так как T_k отнесена к опрокидывающей точке характеристики, ее можно назвать „опрокидывающей" постоянной времени, в отличие от постоянной

$$T_н = \frac{I\omega_1 s_н}{M_н} = \frac{GD^2}{375}\frac{n_1}{M_н}s_н,$$

отнесенной к номинальным величинам.

Постоянные времени T_k и $T_н$ связаны соотношением:

$$\frac{T_k}{T_н} = \frac{M_н}{M_k}\cdot\frac{s_k}{s_н} = 1 + b\left(1 - \frac{M_н}{M_k}\right) + \sqrt{\left[1 + b\left(1 - \frac{M_н}{M_k}\right)\right]^2 - \left(\frac{M_н}{M_k}\right)^2}$$

или в относительных единицах

$$\frac{T_k}{T_н} = \frac{\mu_н}{\sigma_н}.$$

Разделим уравнение (14) на M_k, выразим угловую скорость ротора через скольжение и отнесем T_k к знаменателю правой части. После этих преобразований, используя обозначения (9) и (10), получим уравнение движения в относительной форме:

$$\mu \mp \mu_s = -\frac{d\sigma}{d\tau}. \qquad (17)$$

Знак минус в правой части показывает, что с ростом времени скольжение уменьшается.

Физический смысл уравнения движения (17) объясняется следующим образом (рис. 1).

Вначале двигатель работает в установившемся состоянии в точке e характеристики при скольжении σ_{a1}, соответствующем статическому моменту μ_s. Вместе с реверсом вращающегося поля двигателя его момент меняет знак, что соответствует переходу режима двигателя в точку σ' на характеристике обратного направления поля. Знак статического момента, обусловленного реактивными силами, при этом не меняется, так как еще не изменилась скорость ротора. Двигатель, вращаясь против поля, тормозится под воздействием момента $M_{jb} = M_д + M_s$, в точке $\sigma_0 = \frac{1}{s_k}$ переходит через скорость, равную нулю, и разбегается, согласно с направлением поля. Вместе с изменением знака скорости ротора меняется знак статического момента, как это видно из рис. 1, и ускоряющий момент определится как $M_{ja} = M_д - M_s$. Процесс пуска закончится в точке a_1, имеющей координаты μ_s, σ_{a1}. Таким образом процесс реверса двигателя, нагруженного статическим моментом, не описывается непрерывной функцией.

[4] Она отличается от постоянной пуска T_k по Рюденбергу на величину s_k в числителе. См. сноску 2.

Найдем значение того относительного скольжения, при котором заканчивается процесс пуска, т. е. при котором момент двигателя равен моменту статического сопротивления.

Решив уравнение

$$2(1+b)\frac{\sigma_a}{\sigma_a^2+2b\sigma_a+1}-\mu_s=0,$$

где σ_a — искомое значение относительного скольжения при пуске, соответствующее заданному значению μ_s, получим:

$$\sigma_{a1,2}=\left[\frac{1+b}{\mu_s}-b\right]\pm\sqrt{\left[\frac{1+b}{\mu_s}-b\right]^2-1}. \quad (18)$$

Два значения корня соответствуют двум точкам характеристики, в которых $\mu=\mu_s$. Второй корень σ_{a2} реально не существует вследствие разрыва функции M_s в точке $\sigma_0(\omega=0)$. Находиться же на участке $\sigma_{a2}<\sigma_0$ он не может, так как в последнем случае $M_s>M_{нач}$, т. е. пуск невозможен.

Аналогичным образом можно получить значения скольжения, обращающие в нуль избыточный момент в случае торможения.

Из уравнения

$$2(1+b)\frac{\sigma_b}{\sigma_b^2+2b\sigma_b+1}+\mu_s=0$$

следует:

$$\sigma_{b\,1,2}=-\left[\left(\frac{1+b}{\mu_s}+b\right)\mp\sqrt{\left(\frac{1+b}{\mu_s}+b\right)^2-1}\right]. \quad (19)$$

Эти корни отрицательны, т. е. формально находятся в генераторной области (рис. 1). Реально они также не существуют ни в режиме торможения противотоком ни при рекуперативном торможении.

Как и в случае пуска, корни взаимно обратны, но при одних и тех же значениях μ_s их величина отлична от величины корней $\sigma_{a\,1,2}$ в случае пуска.

Корни σ_a и σ_b мы в дальнейшем используем в качестве промежуточного аргумента, заменяя через них момент статического сопротивления, что позволяет придать всем выводам предельно простую и наглядную форму, приемлемую для практических вычислений.

Относительный момент статического сопротивления из формулы (18) выразится через σ_1 и σ_2 как

$$\mu_s=\frac{2(1+b)}{\sigma_{a1}+\sigma_{a2}+2b}, \quad (20)$$

а из формулы (19)

$$\mu_s=\frac{2(1+b)}{\sigma_{b1}+\sigma_{b2}-2b}, \quad (21)$$

что можно получить и непосредственно из уравнений (7) и (8).

Продолжительность пуска и торможения противотоком. Функция, связывающая скорость (или скольжение) и время при пуске и торможении к.-з. двигателей трансцендентна относительно скольжения. Поэтому прямой зависимости скорости от времени нельзя получить и при решении задачи мы вынуждены ограничиться выводом формул для продолжительности пуска и торможения.

Выражение для относительной продолжительности пуска τ_a получим из уравнения движения (17) после подстановки в него μ из (7):

$$d\tau=-\frac{\sigma^2+2b\sigma+1}{\mu_s\left[-\sigma^2+2\left(\frac{1+b}{\mu_s}-b\right)\sigma-1\right]}d\sigma.$$

Формула (18) дает:

$$\frac{1+b}{\mu_s}-b=\frac{\sigma_{a1}+\sigma_{a2}}{2}. \quad (22)$$

Откуда, учитывая также равенство (12), получаем:

$$d\tau=-\frac{\sigma^2+2b\sigma+1}{\mu_s(\sigma-\sigma_{a1})(\sigma_{a2}-\sigma)}d\sigma. \quad (23)$$

Интегрируя (23) и воспользовавшись формулой (20), находим:

$$\tau_a=\frac{1}{\mu_s}\left\{(\sigma-\sigma_0)-\frac{2b+\sigma_{a1}+\sigma_{a2}}{\sigma_{a2}-\sigma_{a1}}\left[\sigma_{a1}\ln\frac{\sigma-\sigma_{a1}}{\sigma_0-\sigma_{a1}}-\sigma_{a2}\ln\frac{\sigma_{a2}-\sigma}{\sigma_{a2}-\sigma_0}\right]\right\}. \quad (24)$$

При определении конечной продолжительности пуска верхний предел может быть взят только условно, как величина несколько бо́льшая, чем установившееся скольжение σ_{a1}, например, как

$$\sigma=\sigma_{a1}+\Delta,$$

так как теоретически установившееся скольжение достигается только при $t=\infty$.

Для случая пуска вхолостую получить продолжительность пуска из выражения (24) прямой подстановкой $\mu_s=0$ нельзя, так как такая подстановка приводит к неопределенности. Исходное выражение для $d\tau$ позволяет для этого случая получить:

$$\tau_{a0}=\frac{1}{2(1+b)}\left[\frac{\sigma_0^2-\sigma^2}{2}+2b(\sigma_0-\sigma)+\ln\frac{\sigma_0}{\sigma}\right]. \quad (25)$$

Аналогичным образом найдем выражения для продолжительности торможения. Из уравнений (17), (8) и (19) можно получить:

$$d\tau=-\frac{\sigma^2+2b\sigma+1}{\mu_s(\sigma+\sigma_{b1})(\sigma+\sigma_{b2})}d\sigma. \quad (26)$$

Здесь и в дальнейшем мы берем арифметическое значение корней σ_{b1}, σ_{b2}, почему они для случая торможения и входят со знаком плюс.

Интеграция дает:

$$\tau_b=\frac{1}{\mu_s}\left\{(\sigma-\sigma_0)+\frac{-2b+\sigma_{b1}+\sigma_{b2}}{\sigma_{b2}-\sigma_{b1}}\left[\sigma_{b1}\ln\frac{\sigma_{b1}+\sigma}{\sigma_{b1}+\sigma_0}-\sigma_{b2}\ln\frac{\sigma_{b2}+\sigma}{\sigma_{b2}+\sigma_0}\right]\right\}. \quad (27)$$

Верхний предел интегрирования попрежнему

$$\sigma_0=\frac{1}{s_к},$$

а нижний можно принять равным

$$\sigma=2\sigma_0-\sigma_{a1}.$$

В случае торможения вхолостую продолжительность его выразится той же формулой (25), что и для пуска с соответствующим изменением пределов.

Хотя полученные нами формулы и несколько громоздки, но структура их проста и наглядна [5]. Графически формула (24) может быть представлена следующим образом. Разность $\sigma_{a2}-\sigma_{a1}$ есть отрезок ac (рис 1) прямой $\mu_s=\text{const}$, заключенный между ветвями механической характеристики. Проекция x точки переменного скольжения σ_x, перемещающейся в процессе пуска по характеристике, делит его на отрезки, равные разностям $\sigma-\sigma_{a1}$ и $\sigma_{a2}-\sigma$. Дробь $\frac{\sigma-\sigma_{a1}}{\sigma_0-\sigma_{a1}}$ представится отношением отрезков $\frac{aa_1}{ab}$, а $\frac{\sigma_{a2}-\sigma}{\sigma_{a2}-\sigma_0}$ — отношением $\frac{a_1c}{bc}$.

В формуле (27) для продолжительности торможения разность $\sigma_{b2}-\sigma_{b1}$ изобразится отрезком fg прямой $\mu_s=\text{const}$ между ветвями кривой момента в генераторной области. Суммы $\sigma_{b1}+\sigma$ и $\sigma_{b2}+\sigma$ есть расстояния gx_1' и fx' проек-

[5] См. для сравнения соответствующие формулы в курсе проф. Ринкевича „Электрическое распределение механической энергии", 1933 г., ч. 1, стр. 197, формула 127 и стр. 217–218, формула 152.

ции x' точки переменного скольжения σ_x на прямую $-\mu_s = \text{const}$ от концов этого отрезка fg, дроби $\frac{\sigma_{b1}+\sigma}{\sigma_{b1}+\sigma_0}$ и $\frac{\sigma_{b2}+\sigma}{\sigma_{b2}+\sigma_0}$ представятся отношениями отрезков $\frac{ge}{gd}$ и $\frac{ef}{df}$.

Приведем полученные нами формулы также и в обычной размерной форме.

Продолжительность пуска вхолостую

$$t_{a0} = \frac{T_k}{2(1+b)}\left[\frac{1-s^2}{2s_k^2} + 2b\,\frac{1-s}{s_k} + \ln\frac{1}{s}\right]. \qquad (28)$$

Продолжительность пуска под нагрузкой

$$t_a = \frac{T_k}{\mu_s s_k}\left[(s-1) - \frac{s_{a1}+s_{a2}+2bs_k}{s_{a2}-s_{a1}}\left(s_{a1}\ln\frac{s-s_{a1}}{1-s_{a1}} - s_{a2}\ln\frac{s_{a2}-s}{s_{a2}-1}\right)\right]. \qquad (29)$$

Продолжительность торможения вхолостую

$$t_{b0} = \frac{T_k}{2(1+b)}\left[\frac{3}{2s_k^2} + 2b\,\frac{1}{s_k} + \ln 2\right], \qquad (30)$$

а под нагрузкой

$$t_b = \frac{T_k}{\mu_s s_k}\left[(1-s) + \frac{s_{b1}+s_{b2}-2bs_k}{s_{b2}-s_{b1}}\left(s_{b1}\ln\frac{s_{b1}+s}{1+s_{b1}} - s_{b2}\ln\frac{s_{b2}+s}{s_{b2}+1}\right)\right]. \qquad (31)$$

Индексы здесь имеют тот же смысл, что и прежде.

При вычислениях по формулам (24), (27) или (29) и (31) практически удобнее задаваться сначала значениями σ_1 или s_1, для которых вычислять μ_s и t_a или t_b. Значения обратных корней s_2, согласно формулам (10) и (12), выразятся через s_1 как

$$s_2 = \frac{s_k^2}{s_1}. \qquad (32)$$

Энергия джоулезых потерь в роторе. Мощность потерь в роторе

$$P_{2дж} = M\omega_1 s.$$

Разделив и умножив это равенство на „опрокидывающую" мощность двигателя

$$P_k = M\omega_1 s_k, \qquad (33)$$

т. е. на мощность вращающегося поля, развиваемую им при опрокидывающем скольжении, получим выражение для потерь в роторе в относительных единицах

$$\frac{P_{2дж}}{P_k} = \mu\sigma = 2(1+b)\,\frac{\sigma^2}{\sigma^2+2b\sigma+1}. \qquad (34)$$

Энергия джоулевых потерь в относительных единицах

$$\Theta_k = \frac{W_{2дж}}{W_k} = \int_0^\tau \mu\sigma\,d\tau, \qquad (35)$$

где

$$W_k = P_k T_k$$

представляет энергию вращающегося поля, которую оно передаст ротору при опрокидывающей мощности за время, равное постоянной времени пуска T_k. Из (16) и (33) видно, что эта величина равна двойному запасу кинетической энергии инерционных масс привода, вращающихся с опрокидывающей скоростью ротора

$$W_k = 2\frac{J\omega_1^2 s_k^2}{2}.$$

Хотя величина относительной энергии потерь Θ_k и построена в той же системе, что и другие относительные единицы, именно отнесена к опрокидывающей точке механической характеристики, однако практически удобнее потери в роторе относить к запасу кинетической энергии привода при синхронной скорости, примерно равному потерям в роторе при пуске вхолостую, т. е. выражать относительные потери энергии в роторе как

$$\Theta_0 = \frac{W_{2дж}}{\frac{J\omega_1^2}{2}} = 2s_k^2\Theta_k. \qquad (36)$$

Подставив в (35) $d\tau$ из (23), проинтегрировав и заменив μ_s его значением из (20), получим:

$$\Theta_{ka} = (2b+\sigma_{a1}+\sigma_{a2})\left\{(\sigma-\sigma_0) - \frac{1}{\sigma_{a2}-\sigma_{a1}}\times\right.$$
$$\left.\times\left[\sigma_{a1}^2\ln\frac{\sigma-\sigma_{a1}}{\sigma_0-\sigma_{a1}} - \sigma_{a2}^2\ln\frac{\sigma_{a2}-\sigma}{\sigma_{a2}-\sigma_0}\right]\right\}. \qquad (37)$$

Аналогичным образом, для случая торможения

$$\Theta_{kb} = (-2b+\sigma_{b1}+\sigma_{b2})\left\{(\sigma-\sigma_0) + \frac{1}{\sigma_{b2}-\sigma_{b1}}\times\right.$$
$$\left.\times\left[\sigma_{b1}^2\ln\frac{\sigma_{b1}+\sigma}{\sigma_{b1}+\sigma_0} - \sigma_{b2}^2\ln\frac{\sigma_{b2}+\sigma}{\sigma_{b2}+\sigma_0}\right]\right\}. \qquad (38)$$

После перехода к размерным величинам формулы (37) и (38) получают вид:

$$W_{2дж.\,a} = \frac{J\omega_1^2}{2}\,4(1+b)\,s_k\,\frac{M_k}{M_s}\times$$
$$\times\left[(s-1) - \frac{s_{a1}^2}{s_{a2}-s_{a1}}\ln\frac{s-s_{a1}}{1-s_{a1}} + \frac{s_{a2}^2}{s_{a2}-s_{a1}}\ln\frac{s_{a2}-s}{s_{a2}-1}\right] \qquad (39)$$

для потерь при пуске и

$$W_{2дж.\,b} = \frac{J\omega_1^2}{2}\,4(1+b)\,s_k\,\frac{M_k}{M_s}\times$$
$$\times\left[(s-1) + \frac{s_{b1}^2}{s_{b2}-s_{b1}}\ln\frac{s_{b1}+s}{s_{b1}+1} - \frac{s_{b2}^2}{s_{b2}-s_{b1}}\ln\frac{s_{b2}+s}{s_{b2}+1}\right] \qquad (40)$$

для потерь при торможении противотоком.

Суммарные потери на джоулево тепло в обмотках статора и ротора можно вычислять с помощью коэфициентов относительных потерь Θ_a и Θ_b:

$$W_{дж} = \frac{J\omega_1^2}{2}\,\Theta_{a,b}\left(1+\frac{r_1}{r_2'}\right)\ [\text{kg.m}] \qquad (41)$$

или

$$W_{дж} = \frac{GD^2 n_1^2}{730}\,\Theta_{a,b}\left(1+\frac{r_1}{r_2'}\right)\ [\text{kWsec}]. \qquad (42)$$

Более точно эти потери можно вычислять, исходя из схемы замещения с вынесенной на внешние клеммы „нулевой ветвью" по формуле:

$$W'_{дж} = W_{дж} + m_1 I_0^2 r_1 t_{a,b}, \qquad (43)$$

где I_0 — фазовый ток холостого хода.

Формулы для практических расчетов. На основе анализа полученных выше точных формул мы получили более простые и удобные к применению формулы, допускающие незначительную погрешность. С этой целью на рис. 3—7 построены в системе относительных единиц кривые переходных процессов, вычисленные по точным формулам для $b = 0{,}35$: $\sigma = f(\tau)$ (рис. 3); $\frac{\tau_{a,b}}{\tau_{0a,b}} = \frac{t_{a,b}}{t_{0a,b}} = f(\mu_s)$ (рис. 4 и 5); Θ_{0a} и $\Theta_{0b} = f(\mu_s)$ (рис. 6 и 7).

Начало кривой пуска (рис. 3) определяется точкой $\sigma_0 = \frac{1}{s_k}$, начало кривой торможения — точкой $\sigma = \frac{2}{s_k}$, или, точнее, точкой $\sigma = \frac{2-s_{a1}}{s_k}$, конец — точкой σ_0. При

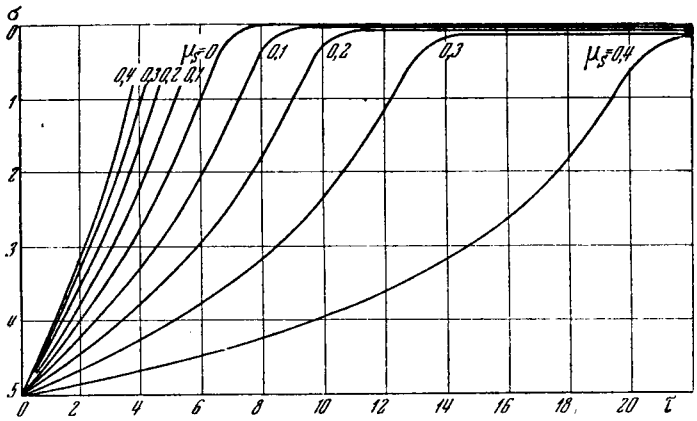


Рис. 3. Универсальные кривые пуска и торможения противотоком

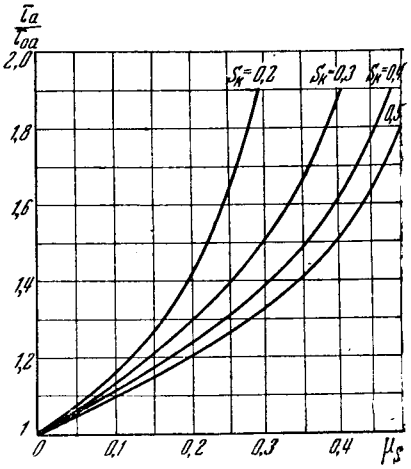


Рис. 4. Универсальные кривые продолжительности пуска $\left(t_a = t_{0a}\frac{\tau_a}{\tau_{0a}}\right)$

реверсе скорость изменяется сначала по кривой торможения, семейство которых расположено левее кривой $\mu_s = 0$, затем в точке σ_0 переходит на кривую пуска, семейство которых расположено правее кривой $\mu_s = 0$. В кривую — $\sigma = f(\tau)$ при $\mu_s = 0$ укладывается все семейство классических кривых пуска Рюденберга, построенных для различных s_k. Переход от масштаба относительного скольжения к масштабу скорости производится согласно пропорциональности:

$$n_1 \equiv \left(\sigma_1 = \frac{1}{s_k}\right) \equiv (s = 1).$$

Процесс пуска (рис. 4) принят закончившимся при скольжении $s = s_{a1} + \Delta$, где $\Delta = 0{,}05$, что, примерно, соответствует точке перегиба кривой скорости, за которой ускорение быстро падает.

Такие кривые в относительных единицах можно применять для графического определения соответствующих величин в качестве увиверсальных кривых, так как они пригодны для всех к.-з. двигателей с нормальным пазом, если, допуская известную погрешность, пренебречь влиянием параметра b. В действительности параметр $b = as_k$ изменяется для разных двигателей в функции от полюсного деления гиперболически, примерно от $b = 0{,}5$ до $b = 0{,}1$ и в небольшой степени зависит от напряжения машины [6].

Графический анализ кривых рис. 4—7 показывает, что все они являются гиперболами вида:

$$y = \frac{1}{1 \mp k\mu_s}, \qquad (44)$$

где y обозначает $\frac{\tau_a}{\tau_{0a}}$, $\frac{\tau_b}{\tau_{0b}}$, Θ_{0a} и Θ_{0b}. Знак минус относится к пуску, плюс — к торможению.

Действительно, функции, обратные этим кривым $\left[\frac{1}{y} = f(\mu_s)\right]$, с большой точностью можно считать прямыми в диапазоне изменения переменных, имеющем практическое значение. Следовательно, угловой коэфициент k этих кривых можно считать независящим от μ_s. В зависимости от s_k он изменяется гиперболически:

$$k = p + \frac{q}{s_k}.$$

Коэфициены p и q можно также с большой точностью считать постоянными.

Значения k: для продолжительности пуска —

$$k_{\tau a} = 0{,}4 + \frac{0{,}22}{s_k}; \qquad (45)$$

для потерь при пуске

$$k_{\Theta a} = 0{,}6 + \frac{0{,}22}{s_k}; \qquad (46)$$

для продолжительности и потерь торможения

$$k_{\tau b} = k_{\Theta b} = 0{,}8 + \frac{0{,}5}{s_k}. \qquad (47)$$

Эти значения k получены для значения $b = 0{,}35$. Влияние b на продолжительность пуска и торможения учтем тем, что в окончательных формулах значения τ_{0a} и τ_{0b} возьмем точные — согласно формулам (25) или (28) и (30).

Влияние параметра b на потери учтем следующим образом. На основании формул (37) и (38) можем написать:

$$\frac{\Theta_x}{\Theta_{0,35}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 \pm 2b}{\sigma_1 + \sigma_2 \pm 0{,}7}, \qquad (48)$$

где $\Theta_x = \Theta_{a,b}$ при $b = x$; $\Theta_{0,35} = \Theta_{a,b}$ при $b = 0{,}35$. Знак

[6] По данным Клосса, опубликованным в 1916 г., которые теперь, вследствие прогресса в использовании активных материалов, требуют коррективов.

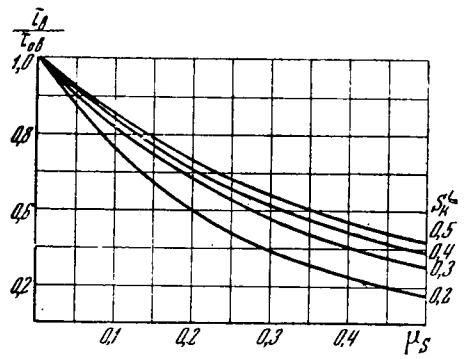


Рис. 5. Универсальные кривые продолжительности торможения

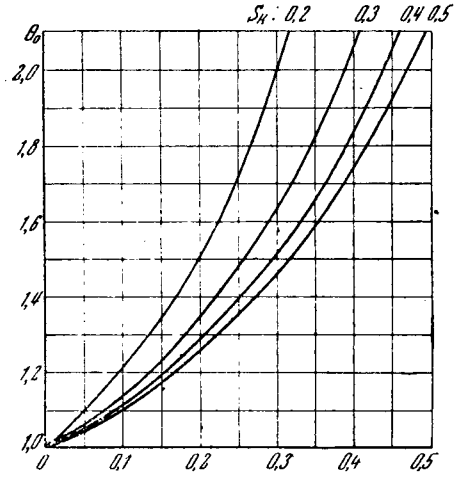


Рис. 6. Универсальные кривые потерь в меди ротора при пуске $\left(W_{2\,дж.\,a} = \frac{\Theta_0 J \omega_1^2}{2}\right)$

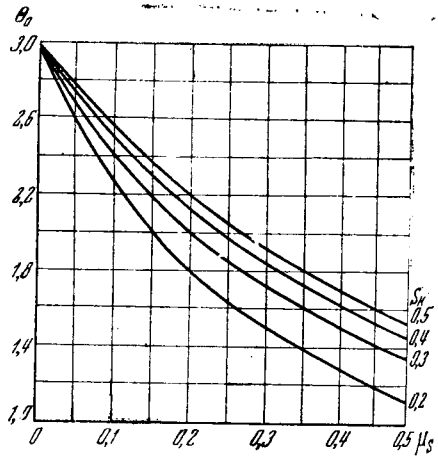


Рис. 7. Универсальные кривые потерь в меди ротора при торможении противотоком $\left(W_{2\,дж.\,b} = 3\frac{\Theta_0 J \omega_1^2}{2}\right)$

плюс и индекс a относятся к пуску, знак минус и индекс b — к торможению. Численный анализ равенства (48) показывает, что ему можно придать вид:

$$\frac{\Theta_x}{\Theta_{0,35}} = 1 \pm l\,\mu_s, \qquad (49)$$

где l — функция b, весьма незначительно зависящая от μ_s. В зависимости от b (как для пуска, так и для торможения) функция l с большой точностью выражается линейным уравнением:

$$l = 0{,}8b - 0{,}28. \qquad (50)$$

На основании всех этих соображений напишем расчетные формулы в окончательной форме. Подставив в формулу (44) соответствующие величины из (45) и (28) и воспользовавшись (16), получаем, что продолжительность пуска

$$t_a = \frac{J\omega_1}{2(1+b)} \cdot \frac{1{,}9b + \frac{1}{2s_k} + 3s_k}{M_k - \left(0{,}4 + \frac{0{,}22}{s_k}\right) M_s}, \qquad (51)$$

продолжительность торможения, согласно (44), (47), (30) и (16)

$$t_b = \frac{J\omega_1}{2(1+b)} \cdot \frac{2b + \frac{3}{2s_k} + 0{,}69s_k}{M_k + \left(0{,}8 + \frac{0{,}5}{s_k}\right) M_s}. \qquad (52)$$

Из формул (44), (46), (49), (50) и (44), (47), (49), (50) получаем, соответственно, для джоулевых потерь в роторе

$$W_{2\,дж.\,a} = \frac{M_k + (0{,}8b - 0{,}28) M_s}{M_k - \left(0{,}6 + \frac{0{,}22}{s_k}\right) M_s} \cdot \frac{J\omega_1^2}{2} \qquad (53)$$

при пуске и

$$W_{дж.\,b} = \frac{M_k - (0{,}8b - 0{,}28) M_s}{M_k + \left(0{,}8 + \frac{0{,}5}{s_k}\right) M_s} \cdot 3\,\frac{J\omega_1^2}{2} \qquad (54)$$

при торможении.

В формуле (51) принято, что пуск вхолостую заканчивается при скорости 0,95 синхронной. Формулы (51) — (54) были проверены сравнением по точкам, с точными формулами (29), (31), (39) и (40), для двигателей с s_k до 0,5. Результат проверки показал, что при относительной нагрузке $\mu_s = 0{,}25$ погрешность формул для продолжительности пуска и торможения не превышает, примерно, 2%, а погрешность формул для потерь — около 1%. В обоих случаях с уменьшением μ_s погрешность уменьшается и равна 0 при $\mu_s = 0$. Имея в виду условную точность „точных" уравнений механической характеристики, не учитывающих таких факторов, как насыщение[7], а также погрешности в определении статического момента, точность наших приближенных формул следует признать более чем удовлетворительной. В то же время они достаточно просты, чтобы получить практическое применение и успешно конкурировать с графическими методами определения соответствующих величин.

[7] Погрешность, обусловленная насыщением, может быть сведена до минимума, если значения реактансов рассеяния в формулах для M_k и s_k относить не к номинальному току, а к пусковому, т. е. к ненасыщенному участку характеристики. Тогда погрешность формул для торможения будет ничтожна, а формул для пуска — минимальна.

Квадратичная система возбуждения электрических машин

Д. П. Морозов, П. С. Козлов

Московский энергетический институт им. Молотова

КВАДРАТИЧНАЯ система возбуждения электрических машин применяется в целом ряде ответственных и разнообразных по своему назначению установок. Этот не совсем удачный термин подразумевает, что генератор постоянного тока (возбудитель) питает обмотку возбуждения главной машины, причем регулирование намагничивающего тока этой последней осуществляется путем изменения параметров в цепи возбуждения возбудителя (рис. 1). Ответственное применение эта система возбуждения имеет в схемах электропривода реверсивных прокатных станов.

В ряде случаев возбудитель снабжается сериесной противокомпаундной обмоткой, существенно влияющей на работу всей установки. Фирма AEG выполняет с противокомпаундной обмоткой возбудитель генераторов, обслуживающих двигатели реверсивных станов. Фирма GEC снабжает такой обмоткой возбудитель реверсивного двигателя. В обоих случаях наличие противокомпаундной обмотки обеспечивает форсированное установление переходного процесса для тока возбуждения главной машины при изменении параметров (сопротивления) в цепи ее возбуждения или в цепи возбуждения возбудителя.

Отношение ампер-витков последовательной обмотки к ампер-виткам основного возбуждения доходит до 0,5, в отдельных случаях оно выше. При установившемся режиме ампер-витки противокомпаундной обмотки действуют против основного возбуждения, но в начале переходного процесса, например, при замыкании первичной обмотки они отсутствуют (нет тока во вторичной обмотке), и благодаря тому нарастание потока возбудителя происходит быстрее.

В этом методе выявляется интересное противоречие: быстрое установление тока якоря возбудителя осуществляется за счет неполной величины этого тока в процессе нарастания.

Качественное и количественное исследования действия сериесных обмоток на процесс возбуждения и являются содержанием настоящей работы.

Если характеристика намагничивания одной или обеих машин не прямолинейна, — аналитическое решение процесса возбуждения затруднительно; в этом случае необходимо изыскать графические методы решения. Далее мы будем предполагать, что $L_1 \doteq \text{const}$ и $L_2 = L_\partial + L_c = \text{const}$, т. е. будем считать, что машины ненасыщены. В целом ряде случаев это имеет место; например, генератор и его возбудитель в схеме преобразовательного агрегата для питания двигателя реверсивного стана обычно выполняются ненасыщенными. В качестве исходной мы примем схему рис. 1. Под r_1 и R_∂ в общем случае подразумевается суммарное сопротивление обмоток возбуждения машин и последовательно с ними включенных дополнительных (регулирующие) сопротивлений.

При включении или выключении рубильника K или при внезапном изменении дополнительных сопротивлений в цепях обмоток возбуждения обеих машин будут по некоторым законам изменяться во времени ток в обмотке возбуждения возбудителя (первичная обмотка) i_n и ток в обмотке возбуждения главной машины (вторичная обмотка) $i_в$.

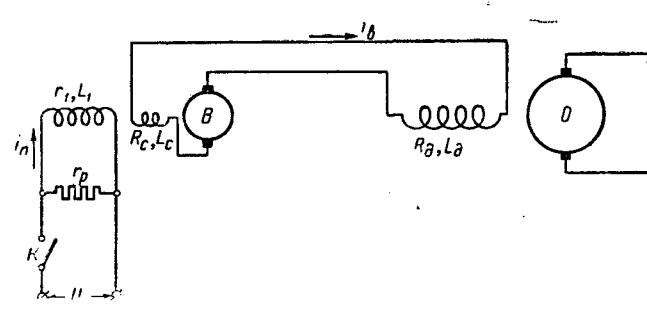


Рис. 1. R_∂, L_∂ — сопротивление и индуктивность главной машины; r_1, L_1 — возбудителя; R_c, L_c — сериесной обмотки; i_n — ток обмотки возбуждения возбудителя (первичная обмотка); $i_в$ — ток обмотки главной машины (вторичная обмотка)

Ток в первичной обмотке рассматриваем как сумму

$$i_n = I_1^\circ + i_1, \tag{1}$$

где I_1° — начальное значение тока в этой обмотке, а i_1 — ток переходного режима *.

То же и для вторичной обмотки:

$$i_в = I_2^\circ + i_2. \tag{2}$$

Для первичной обмотки возбуждения можно написать в операционной форме:

$$U' = (r_1 + pL_1)\, i_1 + pMi_2, \tag{3}$$

где M — взаимоиндуктивность между обмотками на полюсах возбудителя:

$$U' = U - I_1^\circ r_1.$$

Для вторичной обмотки имеет место уравнение:

$$k(I_1^\circ + i_1) + \beta(I_2^\circ + i_2) = (I_2^\circ + i_2)\, R_2 + L_2 \frac{\mathrm{d}(I_2^\circ + i_2)}{\mathrm{d}t} + M \frac{\mathrm{d}(I_1^\circ + i_1)}{\mathrm{d}t}.$$

Здесь:

$$R_2 = R_д + R_c;$$

$k(I_1^\circ + i_1)$ — э. д. с., наводимая в якоре возбудителя потоком основного возбуждения; $\beta(I_2^\circ + i_2)$ — э. д. с., индуктируемая в нем же ампер-витками сериесной обмотки.

При прямолинейной характеристике намагничивания возбудителя ($L_1 = \mathrm{const}$) $k = \frac{e_1}{i_n}$ для любой точки характеристики.

Очевидно, что коэфициент

$$\beta = \frac{w_c}{w_1} k = \mu k,$$

где w_c — число витков сериесной обмотки возбудителя, w_1 — число витков его обмотки возбуждения.

После необходимых преобразований уравнение для вторичной обмотки в операционной форме примет такой вид:

$$E_2^\circ = (pM - k)\, i_1 + (pL_2 + R_2 - \beta)\, i_2, \tag{4}$$

где $E^\circ = kI_1^\circ - (R_2 - \beta)\, I_2^\circ$.

Уравнения (3) и (4) справедливы как для компаундной обмотки на возбудителе, так и для противокомпаундной. Если сериесная обмотка компаундная,— β и M положительны; при противокомпаундной обмотке β и M им должен быть присвоен знак минус [1].

Совместное решение уравнений дает:

$$i_2 = \frac{E^\circ(r_1 + pL_1) - (pM - k)\, U'}{(r_1 + pL_1)(pL_2 + R_2 - \beta) - pM(pM - k)}. \tag{5}$$

Для установившегося режима вторичной цепи схемы можно написать:

$$E_{об} = E_ш + I_2\beta. \tag{6}$$

Здесь $E_ш$ и $I_2\beta$ — э. д. с., наводимые ампер витками шунтовой обмотки при установившемся режиме, и ампер-витками сериесной обмотки в якоре возбудителя;

$E_{об}$ — их сумма ($E_{об} = I_2 R_2$).

Если обозначить $\frac{E_ш}{E_{об}} = \gamma$, то из соотношения (6) можно найти:

$$R_2 - \beta = \gamma R_2.$$

То же соотношение соответствует и противокомпаундной обмотке. Разница между обоими случаями лишь та, что для компаундной обмотки $\gamma < 1$, а для противокомпаундной $\gamma > 1$. Это соотношение позволяет несколько упростить (5):

$$i_2 = \frac{\left\{\frac{E^\circ}{U'}(r_1 + pL_1) - (pM - k)\right\} U'}{(r_1 + pL_1)(pL_2 + \gamma R_2) - pM(pM - k)}. \tag{7}$$

i_2 определяется символическим выражением [2]:

$$i_2 = \frac{\nu(0)}{Z(0)} U' + U' \sum_{k=1}^{k=n} \left[\frac{\nu(p)}{pZ'(p)}\right]_{p=p_k} e^{p_k t}, \tag{8}$$

где

$$\nu(p) = \frac{E^\circ r_1 + kU'}{U'} + \frac{E^\circ L_1 - U'M}{U'}, \tag{9}$$

$$Z(p) = (r_1 + pL_1)(pL_2 + \gamma R_2) - pM(pM - k). \tag{10}$$

Корни $Z(p)$ будут:

$$p_{1,2} = \frac{-m \pm \sqrt{m^2 - 4\gamma n}}{2n}, \tag{11}$$

где $m = T_1 + T_2 = \frac{L_1}{r_1} + \frac{L_2}{R_2}$; $\quad n = T_1 T_2 - \frac{M^2}{r_1 R_2}$.

Далее можно найти $Z'(p_1)$, $Z'(p_2)$, $\nu(p_1)$ и $\nu(p_2)$,

$$\frac{\nu(0)}{Z(0)} = \frac{E^\circ r_1 + kU'}{r_1 \gamma R_2 U'}.$$

Формула (8) в раскрытом виде такова:

$$i_2 = \frac{kU' + E^\circ r_1}{r_1 \gamma R_2} \left\{1 + \left(\frac{2\gamma(E^\circ L_1 - U'M)}{kU' + E^\circ r_1} - m}{2\sqrt{m^2 - 4\gamma n}} - \frac{1}{2}\right) e^{p_1 t} - \left(\frac{\frac{2\gamma(E^\circ L_1 - U'M)}{kU' + E^\circ r_1} - m}{2\sqrt{m^2 - 4\gamma n}} + \frac{1}{2}\right) e^{p_2 t}\right\}. \tag{12}$$

Если коэфициент при $e^{p_1 t}$ обозначить через A', то коэфициент перед $e^{p_2 t}$ будет $A' + 1$.

Далее, коэфициент перед главной скобкой можно представить в совсем простом виде:

$$\frac{kU' + E^\circ r_1}{r_1 \gamma R_2} = \frac{kU}{r_1 \gamma R_2} - I_2^\circ = I_2 - I_2^\circ,$$

так как

$$\frac{kU}{r_1 \gamma R_2} = \frac{I_1 k}{\gamma R_2} = \frac{E_ш}{\gamma R_2} = \frac{E_{об}}{R_2} = I_2. \tag{13}$$

Здесь I_2 — установившийся ток в конце данного переходного режима во вторичной обмотке; I_1 — то же в первичной обмотке.

В связи с этим формула (12) упрощается:

$$i_в = I_2^\circ + i_2 = I_2^\circ + (I_2 - I_2^\circ)\left\{1 + A' e^{p_1 t} - (A' + 1)\, e^{p_2 t}\right\}. \tag{14}$$

Эта формула является общей и она полностью охватывает различные случаи исследуемых режимов при всех возможных манипуляциях с параметрами цепей возбуждения схемы рис. 1. Характер процесса будет определяться его начальными и конечными значениями.

Если начальные значения исследуемого режима являются одновременно *установившимися* значениями предшествующего, то коэфициент A получает более простое выражение. Действительно, нетрудно доказать, что в этом случае $E^\circ = 0$:

$$E^\circ = kI_1^\circ - (R_2 - \beta) I_2^\circ = kI_1^\circ - \gamma R_2 I_2^\circ = kI_1^\circ - \gamma E_{об} = kI_1^\circ - E_ш = 0.$$

Рассмотрим несколько частных случаев уравнения (14) при одном общем для них условии, что начальные значения исследуемого режима есть установившиеся значения предшествующего ($E^\circ = 0$):

1) $I_2^\circ = 0$ и $I_1^\circ = 0$,

---

* I° — Представляет собою конечное значение предыдущего режима, причем не обязательно оно должно быть установившееся значение этого режима.

[1] Отметим, что принятое нами выше обозначение $i_в = I_2^\circ + i_2$ позволяет применить метод Хевисайда и для того случая, когда начальные условия исследуемого процесса не являются условиями покоя.

[2] Решение для тока i_1 мы опускаем.

тогда

$$i_в = I_2 \left\{1 + Ae^{p_1 t} - (A+1)\, e^{p_2 t}\right\}. \qquad (15)$$

2) При наличии тока в первичной и во вторичной обмотках первичная обмотка будет закорочена или замкнута на разрядное сопротивление r_p (размыкание ключа K, рис. 1), и в обеих обмотках ток будет спадать. В этом случае:

$$I_2 = 0,$$

$$i_в = I_2^\circ \left\{(A+1)\, e^{p_2 t} - Ae^{p_1 t}\right\}. \qquad (16)$$

При подсчете постоянных коэфициентов необходимо учесть, что в данном случае $T_1 = \dfrac{L_1}{r_1 + r_p}$.

3) Напряжение, подводимое к цепи возбуждения возбудителя изменено мгновенно с $+U$ на $-U$. Тогда уравнение для процесса реверса возбуждения мы найдем, если подставить в (14) вместо $+I_2$, $-I_2$:

$$i_в = I_2 - \left(I_2 + I_2^\circ\right)\left\{1 + Ae^{p_1 t} - (A+1)\, e^{p_2 t}\right\}. \qquad (17)$$

4) Допустим, что сериесная обмотка у возбудителя отсутствует. В этом случае: $\mu = 0$; $\gamma = 1$; $M = 0$;

$$m = T_1 + T_2;\ n = T_1 T_2;\ \sqrt{m^2 - 4\gamma n} = T_2 - T_1;$$

$$p_1 = -\frac{1}{T_2};\quad p_2 = -\frac{1}{T_1};\quad A = -\frac{T_2}{T_2 - T_1};$$

$$A + 1 = -\frac{T_1}{T_2 - T_1}.$$

Уравнение (14) преобразовывается:

$$i_в = I_2^\circ + \left(I_2 - I_2^\circ\right)\left\{1 - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}}\right\}. \qquad (18)$$

5) Наконец, допустим, что $L_1 = 0$ — ток в первичной обмотке устанавливается мгновенно, т. е. мы как бы имеем дело со схемой рис. 2. В этом случае $T_1 = 0$, и из (18) имеем:

$$i_b = I_2^\circ + \left(I_2 - I_2^\circ\right)\left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \qquad (19)$$

Это есть известное уравнение тока при включении контура, состоящего из омического сопротивления и индуктивности на постоянное напряжение. Последнее соотношение является проверкой приведенного в работе решения.

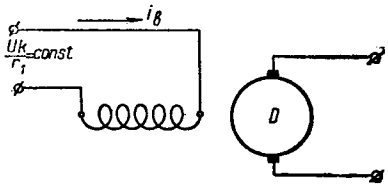


Рис. 2

Рассмотрим конкретный пример на схеме возбуждения двигателя блюминга завода „Электросила".

Возбудитель: 75 kW, 250/150 V, 500 A, 980 об/мин. Число витков шунтовой обмотки $w_1 = 6 \cdot 1050$. Сопротивление $r_1 = 52{,}6\ \Omega$ (при 75° C). Число пар полюсов $p = 3$. Якорь имеет: параллельных ветвей $a = 2$; число секционных сторон $N = 376$; число витков в одной параллельной ветви $w_a = \dfrac{N}{4a} = \dfrac{376}{4 \cdot 2} = 47$. Коэфициент рассеяния $\sigma = 1{,}15$. Частота вращения якоря:

$$f_r = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{3 \cdot 980}{60} = 49.$$

Постоянная времени обмотки шунтовой обмотки возбуждения:

$$T_1 = \frac{L_1}{r_1} = \frac{w_m}{w_a} \cdot \frac{\sigma}{4 f_r} \cdot \frac{E_1}{I_{m1} r_1} =$$

$$= \frac{6 \cdot 1050}{47} \cdot \frac{1{,}15}{4 \cdot 49} \cdot \frac{100}{1{,}2 \cdot 52{,}6} = 1{,}24 \text{ sec}.$$

Число витков сериесной обмотки $w_c = 6 \cdot 4 = 24$.

Отношение витков $\mu = \dfrac{w_c}{w_1} = \dfrac{6 \cdot 4}{6 \cdot 1050} = 3{,}8 \cdot 10^{-3}$.

Коэфициент, связывающий ток возбуждения и э. д. с. генератора:

$$k = \frac{100}{1{,}2} = 83{,}4.$$

Полное сопротивление цепи возбуждения главного двигателя (сопротивление самой обмотки плюс дополнительное сопротивление):

$$R_2 = 0{,}3025 + 0{,}152 = 0{,}46\ \Omega.$$

Коэфициент γ: компаундная обмотка

$$\gamma = 1 - \frac{\mu k}{R_2} = 1 - \frac{3{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 83{,}4}{0{,}46} = 0{,}31,$$

противокомпаундная обмотка

$$\gamma = 1 + \frac{3{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 83{,}4}{0{,}46} = 1{,}69.$$

Прокатный двигатель. Число витков обмотки возбуждения $w_2 = 35 \cdot 24$. Число витков в одной параллельной ветви якоря $w_a = 45$. Частота вращения якоря $f_r = 10$.

Постоянная времени обмотки возбуждения для ненасыщенной части:

$$T_m = \frac{35 \cdot 24}{45} \cdot \frac{1{,}13}{4 \cdot 10} \cdot \frac{290}{100 \cdot 0{,}3025} = 5{,}05 \text{ sec}.$$

Дополнительное включение сопротивления $R_{доп} = 0{,}152\ \Omega$.
Общее сопротивление $R_2 = 0{,}46\ \Omega$.
Постоянная времени всего контура возбуждения:

$$T_2 = 5{,}05 \cdot \frac{0{,}3025}{0{,}46} = 3{,}32 \text{ sec}.$$

По полученным данным, пользуясь формулами (15) и (16), были построены изображенные на рис. 3 кривые нарастания и спадания тока в обмотке возбуждения двигателя для трех случаев: возбудитель имеет только шунтовую обмотку; сериесная обмотка его—компаундная; возбудитель имеет противокомпаундную сериесную обмотку.

Процессы изменения тока по всем трем кривым объединены тем общим положением, что установившийся ток для этих процессов один и тот же. Это достигается соответствующим выбором напряжения обмотки возбуждения возбудителя. Кривые рис. 3 дают возможность оценить роль сериесных обмоток на процесс возбуждения главной машины.

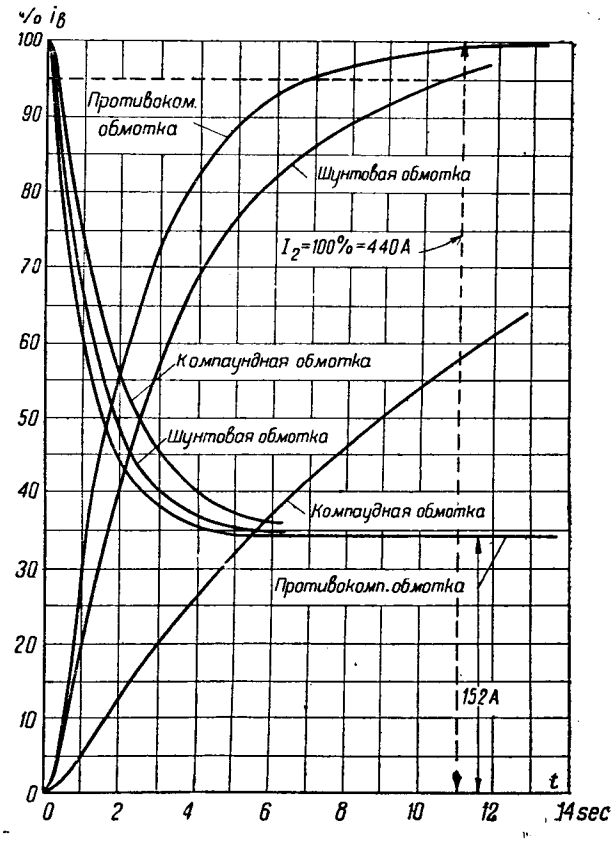


Рис. 3

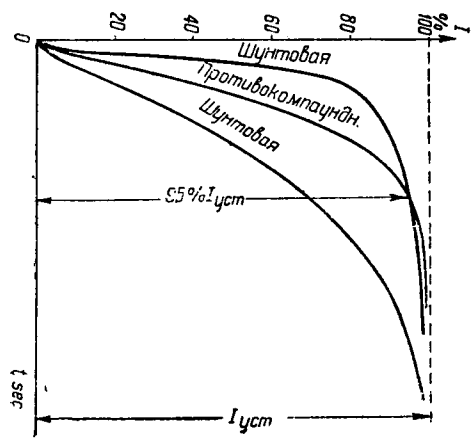


Рис. 4

Действительно, совершенно отчетливо выявляется, что противокомпаундная обмотка убыстряет протекание процесса возбуждения, ее присутствие сказывается на большей части протекания процесса. Для нашей установки, например, нарастание тока до 95% своего установившегося значения совершается при наличии противокомпаундной обмотки за время 6,8 sec, а без нее за 10,5 sec, т. е. процесс в первом случае протекает быстрее в 1,55 раза. Но этим влияние противокомпаундной обмотки на процессе возбуждения главной машины не ограничивается.

Ее наличие обусловливает также равномерное протекание процесса. Так, если бы, например, мы захотели достигнуть за время 6,8 sec 95% тока от установившегося значения, но при возбудителе, снабженном лишь шунтовой обмоткой, то процесс нарастания тока был бы примерно таков, как это изображено на рис. 4. Равномерность же протекания процесса возбуждения у генераторов, работающих в системе электропривода, оказывает большое влияние на снижение максимальных толчков тока и энергии в главной цепи этих машин при переходных режимах пуска и реверса. Как очевидно из рис. 3 наличие компаундной обмотки у возбудителя сказывается, и в очень сильной степени, замедляюще на процесс установления во времени тока его якоря.

Экспериментальное определение синхронного поперечного реактанца

В. М. Матюхин
ХЭТЗ им. Сталина

ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ определении синхронного поперечного реактанца x_q синхронных машин с явно выраженными полюсами обычно пользуются методом скольжения, описанным в известной статье Wright [1]. При малом скольжении ротора и при разомкнутой обмотке возбуждения можно считать, что через обмотку якоря будет протекать только намагничивающий ток, величина которого колеблется между значениями продольного и поперечного намагничивающего тока — I_{0d} и I_{0q}. Тогда частное от деления фазного напряжения на ток даст соответствующие реактанцы:

$$x_d = \frac{U_\phi}{I_{0d}},$$

$$x_q = \frac{U_\phi}{I_{0q}}.$$

Этот метод неудобен тем, что требует пониженного напряжения, примерно 25% номинального, а также двигатель постоянного тока для вращения синхронной машины.

В 1935 г. в американской литературе был предложен метод [2] определения x_q, заключающийся в измерении мощности синхронной машины, работающей вхолостую без возбуждения. При этом напряжение U в опыте должно понижаться до тех пор, пока двигатель не выпадет из синхронизма. Относящаяся к этому критическому значению напряжения мощность принимается за реактивную и из нее определяется величина x_q по формуле:

$$P_r = U^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q},$$

где P_r — реактивная мощность.

Так как этот метод требует пониженного напряжения и притом достаточно тонко регулируемого, он также применим на практике лишь в редких случаях. Следует также отметить, что оба упомянутые способа определения x_q дают значение его для ненасыщенной машины и, следовательно, не отвечают действительным условиям работы машины.

В статье предлагается экспериментальный метод определения синхронного поперечного реактанца x_q, отличающийся простотой выполнения и тем, что он может быть выполнен при полном напряжении машины, т. е. для действительных условий насыщения магнитной цепи.

Метод заключается в том, что синхронной машине, работающей вхолостую без возбуждения, дают ток возбуждения, стремящийся уничтожить продольный поток якоря, так что ток якоря сразу начинает увеличиваться, а не уменьшаться, как при правильном направлении тока ротора. Так как при холостом ходе двигатель уже работает с некоторым углом отставания δ_0 вследствие механических потерь и так как встречное возбуждение создает тормозящий момент, то с увеличением возбуждения угол δ растет.

При работе синхронного двигателя с размагничивающим возбуждением будет иметь место следующее уравнение моментов:

$$U^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \sin 2\delta = \frac{UE_d}{x_d} \sin \delta + P_{мех},$$

т. е. реактивный момент уравновешивает момент возбуждения и момент механических потерь. При достаточно медленном повышении тока возбуждения влияние асинхронного момента и момента инерции устраняется. Когда ротор вследствие увеличивающегося возбуждения отстанет на угол $\delta = 45°$, двигатель выпадет из синхронизма, что

[1] Tr. AIEE, 1931, стр. 1331, см. также В. И. Иванов, Синхронные машины, стр. 298.

[2] Реферат в журн. „Энергетическое обозрение" № 8, 1935.

будет заметно по амперметру в цепи ротора (ток ротора произвольно начнет уменьшаться). В опыте необходимо записать величину критического возбуждения i_m, при котором двигатель выпал из синхронизма, и напряжение сети U.

Величина x_q определяется из предыдущего уравнения для $\delta = 45°$:

$$x_q = \frac{x_d}{1 + \sqrt{2}\,\frac{E'_d}{U} + \frac{2P_{мех}x_d}{U^2}}.$$

Если пренебречь механическими потерями, то

$$x_q = x_d \frac{U}{\sqrt{2}E'_d + U}.$$

В написанных равенствах:

x_d, x_q — продольный и поперечный реактанцы в омах на фазу звезды;

U — линейное напряжение в вольтах;

E_d — э. д. с. холостого хода (линейная);

E'_d — то же соответственно возбуждению i'_m; определяется по прямой, проведенной на характеристике холостого хода через начало координат и точку экспериментального напряжения U;

$P_{мех}$ — механические потери в ваттах.

Синхронный реактанц x_d определяется соответственно насыщению магнитной цепи при экспериментальном напряжении. Он может быть определен или из опыта работы синхронного двигателя вхолостую и без возбуждения

$$x_d = \frac{U}{\sqrt{3}I}$$

или же по характеристикам холостого хода и к. з., причем напряжение должно определяться по той же прямолинейной характеристике, что и E'_d.

Описанный метод определения x_q был проверен экспериментально в лаборатории электропривода ХЭТЗ на синхронном двигателе 125 kVA, 440 V, 1000 об/мин путем сличения максимальной реактивной мощности, вычисленной по экспериментально определенным x_q и x_d, с максимальной мощностью, определенной непосредственно нагрузкой при невозбужденном двигателе. Синхронный двигатель был сцеплен с генератором постоянного тока 88 kW, 220 V, который при непосредственном определении максимальной реактивной мощности грузился на реостаты.

При экспериментальном определении x_q (опыт противовозбуждения) двигатель имел на клеммах 400 V и «опрокинулся» при токе возбуждения $i'_m = 21{,}5$ A. Для оценки величины этого тока отметим, что номинальное напряжение (440 V) при 1000 об/мин получается при $i_m = 55$ A, номинальный ток возбуждения составляет примерно 130 A. Ток в якоре при $\delta = 45°$ в момент выпадения из синхронизма равнялся 240 A (при номинальном токе в 160 A). Максимальный ток в якоре при «проскальзывании» на полюсное деление равнялся примерно 400 A. В опыте такое повышение тока можно избежать, выключив двигатель сейчас же, как только стрелка амперметра в цепи ротора пойдет в обратную сторону (т. е. когда ток возбуждения произвольно начнет уменьшаться).

Соответственно $i'_m = 21{,}5$ A по прямолинейной характеристике, проходящей через начало координат и точку экспериментального напряжения (400 V) на характеристике холостого хода, E'_d оказалось равной 208 V. По той же характеристике и характеристике к. з. определено $x_d = 1{,}88\ \Omega$. Отсюда при механических потерях агрегата в 3 kW найдено x_q:

$$x_q = \frac{1{,}88}{1 + \sqrt{2}\,\frac{208}{400} + \frac{2 \cdot 3000 \cdot 1{,}88}{400^2}} = 1{,}04\ \Omega.$$

Расчетная максимальная реактивная мощность P_r при $U = 400$ V будет равна:

$$P_r = U^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} = 400^2 \frac{1{,}88 - 1{,}04}{2 \cdot 1{,}88 \cdot 1{,}04} = 34\ \text{kW}.$$

При непосредственном определении максимальной реактивной мощности потери в нагрузочных реостатах составили 29 kW. Учитываемые потери агрегата (механические потери обеих машин, джоулевы потери в якоре и в железе его генератора постоянного тока) были определены приближенно в 5 kW с максимально возможной ошибкой $\pm 0{,}5$ kW. Таким образом действительная реактивная мощность мотора составит $33{,}5 \div 34{,}5$ kW, что указывает на достаточную точность описанного метода.

Отметим еще, что в опыте „противовозбуждения" ток якоря синхронного двигателя при $\delta = 45°$ может быть найден согласно теории двух реакций по формуле:

$$I = \sqrt{\left[\frac{U_d + E'_d}{\sqrt{3}x_d}\right]^2 + \left[\frac{U_q}{\sqrt{3}x_q}\right]^2} = \sqrt{\left[\frac{U\frac{\sqrt{2}}{2} + E'_d}{\sqrt{3}x_d}\right]^2 + \left[\frac{U\frac{\sqrt{2}}{2}}{\sqrt{3}x_q}\right]^2},$$

где $U_d = U_q = U\frac{\sqrt{2}}{2}$ — продольная и поперечная составляющие напряжения при $\delta = 45°$.

Подставив в эту формулу данные нашего опыта, получим:

$$I = \sqrt{\left[\frac{400 \cdot 0{,}71 + 208}{\sqrt{3} \cdot 1{,}88}\right]^2 + \left[\frac{400 \cdot 0{,}71}{\sqrt{3} \cdot 1{,}04}\right]^2} \approx 220\ \text{A}.$$

Как отмечено выше, в опыте этот ток составил 240 A. Расхождение в 8% объясняется, повидимому, главным образом, не вполне симметричными токами в фазах [3].

[3] Испытание производилось при соединении якоря в треугольник, числовые данные переведены на нормальное соединение в звезду.

Современное состояние проблемы вентильных двигателей

О. Г. Вегнер
Ленинградский индустриальный институт

В 1931 г. инж. Керн впервые предложил заменить коллектор управляемыми ионными вентилями с целью получения двигателя переменного тока высокого напряжения с широкой регулировкой скорости вращения.

Поиски рационального технического решения этой проблемы производились у нас в СССР в исследовательских лабораториях (Ленинградский индустриальный институт, ВЭИ) и за границей фирмой GEC (США).

В настоящее время имеется одна работающая промышленная установка вентильного двигателя, выполненная GEC, и есть все основания думать, что применение их будет развиваться вместе с совершенствованием ионных вентилей.

Устройство двигателя. Вентильные двигатели отличаются от нормальных коллекторных машин постоянного и переменного тока тем, что система щетки-коллектор заменена комбинацией управляемых ионных выпрямителей.

Производя такую замену средств коммутации тока, возможно получить столько же типов вентильных двигателей, сколько существует видов коллекторных машин. Очевидно, что чем большее число коммутируемых секций содержит обмотка якоря машины, тем больше должно быть вентилей, заменяющих коллектор. Ясно поэтому, что сокращение числа коммутируемых секций крайне упростит схему двигателя. Вопрос о том, какое минимальное число секций достаточно для обеспечения хороших энергетических и эксплоатационных свойств, мы проанализируем на простейшем случае нормального двигателя постоянного тока.

Тяжелые условия коммутации посредством системы щетки-коллектор заставили дробить обмотку якоря нормальных коллекторных машин на большое число элементов с целью обеспечения малой индуктивности коммутируемых цепей.

Требования безыскровой коммутации не позволяли иметь в коммутируемых цепях больших э. д. с., что также приводило к мелкому дроблению обмотки.

Эти соображения отпадают при введении в коммутируемые элементы ионных вентилей, выполняемых на напряжение в десятки тысяч вольт.

С энергетической точки зрения мелкое дробление обмотки совсем не требуется. В самом деле, сравним две обмотки якоря—одну нормального типа, замкнутую, с очень большим числом коллекторных пластин, другую разрезную, трехфазную с тремя коллекторными пластинами (рис. 1, *а*). На рис. 1, *б* показаны кривые токов и э. д. с. в коммутируемых секциях обмоток в предположении синусоидального распределения магнитного поля. При одинаковых эффективных значениях тока амплитуда его в случае разрядной трехфазной обмотки в $\sqrt{\frac{3}{2}}$ раза больше, чем в замкнутой.

Электромагнитная мощность двигателя с замкнутой обмоткой

$$P_{э1} \equiv \frac{2I}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} E_m \sin \omega t \, \mathrm{d}\, t = \frac{2}{\pi} I E_m. \qquad (1)$$

Мощность двигателя с разрезной обмоткой

$$P_{э2} \equiv \frac{2I\sqrt{\frac{3}{2}}}{T}\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5}{6}\pi} E_m \sin \omega t \, \mathrm{d}t = \frac{3E_m I}{\pi\sqrt{2}}. \qquad (2)$$

Во втором случае мощность больше, чем в первом, в $\frac{3}{2\sqrt{2}}$ раза, т. е. на 6,4%.

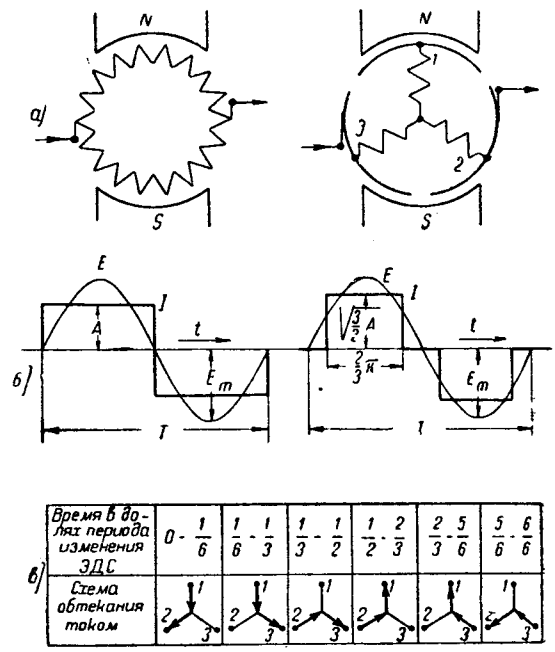


Рис. 1

Если же учесть, что коэфициент обмотки во втором случае примерно равен 0,96, получим увеличение электромагнитной мощности трехфазной разрезной обмотки по сравнению с замкнутой на 2%.

Во всяком случае ясно, что с точки зрения использования активных материалов уменьшение числа коллекторных пластин до трех не привело к ухудшению.

Теперь мы видим, что применение коммутируемой разрезной обмотки не должно рассматри-

ваться как анахронизм. Почти во всех современных схемах вентильных двигателей используется трехфазная разрезная обмотка, питаемая через вентили, включенные и управляемые так, чтобы получить такое же обтекание обмотки током, какое получается в нормальном коллекторном двигателе (рис. 1, *b*).

Для этой цели применимы различные схемы включения вентилей (этим лишь и отличается большинство предложенных схем вентильных двигателей). Наибольшую надежность и устойчивость работы дает схема рис. 2.

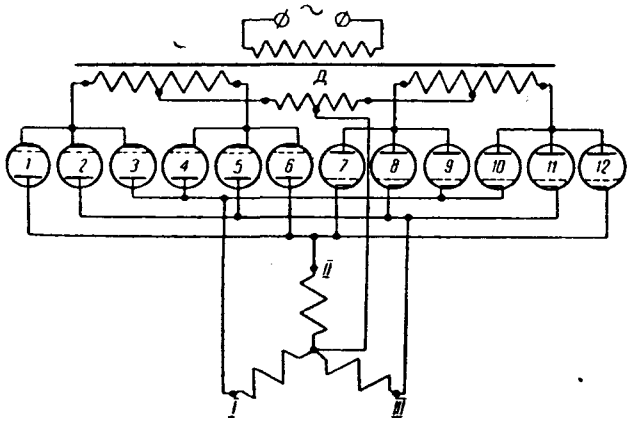


Рис. 2. Схема вентильного двигателя Вегнера и Завалишина

Обмотка якоря питается выпрямленным переменным током при помощи двух групп вентилей, соединенных с двумя вторичными обмотками трансформатора.

Группа вентилей *1—6* (рис. 2) позволяет пропускать ток поочередно по всем фазам *I—III* в направлении от нулевой точки к началам обмоток; группа вентилей *7—12* позволяет питать обмотки токами обратного направления.

Таблица 1

Время в долях периода изменения э. д. с. двигателя	0 — 1/6	1/6 — 1/3	1/3 — 1/2	1/2 — 2/3	2/3 — 5/6	5/6 — 6/6
Номера отпертых вентилей	1,6,	2,5,	2,5,	3,4,	3,4,	1,6,
(рис. 2)	9,10	9,10	7,12	7,12	8,11	8,11

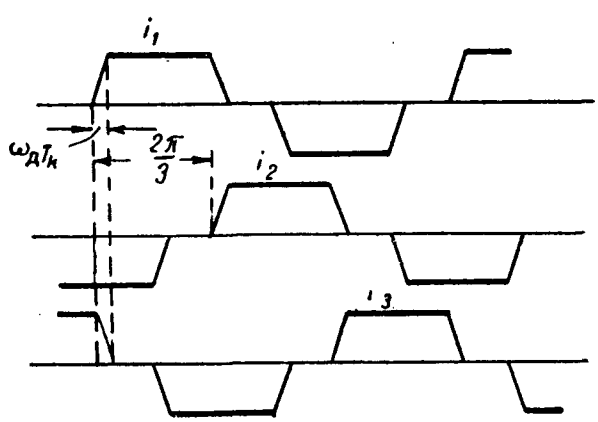


Рис. 3. Фазовые токи $T_к$ — период коммутации; ω — угловая скорость

При отпирании вентилей в последовательности, указанной в табл. 1, фазовые токи будут изменяться так, как показано на рис. 3.

Испытание всех известных до сего времени схем наряду с описанной показало ее большие преимущества в отношении надежности работы, которая здесь может быть обеспечена в полной мере. На рис. 4 показаны рабочие характеристики, полученные экспериментально при работе двигателя по схеме рис. 2.

При рассмотрении этих характеристик нужно иметь в виду, что они относятся к машине,

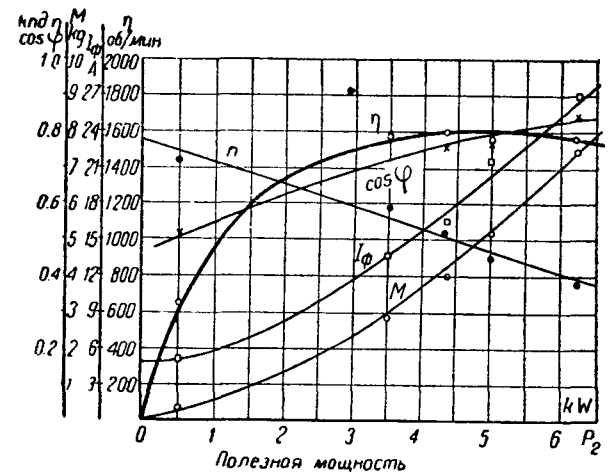


Рис. 4. Рабочие характеристики вентильного двигателя

обладающей параметрами, совершенно не подходящими для работы совместно с ионными преобразователями.

В качестве двигателя была использована синхронная машина мощностью 12 kW, 1500 об/мин, при номинальном токе 21,3 А, вращающем моменте $M = 7{,}75$ kgm и к. п. д. $\eta = 0{,}84$. Рис. 4 с несомненностью показывает, что вентильный двигатель имеет хорошие энергетические показатели. Что же касается использования активных материалов, то оно, конечно, не может быть столь же большим, как в синхронной машине.

Дело здесь в том, что для удовлетворительной коммутации тока необходимо обеспечить действие в коммутируемых цепях э. д. с. соответствующего направления и достаточной величины. Если в нормальных машинах постоянного тока это осуществляется посредством применения добавочных полюсов, то в вентильных двигателях приходится поступать так же, как в машинах без добавочных полюсов, т. е. сдвигать по фазе ток и э. д. с. в коммутируемой обмотке путем регулировки положения коммутатора сеточных цепей, управляющего зажиганием вентилей.

Это приводит, конечно, к худшему использованию машины, которое, однако, остается вполне удовлетворительным по сравнению с другими двигателями, дающими большую регулировку скорости (табл. 2).

Возможности регулировки скорости вентильного двигателя такие же, как в схеме Леонарда, и поэтому его стоимость и вес необходимо сравнивать со стоимостью и весом шунтового двигателя, питаемого мотор-генератором.

Таблица 2

Наименование машины	Вес всей установки на единицу мощности	Стоимость установки на единицу мощности	Примечание
Шунтовой двигатель постоянного тока . . .	1	1	Данные относятся к установке мощностью 200—400 kW
Шунтовой двигатель, питаемый мотор-генератором	2,25	2,6	—
Вентильный двигатель .	1,25	1,3	В стоимость установки входит стоимость ионных вентилей из расчета 100 руб. за штуку *

* Стоимость 100 руб. предположена при массовом производстве тиратронов.

При питании от сети трехфазного тока схема двигателя приобретает вид, показанный на рис. 5.

Пускорегулирующая аппаратура чрезвычайно легка и дешева потому, что все операции выполняются путем управления сеточными цепями вентилей, несущими очень малые токи, порядка долей ампера. Крайне легко осуществима автоматизация управления и получение ряда комбинаций специального характера, например, синхронная передача угла и движения и т. п.

Следует признать, что уже в своем теперешнем виде вентильный двигатель представляет большой технический интерес и ждет своего промышленного использования.

Регулирование скорости. Как и в случае двигателей постоянного тока, здесь применимы два метода: изменение магнитного потока регулировкой тока возбуждения, изменение напряжения, приложенного к якорю.

Как известно, увеличение скорости ослаблением магнитного поля возможно лишь до момента, когда сумма падений напряжения, пропорциональных току якоря, станет равной его э. д. с.

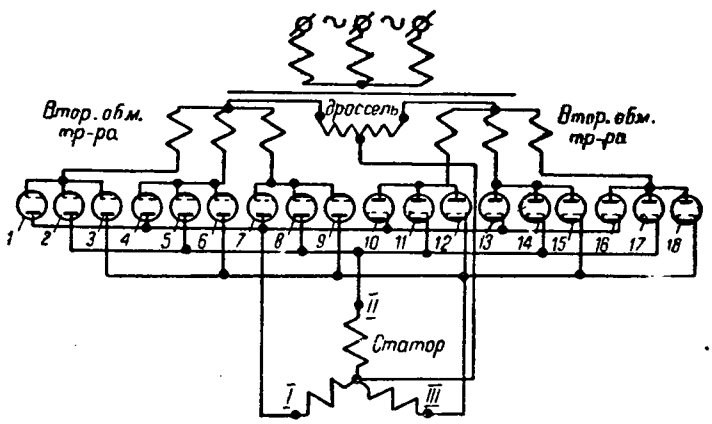


Рис. 5. Вентильный двигатель Вегнера и Завалишина при трехфазном питании

Пусть при наименьшей скорости вращения и наибольшей величине магнитного потока сумма падений напряжения, пропорциональных току, равна $\Sigma\Delta U_1$, среднее значение рабочей части синусоиды э. д. с. вентильного двигателя равно E_{cp1}, а отношение

$$\frac{E_{cp1}}{\Sigma\Delta U_1} = k_1. \qquad (2)$$

При наибольшей возможной скорости вращения

$$\frac{E_{cp2}}{\Sigma\Delta U_2} = k_2 = 1. \qquad (3)$$

Если регулировка происходит при постоянном вращающем моменте, то

$$I\Phi \equiv \Sigma\Delta U \frac{E_{cp}}{n} \equiv M = \text{const}, \qquad (4)$$

где I — ток якоря;
Φ — магнитный поток;
n — скорость вращения;
M — вращающий момент.

Учтя эти условия, легко получить отношение максимальной скорости вращения к исходной, т. е. кратность регулирования по этому способу:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\left(1+\frac{1}{k_1}\right)^2 k_1}{4}. \qquad (5)$$

На рис. 6 представлена зависимость кратности регулирования от коэфициента k_1.

При расчете параметров схемы нужно учесть также и то, что в зависимости от коэфициента k_1 получается различное изменение тока якоря в процессе регулирования.

На рис. 7 показано влияние k_1 на характер

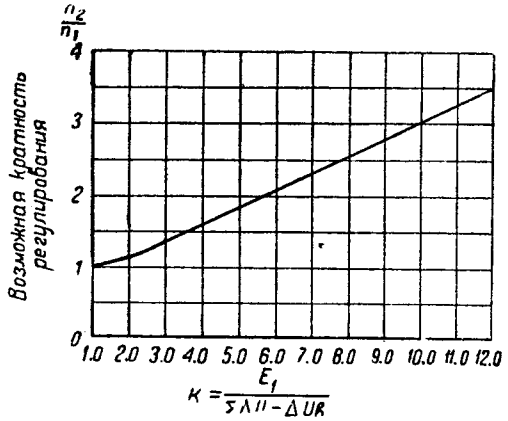


Рис. 6. Регулирование скорости изменением магнитного потока

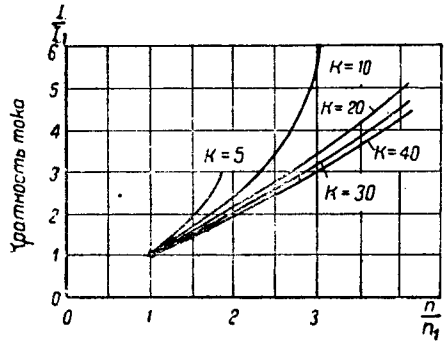


Рис. 7. Кратность регулирования скорости изменением магнитного потока

изменения тока двигателя при увеличении скорости и $M = \text{const}$.

Это обстоятельство особо важно, так как с ростом тока условия коммутации отягчаются и обеспечение ее является важнейшей задачей расчета. При регулировании в условиях постоянной мощности дело обстоит значительно проще, так как ток остается неизменным и задача обеспечения коммутации упрощается.

Резюмируя, можно сказать, что применение первого способа регулирования скорости вентильных двигателей (изменением поля) может быть рекомендовано при работе в условиях неизменной мощности. При постоянном моменте удается регулировать скорость этим способом лишь в пределах 20—30% ввиду резко ухудшающихся коммутационных условий при ослаблении поля и возрастании тока якоря.

Осуществить регулировку изменением напряжения, приложенного к якорю, возможно в двух вариантах: 1) изменение напряжения по способу „отсечки", применяемому в обычных ртутных выпрямителях; 2) изменение напряжения по новому способу „набора" [1].

При наличии хорошего сглаживания тока дросселем работа двигателя ничем не отличается от работы нормального коллекторного двигателя в схеме Леонарда, и возможности регулирования столь же широки.

При регулировании по первому способу схема двигателя совершенно не изменяется, так как регулировка отсечкой получается, как известно, путем воздействия лишь на сеточные цепи вентилей.

Способ „набора" требует изменить схему так, как это показано на рис. 8, для одной из простейших схем вентильного двигателя (схема Вилиса).

Вторичная обмотка питающего трансформатора секционирована и приключена к анодам ртутного выпрямителя (*4—9*) так, чтобы, отпирая ту или иную пару анодов (*4, 9*; *5, 8*; *6, 7*), можно было включать ту или иную часть обмотки, регулируя (скачками) величину выпрямленного напряжения.

Промежуточное регулирование между тремя ступенями получается путем поочередного отпирания вентилей, дающих смежные ступени напряжения с регулировкой времени включения каждой ступени так, как это уже было описано в „Электричестве".

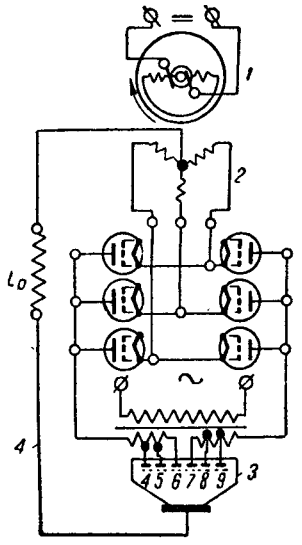


Рис. 8. Схема вентильного двигателя с регулировкой скорости по методу „набора".

1 — ротор; *2* — статор; *3* — регулирующие вентили; *4* — нулевой провод

Коэфициент мощности и влияние на сеть. С точки зрения влияние на сеть и условий в первичной цепи питающего двигатель трансформатора дело здесь обстоит совершенно таким же образом, как и в случае обычных выпрямительных установок. Это ясно из того, что при хорошем сглаживании выпрямленного тока совершенно безразлично (с рассматриваемой точки зрения), питает ли сеть через трансформатор обычный выпрямитель или вентильный двигатель. При регулировании скорости по способу отсечки получается такое же изменение коэфициента мощности, как и в выпрямительных установках. Способ набора имеет в этом отношении серьезные преимущества [1]. Так как эти вопросы хорошо освещены в литературе применительно к обычным выпрямителям, здесь нет надобности останавливаться на них подробнее. Гораздо больший интерес представляют вопросы, отражающие специфические особенности вентильного двигателя, освещение которых сделает возможным расчет последнего для любых заданных условий.

[1] О. Г. Вегнер, Новый способ регулирования напряжения ртутных выпрямителей. „Электричество" № 3, 1937.

Кабели с уплотненной жилой

В. А. Привезенцев, Д. Д. Зарин и А. Г. Макаров

Электротехническая лаборатория завода „Москабель"

В НАСТОЯЩЕЕ время все кабели на напряжение до 10 kV, составляющие основную массу продукции кабельных цехов наших заводов, изготовляются с секторными жилами. Секторные жилы конструируются согласно так называемых „Единых конструкций". Обычно в центре сектора располагается одна сплошная проволока круглого сечения [1], по бокам центральной проволоки или жилы помещаются две проволоки меньшего диаметра, а поверх их делается в зависимости от сечения сектора один или два повива.

Общий вид сечения такой секторной жилы, изготовленной по „Единым конструкциям", дан на рис. 1, а на рис. 2 показаны сечения кабелей различного способа приготовления жил.

Эти жилы имеют сравнительно низкий коэфициент заполнения, благодаря чему увеличивается диаметр скрученного кабеля и одновременно с ним и стоимость. Кроме того, наличие пустот в токоведущих жилах облегчает стекание массы при вертикальной прокладке кабеля.

[1] Для крупных сечений эта проволока заменяется 7 скрученными правильной круткой проволоками.

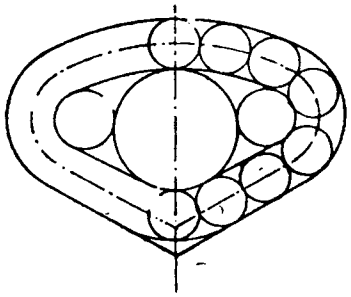


Рис. 1

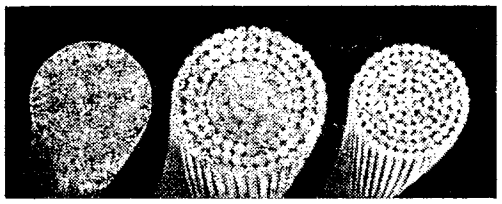


Рис. 2

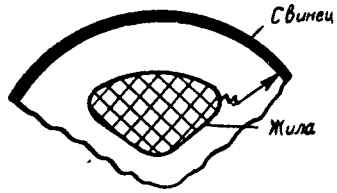


Рис. 3

Наблюдались случаи, когда вполне удовлетворительного качества кабели при горизонтальной прокладке большой протяженности очень часто пробивались в вертикальных участках длиною 10—15 m. Пробой происходил вследствие ионизации пустот, образовавшихся от стекания массы по жилам к нижней части кабеля.

Описанные дефекты и некоторые другие обстоятельства способствовали проявлению большого интереса к кабелям с так называемой уплотненной жилой. Такой кабель появился за последние годы в европейской и американской практике.

В этих кабелях секторная жила конструировалась или из одинаковых или из разных по диаметру проволок, причем отдельные повивы при скрутке специальными вальцами сжимались до секторной формы. В некоторых случаях для предотвращения разрывов бумажных лент при изгибе жилы самый верхний слой составлялся из тонких круглых проволок и не обжимался.

Ниже сопоставлены опытные электрические и механические характеристики кабелей с уплотненной и нормальной жилой.

Для опытов были взяты два 10-kV кабеля с нормальной и уплотненной жилой сечением 3×95 mm² марки СГС с одинаковой толщиной изоляции. Геометрические размеры и веса кабелей приведены в табл. 1.

Применение уплотненной жилы дает 4—6% экономии веса свинца (табл. 1). Процент экономии свинца с понижением номинального напряжения кабеля (6, 3, 1 kV) и, в особенности, с увеличением сечения токопроводящих жил увеличивается. Например, для кабеля сечением 3×185 mm² на номинальное напряжение 1 kV экономия свинца достигает 10—12%.

Для сравнения электрической прочности кабели с нормальной и уплотненной жилой подвергались испытанию на ускоренное старение в сильном электрическом поле частотой 50 Hz (шестикратное рабочее напряжение) по схеме — три жилы против свинца (табл. 2).

Разбор каждого пробитого образца в месте пробоя показал, что кабели, как правило, пробивались с ребра жилы (рис. 3) на свинец. В месте пробоя изоляции имели место либо совпадения бумаг либо трещины и надрывы бумаг.

Для сравнения электрической прочности междужильной изоляции образцы кабелей нормальной и уплотненной конструкций были поставлены под напряжение 60 kV, по схеме — одна жила против двух других и свинца (табл. 3).

Во всех случаях, приводимых в табл. 2 и 3, кабели с уплотненной жилой показали бо́льшую длительность жизни.

Таблица 1

	Кабель с нормальной жилой		Кабель с уплотненной жилой	
	конструктивные данные	фактически	конструктивные данные	фактически (серийное производство)
Вес в kg/km	6736	6480,4	6499	—
„ свинца в kg/km	2958	2941,6	2839	2760
„ корделя в kg km	—	100,6	—	—
„ жилы с поясной и фазной изоляцией в kg/km .	3778	3438,5	3071,5	—
Диаметр по свинцу в mm	43,3	42,3	41,6	41,7
Диаметр под свинцом в mm	39,3	38,37	37,6	37,50
Диаметр по скрутке в mm	33,8	33,52	32,1	31,60

Таблица 2

Состояние кабеля *	Кабель с нормальной жилой			Кабель с уплотненной жилой		
	общая толщина изоляции (число бумаг)	время воздействия	место пробоя	общая толщина изоляции (число бумаг)	время воздействия	место пробоя
До изгибов	46	4 h	В кабеле	48	6 h 40 min	В кабеле
	47	3 h 05 min	„ „	—	10 h 00 min	В воронке
	45	3 h 50 min	„ „	46	8 h 16 min	В кабеле
После изгибов	—	2 h 57 min	В воронке	45	6 h 20 min	В кабеле
	47	3 h 03 min	„ кабеле	48	5 h 23 min	„ „
	45	3 h 42 min	„ „	46	5 h 54 min	В воронке

* Изгиб на барабане с „животом" 15-кратного согласно ОСТ 6260.

Таблица 3

Кабель с нормальной жилой		Кабель с уплотненной жилой	
время воздействия	место пробоя	время воздействия	место пробоя
6 h 17 min	В кабеле	10 h 30 min	В кабеле

Подсчеты по формуле для концентрических цилиндров

$$E_{max} = \frac{\sqrt{2}U_{eff}}{r_0 \ln \frac{R}{r_0}},$$

в которой полагалось r_0 — радиус описанной по жилам окружности, R — внутренний радиус свинцовой оболочки, показали, что максимальный градиент при уплотненной жиле равен 18,4 $kV_{max/mm}$, а для нормальной конструкции — 18,5 $kV_{max/mm}$.

На рис. 4 даны кривые $tg\,\delta = f(t)$. Кривые показывают, что в области температур, превышающих 40° С, угол потерь кабеля нормальной конструкции больше, чем кабеля с уплотненной жилой, этим, видимо, объясняется и их различие в длительности жизни.

Кривые снимались на кусках кабелей, помещенных в масляный бак с нагревательным приспособлением. Замеры производились при остывании кабеля. На измеряемых образцах были надеты охранные кольца. Измерения осуществлялись по схеме — три жилы против свинцовой оболочки.

Как меняются градиенты ионизации после изгибов, видно из кривых рис. 5 и 6. Изгибы производились на барабане с «животом», равным 15-кратному диаметру кабеля.

Кривые ионизации, снятые с образцов обеих конструкций до изгибов, показывают, что напряжение ионизации в обоих случаях лежит в пределах между 13 и 15 kV. Напряжение ионизации после изгибов несколько уменьшается (до 10—12 kV).

После изгибов и последующих измерений образцы были нагреты до 80° С; эта температура выдерживалась в течение 2 h 30 min, после чего кабели охлаждались до нормальной температуры (20—25° С) и у них измерялся $tg\,\delta = f(U)$. Соответ-

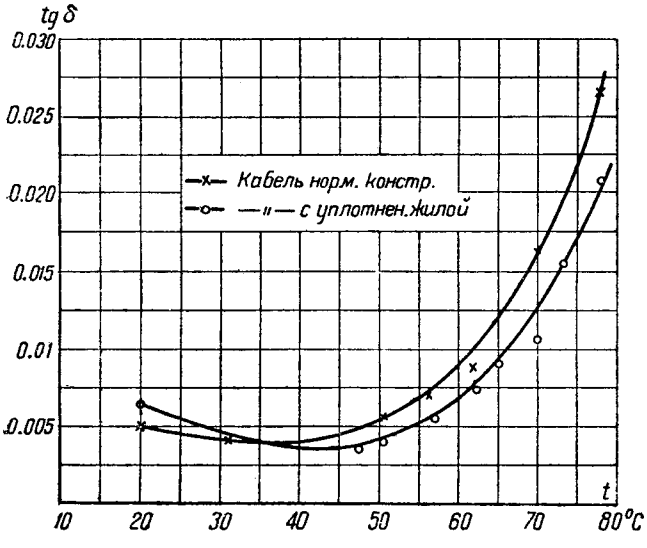


Рис. 4

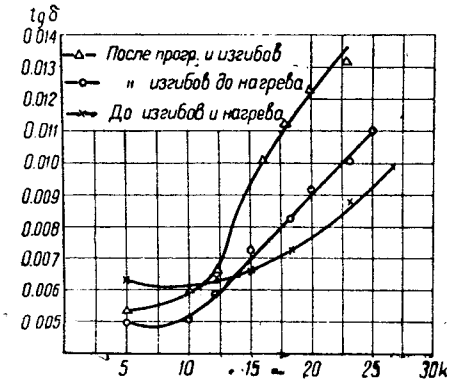


Рис. 5. Кабель с уплотненной жилой

ствующие кривые показывают, что скорость нарастания tg δ после нагрева возросла, а напряжение начала ионизации в обеих конструкциях снизилось. Несколько более быстрый рост кривой ионизации в образце кабеля с уплотненной жилой следует объяснить тем, что кривая tg δ для кабеля с уплотненной жилой снималась при 20° С, тогда как для кабеля нормальной конструкции подобные же измерения производились при 23° С; поставить испытания при одинаковых температурах было крайне затруднительно по техническим причинам.

Термические характеристики кабелей приведены на рис. 7 и 8. Нагрев производился с помощью трансформатора тока. Измерение температур жилы и свинца осуществлялось с помощью термопар, заложенных на середине испытуемого отрезка кабеля длиною 6 m.

Опыты по сравнению механических характеристик производились на кабелях сечением 3×95 mm², марки СГС. Они показали, что прочность на разрыв кабелей с уплотненной жилой несколько больше (рис. 9 и 10).

При растягивающем усилии 5000 kg удлинение кабеля нормальной конструкции составляет 0,8—0,9%, а с уплотненной жилой — 0,7—0,8% (рис. 9 и 10).

Для испытания кабелей на изгиб конец образцов длиною 1500 mm закреплялся, как показано на рис. 11. Затем замеряли расстояние от нижней плоскости до конца кабеля (h_1) при недеформированном образце. Потом на конец кабеля подвешивался груз и измерялось расстояние от пола до конца изогнувшегося кабеля (h_2).

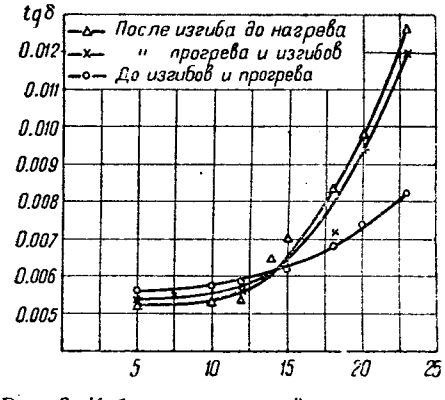


Рис. 6. Кабель нормальной конструкции

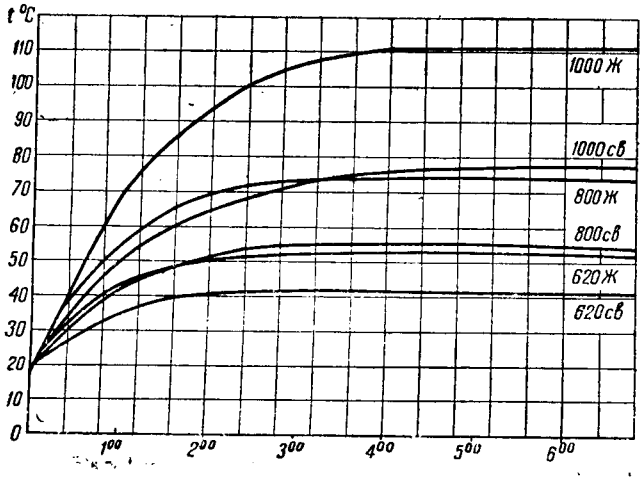


Рис. 7 Кабель нормальной конструкции

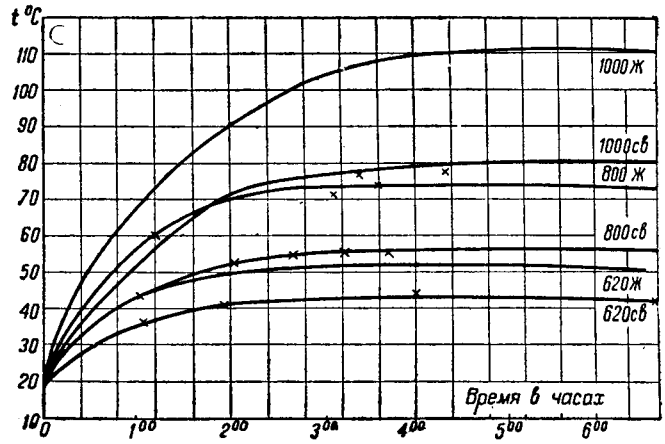


Рис. 8. Кабель с уплотненной жилой

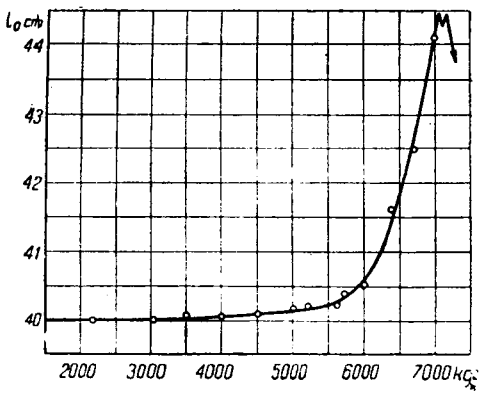


Рис. 9. Кабель с уплотненной жилой

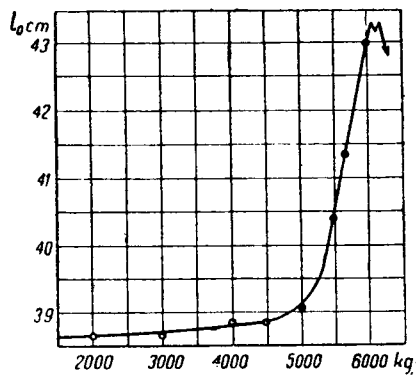


Рис. 10. Кабель нормальной конструкции

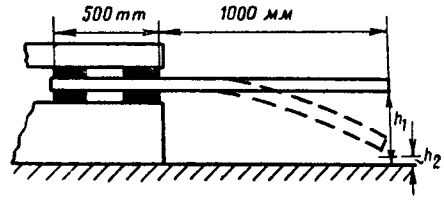


Рис. 11

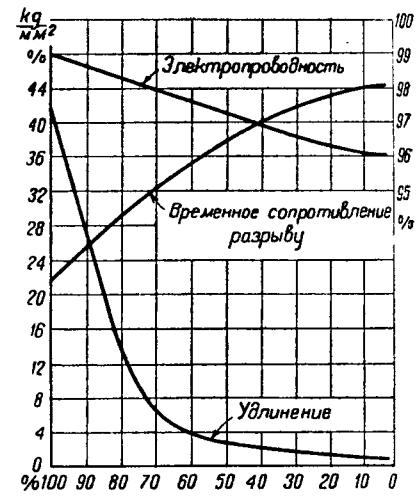


Рис. 12

Из табл. 4 видно, что кабели очень мало отличаются по гибкости.

Таблица 4

Нормальная конструкция кабелей			С уплотненной жилой		
h_1	h_2	$\frac{h_2 - h_1}{\%}$	h_1	h_2	$\frac{h_2 - h_1}{\%}$
829	581	43	325	587	40,5

Известно, что при обжиме медной жилы металл получает нагартовку, при этом его пластичность уменьшается, повышается временное сопротивление на разрыв и увеличивается электрическое сопротивление меди. Поэтому интересно было сравнить электрическое сопротивление нормальной и уплотненной жилы. С этой целью в большом количестве были испытаны на разрыв проволоки из уплотненной жилы и определялось их удлинение. По этим испытаниям удлинение проволок составляло 7,7%, в то время как удлинение неуплотненной жилы равно 16%.

На рис. 12 дана зависимость между электропроводностью меди, ее удлинением и временным сопротивлением на разрыв. Из кривых рисунка видно, что при удлинении от 8 до 35% электрическое сопротивление изменяется всего на 0,8%. Таким образом увеличение омического сопротивления уплотненной жилы не может превышать этой величины, а фактически оно достигнет примерно 0,5%.

Изложенные результаты испытаний позволяют заключить, что кабель с уплотненной жилой по своим характеристикам во всяком случае равноценен кабелю с жилой нормальной конструкции, поэтому его следует рекомендовать эксплоатирующим и производящим организациям. Рекомендуемая конструкция дает значительную экономию свинца и, кроме того, пригодна при небольших пролетах для вертикальных прокладок.

Изоляция газонаполненного кабеля

С. С. Городецкий и Д. Д. Зарин
ВЭИ

ОДНО из основных условий надежной работы кабелей высокого напряжения — это отсутствие ионизации газовых включений в изоляции. Ионизацию в изоляции можно устранить либо исключая возможность образования газовых включений, либо значительно увеличивая их диэлектрическую прочность путем повышения давления в газовых прослойках.

Первый путь приводит к маслонаполненным кабелям, второй путь — к кабелям с газовым давлением.

В конструкции, называемой «кабель под давлением», передача давления на изоляцию осуществляется извне, через свинцовую оболочку, путем помещения кабеля в герметически закрытую трубу, заполненную сжатым газом. В другой конструкции кабеля так называемой газонаполненной сжатый газ подается непосредственно в изоляцию кабеля. При этом свинцовая оболочка усиливается специальной броней.

Изоляция газонаполненных кабелей может состоять из сухой бумаги, «пропитанной» сжатым газом [1]. В этом случае газ заполняет все поры и зазоры между листами бумаги.

В другом варианте конструкции [2] газ заполняет только зазоры между отдельными лентами, сама же бумага пропитывается массой. Существует еще третий тип кабеля [3], в котором газ служит средой, передающей давление на изоляцию и компенсирующей изменения объема при термических расширениях изоляции. В последней конструкции изоляцией служит пропитанная вязкой массой бумага с заполнением всех пор бумаги и зазоров между лентами пропитывающей массой. Газ в кабеле такого типа в виде подушек распределяется равномерно по длине кабеля.

Применение кабелей с сухой бумагой значительно облегчает вертикальную прокладку, так как отсутствуют статические давления в нижних частях кабеля, неизбежные в кабелях с масляным наполнением. Он, в частности, весьма удобен для работы на крайнем севере.

Вообще все газонаполненные кабели имеют значительные эксплоатационные преимущества перед кабелями с масляным наполнением, так как при этих кабелях отпадает потребность в специальных компенсаторах (баки давления и баки питания маслонаполненных кабелей). К тому же для них, понятно, менее опасны к. з.

Газ, применяемый при заполнении, должен иметь хорошие электрические характеристики, обладать хорошей теплопроводностью, быть химически инертным, наконец, он должен быть дешев.

Практический выбор можно сделать только между азотом и углекислотой. По электрической прочности оба газа приблизительно равноценны. Однако углекислый газ уступает азоту в том смысле, что абсорбция его диэлектриком сильно зависит от температуры, а это может вызывать нежелательные изменения давления в кабеле. Кроме того, он менее инертен и менее теплопроводен.

По этим соображениям нами в опытах применялся только азот.

Электрические характеристики трех конструкций высоковольтного кабеля. Авторы поставили своей задачей выяснить на моделях газонаполненных кабелей различных конструкций влияние типа изоляции на электрические характеристики кабеля и исследовать старение и стабильность электрических характеристик бумаг в сжатом газе.

Испытуемые образцы были выполнены в виде медных трубок диаметром 15 и длиною 210 mm, на которые наматывалась ленточная кабельная бумага (ширина ленты 20 mm). На концах делалась конусная подмотка, и все это покрывалось плотным слоем свинцовой фольги (рис. 1). Образцы, предназначенные для измерения диэлектрических потерь, имели еще охранные кольца.

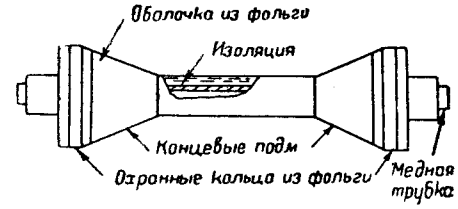


Рис. 1

Опыты производились на моделях трех конструкций, данные о которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конструкция	Марка бумаги	Толщина изоляции	Примечание
I	КВ — 0,12 (кондров.)	0,36 mm	Непропитанная бумага
II	То же	0,36 mm	Бумага, предварительно пропитанная
III	„ „	0,36 mm	Модели в готовом виде пропитывались брайтстоком на заводе „Москабель“ нормальным циклом 10-kV кабеля. Передача давления осуществлялась газом, находящимся вне электрического поля (рис. 2)

Образцы моделей типа *I* закладывались в бомбу и в ней сушились под вакуумом при температуре 90—100° С. Затем бомбу заполняли осушенным азотом до нужного давления и, давая ей остыть, пробивали модель импульсным или переменным напряжением. Образцы моделей *II* закладывались в бомбу и после эвакуации из нее воздуха она заполнялась осушенным техническим азотом до

нужного давления. Для моделей типа *III* бомбу заполняли на $^3/_4$ объема массой, примененной для пропитки образца. Затем посредством сжатого осушенного азота в бомбе создавалось нужное давление (рис. 2).

Образцы пробивались импульсным напряжением с формой волны 1,5/40 μ sec. Напряжение повышалось ступенями через каждые 5 ударов до пробоя образца.

На рис. 3 и 4 приведены кривые пробивного напряжения в зависимости от давления при переменном токе и импульсах для всех трех типов (кривые *I*, *II*, *III*). На рисунке номера кривых (1, 2, 3) соответствуют типам (*I*, *II*, *III*) кабеля.

Рис. 2

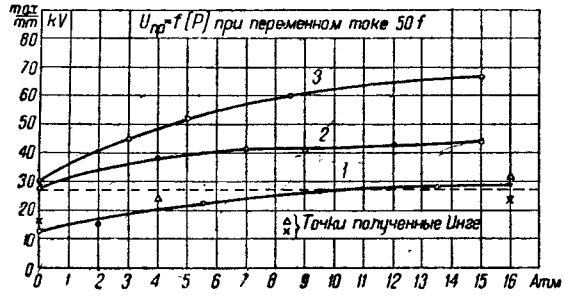


Рис. 3

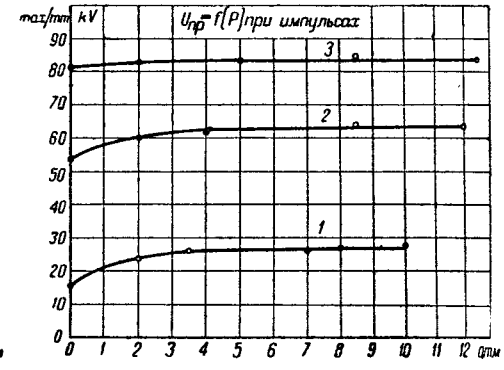


Рис. 4

Из рисунков видно, что электрическая прочность типа *III* значительно превосходит прочность первых двух типов моделей.

Сравнительные кривые ионизации [$\mathrm{tg}\,\delta = f(U)$] для всех типов моделей даны на рис. 5 и 6. Из приводимых кривых следует, что тип *III* моделей имеет наибольший градиент ионизации.

Стабильность электрических характеристик пропитанных и непропитанных бумаг в сжатом азоте[1]. В опытах применялся очищенный и технический азот. Технический азот содержал примесь кислорода до 1,5% и влажность его при нормальном давлении до 5 g/m³ газа.

Для наглядности оценки количества влаги в техническом азоте отметим, что в обычных условиях влажность воздуха 7—15 g/m³.

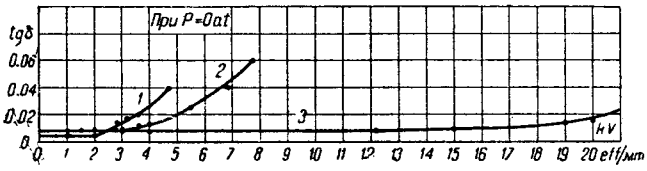


Рис. 5

При повышении давления (в постоянном объеме) содержание влаги будет увеличиваться пропорционально давлению, т. е. в техническом азоте при давлении в 10 at влажность газа 20—50 g/m³.

Чтобы устранить присутствующую в техническом азоте влагу, он пропускался через трубу, заполненную фосфорным ангидридом (P_2O_5).

Влажность азота контролировалась помощью двух U-образных стеклянных трубок (заполненных P_2O_5), соединенных последовательно с газовыми часами.

Через трубки медленно пропускалось около 100 l исследуемого азота. Количество влаги определялось путем взвешивания трубок до и после опыта. Осушенный однократным прохождением через фосфорный ангидрид азот имел влажность не более 0,3 g/m³ при нормальном давлении. Для контроля содержания кислорода в азоте применялись метод Мугдана и аппарат Гемпеля.

При исследовании старения образцов, в целях удаления следов воздуха и быстрого проникновения газа в толщу бумажной изоляции, был принят следующий порядок заполнения бомбы газом: бомба с вложенным в нее образцом сначала откачивалась вакуумным насосом[2], затем заполнялась сжатым азотом, потом вновь откачивалась и после ряда циклов заполнялась азотом до требуемого давления.

Проникновение сжатого газа в толщу изоляции контролировалось измерением $\mathrm{tg}\,\delta = f(U)$ в зависимости от длительности приложения давления. Контроль ионизационных градиентов и непосредственный осмотр (после опыта) образцов свидетельствовали о проникновении газа между слоями бумаг.

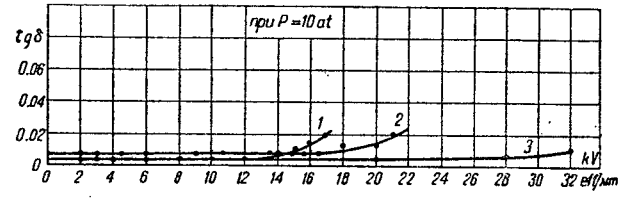


Рис. 6

Диэлектрические потери измерялись мостиком Шеринга с усилителем, дававшим большую точность измерений.

В сжатом азоте образцы выдерживались при температуре в 20 и 85° С. В целях увеличения интенсивности воздействия примесей азота на изоляцию, нагрев производился циклами (нагрев до 80—85° С с последующим охлаждением до комнатной температуры в 20°).

Испытания образцов, выполненных из пропитан-

[1] Под стабильностью изоляции в данном случае понимается неизменность $\mathrm{tg}\,\delta$ во времени. Причиной нарушения стабильности является гидроскопичность диэлектрика и частичное его окисление под действием примесей кислорода в азоте.

[2] При подготовке образца из непропитанной бумаги одновременно производилась сушка при 100° С в течение 5—6 h.

ных[3] и непропитанных бумаг, в осушенном азоте с содержанием кислорода до 1,5% при 20° С и при нагреве до 85° С, не обнаружили какой-либо нестабильности изоляции, наоборот, в техническом азоте (не подвергнутому специальной осушке) пропитанные и непропитанные бумаги быстро и резко увеличивали диэлектрические потери (табл. 2). В том случае, если нагрев производился циклами, в первое время наблюдалось уменьшение диэлектрических потерь (рис. 7). Это уменьшение угла после первых циклов прогрева объясняется тем, что масса, имеющая значительный угол потерь в сравнении с газом, под влиянием нагрева из образцов вытекает, образовавшиеся пустоты заполняются сжатым газом, и поэтому угол потерь образца несколько уменьшается.

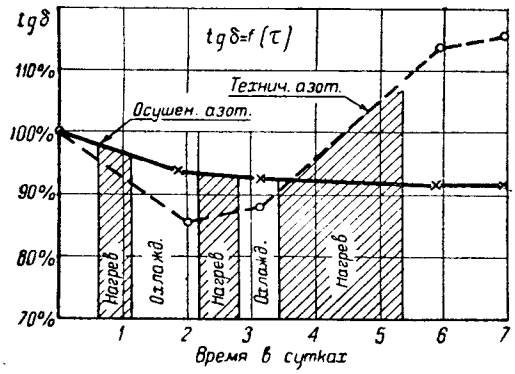


Рис. 7

При последующих циклах нагрева процесс идет так, что во влажном азоте угол потерь по времени растет, а в сухом остается постоянным (табл. 2).

Таблица 2

Изменение tg δ *изоляции при прогревах циклами*

№ опыта	Длит. опыта в сутках	Общая продолжительн. нагрева (в часах) до 80–85° С	Число циклов	tg δ до опыта	tg δ после опыта	Состояние азота	Давление, kg/cm²
1	11	46	4	0,004	0,0046	Технический	7
2	11	46	4	0,005	0,0047	Осушенный	7
3	7	74	3	0,0046	0,0053	Технический	5,5
4	7	74	3	0,007	0,0065	Осушенный	5,5
5	10	105	3	0,0046	0,0078	Технический	8
6	10	105	3	0,0055	0,0055	Осушенный	8

Примечание. Все образцы выполнены из пропитанной бумаги.

[3] Пропитка образцов производилась маслоканифольной массой.

В заключение необходимо заметить следующее.

В целях улучшения электрических характеристик газонаполненных кабелей, конструкция их и выполнение изоляции должны быть таковы, чтобы объем газа, находящийся в электрическом поле, был минимальный. С точки зрения улучшения электрических характеристик кабелей с газовыми подушками желательно, чтобы газ, находящийся в кабеле, был вне электрического поля.

Размеры газовых подушек должны быть значительно меньше, чем указывается в фирменных эскизах. Минимальный объем газа в кабеле определяется допустимыми колебаниями давления при температурных циклах.

Численные значения[4] ионизационных градиентов, при давлении 10 at для кабеля, выполненного из хорошо просушенной бумаги, достигают 14—15 kV/mm, из предварительно пропитанной бумаги – 16—18 kV/mm, а для кабеля с газовыми подушками, находящимися вне электрического поля, ионизационные градиенты выше 23 kV/mm. Кратковременная прочность[5] для малых толщин изоляции при токе 50 Hz и импульсах при давлении в 10 at для различного выполнения изоляции дается в табл. 3.

Таблица 3

Тип изоляции	50 Hz kV/mm	Импульсы kV/mm
Сухая бумага	28	28
Предварительно пропитанная бумага . .	42	63
Изоляция с вязкой пропиткой, газ вне электрического поля	63	82

В газонаполненном кабеле с сухой бумагой для увеличения допустимых градиентов следует уменьшить толщины газовых прослоек, применяя возможно более тонкие и плотные бумаги. Также целесообразно размещать между слоями сухой бумаги слои из более плотного материала (типа лако-ткани, лако-бумаги).

Литература

1. M. Hochstadter, W. Vogel and E. Bowden, The Pressure Cable, Journal of the Royal Society of Arts, Vol. 80, 1931, стр. 84.
2. P. Dunsheath, The Gas Cushion Cable, The El. 1935, August 16, стр. 193.
3. Gas-filled Cable, The El. 1934, стр. 807.
4. Nitrogen filled Cable for the Grid, El. R. № 3097, 1937, стр. 504.

[4] Получены на моделях из кондровской бумаги толщиной 0,12 mm, с общей толщиной изоляции 0,36 mm.

[5] Для кондровской бумаги толщиной 0,12 mm.

Щитовой прибор для измерения угла сдвига ротора

Л. И. Гутенмахер
Новочеркасский индустриальный институт

В СОВРЕМЕННЫХ условиях работы энергосистем вблизи предела устойчивости давно уже возникла необходимость в щитовом приборе, измеряющем длительно угол сдвига ротора ϑ.

Если произвести анализ опыта эксплоатации энергосистем, то становится ясной целесообразность установки такого прибора на станциях. В качестве наглядного доказательства этого положения можно напомнить два случая аварий с нарушением устойчивости в параллельной работе генераторов гэс им. Классона № 6 и № 5, происшедшие в июле 1934 г. и в октябре 1936 г. [1, 2 и 3]. В обоих случаях генераторы вышли из синхронизма в результате превышения предельного значения угла ϑ для условий работы станции. Так например, вторая авария произошла при следующих условиях. По последней (до аварии) записи показаний приборов напряжение составляло 83% от номинального и согласно записи самопишущего вольтметра еще продолжало снижаться, ток возбуждения — 89% и генератор работал с активной нагрузкой в 112% номинальной.

Из известной формулы

$$\sin\vartheta = \frac{PX}{EU} \qquad (1)$$

можно видеть, что при повышении мощности P или понижении тока возбуждения, пропорционального E, угол ϑ увеличивается. Так как ток статора уже достиг наибольшей допускаемой по инструкции величины, то, вероятно, дежурный стал снижать ток возбуждения, чтобы не допустить перегрузки обмоток статора. Но при этом угол ϑ увеличился до недопустимой величины, и в результате генератор вышел из синхронизма.

Таким образом при некоторых условиях, когда угол сдвига ротора оказывается близким по значению к предельной величине, генератор может выйти из синхронизма при толчке в сети или при неправильной регулировке возбуждения.

Наблюдение за значением угла ϑ позволяет своевременно принять меры к увеличению устойчивости генератора изменением возбуждения или нагрузки. Это имело бы немаловажное значение для увеличения устойчивости параллельной работы удаленных станций.

Выполнение устройств, позволяющих осуществить это наблюдение для всех генераторов системы, особенно ценно в условиях централизованного управления (диспетчеризации), когда показания этих приборов со всей системы могут быть сосредоточены в диспетчерском пункте.

В статье мы рассмотрим принцип работы и конструкцию прибора для измерения ϑ, удовлетворяющего требованиям эксплоатации к щитовым приборам.

Предлагаемое автором устройство основано на существующей зависимости угла ϑ от активной составляющей тока нагрузки и тока возбуждения (рис. 1).

Векторная диаграмма рис. 1 построена для генератора с неявно выраженными полюсами. В ней не учтено активное сопротивление обмотки статора, величина ничтожно малая сравнительно со значением синхронного реактанца больших машин.

Из диаграммы легко получить, что

$$\sin\vartheta = \frac{X_d}{E_d} I\cos\varphi. \qquad (2)$$

Электродвижущая сила E_d и синхронный реактанц X_d зависят от степени насыщения генератора и не могут быть непосредственно определены во время работы машины, но, как известно, отношение E_d к X_d при данном токе возбуждения равно установившемуся току трехполюсного к. з.:

$$\frac{E_d}{X_d} = I_{к.з.}. \qquad (3)$$

Установившийся ток трехполюсного к. з. на клеммах машины в свою очередь практически является линейной функцией тока возбуждения $i_в$ до примерно удвоенного значения $i_в$ при нормальной нагрузке машины. В этих пределах

$$I_{к.з.} = ki_в, \qquad (4)$$

где k — коэфициент, постоянный для каждой данной машины.

Эти соотношения позволяют переписать уравнение (1) так:

$$\sin\vartheta = \frac{I\cos\varphi}{ki_в}. \qquad (5)$$

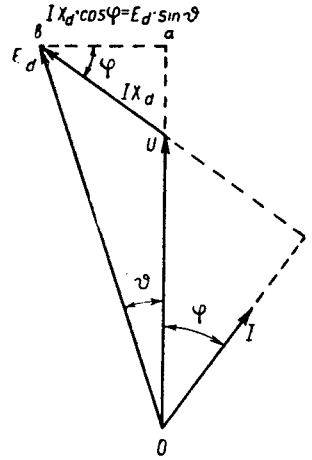


Рис. 1. Векторная диаграмма синхронной машины

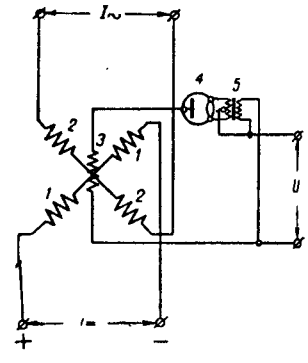


Рис. 2. Схема устройства прибора для измерения угла сдвига ротора

Это уравнение положено автором в основу измерения угла ϑ непосредственным отсчетом[1].

Автором разработаны несколько способов измерения отношения $\frac{I\cos\varphi}{i_в}$. Один из них с меха-

[1] Авторское свидетельство № 51761.

ническим вибрационным выпрямителем был описан в журн. «Электричество» [4]. Недостатки выпрямителя — износ контактов, необходимость ухода и наблюдения за его работой, заставили искать более удобных для эксплоатации способов.

В этой статье будет описан новый прибор [2] электродинамической системы, сконструированный автором совместно с А. В. Канашинским. По принципу своей работы прибор может быть назван электродинамическим векторметром.

Схема устройства этого прибора изображена на рис. 3. Он состоит из двух неподвижных расположенных под углом 90° катушек и одной подвижной. Подвод тока к подвижной катушке осуществляется через безмоментные пружины, его можно также подвести через металлические подшипники и ось этой катушки.

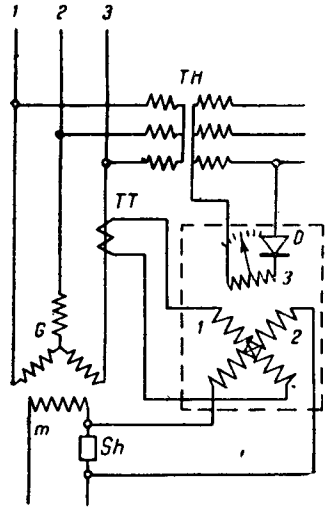


Рис. 3. Схема соединения обмоток прибора с измерительными трансформаторами и цепью возбуждения синхронного генератора

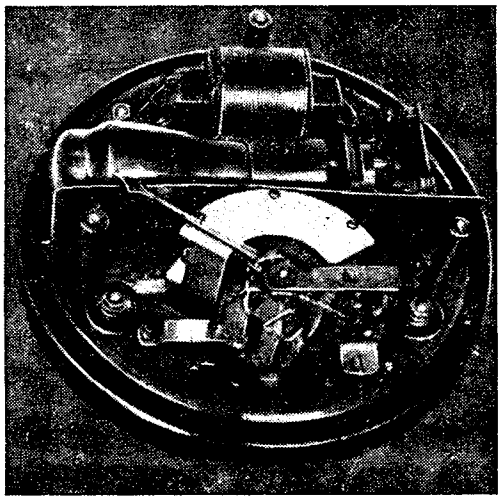


Рис. 4. Внутреннее устройство прибора

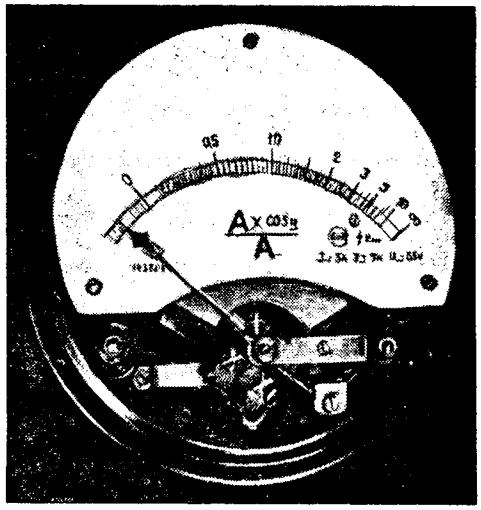


Рис. 5. Прибор без покрышки

Фазовое напряжение генератора от вторичной обмотки трансформатора напряжения питает через простой однополупериодный выпрямитель (диод, купрокс и т. п.) подвижную обмотку прибора. При синусоидальной форме кривой напряжения генератора $u = U \sin \omega t$ через подвижную катушку *3* будет проходить выпрямленный ток:

$$i_3 = k_3 U \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{1}{1 \cdot 3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2}{3 \cdot 5\pi} \cos 4\omega t \right). \quad (6)$$

Через неподвижную катушку *1* проходит ток нагрузки:

$$i_1 = I \sin (\omega t - \varphi). \quad (7)$$

В катушку *2* ответвлена при помощи шунта *Sh* (рис. 3) часть тока возбуждения генератора:

$$i_2 k_2 i_в. \quad (8)$$

На систему подвижной катушки воздействуют два устанавливающих вращающих момента:

$$m_1 = c_1 i_1 i_3 \cos \alpha, \quad (9)$$

где c_1 — постоянная прибора и α — угол поворота стрелки, укрепленной по направлению магнитного поля подвижной катушки относительно оси второй неподвижной катушки:

$$m_2 = c_2 i_2 i_3 \sin \alpha, \quad (10)$$

где c_2 — постоянная прибора.

Катушка устанавливается ввиду своей инертности в такое положение, при котором средние значения моментов m_1 и m_2 равны между собой:

$$\frac{1}{T_0} \int_0^T c_1 i_1 i_3 \cos \alpha dt = \frac{1}{T_0} \int_0^T c_2 i_2 i_3 \sin \alpha dt, \quad (11)$$

где T — период переменного тока.

Подстановка значений токов i_1, i_2 и i_3 — формулы (6), (7), (8) — и интегрирование дают:

$$c_1 I \frac{k_3}{4} U \cos \varphi \cos \alpha = c_2 k_2 k_3 i_в \frac{1}{\pi} U \sin \alpha.$$

Откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c_1 \pi}{c_2 4 k_2} \frac{I \cos \varphi}{i_в} = c \frac{I \cos \varphi}{i_в}, \quad (12)$$

т. е. тангенс угла поворота подвижной катушки прибора пропорционален отношению активной составляющей тока нагрузки к току возбуждения, что и требовалось.

Таким образом для измерения отношения величин активной составляющей переменного тока и постоянного тока цепи возбуждения приходится выпрямить напряжение генератора. При этом постоянная составляющая выпрямленного напряжения взаимодействует с постоянным током возбуждения, а первая гармоника переменной составляющей выпрямленного напряжения взаимодействует с переменным током, протекающим в неподвижной катушке *2*. В качестве выпрямителя может быть применен медно-закисный, селеновый или ламповый выпрямитель. Все они весьма нетребовательны к уходу.

На рис. 4, 5 приведены фотографии прибора [3].

Внутри прибора помещен также кенотрон ВО-230 и трансформатор накала к нему с коэфициентом

[2] Заявочное свидетельство № ТП-11131.

[3] Прибор изготовлен А. В. Канашинским.

трансформации 65/3, 6 V при токе накала 0,8 А. Эти детали отделены от системы измерительных катушек перегородкой.

На первую катушку постоянного тока вместе с подводящими концами приходится 520 mV при 5А протекающего через нее тока (при температуре 20° С). Падение напряжения на второй неподвижной катушке для переменного тока равно 400 mV при 5 А. В цепь подвижной катушки включено добавочное сопротивление 400 Ω, и постоянная составляющая тока ее (фазовое напряжение 65 V) равна 16 mA.

Испытание прибора производилось при различных значениях токов в катушках изменением сдвига фаз между напряжением и током (рис. 6). Геометрическим построением на рис. 6 начерчена тангенсоида. Как видно из рисунка, все 210 точек, полученные при испытании, нанесенные на диаграмме в виде кружков, весьма хорошо совпадают с значениями кривой.

В таблице приведены соотношения токов напряжения, при которых производились наблюдения.

Таблица

Значения токов и напряжения при испытании прибора

№ п/п	Напряжение V	Постоянный ток А	Переменный ток А	Сдвиг фаз	Число наблюдений
1	65	2,5	2,5	0—90°	45
2	65	5	5	0—90	40
3	65	3,75	5	0—90	30
4	65	2,5	5	0—90	35
5	42	1,25	5	0—90	20
6	65	1,25	5	0—90	20
7	78	1,25	5	0—90	25

Величина напряжения, как видно из таблицы, практически не влияет на показания прибора (см. пункты 5 и 7). Данные испытания позволяют считать, что погрешность измерения не превосходит $\pm 1°$ шкалы прибора. Точность измерения больше, чем, например, у обычных фазометров (± 2 угловых градусов).

Собственное потребление прибора в цепях измерительных трансформаторов тока и напряжения является вполне приемлемым (по 2—3 VA). Желательно только уменьшить собственное потребление в цепи катушки постоянного тока для того, чтобы несколько уменьшить сопротивление шунта в цепи тока возбуждения. Для этой цели сейчас разрабатывается конструкция прибора ферродинамической системы.

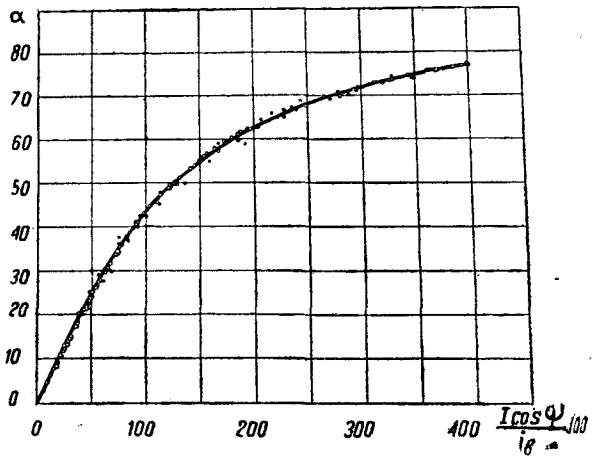


Рис. 6. Результаты испытания прибора (α — показание прибора в угловых градусах)

Пользуясь предложенным автором способом, можно также производить измерение угла сдвига фаз между э. д. с. генератора и любой точкой системы. При этом необходимо только знать реактивное сопротивление линий передач и промежуточных силовых трансформаторов, расположенных между генератором и данной точкой энергосистемы. Считая эти сопротивления постоянными, можно учесть падение напряжения на этих сопротивлениях соответствующим сдвигом напряжения, приложенного к прибору. Кроме этого, необходимо также изменить коэфициент пропорциональности k в формуле (5).

Применение этого прибора в качестве реле позволяет производить дистанционное деление системы в заданных точках (подстанциях) при определенных значениях угла ϑ. Им можно также непосредственно измерять активные и реактивные составляющие переменного тока. Достаточно, очевидно, пропустить через неподвижную катушку *1* некоторый неизменный по величине постоянный ток, и прибор приобретет необходимые свойства. Однако для этой цели значительно удобнее заменить катушку постоянным магнитом.

Литература

1. Н. А. Поляк, О повышении предельной нагрузки генераторов станций Мосэнерго, Бюллетень Мосэнерго № 3, 1936, стр. 40.

2. Н. А. Поляк, О работе генераторов при пониженном напряжении, Бюллетень Мосэнерго № 11, 1936, стр. 31.

3. И. М. Маркович, Борьба за повышение устойчивости параллельной работы Мосэнерго, Бюллетень Мосэнерго № 3, 1936, стр. 28.

4. Л И. Гутенмахер, Новые методы непосредственного определения угла сдвига фаз между э. д. с. и напряжением синхронных машин. „Электричество" № 20, 1937, стр. 39.

Автоматическая почта с электрическим управлением

М. М. Савостюк
Москва

АВТОМАТИЧЕСКАЯ почта используется для пересылки разного рода корреспонденции, пакетов, книг, телеграфных бланков, посылок, мелких образцов материалов, легкого инструмента, проб и т. п. на небольшой территории внутри здания или между отдельными зданиями, удаленными друг от друга на некоторое расстояние.

Существуют несколько систем автоматической почты с электрическим управлением. Мы рассмотрим две системы: пневматическую и электромагнитную. Первая распространена за границей; общая протяженность трубопроводов, находящихся в эксплоатации установок, достигает сотен километров. Вторая разработана у нас в 1935 г. и находится в стадии опытного исследования. Автоматическая почта в СССР пока не получила распространения, если не считать двух установок НКСвязи (московский и ленинградский центральные телеграфы) и одной в Наркомфине СССР в Москве.

Независимо от типа пневматической почты и ее конструктивных особенностей она в основном состоит из металлического трубопровода T_1 и T_2 (рис. 1), приемно-передающих станций $З_1К_1$ и $З_2К_2$, воздуходувных агрегатов $ВА$ и некоторых вспомогательных устройств. Движение патрона с вложенным отправлением осуществляется за счет искусственно создаваемой разности давления воздуха между начальным и оконечным пунктами трубопроводной сети. Скорость движения патрона—10 ÷ 15 m/sec. Питание трубопровода от воздуходувного агрегата $ВА$ можно осуществить на вакуум, на сжатие или комбинированным путем, т. е. на вакуум и на сжатие.

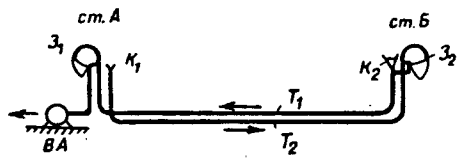


Рис. 1

В системе, изображенной на рис. 1, применено питание на вакуум. При движении патрона, например от передатчика $К_2$ станции $Б$ до приемника $З_1$ станции $А$, в трубе T_1 создается вакуум впереди патрона и сжатие позади него. Вакуум создается воздуходувным агрегатом $ВА$, а сжатие — естественным путем — атмосферным воздухом при открывании крышки передатчика $К_2$ в момент отправления патрона. По прибытии патрона в приемник $З_1$ сжатый воздух из трубопровода отсасывается вентилятором.

Металлические трубы для внешней пневматической почты обычно прокладываются под землей, а для внутренней — в открытом или закрытом виде на потолках, стенах, в подвальных помещениях и т. п.

При наличии нескольких приемно-передающих станций пересылка отправлений в патронах из одного пункта в другой в новейших установках осуществляется при помощи стрелочной системы управления патронами подобно тому, как это делается на ж.-д. транспорте в системе автоблокировки для регулирования движением поездов. В 1932 г. в Берлине построена пневматическая почта, у которой все функции по перемещению патронов выполняют сами же патроны, для чего на них предварительно устанавливаются два железных передвижных кольца $К$ (рис. 2), которые производят затем управление стрелкою.

В этой почте для управления патронами использованы явления электромагнитной индукции. Если на трубу $Т$ снаружи поместить два поляризованных электромагнита $М_1$ и $М_2$, расположенные на определенном расстоянии друг от друга, то при прохождении в трубопроводе патрона из немагнитного материала (алюминий, латунь, фибра, целлюлоид и др.), но имеющего на своей внешней поверхности два кольца из магнитного материала, магнитное сопротивление цепи изменится, а в связи с этим изменится и магнитный поток, отчего в обмотках $В_3$ и $В_4$ появится э. д. с. Электродвижущая сила образуется только в том случае, когда оба конца патрона, проходящего в трубе, станут точно против постоянных магнитов $М_1$ и $М_2$. В катушку $В_3$ включена неподвижная обмотка $В_1$ электродинамометра, а в катушку $В_4$ — подвижная его обмотка $В_2$, которая в нормальном положении устанавливается перпендикулярно к $В_1$. К подвижной системе катушки $В_2$ прикрепляется контактная пружина $а$, напротив которой лежит контакт $в$.

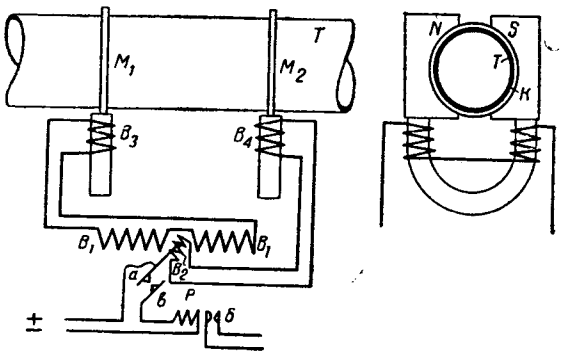


Рис. 2

В результате действия э. д. с. в обмотках $В_1$ и $В_2$ создастся вращающий момент в подвижной системе $В_2$, и пружинка $а$ замкнет контакт $в$. При этом замыкается также цепь реле $Р$, отчего через контакт $б$ сработает стрелочный механизм. Как только патрон выйдет со своими кольцами из магнитного поля электромагнитов, э. д. с. в обмотках $В_1$ и $В_2$ электродинамометра исчезнет, и вся система приходит в нерабочее положение, и контакт $в$ с пружинкой $а$ нарушается. Точно так же система не придет в действие, если патрон, подойдя в трубопроводе к электромагниту, занял такое положение, при котором только одно из двух его колец стало против полюсов $М_1$ и $М_2$. Таким образом для каждой станции электромагниты на трубе должны устанавливаться на каком-либо определенном расстоянии и соответственно на таком же расстоянии должны устанавливаться железные кольца патрона, принадлежащего этой станции. При недостаточности числа комбинаций при указанной выше расстановке электромагнитов и при наличии двух колец можно поместить на трубе $Т$ не два электромагнита, а три, и на патроне, таким образом, не два кольца, а три.

Оригинальное решение вопроса в деле управления патронами в пневматической почте предложила фирма Микс и Генест.

В соответствующем механизме патрона помещается замкнутый колебательный контур, состоящий из регулируемого индуктивного сопротивления L и конденсатора $С$. Специальным переключателем можно установить то или

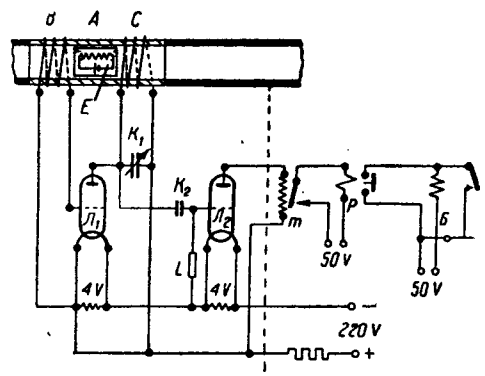


Рис. 3

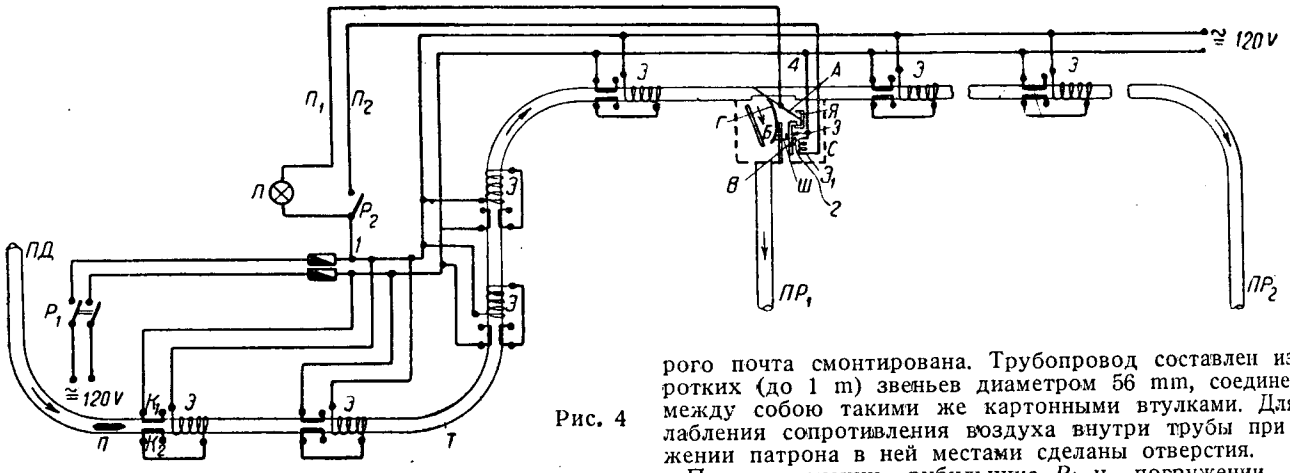


Рис. 4

другое сопротивление и индуктивность в контуре. Контур настраивается на длину волны генераторной схемы, помещенной на трубопроводе приемной станции (рис. 3).

Показанная на рис. 3 часть трубы в виде муфты *А* сделана из диэлектрика, на нее надеты две катушки *В* и *С* из изолированной проволоки. Катушка *В* включена в сетку лампы $Л_1$, а катушка *С* — в анодную цепь ее. Лампа $Л_2$ является усилительной. При включении параллельно к цепи катушки *С* конденсатора переменной емкости $К_1$ в ее цепи получается колебательный контур. В нормальном состоянии, когда в муфте *А* нет патрона, колебательный процесс контура катушки *С* не может произвести какого-либо индуктивного действия на цепь катушки *В* ввиду значительного расстояния между этими катушками. Однако как только проходящий в трубопроводе патрон *Е* попадает в муфту *А*, то благодаря настройке его контура в резонанс с колебательным контуром схемы генератора данной станции, создается индуктивная связь двух контуров, в результате чего на сетку лампы $Л_1$ подается сигнал определенной частоты. Электрические колебания лампы $Л_1$, продолжающиеся при скорости движения патрона в 20 m/sec, от 0,002 до 0,001 sec, усиливаются лампой $Л_2$. Здесь же эти импульсы, кроме того, несколько удлиняются по времени и затем поступают в поляризованное реле *т*. При соответствующем импульсе последнее притянет свой якорь к контакту, отчего замкнется цепь другого реле *Р*, которое и приведет в действие стрелочный механизм *Б*. Стрелка удерживается в своем рабочем положении до тех пор, пока патрон не покинет муфты *А*.

В этой системе, как видно из описания, на каждой приемно-передающей станции пневматической почты необходим ламповый генератор, настроенный на частоту, отличную от частоты, принятой для других станций данного трубопровода. Эта настройка обычно производится заблаговременно и не меняется. Существуют еще и другие схемы управления патронами в пневматической почте, например фотоэлектрическая, кнопочная и др.

Как отмечалось выше, пневматическая почта, независимо от системы управления патронами, требует наличия воздуходувных агрегатов, а при внешнем трубопроводе и целого ряда других вспомогательных устройств, у нас не производимых для этих целей. Совсем иначе разрешили задачу автоматической почты наши конструкторы Н. Н. Волков и А. Ф. Головацкий. Основываясь на известных принципах электромагнитного управления патронами в металлическом трубопроводе пневматической почты, они сконструировали почту, выгодно разрешающую задачу внутреннего обмена отправлениями и без применения пневматической почты. Схема действия такой электропочты показана на рис. 4.

На трубопровод *Т* из немагнитного материала (картон) надеты на определенном расстоянии друг от друга соленоиды *Э*, которые включаются параллельно в сеть постоянного или переменного тока 120 V. Катушки соленоида одним своим концом включены в контактную пластинку $К_2$ внутри трубы, а другим — к одному из питающих проводов. Другой питающий провод включен во вторую контактную пластинку $К_1$, также помещенную внутри трубы. Трасса трубопровода имеет криволинейное очертание, применительно к условиям того помещения, на стенах которого почта смонтирована. Трубопровод составлен из коротких (до 1 m) звеньев диаметром 56 mm, соединенных между собою такими же картонными втулками. Для ослабления сопротивления воздуха внутри трубы при движении патрона в ней местами сделаны отверстия.

При включении рубильника $Р_1$ и погружении затем металлического патрона *П* в передатчик *ПД* он по трубе попадает в первый соленоид *Э*, где вследствие замыкания им контактов $К_1$ и $К_2$ включает цепь тока на время своего прохождения до середины соленоида. От середины соленоида Э до контактов следующего соленоида патрон движется при разомкнутой цепи благодаря приобретенной им живой силе. У второго соленоида повторяются те же включения и выключения и т. д., пока, наконец, патрон не попадет в приемное колено трубопровода $ПР_2$, где и будет выброшен в улавливатель.

При замыкании кнопки $Р_2$ (рис. 4) придет в действие стрелочный электромагнитный механизм *С* и, заблокировав путь патрона к приемнику $ПР_2$, откроет ему путь к промежуточному приемнику $ПР_1$. При этом загорится лампа *Л*, которая и будет указывать на заблокированный путь. Цепь тока электромагнита $Э_1$ стрелочного механизма будет замкнута по пути: провод электросети в точке *1*, кнопка $Р_2$, соединительный провод $П_2$, электромагнит $Э_1$, точка *3* и у точки *4* второй конец провода электросети. Электромагнит вследствие этого притянет укорь *Я*, который тотчас же поставит язычок *А* в положение под углом в 45°, отчего и заблокируется путь к приемнику $ПР_2$. Лампа *Л* будет включена по цепи: провод электросети в точке *1*, *Л*, провод $П_1$, язычок стрелки *А*, якорь *Я*, рычаг *В*, контакт *2*, точки *3* и *4* и другой провод электросети. Выключение лампы *Л* и возвращение якоря, а вместе с ним и язычка *А* в нормальное положение, произойдут сейчас же, как только патрон пройдет поворот колена *Б* и своим телом ударит пружинку *Г*, связанную с язычком *А*. При этом штифт *Ш* толкнет рычаг *В*, который соскочит с плеча якоря *Я* и этим разомкнет контакт у *2*. Таким образом лампа *Л* при нажатии кнопки $Р_2$ зажигается, а при проходе патроном поворотного колена *Б* и ударе о пружинку *Г* гаснет. Весь стрелочный механизм заключен в деревянный ящик *С*, который прикрепляется на стене вместе с сетью трубопровода.

Для двухсторонней связи по одному и тому же трубопроводу описанная выше контактная система устанавливается с обеих сторон соленоида. На концах трубопровода могут быть установлены самые простые коммутаторы для включения и выключения тока, подводимого к контактной системе трубопровода. С переводом одного из коммутаторов в рабочее положение, на месте отправления зажигается зеленая сигнальная лампа, а на противоположном конце линии — красная, показывающая, что трубопровод занят. На случай застревания патрона на каком-либо участке трубопровода применена оптическая сигнализация, которая основана на том, что на станции отправления зажигается одна за другой сигнальная лампа, указывающая номер того соленоида, мимо которого прошел патрон. Если последний при этом где-либо застрянет внутри трубопровода, то по номеру сигнальной лампы можно определить аварийный участок.

Патрон представляет полый железный металлический цилиндр с концами, заостренными на конус. Внешний диаметр его равен 47 mm, длина 200, а толщина стенок 1 mm. Вес патрона около 250 g.

Электромагнитная почта может найти применение для внутренних установок в различного рода учреждениях, на фабриках и заводах, в библиотеках, на телеграфных и телефонных станциях, при оборудовании самолетов и др.

ХРОНИКА

К 30-летию научно-педагогической деятельности проф. В. М. Хрущова

Василий Михайлович Хрущов родился в Ленинграде в 1882 г. Среднее образование получил в Красноярской и Томской гимназиях. По окончании в 1901 г. средней школы В. М. Хрущов поступил в Томский технологический институт. В 1908 г. получил звание инженера-механика по уклону электротехники и был оставлен ассистентом электротехнической лаборатории института. В 1912 г. сдал экзамены на право занятия кафедры и в 1913 г. был послан в научную командировку за границу. В 1915 г. защитил диссертацию на право занятия кафедры и получил звание приват-доцента. В 1920 г. был назначен профессором Томского технологического института. В сентябре 1921 г. перевелся профессором в Саратовский политехнический институт, а в январе 1923 г. в Харьковский технологический институт.

С 1930 г., после преобразования технологического института, состоит профессором Харьковского электротехнического института.

В. М. Хрущов написал 39 научных работ, опубликованных в наших и заграничных журналах, ряд технических статей и 7 книг. На протяжении с 1913 г. по 1938 г. В. М. Хрущовым опубликовано в журнале «Электричество» 20 статей и заметок.

Известны работы В. М. Хрущова в области электрических сетей и режимов работы электросистем.

В марте 1937 г. ВАК Комитета по делам высшей школы присвоил В. М. Хрущову степень доктора технических наук.

Ведя непрерывно большую педагогическую работу, В. М. Хрущов подготовил большое количество инженеров.

В. М. Хрущов никогда не замыкался в рамки только педагога или ученого, а всегда поддерживал тесную связь с промышленностью — состоял в течение ряда лет председателем научно-технического совета энергетики ВСНХ УССР, консультантом Донбасстока, Эсхара и т. д., апробировал большое количество проектов и давал заключения по ряду специальных вопросов.

В. М. Хрущов совмещает свою научную и педагогическую работу с общественной деятельностью, работая как член окружной избирательной комиссии Дзержинского района Харькова по выборам в Верховный Совет СССР и председателем УКРНИТО энергетики и связи и т. п.

В. М. Хрущов в 1935 г. вступил в группу сочувствующих ВКП(б) в ХЭТИ.

В марте с. г. исполнилось 30 лет научно-педагогической деятельности В. М. Хрущова. Общественность Харькова 11 апреля с. г. в торжественном заседании отметила этот юбилей.

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

О разработке норм и правил в области электротехники

В № 3 «Электричества», 1938, помещена статья Я. Л. Зеликсона относительно положения дела с изданием в СССР норм и правил в области электротехники. Нужно полностью согласиться с мнением т. Зеликсона о необходимости изменения порядка разработки, рассмотрения и опубликования не только норм и правил, но и стандартов в области электротехники.

Необходимо внести коренные изменения в установившуюся практику с тем, чтобы поставить в СССР дело издания обязательных правил, норм и стандартов в области электротехники на надлежащую высоту. Необходимо принять следующий порядок.

Для руководства всем делом составления правил, норм и стандартов в области электротехники (конечно, за исключением специальных случаев применения электрической энергии) должен быть организован специальный центр.

1. Центр опубликовывает ежегодно список норм, правил и стандартов, подлежащих разработке, с указанием учреждений или организаций, которым поручается разработка проектов правил, норм и стандартов.

2. По получении отзывов и соображений относительно опубликованного списка составляется окончательный перечень проектов, подлежащих разработке, и устанавливаются сроки разработки.

3. Разработка проектов правил, норм и стандартов ведется небольшими группами специалистов, и составленные ими проекты публикуются для получения отзывов в соответствующих электротехнических журналах.

4. По получении отзывов те же группы рассматривают отзывы, вносят в свои проекты соответствующие изменения и дополнения и составляют окончательные проекты правил, норм и стандартов.

5. Проекты в последней редакции вносятся на окончательное рассмотрение специальных конференций, которые периодически собираются организующим центром и на которые приглашаются составители проектов, представители электроснабжающих, электромонтажных, заводских и научных организаций и учреждений.

6. Одобренные конференциями проекты вносятся на утверждение в соответствующие инстанции.

Предлагаемый мной порядок прохождения может показаться слишком сложным и длительным. На самом деле он потребует немногим больше времени, чем принятый раньше, так как и теперь приходится месяцами ждать отзывов на проекты от учреждений, которым они рассылаются. Если наши журналы придут на помощь, то отзывы можно будет получить в тот же срок, но с той только разницей, что они будут даны всеми лицами и учреждениями, заинтересованными в правилах, нормах и стандартах, а не весьма небольшим числом учреждений, которым проекты рассылаются в канцелярском порядке и которые иногда дают отзывы порядка «отписок». При опубликовании в журналах все проекты, несомненно, сделаются предметом обсуждения в наших научно-технических обществах, на заводах и т. д., от чего можно ждать только их значительного улучшения. Точно так же отзывы о публикуемом перечне проектов, предполагаемых к разработке, позволят с достаточной полностью удовлетворить требования промышленности и строительства.

Если по каким-либо причинам окажется невозможным опубликование всех проектов, то необходимо публиковать хотя бы главнейшие из них; к ним можно, например, отнести только что составленные проекты «Правил устройства электротехнических установок с точки зрения безопасности», «Правил эксплоатации электротехнических устройств», «Руководящих указаний по проектированию электрических сетей», «Руководящих указаний для установок 220/380 V» и т. п. По моему мнению заблаговременное опубликование перечня проектов, а затем и самых проектов даст полную гарантию, что в СССР будут своевременно издаваться нужные нормы, правила и стандарты и что они будут надлежащего качества. Опыт опубликования проектов правил и норм в журнале «Электричество» давал всегда отличные результаты.

В заметку Я. Л. Зеликсона необходимо, однако, внести фактическую поправку.

Я. Л. Зеликсон, говоря о существующем порядке составления правил и норм, указывает, что организованная Главэнерго при СЗО Теплоэлектропроекта комиссия, существующая уже около 3 лет, не выпустила до сих пор ни одного труда.

На самом деле это не так.

Ленинградская группа (СЗО ТЭП) разработала за 1936 и 1937 гг. целый ряд норм и правил, в том числе 22 из области электротехники. Все они после обсуждения в специальных комиссиях группы рассылались на заключения в целый ряд заинтересованных организаций и по получении заключений вновь перерабатывались, учитывая присланные заключения. Окончательный текст правил и норм отправлялся затем на утверждение Главэнерго.

К сожалению, утверждение это сильно задерживалось.

Из 22 правил и норм, посланных в Главэнерго в период с января 1936 г. по февраль 1938 г., утверждены до настоящего времени по имеющимся сведениям не все. Остальные еще рассматриваются. Медленность в рассмотрении объясняется, главным образом, отсутствием хорошо организованного центра по изданию правил и норм. Этот центр необходимо создать, связав его с органом, издающим ОСТ на электротехническое оборудование. Без этой связи работа как по изданию норм и правил, так и по составлению стандартов, которые должны быть увязаны между собой, сильно затрудняется.

Необходимо, чтобы Главэнерго, Главэлектропром и Главэнергопром обратили на этот участок работы особое внимание и приняли все ме-

ры к обеспечению своевременного выпуска норм, правил и стандартов, обеспечив электротехнической общественности возможность высказать свое мнение о проектах и предложить нужные коррективы.

Надо, однако, заметить, что организация работ по правилам, нормам и стандартам в общественных научно-технических органах весьма трудна и до сих пор по большей части не удавалась. Тем более надо приветствовать инициативу Московского энергетического общества, о которой говорит Я. Л. Зеликсон, и необходимо оказать этой инициативе полнейшую поддержку.

М. А. Шателен

Еще о расчете сверхтоков методом спрямленной внешней характеристики

Инж. Г. И. Атабеков в своем ответе на мою статью[1] «Действительно ли нужно при расчете сверхтоков учитывать активную составляющую тока нагрузки» весьма мало коснулся существа дела, а предпочел почему-то сделать историческую экскурсию. Из заключительного абзаца его возражения следует, что формулы (3), данные им в статье[2] „Выбор э. д. с. и реактивностей генераторов при расчете сверхтоков методом симметричных составляющих", относящиеся к случаю учета активной и реактивной составляющих нагрузки, не должны рассматриваться как расчетные и что он не предлагает вести расчет с учетом активной составляющей нагрузки. В таком случае данные мною формулы:

$$E_г = \frac{w_к}{w_к - 1} \quad \text{и} \quad X_г = \frac{1}{w_к - 1} \qquad (1)$$

являются единственно правильными, формулы же (3) инж. Атабекова лишены какого-либо практического значения. Как неизбежный вывод, отсюда вытекает все сказанное мною о спрямлении характеристики холостого хода в статье[3] „Рациональный выбор величины э. д. с. и реактивных сопротивлений генератора при расчете сверхтоков методом симметричных составляющих". В частности, отсюда следует, что прямолинейная характеристика холостого хода, отвечающая выражениям (1) для всех крупных наших турбогенераторов, совсем не пересекает действительную характеристику холостого хода. Вполне также ясна невозможность получить правильные значения э. д. с. и реактивного сопротив ения генератора путем какого-либо спрямления последней характеристики. Наконец, с полной очевидностью следует совершенная необоснованность утверждения инж. Г. И. Атабекова о том, что спрямление характеристики холостого хода и внешней одно и то же.

В исторической экскурсии инж. Г. И. Атабекова имеются также существенные неправильности. Разумеется, я никогда не мог нападать на метод симметричных составляющих, представляющий собой строго обоснованный математический метод, что я неоднократно подчеркивал. Это было бы столь же нелепо, как если бы кто-нибудь вздумал отрицать дифференциальное исчисление. Речь шла о применении метода симметричных составляющих к расчету токов к. з. В результате моей статьи „Сравнение метода спрямленной внешней характеристики расчета сверхтоков с методом симметричных составляющих" и возражения на нее инж. Д. А. Городского (несмотря на противоречивость, с первого взгляда, этого возражения моей статье) было установлено, что применять метод симметричных слагающих к расчету токов к. з. в электрической сети без учета нагрузок нельзя.

В статье же „Рациональный выбор величины э. д. с. и реактивных сопротивлений генератора при расчете сверхтоков методом симметричных составляющих" мною были даны величины расчетных э. д. с. и реактивных сопротивлений, обеспечивающие правильность результатов расчета сверхтоков при применении метода симметричных составляющих с учетом влияния нагрузки.

Таким путем были выяснены все условия, вне которых метод симметричных составляющих в применении его к расчету сверхтоков в электрических сетях будет давать неправильные результаты.

Совершенно непонятно, на основе чего инж. Г. И. Атабеков мог заключить, что „вопрос о непригодности метода спрямления характеристики холостого хода для расчетов токов к. з. снимается с повестки дня", в то время как моя статья доказывает как раз обратное.

Еще одно замечание инж. Г. И. Атабекову: спрямление внешней характеристики нужно, разумеется, не для доказательства формул (1), а для внесения в них поправочных коэфициентов, учитывающих криволинейность этой характеристики.

Я считаю, что вопрос о расчете сверхтоков методом спрямленной внешней характеристики в настоящее время вполне достаточно освещен, и никаких новых аргументов в пользу спрямления характеристики холостого хода инж. Г. И. Атабеков ни в своей статье, ни в своем возражении не привел.

В. М. Хрущов
Харьковский электротехнический институт

[1] «Электричество» № 17—18, 1937.
[2] «Электричество» № 21, 1936.
[3] «Электричество» № 17, 1935.

Фактическая справка к письму проф. В. М. Хрущова

1. В начале дискуссии проф. В. М. Хрущов противопоставлял метод симметричных составляющих методу спрямленной внешней характеристики, что, между прочим, явствует из самого названия его статьи: «Сравнение метода спрямленной внешней характеристики расчета сверхтоков с методом симметричных составляющих» («Электричество» № 23—24, 1932). При этом проф. В. М. Хрущов писал (стр. 1071): «...метод симметричных составляющих по сравнению с методом спрямленной внешней характеристики никаких преимуществ не имеет; наоборот, он гораздо сложнее последнего и в лучшем случае может дать одинаковую точность. Мало того, можно показать, что если применять при расчете методом симметричных составляющих положительные реактанцы генератора, то расчет всегда приведет к весьма неправильным результатам».

Теперь же проф. В. М. Хрущов пишет: «Разумеется я никогда не мог нападать на метод симметричных составляющих...».

2. В статье, помещенной в журнале «Электричество» № 17—18, 1937, проф. В. М. Хрущов писал (стр. 52): «Конечно, от характеристики холостого хода можно притти к любой внешней характеристике...». Это было справедливым признанием.

Теперь же проф. В. М. Хрущов пишет: «Вполне также ясна невозможность получить правильные значения э. д. с. и реактивного сопротивления генератора путем какого-либо спрямления последней характеристики» (речь идет о характеристике холостого хода, Г. А.).

3. В статье, помещенной в журнале «Электричество» № 5, 1937, проф. В. М. Хрущов писал (стр. 22): «...внеш-

няя характеристика играет здесь второстепенную роль, она представляет лишь доказательство справедливости формулы».

Теперь же проф. В. М. Хрущов заявляет, что «...спрямление внешней характеристики нужно, разумеется, не для доказательства формул (1)...».

4. В статье, помещенной в журнале «Электричество» № 17—18, 1937, проф. В. М. Хрущов писал: «В последней части своей статьи инж. Атабеков говорит о том, что при определении величины установившегося тока к. з., в силу ряда обстоятельств, не требуется большой точности; *с этим, разумеется, необходимо всецело согласиться*» (курсив наш. Г. А.).

Теперь же проф. В. М. Хрущов заявляет, что спрямление внешней характеристики нужно «...для внесения... поправочных коэфициентов, учитывающих криволинейность этой характеристики».

При трехфазном к. з. поправочный[1] коэфициент по мнению проф. В. М. Хрущова может быть принят порядка 1,017 (!).

Предоставляем читателям судить о том, можно ли говорить о такой «точности» при прочих грубых предпосылках, положенных в основу расчета установившихся токов к. з.

Г. И. Атабеков
Теплоэлектропроект

[1] В. М. Хрущов, Расчет токов короткого замыкания методом спрямленной внешней характеристики. Гос. научно-техническое издательство Украины, 1937, стр. 9 и 10.

ОТ РЕДАКЦИИ

Опубликованием напечатанных выше писем проф. В. М. Хрущова и инж. Г. И. Атабекова редакция считает целесообразным прекратить дискуссию, развернувшуюся на страницах „Электричества", по поводу применения метода спрямленной внешней характеристики к расчету токов короткого замыкания.

Правильность приводимых проф. В. М. Хрущовым формул (1) не вызывает сомнений, так же как не должно вызывать сомнений и то, что расчеты, базирующиеся на этих формулах, оказываются одним из частных случаев применения метода спрямленной характеристики холостого хода при соответствующем выборе расчетной э. д. с. и расчетного реактанца.

Учет нагрузки одинаково необходим при всех способах расчета. Однако обычно учитывались только реактивные составляющие. В отличие от этого проф. В. М. Хрущовым сделана попытка учесть и полные токи нагрузки.

Необходимо в заключение отметить, что спрямление внешней характеристики, как и спрямление характеристики холостого хода, является лишь средством к выбору расчетных э. д. с. и сопротивлений генераторов. При этом вариация добавочных условий (как-то: соблюдение условий к. з. на клеммах, удовлетворение условиям предшествующего рабочего режима, учет нагрузки при к. з. и т. д.) приводит к различным значениям расчетных параметров генераторов.

Точность же вычисления токов к. з. определяется исходными добавочными условиями и способом учета нагрузки, независимо от того, производится ли замена прямой линией внешней характеристики или характеристики холостого хода.

Против искажения ближайших перспектив 50-периодного коллекторного двигателя

Анализируя в своей статье[1] 50-периодный коллекторный электродвигатель Сименса и объявляя о «достигнутом фирмой успехе», инж. О. В. Бенедикт при этом дает двусмысленную оценку: то ли этот двигатель — результат «хорошо продуманного решения», то ли это «неудовлетворительный компромисс».

Известно, что Сименс построил 50-периодный коллекторный электродвигатель, который «принципиально не отличается от обычного однофазного двигателя на 16²/₃ Hz»[1].

Но давным-давно установлено, что коллекторный двигатель на 50 Hz, не отличающийся от обычного однофазного двигателя на 16²/₃ Hz обладает весьма серьезными недостатками. При одинаковой мощности двигателей на 50 Hz и 16²/₃ Hz — у первых сила тока возрастает в три раза и увеличивается в три раза число полюсов и щеткодержателей. Также сильно ухудшается использование материалов для двигателей на 50 Hz и др. Чрезмерное увеличение силы тока двигателей сильно удорожает аппаратуру электровоза и затрудняет регулирование нагрузки и скорости двигателей. Вот главные причины, которые не позволяют до сих пор создать рациональный тяговый коллекторный двигатель на 50 Hz.

Очевидно, что заслуживать внимания может лишь такое «хорошо продуманное решение», которое радикальным образом устраняет вышеуказанные недостатки в коллекторном двигателе на 50 Hz. Устраняются ли они в рассматриваемой конструкции? Нет. В самом деле мощность новых двигателей на 50 Hz в два раза меньше, чем мощность обычных двигателей на 16²/₃ Hz, причем сила тока у них больше, чем в двигателях на 16²/₃ Hz. Число полюсов и щеткодержателей увеличено до 14 вместо 8 в двигателях на 16²/₃ Hz.

Возникает естественно вопрос: в чем же конкретно заключается «достигнутый фирмой успех» и почему инж. Бенедикт находит даже возможным рассматривать двигатель Сименса в связи с задачами «третьей пятилетки — нового этапа техники, которому будут сопутствовать большие сдвиги в электромашиностроении»...[1]

Единственный довод (а других доводов вообще нет), которым пытается «обосновать» инж. Бенедикт восхваление двигателя Сименса, таков: в новом двигателе щетки на коллекторе «расположены в шахматном порядке»[1].

Рассмотрим это по существу.

Отметим, что шахматное расположение щеток по коллектору приводит к удвоению его длины. Но этот коллектор отличается от обычного сдвоенного коллектора тем, что у него общая коллекторная пластина. Инж. Бенедикт объясняет это решение с точки зрения уменьшения «опасности переброса»[1]. Последнее, как известно, связано с образованием дуги между выбегающей из-под щетки коллекторной пластиной и самой щеткой, причем эта дуга приводит к серьезным повреждениям еще до того, как она достигнет противоположной щетки. Поэтому следует признать, что объяснение, связывающее шахматное расположение щеток с явлением «опасности переброса», тем более не выдерживает критики, что сериесный коллекторный двигатель на 50 Hz является низковольтной машиной, обладающей большой электромагнитной инерцией.

В действительности же шахматное расположение щеток лишь облегчает уход и наблюдение за коллектором и щетками. Это, безусловно, имеет известное значение для электромашин с весьма большим числом щеткодержателей. Но увеличение длины коллекора приво-

[1] О. В. Бенедикт, Ближайшие перспективы коллекторного двигателя, «Электричество» № 19, 1937.

дит к общему повышению веса двигателя и поэтому уж не слишком ли это дорогая плата за улучшение условий ухода за щетками?

Также, очевидно, что уменьшение «удельной нагрузки поверхности коллектора щетками» может быть достигнуто осевым размещением щеток, которые при этом сильно разгружаются, если удлиняется коллектор.

Двигатель на 50 Hz с удлиненным коллектором еще больше ухудшает использование его материалов в сравнении с таким же двигателем, но с нормальным размещением щеток.

Нам кажется весьма странной аргументация инж. Бенедикта, всячески старающегося доказать, что вовсе не плохо удвоить длину коллектора, если «хватает места»[1]. Всем специалистам хорошо известно, что во всех без исключения тяговых машинах всегда «нехватает места» и вписывание такой машины в габариты требует немало труда со стороны конструктора. В этом же тяговом двигателе оказывается «хватает места» и даже целесообразно, видите ли, заполнить его увеличением размеров коллектора. Нам представляется, что если бы кто-либо из конструкторов обычных тяговых двигателей обнаружил бы в них «свободное» место и предложил бы для его заполнения удвоить длину коллектора, то это сочли бы по крайней мере лишенным всякого основания.

Следует напомнить, что основные затруднения, мешающие создать 50-периодный коллекторный двигатель, связаны с так называемой электродвижущей силой (э. д. с.) трансформации. Последняя создает специфические коммутационные затруднения, а величина этой э. д. с. трансформации является в известной мере универсальной характеристикой коллекторного сериесного двигателя на 50 Hz. В рассматриваемой конструкции ничего не предложено для преодоления этих основных затруднений 50-периодного коллекторного двигателя.

Поэтому восхваление 50-периодного коллекторного двигателя Сименса и тем более рассмотрение этого двигателя в связи с задачами третьей пятилетки является по меньшей мере странным и неуместным.

Здесь нельзя не отметить той «эволюции», которую претерпели взгляды инж. Бенедикта на проблему 50-периодного коллекторного электродвигателя с 1935 г. Тогда[2] инж. Бенедикт писал, что над решением проблемы «уже в течение нескольких десятилетий работают лучшие специалисты по коллекторным электродвигателям, все же не сумевшие ее разрешить». Тогда инж. Бенедикт не говорил о возможности решения проблемы лишь усовершенствованием «существующего уровня конструирования и производства двигателей»[1]. Даже гениальным (как его назвал инж. Бенедикт[2]) изобретением электродвигателя Винтер — Эйхберга не была решена проблема.

А в разбираемой теперь статье инж. Бенедикт призывает «снова рассмотреть возможности конструктивного решения (подчеркнуто нами. Л. Ш.) до сих пор непреодоленных трудностей 50-периодного коллекторного двигателя...»[1].

Остановимся на «решении» проблемы 50-периодного двигателя, предложенном самим инж. Бенедиктом.

Нам уже раз пришлось подвергнуть анализу это «решение» в печати[3], и поэтому нет смысла здесь все повторять. Но отметим следующее: несмотря на широковещательные утверждения инж. Бенедикта, он до сих пор ничего серьезного не смог предложить для создания рационального коллекторного двигателя на 50 Hz. А пока что им создана комбинация из разнообразных предложений нескольких авторов: схема Винтера — Эйхберга — Латура в комбинации с магнитопроводом одного опытного двигателя Сименса — в качестве основы; шахматное расположение щеток Сименса; слоистые щетки Касперовского и др.

Ни одной новой технической идеи во всей этой богатой «коллекции» не имеется.

Необходимо коротко рассмотреть, насколько реальны предложенные инж. Бенедиктом средства.

Слоистые щетки Касперовского и др. — это самостоятельная технологическая проблема угольных щеток. Точно такие же щетки еще 50 лет назад (1888 г.) описаны Дунканом, но все же до сих пор не получили распространения.

Что же касается самого двигателя инж. Бенедикта, то важнейшая особенность этого двигателя, по словам его автора, заключается в следующем: в двигателе создается вторичный ток «который отстает от потока возбуждения приблизительно на 90°»[1]. «Этот ток можно использовать для создания в собственной обмотке добавочного полюса слагающей потока, необходимой для уничтожения трансформаторного напряжения»[1].

Напомним, что в компенсированном двигателе Латура также создается вторичный ток, «который отстает от потока возбуждения приблизительно на 90°», и еще сам Латур предложил использовать этот ток «для создания в собственной обмотке добавочного полюса» потока для улучшения коммутации, причем такой двигатель был давно построен. Однако по словам Арнольда[4] это мероприятие не помогло улучшить коммутацию, а лишь ухудшило cos φ. Причину этой неудачи легко выяснить, если обратиться к векторной диаграмме[2], позволяющей выяснить степень компенсации трансформации (то же самое имеет место в двигателе Латура). Эту векторную диаграмму мы подробно критически рассмотрели в «Вестнике электропромышленности» № 9, 1937 г. и вскрыли при этом, что инж. Бенедикт неправильно оперирует диаграммой.

Относительно того, что (при половинной скорости) недокомпенсация порядка 1,7 V... «меньше допустимого для щеток»[1], необходимо указать, что для этой скорости коллекторных двигателей в Америке и в Европе допускается не больше 1,2—1,3 V.

Не вдаваясь в рассмотрение других вопросов, отметим, что мало существенные изменения, внесенные инж. Бенедиктом в двигатель Латура, так и не помогли ему улучшить двигатель Латура, а лишь усложнили двигатель и ухудшили использование его материалов. В сравнении же с другими известными коллекторными двигателями двигатель инж. Бенедикта также не имеет никаких преимуществ.

Наш вывод — проблема 50-периодного коллекторного электродвигателя требует качественно нового решения, для которого всякого рода «конструктивные решения» смогут быть использованы лишь в виде дополнений.

* * *

В заметке инж. Бенедикта[5] по поводу нашей статьи в № 13 журнала «Электричество» 1937 г. говорится, что «мотор Латура репульсионный» и что «...при нарастании числа оборотов и постоянном первичном токе растет вторичный ток». На самом же деле двигатель Латура[6] — компенсированный репульсионный и при указанных инж. Бенедиктом условиях у него не может «расти вторичный ток». Точно так же далеко от истины и другое «важнейшее различие» — относительно влияния на cos φ «обмотки в цепи вторичного тока»[5], ибо чем больше индуктивное сопротивление этой обмотки, тем больше ухудшается компенсирующее действие в обоих двигателях. Не подлежит никакому сомнению, что двигатель инж. Бенедикта того же класса, что и двигатель Латура.

Остальные «важнейшие различия» — «поперечный поток возбужден первичным током»[5] и «главная часть вращающего момента создается поперечным потоком»[5] — были уже нами рассмотрены[3], в результате чего доказано было, что они не имеют существенного значения и возможно достаточны лишь для «обоснования» получения патента. Кроме того, было доказано, что применение «вторичного тока» (примененного также Латуром) не помогает улучшению коммутации, что в свою очередь давно было отмечено Арнольдом.

Для ослабления «связи с синхронизмом» еще Латуром рекомендовалось применить дополнительные полюса и соответствующее размещение статорной обмотки, т. е. принципиально то же самое, что применил инж. Бенедикт.

Л. М. Шильдинер
ВЭИ

[2] О. В. Бенедикт, Проблема 50-периодного однофазного коллекторного сериесного двигателя и ее разрешение, «Электричество» № 4, 1935.

[3] «Вестник электропромышленности» № 9, 1937.

[4] Arnold, т. V, ч. II, стр. 567, немецкое издание 1912 г.

[5] «Электричество» № 1, 1938.

[6] Подразумевается Латур — Винтер — Эйхберг.

Больше внимания конструктивным вопросам при разрешении проблемы 50-периодного коллекторного электродвигателя

Инж. Л. М. Шильдинер ставит мне в упрек, что мои взгляды на проблему 50-периодного коллекторного электродвигателя со времени 1935 г. «претерпели эволюцию». Эту эволюцию инж. Шильдинер видит в том, что я в 1935 г. как будто бы не говорил о возможности решения проблемы путем усовершенствования существующего уровня конструирования, а в 1937 г. заявил о возможности конструктивного решения старой проблемы.

Обратимся к фактам. В своей статье в журнале «Электричество» (№ 4, 1935, стр. 6) я как раз подробно рассматривал вопрос конструктивных возможностей уменьшения e_t.

Однако в 1935 г. у меня, как и у других авторов, было такое мнение, что с уменьшением e_t конструктивными мероприятиями на практике дошли до возможного предела.

Проанализировав в своей статье («Электричество» № 19, 1937) 50-периодный коллекторный электродвигатель Сименса, о появлении которого сообщил журн. El. Bahnen в марте 1937 г., я пришел к выводу, что в конструктивном отношении, если верить сообщению El. Bahnen, этот двигатель представляет шаг вперед, но не может ввиду своих больших недостатков явиться решением проблемы.

Таким образом в 1937 г. я считал (и считаю теперь) нужным «снова рассмотреть возможности конструктивного решения» проблемы, одновременно полагая, что ее нельзя решить *только* конструктивными средствами.

Инж. Шильдинер упрекает далее меня, что я как-будто бы неправильно оценил 50-периодный коллекторный электродвигатель Сименса. Инж. Шильдинер, очевидно, стремится создать у читателя впечатление, будто бы я предлагал применение таких двигателей для 50-периодного советского электровоза. Но кто объективно прочитает мою статью («Электричество» № 19, 1937), убедится в том, что там сказано как раз обратное. Ибо после того, как я доказал, что упомянутый двигатель имеет неизбежные большие недостатки, из-за которых он является неудовлетворительным, я перечислил ряд свойств, которые по-моему должен иметь будущий советский электровоз (повышенная мощность, сильно увеличенное напряжение мотора, компенсация фаз в широкой области и т. д., т. е. свойства, которые двигатель обыкновенной схемы и двигатель Сименса не имеют и не могут иметь). Наконец, я совершенно ясно установил, что можно только на двух параллельных путях достигнуть решения этих условий: один путь лежит в области дальнейшего усовершенствования щеток, другой путь состоит в реализации изобретенного мною автоматически компенсирующегося коллекторного двигателя, который я считаю единственно радикальным решением старой проблемы.

Теперь разберем утверждение инж. Шильдинера, заключающееся в том, что якобы я дал положительную оценку двигателю Сименса.

Исходя из сообщения, что уже имеется построенный с такими двигателями электровоз, я поставил себе в начале статьи задачу критически оценить это достижение, т. е. я поставил вопрос об оценке, но еще не дал ответа. Затем следует анализ и точное исследование вопроса и, наконец, моя действительная оценка. Но эта оценка, которую точно процитировать инж. Шильдинер забыл, совсем не является выгодной для этого двигателя.

После того, как я установил, что мощность двигателя слишком мала, я подчеркнул, что «это уменьшение мощности, как показывает простое рассуждение, неизбежно при конструкции Сименс-Шуккерта».

Далее я пишу: «Такое уменьшение мощности и увеличение веса... являются, несомненно, значительным недостатком этого мотора, но еще большим недостатком является сравнительно очень небольшое напряжение двигателя...».

Ввиду того, что с первого взгляда могло показаться, что фирма нашла средство увеличения напряжения, я разобрал и этот вопрос и доказал, что это средство является только кажущимся: «Правда, фирма включила последовательно два двигателя и получила, таким образом, двойное напряжение, но это мероприятие пригодно и для двигателя на частоту $16^2/_3$, который уже имеет высокое клеммовое напряжение».

Наконец, я дал следующую оценку этому двигателю: «Он является частично удачной попыткой создания 50-периодного двигателя, принципиально способного работать. Учитывая, что конструктор правильно понял и правильно использовал особые законы для двигателя на эту частоту, создание его нужно оценить как шаг вперед в направлении решения проблемы. Однако двигатель имеет увеличенный вес и весьма увеличенный ток и решение это нужно рассматривать как неудовлетворительный компромисс». После этого, как я уже писал, применение рассмотренного двигателя в наших условиях я не ставил предметом даже дискуссии.

Но инж. Шильдинер говорит еще о том, что мне нельзя было писать о «хорошо продуманном решении» и что здесь у меня имеется как-будто бы противоречие с вышеуказанной оценкой. Я в действительности в одном месте пишу о «хорошо продуманном решении», но из целого абзаца становится совершенно ясно, что там речь не идет о принципиальном решении вообще проблемы 50-периодного коллекторного двигателя (я подробно показал, что она не решена и не может быть решена по схеме Сименса), но только о решении частичной конструктивной задачи, т. е. о возможности получения меньших, чем до сих пор, полюсных делений. Что здесь только о данном вопросе и была речь — ясно видно из другого места статьи, где я писал: «Поэтому мы должны выбранную конструкцию (т. е. коллектор, О. Б.) назвать хорошо продуманной».

Инж. Шильдинер утверждает, что мы имеем право говорить о хорошо продуманном решении конструктивной задачи, если оно радикальным образом устраняет «недостатки в коллекторном двигателе». Это утверждение Шильдинера показывает, что у него имеется пренебрежение к практическим конструктивным вопросам.

А между тем от целесообразного решения «маленьких» конструктивных вопросов технический прогресс зависит не меньше, чем от так называемых больших изобретений. Я в своей статье в «Электричестве» (№ 19, 1937) как раз пробовал анализировать подробнее эту сторону и характерно, что инж. Шильдинер в своем ответе никак не входит в практические конструктивные вопросы.

Речь идет о следующей частичной конструктивной задаче: как можно полюсное деление по возможности уменьшить без того, чтобы щеткодержатели приблизились слишком близко (причем совершенно безразлично, вредно ли такое приближение из-за опасности переброса между щетками или из других практических причин). Этот конструктивный вопрос в моторе WBM196 решен так, что щетки расположены в шахматном порядке. Это решение не является само собой понятным, так как вначале может показаться, что нехватит места для удлинения коллектора. Поэтому я исследовал этот вопрос и пришел к выводу, что конструктор сам создал себе нужное место.

А инж. Шильдинер, не разобравшись в этом, пишет: «всем специалистам хорошо известно, что в тяговых машинах всегда «нехватает места». Но я спрашиваю, о каких абстрактных, вообще действующих для тяговых машин законах, которые инж. Шильдинер «открыл», идет речь? Разве не следует этот вопрос ставить конкретно? Разве вопрос места в каждом конкретном типе тягового двигателя не имеет свой особый характер? Если бы инж. Шильдинер подумал об этом, он понял бы, что вопрос обстоит следующим образом.

Длина якоря состоит из активной длины L и из длины головных соединений. А последняя приблизительно пропорциональна полюсному делению τ. Произведение τL пропорционально потоку одного полюса. Главной задачей конструктора является уменьшить этот поток; если он теперь его так уменьшит, что уменьшит и τ и L, уменьшаются обе части якорной длины, и получается в действительности место для удлинения коллектора.

Это, конечно, совсем не значит, что я не вижу очень хорошо все технологические недостатки этой конструкции, при которой, прежде всего, нужно горячее кольцо. Но эти недостатки по-моему не являются непреодолимыми. Однако в изобретенном мною двигателе я не предла-

таю такое же распределение щеток. Я в своей статье говорил о сравнении предложенного мною двигателя с двигателем Сименса, где я только с целью лучшего сравнения исходил из того же самого распределения щеток. Я считаю одним преимуществом как раз предложенного мною двигателя, что его можно без затруднения строить с обыкновенным распределением щеток. Правда, это не значит, что если в будущем распределение щеток в шахматном порядке дало бы какое-нибудь конструктивное преимущество при построении предложенного мною двигателя, мы должны были бы отказаться от применения этого распределения, которое, кстати, совсем не является изобретением Сименса и которое Сименс лишь применил.

В своем письме инж. Шильдинер выступает также против положительной оценки тех двух методов решения проблемы 50-периодного коллекторного двигателя, которые разрабатываются советскими изобретателями (акад. Шенфером и мною).

Я считаю намерение акад. Шенфера создать расслоенные щетки по новой схеме (а не по схеме Дункана) интересным и заслуживающим внимания. По существу же возражений инж. Шильдинера против предложенного мною (и изготовленного заводом «Динамо» в виде опытного экземпляра) двигателя, я ограничусь следующими замечаниями.

При нарастании числа оборотов и постоянном первичном токе в двигателе Латура вторичный ток в этом двигателе растет. Называем ли мы при этом двигатель Латура, как некоторые авторы, «компенсированным репульсионным» или, как другие «репульсионным двигателем с возбуждением в роторе», никакого значения в данном случае не имеет. Двигатель Латура во всяком случае является репульсионным двигателем. И как раз поэтому его вторичный ток, как это ясно отмечает Арнольд (см. том V, часть II, стр. 377 и 437) состоит из части, которая при вышеуказанных условиях будет постоянной и из части, которая растет приблизительно пропорционально скорости. У предложенного мною двигателя вторичный ток уменьшается, что дает возможность решающим образом улучшить коммутацию. Утверждение инж. Шильдинера, что обмотка, включенная в цепь вторичного тока предложенного мною двигателя, должна ухудшить $\cos\varphi$ из-за своей самоиндукции, является необоснованным: поток этой обмотки, кроме ухудшающего $\cos\varphi$ напряжения от самоиндукции создает и улучшающее его напряжение от вращения, которое на много раз больше, что, между прочим, уже подтверждено результатами экспериментов, проделанных на заводе «Динамо». Что двигатель Латура во всех своих исполнениях связан с синхронизмом, а компенсированный сернистый двигатель (из которых как из элементов состоит и предложенный мною двигатель) ничего общего с синхронизмом не имеет, это тоже элементарно известно.

Что касается других утверждений Шильдинера (в том числе и о векторной диаграмме), которые являются только повторениями из его статьи, опубликованной в журнале «Вестник электропромышленности» № 9, 1937, и которые он пытается «обосновать» неправильными ссылками на Арнольда, то я дал на них подробный ответ, опубликованный в виде двух статей в бюллетене завода «Динамо» и в «Вестнике электропромышленности».

О. В. Бенедикт

Завод «Динамо» им. Кирова

ОТ РЕДАКЦИИ

Проблема 50-периодного коллекторного электродвигателя имеет важное значение для электрификации железных дорог СССР и требует от наших специалистов гораздо большего внимания, чем этой проблеме уделялось до сих пор.

С 1933 г. на заводе «Динамо» им. Кирова ведутся работы по проектированию и изготовлению опытного 50-периодного коллекторного электродвигателя.

Этому делу всячески препятствовали враги народа, пробравшиеся к руководству заводом.

Вот уже в течение нескольких месяцев на заводе ведутся испытания электродвигателя.

Одновременно над созданием 50-периодного коллекторного электродвигателя работают в ВЭИ.

Необходимо форсировать эти работы заводом «Динамо» и ВЭИ и привлечь к изучению и обсуждению их результатов широкий круг специалистов (заводов Электромашиностроения, Академии наук СССР, ВЭИ, МЭИ, Ленинградского индустриального института и др.).

Полноценный по своим качественным данным советский 50-периодный коллекторный электродвигатель должен быть создан, причем, конечно, нынешний электродвигатель Сименса с его непреодоленными недостатками не может служить нам образцом, однако некоторые конструктивные плюсы этого электродвигателя должны быть учтены.

Помещая письма инж. Л. М. Шильдинера и инж. О. В. Бенедикта, редакция рассчитывает вернуться к развернутому обсуждению поставленной проблемы после окончания указанных выше исследовательских работ, ведущихся на заводе „Динамо" и в ВЭИ.

БИБЛИОГРАФИЯ

ГЛАЗУНОВ А. А. и МЕЛЬНИКОВ Н. А., РАСЧЕТ ЗАМКНУТЫХ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ. М.—Л. ОНТИ. Гл. ред. энергетической лит-ры. 64 стр., 54 иллюстр. 5000. Ц. 1 р. 50 к.[1]

Рассматриваемая книжка относится к разряду монографий, посвященных исследованию новых научных вопросов. Основная ее тема — определение эквивалентных сопротивлений трансформаторов и кабелей городских сетей, с помощью которых можно собрать на расчетном столе постоянного тока модель сети, на которой и определить распределение токов и напряжений в сети.

Эта задача имеет большое практическое значение. В нашем Союзе она возникла три года назад при расчете замкнутой сетки в Мосэнерго, которое и обратилось тогда к проф. А. А. Глазунову за ее разрешением. Эта практическая задача дала основание для последующей теоретической работы проф. А. А. Глазунова.

Чтобы найти наиболее подходящие формулы эквивалентных сопротивлений, автор приводит схемы сетей в последовательном их усложнении: начинает с линии, соединяющей три трансформаторных пункта, и с чисто активной нагрузки, а затем в дальнейших главах усложняет схемы и в заключение рассматривает пример сложной сети с 9 трансформаторами, имеющими различную мощность и соединенных участками сети различной длины. Такой прием изложения весьма целесообразен, так как дает возможность изучать проблему в той последовательности, с которой она развивалась в исследовательской работе автора. В педагогическом отношении этот метод тоже удобен, так как он постепенно подводит к разрешению сложных задач.

С точки зрения практических приложений теории автора можно было бы несколько компактнее изложить материал. Например, начать изложение распределения токов в цепочной линии сразу для случая разной мощности трансформаторов и наличия индуктивной нагрузки. Перед переходом к замкнутым сетям автор рассматривает вопрос для элемента сети с двумя трансформаторами. Здесь он показывает, как возникла необходимость применять для эквивалентного сопротивления формулу $r + x$, на первый взгляд кажущуюся непонятной. Однако нам представляется, что исследования распределения токов в таком элементе можно было бы несколько сократить.

Очень важно то, что при рассмотрении методов нахождения распределения активных и реактивных уравнительных токов автор доказывает значительную неточность, получающуюся при отыскании распределения реактивных токов, какой бы формулой эквивалентности сопротивления ни пользоваться. Поэтому для практических целей надо рекомендовать ограничиваться определением полных токов, тем более, что при расчете замкнутых сеток вопрос о загрузке током трансформаторов и кабелей является самым главным. Потери напряжения, как правило, получаются в допустимых пределах, и поэтому не нужно находить активные и реактивные составляющие токов.

Заключительная часть книги — сравнения расчетов для сложной сети — представляет большой интерес. Было бы желательно рассмотреть более конкретный пример, а именно — сети с большим числом трансформаторов. И тогда можно было бы посмотреть, как сетка работает при аварийных условиях, когда часть трансформаторов окажется выключенной.

В заключение отметим большую ценность работы проф. А. А. Глазунова и инж. И. А. Мельникова как для практических целей, так и по своим теоретическим достоинствам, так как она дает ясный и полный анализ новой проблемы в методах расчета сетей. С этой работой полезно познакомиться всем инженерам, занятым вопросами расчета сетей, и в основных своих выводах она должна войти в учебник для втузов.

В. Н. Степанов

[1] По материалам библиографического сектора Гос. научной библиотеки НКТП СССР.

Инж. ФРЕНКЕЛЬ, „ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ". Изд. ОНТИ НКТП. Госуд. научно-технич. изд-во Украины. 1937.

В указанном руководстве большая часть материала заимствована автором из книг: Герливанов, Электроподвижной состав, ч. III; Широкогоров, Основы электрической тяги; Шевалин, Тяговые расчеты; Бюллетень Киевского отделения трамвайных съездов № 16, 1932.

Некоторые из этих материалов перепечатаны дословно, другие же переданы в несколько измененном виде, без обработки.

Использование этого материала свидетельствует о: 1) поверхностном знакомстве автора с излагаемым им предметом; 2) некритическом отношении к перепечатанному материалу, в значительной степени уже устаревшему и неполному; 3) об отсутствии элементарной проверки заимствованных фигур и текста. В результате перепечатаны все неправильности и ошибки, заключавшиеся в воспроизведенном материале.

Там же, где автор пытался изложить материал в сокращенном виде, он внес дополнительные, довольно грубые ошибки.

Мы ограничимся указанием лишь некоторых типичных недостатков.

На стр. 74 приведены формулы[1] $E = iR + ir$ (28) и $Ei = i^2R + i^2R$ (29) для построения диаграммы потребляемой энергии в период пуска. В этих формулах не участвуют соответственно члены e (противо-э. д. с.) и ei. Таким образом получается, что энергия, использованная моторами, полностью идет на покрытие джоулевых потерь, так как измеряется суммой $i^2R + i^2r$.

На рис. 18, показывающем распределение потребляемой энергии при двухступенчатом пуске, периоды пуска при последовательном и параллельном соединении соответственно указаны $0{,}44T$ и $0{,}56T$. Заимствуя это соотношение периодов из частного примера, автор преподнес его без всякой оговорки в форме общего положения.

На стр. 79 автор указывает, что причина редкого применения способа отключения части витков обмотки возбуждения тягового двигателя для целей ослабления поля — появление неравномерного распределения поля, в результате чего ухудшаются условия коммутации двигателя, что неверно.

На рис. 86 (перепечатан из книги Герливанова без исправлений) изображен лишний нижний палец контроллера.

На рис. 90 (перепечатан из книги Герливанова без исправлений) нет перемычек между некоторыми пальцами контроллера, в силу чего цепь двигателей не замкнута.

На рис. 91 приведены развертка контроллера и, соответственно, схемы включения цепи тяговых двигателей. Последняя схема относится к режиму ослабленного поля, которое осуществлено закорачиванием всей обмотки возбуждения. Очевидно, что при этих условиях двигатель работать не может.

Стр. 82. При рассмотрении перехода от последовательного соединения тягового двигателя к параллельному способом к. з. о первом двигателе сказано, что сопротивление в его цепь введено для того, чтобы он оказался сразу под полным напряжением сети, а не наоборот, как это имеет место на самом деле.

На стр. 85 автор заявляет, что «сцепной вес электровоза по сравнению с моторвагоном относительно невелик», что неверно.

На рис. 79 и 80 обмотки возбуждения тягового двигателя помещены перед якорем, что может привести читателя к ложному представлению об общепринятости этого включения обмоток возбуждения на практике. В действительности более распространено включение обмоток воз-

[1] Формулы здесь приводятся в обозначениях автора.

буждения после якоря. На рис. 81 вовсе не показаны обмотки возбуждения.

На стр. 92 приведена таблица элементов сопротивлений фирмы GEC, а не производства наших заводов, таким образом читатель лишен важного справочного материала.

Глава «Управление двигателями однофазного тока» заимствована из книги Широкогорова «Основы электрической тяги», а вводные начальные девять строчек составлены весьма неудачно и приложена абсурдная схема (рис. 98). А именно: вторичная обмотка трансформатора замкнута на сопротивление. Очевидно, что такой способ включения ни в коем случае не может быть допущен.

На рис. 259—263 цепь управления не имеет замкнутого контура, а поэтому аппараты управления не сработают и схемы теряют смысл.

Ток отпадания реле автоматического пуска указан 326 А как постоянная величина без оговорки (стр. 269), что ток отпадания в различных исполнениях этого реле различен и, кроме того, может быть регулируем.

Согласно предисловию книга ставит целью дать возможность студентам эксплоатационной специальности втузов и техникумов, а также работникам электрических ж. д. получить основные сведения в области подвижного состава этих дорог.

Ввиду наличия целого ряда грубых ошибок книга не удовлетворяет поставленной цели. Наоборот, она будет запутывать читателя, ставить его по целому ряду вопросов в тупик, а также порой способствовать неверным установкам.

Настоящая рецензия была разработана бригадой при кафедре Электролокомотивостроения Московского энергетического института в составе: доц. Б. М. Вольфсон, асп. Е. И. Лебедев, асп. Шекшня под руководством проф. Д. К. Минова.

Д. К. Минов

НОВЫЕ КНИГИ

Алексеев А. Е., проф., Тяговые электродвигатели. Одобрено Центральным управлением учебных заведений НКПС в качестве учебного пособия для транспортных электромеханических втузов. М. Трансжелдориздат, 1938, 411 стр., с иллюстр., ц. 15 руб.

Книга содержит исторический обзор по созданию и применению тяговых электродвигателей, описание свойств двигателей постоянного и переменного тока, конструкции, основные механические расчеты частей двигателя, проектирование и расчет их.

Бьюлей Л. В., Волновые процессы в линиях передачи и трансформаторах. Перев. с англ. М.—Л., Главн. ред. энергетич. лит-ры, 1938, 288 стр., с черт., ц. 7 р. 75 к., перепл. 1 р. 25 к.

В части первой дано описание волновых процессов на линиях передач. Изложена теория распространения волн в однопроводной и многопроводной системах и их преломления. Часть вторая посвящена переходным процессам внутри обмоток трансформаторов и на их концах.

Вопросы эксплоатации электрооборудования электростанций. М., Главн. ред. техн.-экономич. лит-ры, 1938, 48 стр., с черт. (сборник информационных писем за 1936 г. № 1. Переработано Оргрэс), ц. 2 р. 40 к.

Сборник содержит одиннадцать писем на следующие темы: Соединение алюминиевых кабелей, Выравнивание нагрузок и эксплоатация однофазных кабелей, Уменьшение вибрации контактов реле типа РММ и РД, Однократное повторное включение магнитных выключателей и др.

Воронин А. В. и Соколов А. Н., Защита контактной сети электрических железных дорог от атмосферных перенапряжений. М. Трансжелдориздат, 1938, 96 стр., с иллюстр. (Научно-исследовательский институт ж.-д. транспорта), цена 2 р. 40 к.

Приведен обзор существующих методов защиты, основанный, главным образом, на материалах, полученных институтом от советских и заграничных электрифицированных дорог. Разбирается вопрос о грозовости местностей пролегания электрифицированных железных дорог Союза. Дан выбор расчетных параметров и защитных мероприятий.

Гримзель Э., Курс физики. Т. 2, вып. 1. Электромагнитное поле. Под ред. проф. А. И. Бачинского. М.—Л., Главн. ред. техн.-теоретич. лит-ры, 1938, 644 стр., с иллюстр., ц. 15 р. 65 к., перепл. 1 р. 50 к.

Единые всесоюзные серии электрических машин. Асинхронные двигатели серии А. М. Технический справочник. М.—Л., Наркомтяжпром, Госконтора справочников и каталогов, 1937, 228 стр., с иллюстр. (Электротехнический завод «Электросила» им. Кирова), ц. 12 руб.

Завалишин Д. А., проф., Машины постоянного тока. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебника для втузов. Л.—М., Главн. ред. энергетич. лит-ры, 1938, 283 стр., с иллюстр., ц. 3 р. 75 к., перепл. 1 р. 50 к.

Инструкция по проверке габаритов воздушных высоковольтных линий электропередач. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 19 стр., с чертеж. (Главэнерго НКТП СССР. Типовые инструкции по эксплоатации энергетических систем. Временная ЭО-47), ц. 40 коп.

Клименко Е. и Крестинская Р., Электрические машины. Под ред. и с предисл. проф. Я. М. Пиотровского. Л.—М., ОНТИ, НКТП СССР, 1938, 72 стр. (Вопросы техники на иностранных языках. Английская серия. Вып. 4-й), ц. 1 р. 10 к.

В сборнике даны статьи на английском языке: Развитие электромашиностроения в США; Водородное охлаждение турбогенераторов; Асинхронные двигатели типа «Сельсин» и др. В заключение дается словарь и комментарии к статьям. Книга предназначена для широкого круга электротехников, изучающих английский язык.

Крестинская Р. и Клименко Е., сост. Электрические машины. Под ред. и с предисл. проф. Л. М. Пиотровского. Л.—М., ОНТИ НКТП СССР, 1938, 108 стр. (Вопросы техники на иностранных языках.) Немецкая серия. Вып. 4-й, ц. 1 р. 60 к.

Задача сборника помочь учащемуся создать такой запас слов и оборотов, которые помогли бы ему свободно ориентироваться в технической литературе по динамостроению на немецком языке. В сборник вошли статьи итогово-описательного характера по динамостроению, освещающие современное состояние динамостроения. В конце сборника приведены комментарии к тексту и словарь, охватывающий около 1000 слов.

Перли С. Б., инж., Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты. Харьков, Гос. научно-технич. изд-во Украины, 1938, 266 стр., с иллюстр., ц. 7 р. 25 к., перепл. 1 р. 50 к.

Руководство посвящено ветродвигателям малой мощности. В нем дана теория идеального ветряка и описание ветродвигателей для насосных и водоподъемных целей, а также ветроэлектрических установок. Дан расчет экономики ветродвигателей.

Правила безопасности по эксплоатации и ремонту для персонала, обслуживающего электрические установки станций и подстанций. М.—Л., Ред. энергетической лит-ры, 1933, 75 стр., с иллюстр. (Главэнерго НКТП СССР. Типовые инструкции по эксплоатации энергетических систем), ц. 1 р. 25 к., перепл. 75 к.

Рабчинский И. В., Электромонтер. Правила установок. 14-е издание, заново переработанное. М.—Л., Главн. ред. энергетич. лит-ры, 1937, 548 стр., с иллюстр., ц. 5 р. 75 к., перепл. 1 р. 25 к.

Назначение книги — оказать помощь электромонтерам, работающим по монтажу установок до 10 kV. В новом издании учтены изменения, происшедшие в электротехнической промышленности. Книга является руководством-справочником.

Сушкин И. Н., проф., Электрическое оборудование центральных станций. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебника для энергетических втузов. М.—Л., Главн. ред. энергетич. лит-ры, 1938, 344 стр., с иллюстр., ц. 7 р. 20 к., перепл. 1 р. 80 к.

Коренная переработка труда, изданного автором совместно с проф. А. А. Глазуновым в 1930 г.

РЕФЕРАТЫ

V. FRITSCH. НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О ГРОЗОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВАХ, БАЗИРУЮЩИЕСЯ НА ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ. E u. M № 9, 1938

Реферату названной статьи необходимо предпослать следующие замечания.

За последние годы проблеме избирательной поражаемости посвящено большое количество исследований. Наиболее систематическое изложение названной проблемы сделано в СССР лабораторией перенапряжений ВЭИ и Энергетическим институтом Академии наук СССР. Сформулированные теоретические положения проблемы избирательной поражаемости и проверка их в лабораторных и полевых условиях оригинальными методами дали возможность сделать существенные практические выводы. На основании развитых представлений широко развернулись работы по моделированию, давшие важные для практики грозозащиты результаты.

В ряде стран упомянутые работы получили признание. Однако некоторые иностранные авторы, публикуя работы, в которых рассматриваются интересующие нас вопросы, не делают никаких ссылок на исследования, проведенные в СССР и широко опубликованные как в нашей, так и в заграничной литературе. При этом в некоторых случаях точки зрения авторов и аргументация поразительно совпадают с нашими значительно ранее опубликованными работами. Для примера упомянем статью V. Fritsch (E u. M № 9, 1938). Основные соображения аргументации, а подчас и иллюстративный материал автора настолько полно повторяют содержание ряда наших работ, что реферат названной статьи вместе с тем является как бы обзором наших исследований, отсутствие ссылок на которые вряд ли может служить убедительным доводом к признанию приоритета V. Fritsch.

**
*

Воздерживаясь от рассмотрения механизма развития молнии, автор принимает, что разряд происходит при отсутствии посторонних сил в направлении силовых линий. Исходя из этого положения, естественно заключить, что для техники отвода молнии (защиты) необходимо изучение распределения силовых линий. Так как силовое поле погружается в землю, необходимо изучить проводящие свойства почвы.

Молния представляет собой импульсный процесс и поэтому для изучения проблемы проводящих свойств почвы имеет большое значение электроразведка (Funkgeologie). Развивающаяся между тучей и землей молния (а только такие разряды имеются в виду в рассматриваемой статье) нейтрализует заряды тучи индуцированными зарядами земли. Ввиду этого необходимы некоторые геологические пласты (залежи), которые обладали бы определенной емкостью. Обычно почва представляет собой плохо проводящее тело, в которое вкраплены той или иной формы хорошо проводящие слои (неоднородности, залежи). Разряд происходит лишь в том случае, когда конденсатор, образованный тучей и проводящим пластом, может удержать определенный заряд, величина которого зависит от длины канала, сопротивления геологических пород, пронизываемых молнией, формы тучи и поверхности земли, от их свойств и от ряда других факторов.

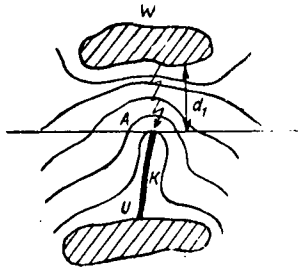


Рис. 1. Вид поля под хорошо проводящей залежью U с проводящей жилой K; W — облако; A — выход жилы K

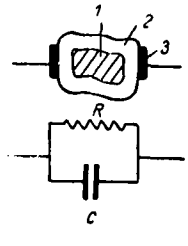


Рис. 2. Геологический проводник. *1* — ядро; *2*—оболочка; *3* — электроды

Автор полагает, что защита от молнии может выполняться либо специальными защитными средствами либо путем установления поражаемых молнией мест, которые следует избегать при грозах.

Общее рассмотрение разряда автор ведет по рис. 1. При распределении проводимостей, указанных на рисунке, молния поражает точку A выхода хорошо проводящей жилы на поверхность земли. С точки зрения изображенной схемы существенно значение факторов, влияющих на изменение проводимостей отдельных слоев почвы. Электрическая схема замещения геологического проводника показана на рис. 2. Проводник, состоящий из двух разнородных слоев, замещается параллельным соединением омического сопротивления R и емкости C. Ясно, что такая комбинация обладает проводимостью, зависящей от частоты. Импеданц слоев зависит также от скин-эффекта и диэлектрического коэфициента.

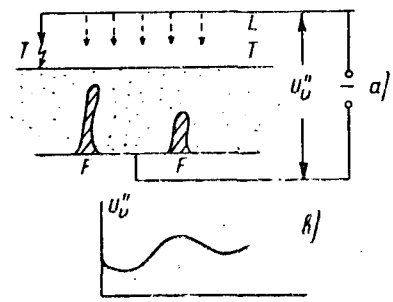


Рис. 3. Схема испытательной установки. — *a*) L — воздушный промежуток; T — поверхность геологического проводника; F — „земляная" пластина; *b*) изменения пробивного напряжения U_u''

Проводимость геологического проводника и его диэлектрический коэфициент зависят от ряда факторов и особенно от влажности. Различая 3 вида сопротивления почвы: сухое, влажное и относительное сопротивление, автор указывает, что последнее подвержено весьма сильным колебаниям. В практике, однако, даются значения именно относительного сопротивления, и это ведет к неверным выводам. При попеременных увлажнениях и высыханиях почв различного строения, благодаря изменению концентрации примесей, остающихся в почве, влиянию эффекта пробоя плохопроводящих слоев зерен при повышениях напряжения (фритт-эффект) и др. обстоятельство — сопротивление почвы может принимать самые различные значения.

С точки зрения V. Fritsch верхнюю корку земли можно разбить на 3 зоны. Верхняя зона — нижняя — хорошо проводит и достаточно однородна. Второй слой весьма неоднороден; его свойства определяются в основном гидрологией. После водоносного слоя, как бы электрически замыкающего второй слой, идет снова плохо проводящий скалистый слой (третий) относительно однородный. В разрезе изучаемого вопроса наибольшее значение имеет второй слой, ибо первый относительно тонок. Автор указывает на желательность разработки метода выявления электрических свойств второй зоны.

Автор подчеркивает, что, помимо электростатических факторов, на путь молнии имеют влияние и другие факторы, как, например, свойства поверхности земли и тучи. Для выявления действия этих факторов автор рекомендует применение модели, изображенной на рис. 3. Игла, представляющая собою один из электродов, присоединенных к импульсному генератору, помещается под слоем земли, насыпанной на металлический лист (соединенный со вторым полюсом генератора). При перемещении иглы вдоль слоя, в котором сделаны проводящие включения, можно определить места наибольшего поражения молнией (т. е. избирательно поражаемые места).

Учитывая трудности отображения в модели всех условий действительности, автор считает, что предпочтение следует отдать методу, использующему для нахождения избирательно поражаемых молнией мест при помощи электроразведки.

В оценке факторов, влияющих на поражение молнией рассматриваемого места, по мнению автора, играет важную роль вопрос о том, может ли разряд перескакивать с одного места на другое.

Рис. 4 служит иллюстрацией к такому случаю. Удар молнии попадает в место выхода хорошо проводящего слоя U на склоне горы (точка A). При большом перепаде

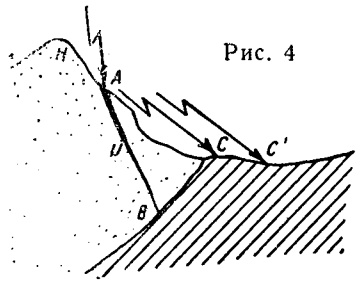


Рис. 4

напряжения в слое A—B молния может перескочить с места в точки C и C'. При этом пораженным оказывается весь склон, в то время как вершина горы подвержена опасности в значительно меньшей мере.

Перескакивание молнии не будет иметь места, если сопротивление жилы меньше, чем сопротивление пути AC или AC'. Аналогичным образом рассматриваются другие примеры, в которых распределение хорошо проводящих включений может направлять разряд по определенным путям. Эта возможность должна быть использована при устройстве заземлений и трассировке линий передач.

И. С. Стекольников

I. G. ALBRIGHT. УДАР МОЛНИИ И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИЕ.
Journal of applied Physiks. Vol. 8, № 5, May 1937

Для наблюдений разрядов молнии автором сконструирован оригинальный аппарат (рис. 1), состоящий из 8 камер, укрепленных на велосипедном колесе, вращаемом через передачу рукой. Камеры расположены под углом в 45° друг к другу, и так как угол горизонта каждой из них равен 60°, то их объективы охватывают весь горизонт. Для того чтобы бо́льшая часть снимка занималась небом, оси камер приподняты на 12°. Под вращаемыми камерами установлены три неподвижные, охватывающие 150° горизонта. Автор сфотографировал многократный разряд, длившийся около 0,162 sec. На рис. 2 дана первая составляющая этого разряда, протекающая без лидера, сильно разветвленная и ярко светящаяся у земли. По мнению автора, различие интенсивности свечения канала объясняется лучшей видимостью у земли[1]. Длительность первой составляющей порядка 0,00015 sec.

Через 0,023 sec после первой составляющей началась вторая (рис. 3) с отчетливо видимым лидерным разрядом. Интервал времени между началом лидера и концом обратного разряда составляет около 0,00025 sec. Разветвленность и интенсивность этого разряда значительно меньше, чем у предыдущего.

Третья составляющая удара последовала через 0,031 sec. Промежуток времени между лидерным и главным ударом был примерно 0,00016 sec.

Четвертая составляющая возникла через 0,030 sec после третьей. Лидерный процесс здесь более ярко выражен, чем в предыдущем случае, его отделение от главного удара достигает 0,00020 sec.

Пятая составляющая возникла через 0,040 sec после четвертой; разделение лидерного и главного удара во времени то же, что и в предыдущем случае.

Шестая составляющая (рис. 4) носила дублетный характер с интервалом между ударами в 0,00075 sec; первый из них возник через 0,037 sec после пятой составляющей, длился около 0,003 sec и имел еле заметный лидер.

Второй удар дублета длился 0,00016 sec, лидер его на снимке отличить не удалось.

В своей работе автор приходит к следующим выводам:

1) за исключением первой составляющей и второго удара дублета все составляющие имеют лидер, предшествующий главному удару;

2) разветвления наиболее значительны у первой составляющей, более слабы у второй и совсем исчезают у последующих составляющих;

3) по разветвлениям первой составляющей, направленным к земле, можно заключить, что облако положительно[2];

4) лидер движется к земле со скоростью порядка 4.10^8 cm/sec $\div$ $12\cdot10^8$ cm/sec; главный удар движется со скоростью $15.10^8 \div 75\cdot10^8$ cm/sec;

5) большая скорость движения главного удара всех составляющих объясняется движением электронов от земли к облаку, вследствие чего образуется мгновенный ток большой силы.

Автор полагает, что частицы, составляющие лидерный разряд, противоположны по знаку частицам главного удара, которыми могут быть только электроны. Таким образом лидерный удар будет состоять из положительных частиц, движущихся к земле (в случае положительного облака), подготовляющих ионный или по меньшей мере проводящий путь, по которому идет главный разряд.

При попытке объяснения этого процесса с помощью потенциалов ионизации, скоростей и масс частиц оказывается, что скорости положительных ионов слишком малы по сравнению со скоростями лидерного удара.

По мнению автора возможно, что положительными частицами лидера являются позитроны, возникающие после главного разряда первой составляющей удара. Позитроны

[1] Различие в видимости свечения канала, возможно, имеет некоторое значение для близких разрядов (порядка 1 km) при дожде. Однако наблюдения других авторов (Шонланд, Колленс, Малан) над дальними разрядами в чистом воздухе показали, что изменение интенсивности свечения канала по длине связано только с физикой явления. Реф.

[2] Из новой работы Симпсона (Proc. Roy. Soc. № 906, 1937) и более ранних работ Вильсона видно, что грозовые тучи в нижней своей части несут отрицательный заряд, в то время как почти все зарегистрированные разряды ветвятся к земле. Шонланд и др. показали, что 90% разрядов, идущих с отрицательно заряженной тучи, разветвляются книзу.

Таким образом это заключение автора и последующие выводы, опирающиеся на него, следует признать сомнительными. Реф.

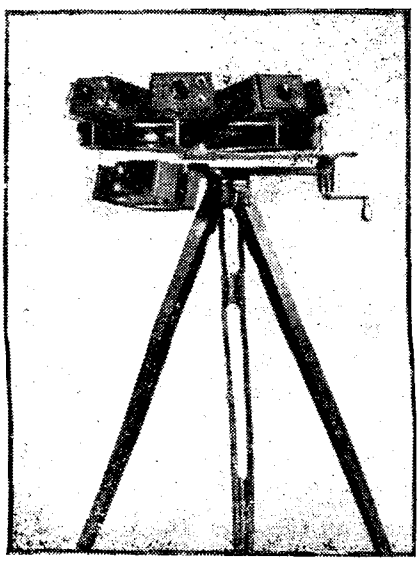


Рис. 1

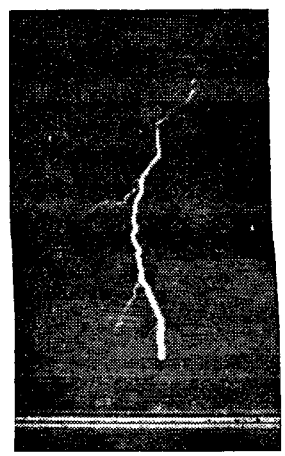


Рис. 2

Рис. 3

Рис. 4

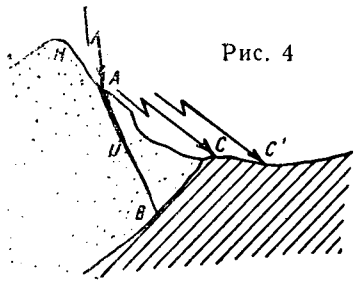


Рис. 4

напряжения в слое A—B молния может перескочить с места в точки C и C'. При этом пораженным оказывается весь склон, в то время как вершина горы подвержена опасности в значительно меньшей мере.

Перескакивание молнии не будет иметь места, если сопротивление жилы меньше, чем сопротивление пути AC или AC'. Аналогичным образом рассматриваются другие примеры, в которых распределение хорошо проводящих включений может направлять разряд по определенным путям. Эта возможность должна быть использована при устройстве заземлений и трассировке линий передач.

И. С. Стекольников

I. G. ALBRIGHT. УДАР МОЛНИИ И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИЕ.
Journal of applied Physiks. Vol. 8, № 5, May 1937

Для наблюдений разрядов молнии автором сконструирован оригинальный аппарат (рис. 1), состоящий из 8 камер, укрепленных на велосипедном колесе, вращаемом через передачу рукой. Камеры расположены под углом в 45° друг к другу, и так как угол горизонта каждой из них равен 60°, то их объективы охватывают весь горизонт. Для того чтобы бóльшая часть снимка занималась небом, оси камер приподняты на 12°. Под вращаемыми камерами установлены три неподвижные, охватывающие 150° горизонта. Автор сфотографировал многократный разряд, длившийся около 0,162 sec. На рис. 2 дана первая составляющая этого разряда, протекающая без лидера, сильно разветвленная и ярко светящаяся у земли. По мнению автора, различие интенсивности свечения канала объясняется лучшей видимостью у земли[1]. Длительность первой составляющей порядка 0,00015 sec.

Через 0,023 sec после первой составляющей началась вторая (рис. 3) с отчетливо видимым лидерным разрядом. Интервал времени между началом лидера и концом обратного разряда составляет около 0,00025 sec. Разветвленность и интенсивность этого разряда значительно меньше, чем у предыдущего.

Третья составляющая удара последовала через 0,031 sec. Промежуток времени между лидерным и главным ударом был примерно 0,00016 sec.

Четвертая составляющая возникла через 0,030 sec после третьей. Лидерный процесс здесь более ярко выражен, чем в предыдущем случае, его отделение от главного удара достигает 0,00020 sec.

Пятая составляющая возникла через 0,040 sec после четвертой; разделение лидерного и главного удара во времени то же, что и в предыдущем случае.

Шестая составляющая (рис. 4) носила дублетный характер с интервалом между ударами в 0,00075 sec; первый из них возник через 0,037 sec после пятой составляющей, длился около 0,003 sec и имел еле заметный лидер.

Второй удар дублета длился 0,00016 sec, лидер его на снимке отличить не удалось.

В своей работе автор приходит к следующим выводам:

1) за исключением первой составляющей и второго удара дублета все составляющие имеют лидер, предшествующий главному удару;

2) разветвления наиболее значительны у первой составляющей, более слабы у второй и совсем исчезают у последующих составляющих;

3) по разветвлениям первой составляющей, направленным к земле, можно заключить, что облако положительно[2];

4) лидер движется к земле со скоростью порядка 4.10^8 cm/sec $\div$ $12\cdot10^8$ cm/sec; главный удар движется со скоростью $15.10^8 \div 75\cdot10^8$ cm/sec;

5) большая скорость движения главного удара всех составляющих объясняется движением электронов от земли к облаку, вследствие чего образуется мгновенный ток большой силы.

Автор полагает, что частицы, составляющие лидерный разряд, противоположны по знаку частицам главного удара, которыми могут быть только электроны. Таким образом лидерный удар будет состоять из положительных частиц, движущихся к земле (в случае положительного облака), подготовляющих ионный или по меньшей мере проводящий путь, по которому идет главный разряд.

При попытке объяснения этого процесса с помощью потенциалов ионизации, скоростей и масс частиц оказывается, что скорости положительных ионов слишком малы по сравнению со скоростями лидерного удара.

По мнению автора возможно, что положительными частицами лидера являются позитроны, возникающие после главного разряда первой составляющей удара. Позитроны

[1] Различие в видимости свечения канала, возможно, имеет некоторое значение для близких разрядов (порядка 1 km) при дожде. Однако наблюдения других авторов (Шонланд, Колленс, Малан) над дальними разрядами в чистом воздухе показали, что изменение интенсивности свечения канала по длине связано только с физикой явления. Реф.

[2] Из новой работы Симпсона (Proc. Roy. Soc. № 906, 1937) и более ранних работ Вильсона видно, что грозовые тучи в нижней своей части несут отрицательный заряд, в то время как почти все зарегистрированные разряды ветвятся к земле. Шонланд и др. показали, что 90% разрядов, идущих с отрицательно заряженной тучи, разветвляются книзу.

Таким образом это заключение автора и последующие выводы, опирающиеся на него, следует признать сомнительными. Реф.

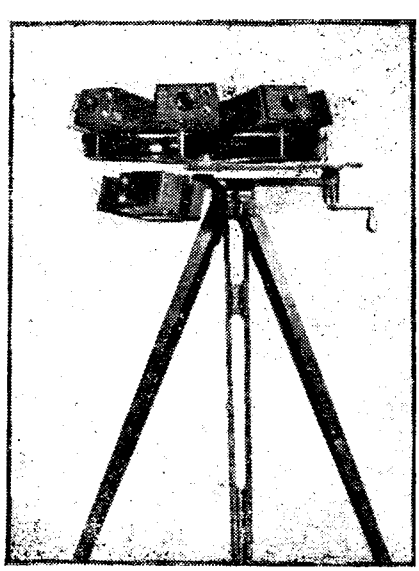


Рис. 1

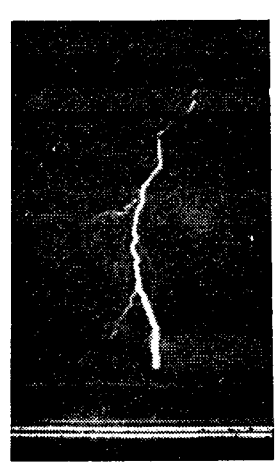


Рис. 2

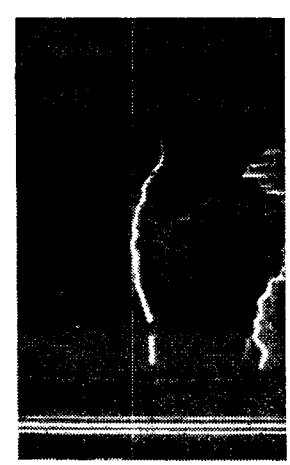


Рис. 3

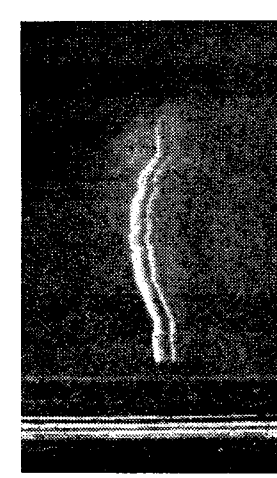


Рис. 4

находятся в канале разряда до момента образования второй составляющей, которая, таким образом, будет протекать с лидером[3].

Х. С. Валеев и В. С. Комельков

[3] Согласно автору лидерный процесс у первой составляющей невозможен из-за отсутствия позитронов. Это положение опытом не подтверждается. Зарегистрированы разряды, в которых первая составляющая удара протекает с лидером (см. работы Шонланд и др., Воркман, Снодд и Бимс и др.). Возникновение позитронов, имеющих потенциал ионизации в 2, 4, 10^6 вольт-электрон в предварительном ионизированном стволе, также мало вероятно.

S. ОНТАКА. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

ETJ № 7, 1937, стр. 198—202

Автор делит все устройства для стабилизации напряжения переменного тока при помощи трансформаторов с насыщенным железом на следующие типы: 1) Устройства с одним трансформатором. 2) Устройства с двумя трансформаторами. 3) Устройства со специальными трансформаторами с подмагничиванием. Для каждого типа указан метод расчета и приведены экспериментальные кривые зависимости напряжения на выходе от напряжения на входе при разных нагрузках.

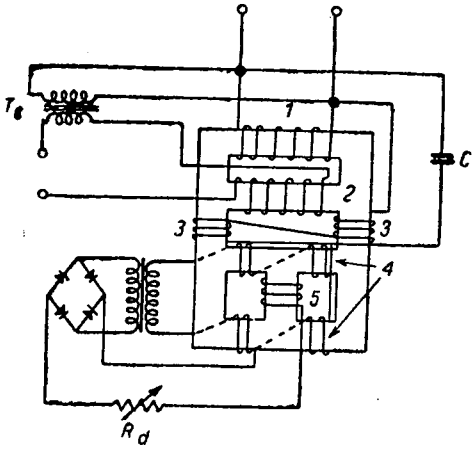


Рис. 1

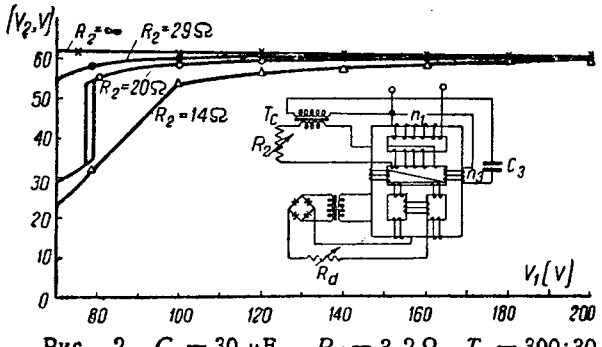


Рис. 2. $C_3 = 30$ μF, $R_d = 3{\cdot}2\ \Omega$, $T_c = 300{:}30$, $n_1 = 300$ витков, $n_3 = 250$ витков

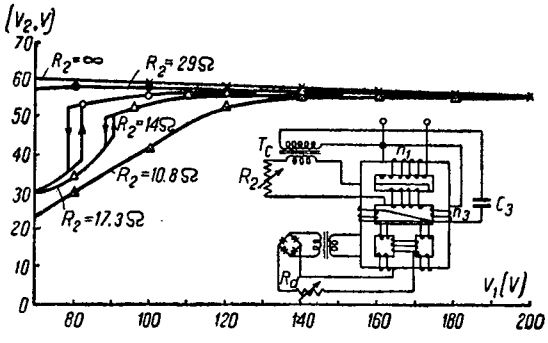


Рис. 3. $C_3 = 30$ μF, $R_d = 3{\cdot}2\ \Omega$, $T_c = 420{:}30$, $n_1 = 300$ витков, $n_3 = 250$ витков

Указывается на преимущества устройства, предложенного автором статьи. Схема этого устройства приведена на рис. 1, а результаты испытаний на рис. 2 и 3.

Как видно из кривых, приведенных на этих рисунках, напряжение на выходе остается почти неизменным при изменении напряжения на входе от 100 до 200 V и нагрузки от 0 до 180 VA.

А. И. Фройман

I. FIEDLER. ДИНАМОМАШИНА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ С НЕРЕГУЛИРУЕМОЙ ВОДЯНОЙ ТУРБИНОЙ. E u. M № 5, 30 января 1938

Водяные турбины малой мощности (приблизительно до 25 kW) по экономическим соображениям иногда применяют без регулятора, несмотря на то, что число оборотов нерегулируемой турбины при холостом ходе возрастает почти вдвое.

Генератор постоянного тока, предназначенный для соединения с нерегулируемой турбиной, должен быть устроен так, чтобы возбуждение его автоматически изменялось по определенному закону, в соответствии с чем напряжение на клеммах оставалось бы постоянным, при переменном числе оборотов. На рис. 1 для нерегулируемого агрегата показана зависимость между тангенциальным внешним усилием P, мощностью и током L и I, магнитным потоком генератора Φ и окружной скоростью или числом оборотов v (n).

Так как $\Phi = \frac{kE}{n}$, то при $E = \text{const}$ кривая $\Phi = f(n)$ представляет собою гиперболу. На рис. 2 изменение результирующего потока машины в функции I показано как разность: $\Phi_R = \Phi_I - \Phi_{II}$, где $\Phi_I = \text{const}$. Основываясь на изложенном принципе, представляется возможным построить динамомашину постоянного напряжения из полуфабрикатов нормальной машины согласно схеме рис. 3. Полюса N_1 и S_1 при постоянном напряжении на зажимах дают постоянный

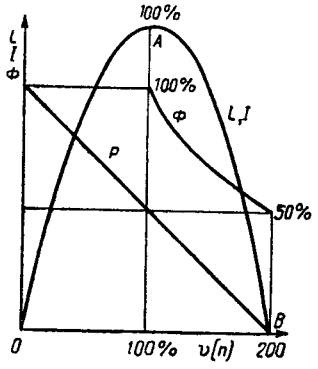


Рис. 1. Характеристика агрегата, оборудованного нерегулируемой водяной турбиной

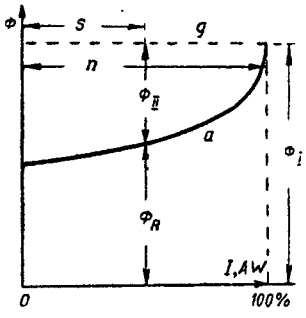


Рис. 2. Кривая изменения результирующего магнитного потока генератора постоянного тока

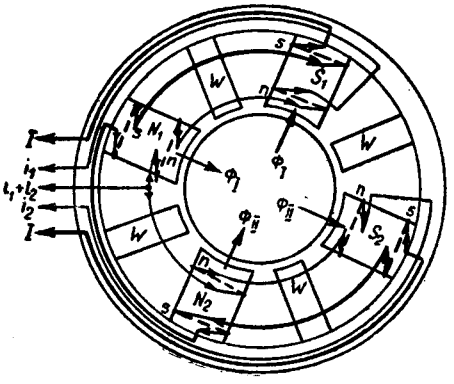


Рис. 3. Принципиальная схема соединения обмоток возбуждения генератора постоянного тока

магнитный поток Φ_I, учитывая, что немногие витки сериесной обмотки предназначены лишь для компенсации реакции якоря. Шунтовая и сериесная обмотки полюсов S_2 и N_2 действуют навстречу и рассчитаны так, что при полной нагрузке $\Phi_{II} = 0$. Взаимно навстречу направленные потоки Φ_I и Φ_{II} при любых оборотах создают в якоре $E = \text{const}$, вследствие того, что совместно они адекватны потоку Φ_R, изменяющемуся согласно кривой *a* на рис. 2.

Такого рода генератор при уменьшении нагрузки и соответственно при увеличении числа оборотов до 80% может иметь изменение напряжения только на $\pm$ 3,3%. Меняя несколько добавочное сопротивление шунтовой обмотки полюсов N_1 и S_1, можно уточнить форму кривой $V = \varphi(n)$, вообще говоря, мало отличающейся от горизонтальной прямой. Включая же дополнительные сопротивления в шунтовую обмотку второй системы полюсов, можно по желанию приспособить генератор к различным величинам максимальной нагрузки. Следует отметить, что генератор постоянного напряжения рассмотренной конструкции, электрически являющийся машиной с расщепленными полюсами, при всякой нагрузке имеет хорошую коммутацию.

Н. А. Караулов

Возможность простыми средствами построить генератор постоянного напряжения заслуживает большого интереса с точки зрения автоматизации малых сельских гэс, где прямые эксплоатационные расходы составляют иногда значительную часть себестоимости энергии.

Н. К.

S. R. MELLONIE, W. E. NETTLETON. КОРРОЗИЯ КОЖУХА ТРАНСФОРМАТОРА. El. R. № 3136, 31 декабря 1937

На основе обследования многих трансформаторов в условиях эксплоатации собран материал, касающийся образования кислот в изолирующем масле и коррозии внутренней поверхности кожуха. В одном из типичных случаев, отмеченных обследованием, авария была вызвана при нормальной работе трансформатора воздействием паров масла на верхнюю крышку и на свинцовые и латунные детали. О размерах повреждения можно судить по тому, что верхний стальной лист толщиной 4,8 mm проржавел насквозь, причем вся внутренняя поверхность крышки была покрыта большими наростами ржавчины.

Масло, отличающееся повышенной кислотностью, обычно в теплом виде вполне прозрачно (хотя иногда имеет яркозеленый цвет), но при охлаждении может стать мутным. На высокую кислотность масла указывает характерный острый запах и в начальной стадии часто очень сухая поверхность крышки кожуха. Такие масла неизменно содержат влагу, которая, будучи извлечена центрифугой, проявляет признаки высокой агрессивности. Вероятно по мере нагревания трансформатора эта влага испаряется и, конденсируясь на внутренней стороне крышки, вызывает опасную коррозию.

Действующие Британские стандартные нормы ограничивают допустимую кислотность значением 0,2 (mg KOH), в то время как вредное воздействие начинается при кислотности 0,7, в условиях отсутствия свободного «дыхания» трансформатора. В случае же свободного «дыхания» были отмечены кислотности до 4,4 при отсутствии заметной коррозии.

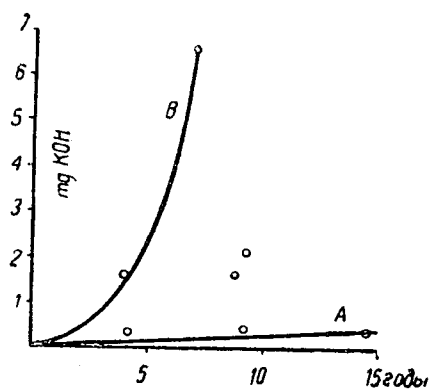


Рис. 1. Увеличение кислотности трансформаторного масла

Трансформаторное масло первоначально поступает от поставщиков с кислотностью от 0,01 до 0,03. В течение ряда лет эксплоатации в благоприятных условиях кислотность может возрастать медленно, как это показывает кривая *A*, но в противоположных условиях она увеличивается быстро, например по кривой *B*. Эти кривые показывают предельные отмеченные значения кислотности масла.

Выводы из произведенного обследования трансформаторов таковы: 1) кислоты образуются во всех случаях, но в различных количествах, даже если сопутствующие условия одинаковы; 2) присутствие кислоты не обязательно вызывает коррозию; 3) во всех случаях, когда трансформатор закрыт практически герметически и над уровнем масла оставлен слой воздуха, — можно ждать опасной коррозии; 4) ограниченное «дыхание» не предотвращает образования кислоты, но предотвращает коррозию; 5) присутствие малого количества испорченного масла, которое после чистки может остаться внутри трансформаторных катушек, повидимому, ускоряет темпы кислотообразования в новых маслах; 6) присутствие грязи редко отмечается в масле с высокой кислотностью; 7) защитная ценность антикоррозионной краски и пробки сомнительна, так как известны случаи, когда пары проникали сквозь облицовку толщиною 3,2 mm, выполненную из прессованной пробки, причинив тяжелую коррозию защищаемому стальному листу; 8) желательно все трансформаторы, устанавливаемые внутри помещений, оборудовать поглотителями влаги, так как в этих условиях не был отмечен ни один случай коррозии.

Н. А. Караулов

J. BAUDET. ПОДСТАНЦИЯ LABORDE ПАРИЖСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА. RGE № 9 и 10, 1938

На одной из вновь пущенных в последнее время в эксплоатацию подстанций метрополитена в Париже Laborde установлено 4 ртутных выпрямителя по 3000 kW каждый при напряжении 615 V на стороне выпрямленного тока. Здание подстанции предусматривает возможность установки пятого агрегата. Таким образом мощность может быть доведена до 15 000 kW.

Ввиду ограничения места подстанция выполнена в 5 этажей с подвальным помещением. В последнем расположены маслостоки, вводные кабели высокого напряжения, кабели отходящих фидеров и камеры для засасывания воздуха для охлаждения трансформаторов. В первом этаже расположены питающие трансформаторы и распределительное устройство высокого напряжения.

Выпрямители и пульт управления помещены в третьем этаже, а небольшой высоты второй этаж занят разделяющими катушками, быстродействующими автоматами и прочим оборудованием. Четвертый этаж занят аккумуляторной батареей, и, наконец, на самом верху расположены баки для охлаждающей воды.

Выпрямители, установленные на этой подстанции, выполнены фирмой Compagnie Électro-Mecanique, являющейся филиалом фирмы Brown Boveri. Выпрямители типа B712 на 3000 kW 615 V выдерживают следующие перегрузки: 50% (7500 A) — 1 h; 100% (10 000 A) — 150 sec.

Аноды выпрямители выполнены из графита и снабжены управляющими сетками для отключения в момент обратных зажиганий. В качестве уплотнений применяются обычные уплотнения фирмы BBC со ртутным контролем, а на катоде поставлена резиновая шайба и прокладка из слюды. Выпрямители снабжены обычной системой откачки, состоящей из ртутного и масляного насосов. Для измерения давления служит электрический вакуумметр. Общий вес выпрямителя 6100 kg; вес ртути в катоде 71 kg.

Со стороны выпрямленного тока выпрямители защищены быстродействующими автоматами, установленными на обратный ток, а также обычными автоматами прямого тока.

На рис. 1 приводится кривая падения в дуге. Для питания выпрямителя служит трансформатор, типовой мощностью 4000 kVA, выполненный по схеме: первичная обмотка — треугольником, вторичная — две звезды с разделяющей катушкой. Первичное напряжение 10 250 V с ответвлениями $\pm$ 2,5%, $\pm$ 5% и $\pm$ 7,5%. Вторичное напря-

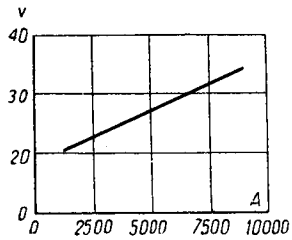


Рис. 1. Падение в дуге

жение — 575 V. Для формовки имеются специальные выводы, дающие возможность получить напряжение 72 V.

Коэфициент полезного действия агрегата при нагрузке от $^2/_4$ до 1 составляет $\sim$0,94, а коэфициент мощности $\sim$ 0,92.

Защита выпрямителей при обратных зажиганиях осуществляется быстродействующим автоматом (время отключения которого $\sim$0,018 sec) и сетками. На сетки нормально подается положительный потенциал, а в момент к. з. специальное реле в течение 0,003—0,006 sec подает на сетки отрицательный потенциал. Кроме сетчатой защиты, для перестраховки выключатель на стороне высокого напряжения действует без выдержки времени.

Охлаждение выпрямителей выполняется по циркуляционной системе. Фирмой BBC было выставлено требование применить для охлаждения выпрямителей воду с температурой не ниже 30° С с целью избежать чрезмерного переохлаждения корпуса, что может вызвать обратные зажигания. Отработанная вода охлаждается в специальных охладителях проточной водой, поступающей из р. Сены. Для обеспечения постоянства напора имеются два бака, установленные в верхнем этаже. Охлаждение выпрямителей происходит раздельно от ртутных насосов. Для последних имеется добавочный охладитель. Питание всех выпрямителей от общего бака емкостью 10 m³ каждый дает возможность подавать воду температурой в 35°, что особенно важно, когда в часы максимальной нагрузки резервные выпрямители сразу должны быть включены на полную мощность.

Благодаря тому что бак общий, вода во вновь включенный выпрямитель подается с температурой 35°, и корпус быстро прогревается. Для поддержания температуры в баках последние отеплены. Трубопроводы от баков к выпрямителям выбраны из такого расчета, чтобы в месте подключения выпрямителя давление составляло 0,8 атмосферного при расходе 40 m³/h на 5 выпрямителей. Температура корпуса поддерживается помощью терморегулятора в пределах $\sim$47°.

Отепление подстанции выполнено путем подогревания воздуха, для чего используется отработанная вода.

Л. М. Клячкин

УПРАВЛЕНИЕ ПОСРЕДСТВОМ ЧАСТОТЫ.

The Electrician № 3107, 17 декабря, 1937, стр. 727—728

В декабре в Maidstone (Англия) была пущена в эксплоатацию система централизованного управления уличным освещением и пиковой нагрузкой посредством нахождения сигнальной частоты. Система эта запроектирована для четырех частот: две для управления освещением (включение и выключение) и две для управления пиковой нагрузкой; последнее устройство в настоящее время еще не работает.

Рассматриваемая система допускает одновременное управление многими цепями из одного пункта. Сигнальные пульсации от трансмиттера генерирующей станции через распределительные сети передаются к реле, расположенным в различных пунктах этой сети.

Управление трансмиттерными аппаратами на силовой станции производится кнопками. Пульсации проходят через высоковольтные фидера и подстанции и действуют на реле, установленные в колонках уличного освещения или у потребителя. Таким образом уличное освещение целого района или части его может быть включено или выключено посредством манипуляций с кнопками на силовой станции.

Управление посредством реле времени или фотоэлементов может быть также легко включено в эту систему. Частота пульсаций практически варьируется между 300 и 900 Hz; различные частоты выбраны во избежание 50-Hz гармоник, а также отражений и затуханий, которые могут иметь место, если применить частоту выше 2000 Hz.

Передаточные трансформаторы изготовлены специальной конструкции, так как они должны противостоять к. з., мощность которых может доходить до 1 000 000 kVA.

Высокочастотный ток генерируется трехфазным генератором; требуемая мощность колеблется от 10 kVA до 100 kVA в зависимости от размеров системы. Генератор приводится во вращение синхронным мотором через коробку передач для получения различных частот, или мотором постоянного тока.

Напряжение и частота регулируются сервомотором, действующим через реостат на возбуждение мотора или генератора. От генератора энергия подводится к ряду компенсирующих и блокирующих конденсаторов, величиной емкости которых, как и другими вспомогательными цепями, управляют контакторы на панели станции.

Резонансный фильтр с помощью конденсатора пропускает сигнальные пульсации к реле, которые приводят в действие два настроенных язычка, вибрирующих с частотой, соответствующей частоте включения и выключения. Начав вибрировать, они заставляют вращаться зубчатое колесо, которое посредством цепной передачи заставляет ртутный контакт занять позицию включения или выключения.

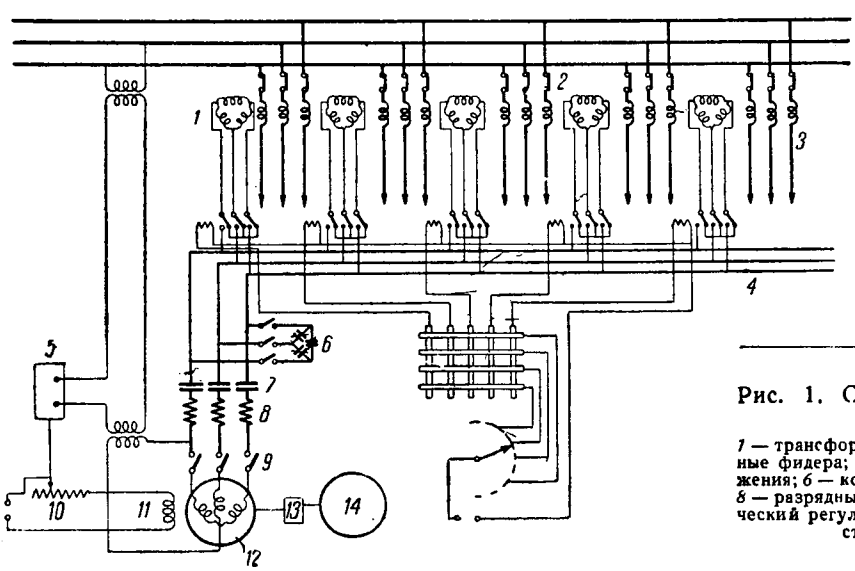
Реле не могут срабатывать от механических сотрясений или высокочастотных волн перенапряжений, получающихся при авариях в системе.

М. Д. Трейвас

F. G. SPREADBURY. МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ИСКРЕНИЯ НА КОНТАКТАХ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ.

The Electrician № 3110, 7 января 1938

Напряжение генератора постоянного тока, работающего совместно с регулятором напряжения типа Тирриля, как известно, колеблется в некоторых небольших пределах вследствие колебания тока возбуждения. Максимальное напряжение на зажимах R_p — рис. 1 (включаемого регулятором в цепь возбуждения), а следовательно, и на контактах P, равно $I_m R_p$, где I_m — ток возбуждения в момент расхождения контактов.



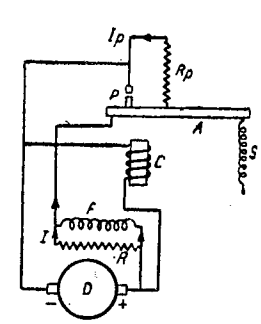


Рис. 1

Рис. 1. Схема электрических соединений трансмиттера пульсаций на центральной станции.

1 — трансформатор передатчика пульсаций; *2* — М. В.; *3* — распределительные фидера; *4* — высокочастотные шины; *5* — диференциальное реле напряжения; *6* — компенсирующие конденсаторы; *7* — блокирующие конденсаторы; *8* — разрядные сопротивления; *9* — главный выключатель; *10* — автоматический регулятор возбуждения; *11* — поле; *12* — генератор звуковой частоты; *13* — коробка передач; *14* — синхронный мотор

Так как напряжение генератора и при возрастании скорости и при увеличении нагрузки должно оставаться постоянным, то I_m меняется по величине, увеличиваясь в последнем случае. Одновременно с I_m напряжение на контактах P также возрастает, и это ведет при размыкании контактов к искрению, а следовательно, и подгоранию их.

Во избежание последнего желательно, чтобы R_p было невелико; однако, с другой стороны, при малом R_p и некоторой скорости, меняющейся в широких пределах, способность регулирования напряжения регулятора Тирриля будет потеряна, так как повышенное напряжение генератора U_m позволит магниту C держать все время притянутым якорь A. Следовательно, R_p должно быть выбрано таким, чтобы, с одной стороны, на зажимах его было малое напряжение, а с другой, — чтобы оно допускало изменение скорости в широких пределах без потери способности регулирования напряжения. Одним из методов уменьшения искрения контактов и в то же время увеличения пределов изменения скорости служит включение омического сопротивления, параллельно обмотке возбуждения, как это изображено на рис. 1. Тогда напряжение на контактах U_p уменьшится, как это и видно из следующих расчетов.

При разомкнутых контактах

$$U_m = L\frac{dI_m}{dt} + I_m R_f + I_p R_p;$$

$$0 = L\frac{dI_m}{dt} + I_m R_f = IR$$

и, кроме того, $I = I_p - I_m$.

Здесь L — самоиндукция обмотки возбуждения; I_m — ток, текущий через нее; I и I_p — ток и индуктивность через сопротивление R и R_p.

Решая совместно эти уравнения, получаем:

$$U_p = I_p R_p = \frac{R_p (U_m + I_m R)}{R_p + R}.$$

Если взять $R = R_p$, то $U_p = \frac{U_m + I_m R_p}{2}$.

Решая практический пример, в котором $I_m = 2{,}5$ A (при заданных $U_m = 15$ V и $R_p = 20$ Ω), получаем, что без шунтирующего сопротивления $U_p = 50$ V, а с сопротивлением — $U_p = 32{,}5$ V.

М. Д. Трейвас

H. ROELIG. СИНТЕТИЧЕСКИЙ КАУЧУК „BUNA" В КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ.

ETZ № 7, 17 февраля 1938, стр. 172

Основным видом синтетического каучука в Германии является „Buna" (сокращение от слов: *бу*тадиен-*на*триевый каучук). В связи с большой работой, ведущейся по замене импортного натурального каучука синтетическим, последний начинает широко внедряться также и в кабельную технику как электроизоляционный материал и для защитных оболочек (заменитель также дефицитного свинца).

Таблица дает сводку ряда характеристик для натурального каучука различных разновидностей буны и других синтетических пластмасс, находящих себе применение в кабельном производстве. Как видно, Perbunan (масло- и бензиностойкий тип буны) является весьма низкокачественным изоляционным материалом, в то время как основные сорта Buna S и Zahlenbuna по диэлектрическим свойствам близки к натуральному каучуку.

Рис. 1 дает зависимость tg δ и удельного сопротивления от температуры, рис. 2 — гигроскопичность — прирост веса при пребывании в течение продолжительного времени в воде натурального каучука и в сравнении с ним Buna. Отмечается также устойчивость Buna против термического старения

Таблица

Материал	Удельное сопротивление при 20° C в Ω·cm	tg δ при 20° C и 50 Hz		ε при 20° C и 50 Hz	
		без наполнителей	с наполнителем	без наполнителей	с наполнителем
Perbunan	10^6—10^7	—	—	15—20	15—20
Buna S	10^{14}—10^{15}	0,0009	0,003—0,03	2,9	2,9—7
Zahlenbuna	10^{14}—10^{15}	0,0007	0,006—0,03	2,9	2,9—7
Натуральный каучук	10^{14}—10^{15}	0,001	0,005—0,01	2,7	2,7—7
Igelit PCU	10^{12}—10^{14}	0,01	—	3,6	—
Oppanol	10^{16}	0,0003	—	2,7	—
Полистирол	10^{16}	0,0001	—	2,3	—

Примечание. В графах „с наполнителем" даны средние значения для типовых вулканизатов с наполнителями, смягчителями и ускорителями вулканизации.

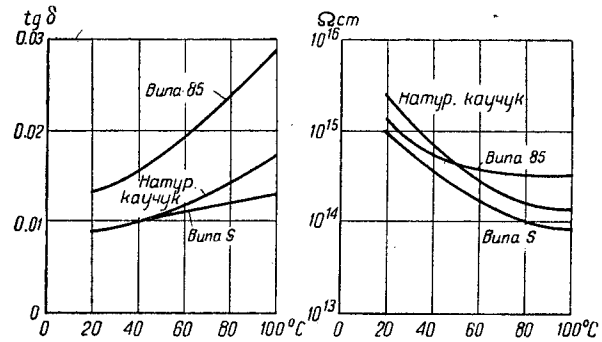


Рис. 1

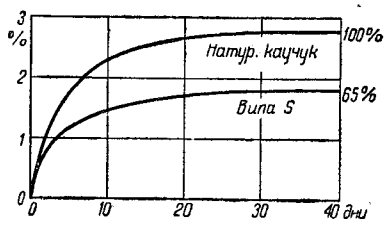


Рис. 2

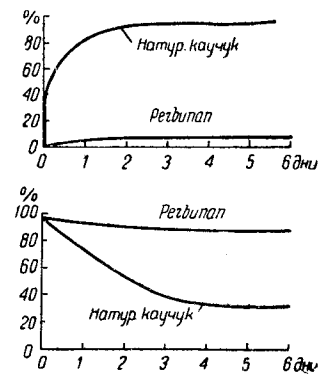


Рис. 3

и стойкость Perbunan (могущего быть использованным как материал для защитных оболочек кабельных изделий) против действия органических растворителей. Рис. 3 дает прирост веса — верхний график — и изменение прочности на разрыв — нижний график — для натурального каучука и Perbunan).

Б. М. Тареев

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Шенфер К. И. — Высоковольтные генераторы переменного тока	1
Ларионов А. Н. — Проблема повышения напряжения на зажимах турбогенераторов	3
Калинин Е. В. — Защита от перенапряжений вращающихся машин, работающих на воздушную сеть	8
Иванов Л. И. — Увеличение селективности искрового промежутка тиритового разрядника	11
Подольский Л. П. — К устройству заземлений в плохо проводящих грунтах	16
Беляев Б. В. и Шорыгин А. П. — Электризация бумаги на печатных машинах	18
Поливанов К. М. — Системы единиц мер в электротехнике	21
Ольдензихт Д. И. — О размерности электрических и магнитных величин	25
Суслов М. П. и Горсюков А. С. — Условные обозначения в электрических схемах автоматики	26
Щукин Б. К. — О статье М. П. Суслова и А. С. Горсюкова, Условные обозначения в электрических схемах автоматики	29
Г. И. Атабеков — Защита сетей с незаземленной нулевой точкой от коротких замыканий	30
Ботвинник М. М. — О влиянии колебаний напряжения возбуждения на малые колебания ротора синхронной машины	34
Булгаков А. А. — Пуск и торможение к. з. двигателей под нагрузкой	40
Морозов Д. П. и Козлов П. С. — Квадратичная система возбуждения электрических машин	45
Матюхин В. М. — Экспериментальное определение синхронного поперечного реактанца	48
Регнер О. Г. — Современное состояние проблемы вентильных двигателей	50
Привезенцев В. А., Зарин Д. Д. и Макаров А. Г. — Кабели с уплотненной жилой	53
Городецкий С. С. и Зарин Д. Д. — Изоляция газонаполненного кабеля	57
Гутенмахер Л. И. — Щитовой прибор для измерения угла сдвига ротора	60
Савостюк М. М. — Автоматическая почта с электрическим управлением	63

ИЗДАТЕЛЬ ГОНТИ

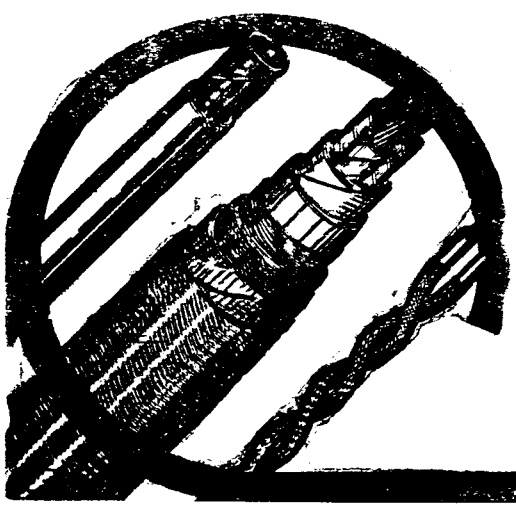
Технический редактор **А. П. Александрова**

Зав. редакцией **М. Г. Башкова**

Редколлегия

Сдано в набор 21/V 1938 г. Подписано к печати 4/VII 1938 г. Стат. формат 226 × 293 1/8. Печ. листов 11 У. а. л. 14,3.

Уполн. Главлита Б-40920. 1-я Журнальная тип. ГОНТИ НКТП СССР. Москва, Денисовский пер., 30. Заказ 871. Тираж 11.000 экз.



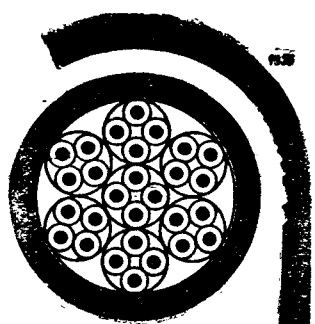
Свинцовые кабели

для сильных токов, телефона, телеграфа, сигнализации, радио и телевизии, а также принадлежности к ним.

Провода с резиновой изоляцией

любого назначения

Изоляционные трубки



KABEL- & GUMMIWERKE A. G.

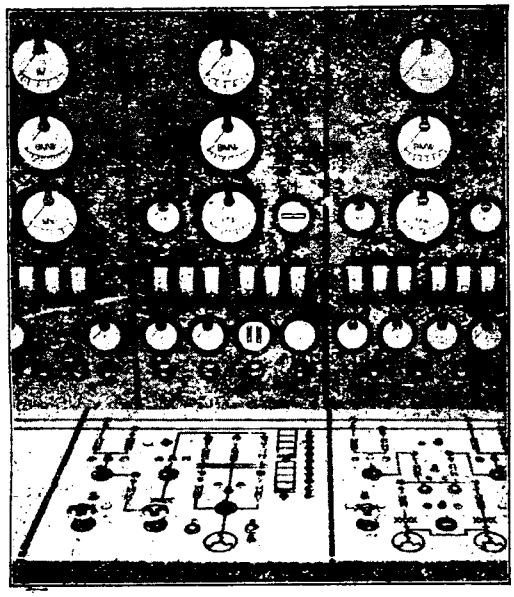
EUPEN БЕЛЬГИЯ

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

AEG

Дистанционный контроль электрических станций

повышает безопасность и экономичность работы.



Установки действующие на расстоянии

для

управления, регулировки, измерения, сигнализации.

Светящие контрольные схемы распределения. Устройство телефонных сообщений высокой частоты.

ALLGEMEINE ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT

Berlin NW 40 — Büro Rußland

6740

Авометр (универсальный прибор с 46 шкалами)

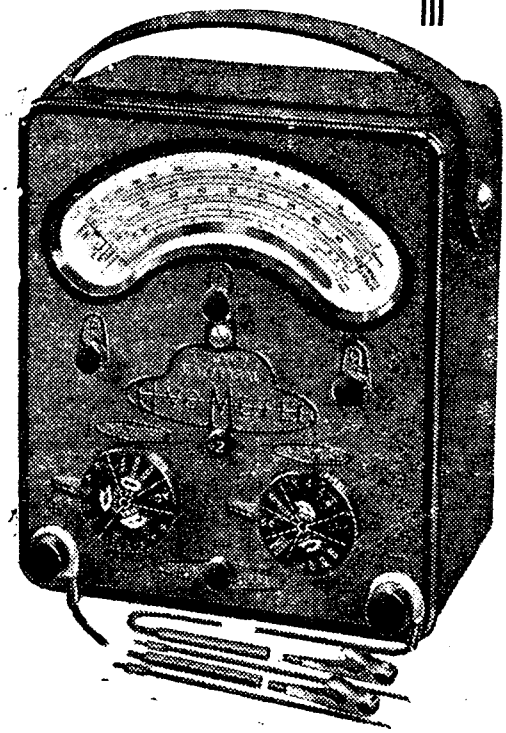
МОДЕЛЬ 7

ЛЮБОЕ электрическое измерение при помощи ОДНОГО прибора.

- Этот компактный электро-измерительный прибор с вращающейся катушкой предназначен для измерения напряжения и силы переменного и постоянного тока, а также сопротивления, силы звуковой частоты и децибэлов.
- Он содержит 46 шкал, выбор которых быстро производится при помощи двух поворотных переключателей.
- Нет надобности ни в отдельных шунтах, ни в добавочных сопротивлениях.
- Этот прибор отвечает британским нормам точности первого класса.
- Автоматическая компенсация температуры.
- Автоматическое отключение, предохраняющее прибор от порчи вследствие перегрузки.

Помимо этого прибора, фирмой выпускается универсальный «АВОМЕТР» с 36 шкалами для переменного и постоянного тока, применяемый в тех случаях, когда нет надобности в измерениях емкости, силы звуковой частоты или децибэлов.

БОЛЕЕ ПОДРОБНЫЕ ДАННЫЕ СООБЩАЮТСЯ ПО ПЕРВОМУ ТРЕБОВАНИЮ.



Другие приборы „АВО"

Универсальный прибор «АВОМИНОР»

Прибор небольших размеров переменного и постоянного тока, с 22 шкалами, для измерений напряжения, силы и сопротивления переменного и постоянного тока.

Измерительный прибор «АВО» для трубок

служит для точного определения состояния радио-трубок посредством измерения взаимной проводимости.

Осциллатор „АВО" для всех волн

Этот точно модулированный осциллатор обладает диапазоном в 95 кц. — 40 мц. при шести основных шкалах. Калибрированный гармонический циферблат расширяет шкалу до 80 мц.

Цены сообщаются по первому требованию.

THE AUTOMATIC COIL WINDER & ELECTRICAL EQUIPMENT Co., LTD.

WINDER HOUSE, DOUGLAS STREET. LONDON, S.W.1. (АНГЛИЯ)

Телеграфный адрес : «AUTOWINDA, SOWEST, LONDON»

3

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

Измерительная и защитная аппаратура

Счетчики

Реле

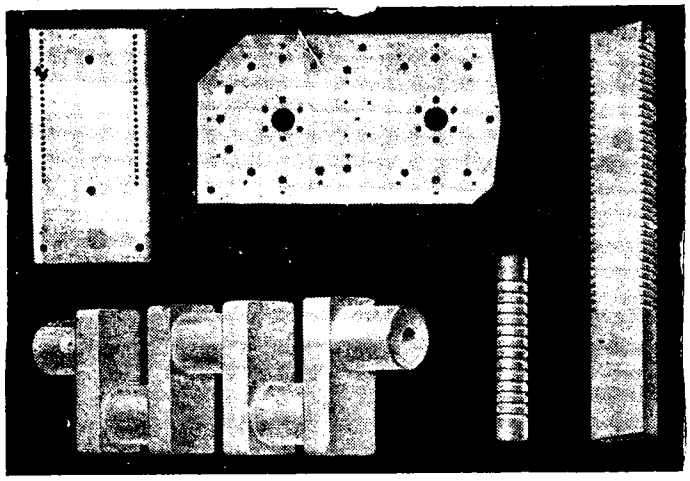
для переменного и прямого тока

МЕТРОПОЛИТЭН ВИККЕРС ЭЛЕКТР. АКЦ.О-ВО

Имеется лишь один

изоляционный материал для токов высокой частоты, поддающийся механической обработке, — это

MYCALEX



керамический материал, разрешивший проблему изоляции.

Mycalex обрабатывается механически так же легко, как мягкая сталь

Детали, указанные на рисунке, сработаны на наших заводах при помощи обыкновенных быстрорежущих резцов

В числе наших крупных покупателей значатся :

Admiralty
Air Ministry
Post Office
War Office
British Broadcasting Corporation
British Thomson-Houston Co., Ltd.
Crompton Parkinson, Ltd.
General Electric Co., Ltd.
Marconi's Wireless Telegraph Co., Ltd. and Associated Companies
Metropolitan-Vickers Electrical Co., Ltd
A.E.G. Germany
General Electric Company of America
Ministry of Marine, France
Philips Radio Holland
Radio Corporation of America
Dutch Government Radio
U.S.A. Admiralty Dept.
Westinghouse Electric & Manufacturing Co., U.S.A.
Aeronautical & General Instruments, Ltd.
Baird Television, Ltd.
Dubilier Condenser Co., Ltd.,
Ferranti, Ltd.
National Physical Laboratory, Teddington
Plessey Co., Ltd.
Standard Telephones and Cables, Ltd., and Associated Companies
H. W. Sullivan, Ltd.
Telegraph Condenser Co., Ltd.
Western Electric Co., Ltd.

MYCALEX

MYCALEX (Parent) Co. Ltd.
100, VICTORIA STREET, LONDON, S.W.1, АНГЛИЯ

SOCIÉTÉ BELGE

POUR LA FABRICATION DES

CABLES ET FILS ÉLECTRIQUES S.A.

79, rue du Marché, BRUXELLES (Бельгия)

Адр. для телегр. : FABRICABLE, Bruxelles | Телегр. Коды : A. B. C. 5 и 6th, Bentley's

ИЗОЛИРОВАННАЯ ПРОВОЛОКА И КАБЕЛИ

для всех электротехнических целей

БРОНИРОВАННЫЕ КАБЕЛИ

низкого и высокого напряжения

ТЕЛЕФОННЫЕ КАБЕЛИ

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ ТРУБКИ

с освинцованной железной оболочкой и стальные

СТАЛЬНЫЕ НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ ТРУБКИ

электросваренные, крытые красным и черным лаком

3.000.000 МАГНИТОВ!

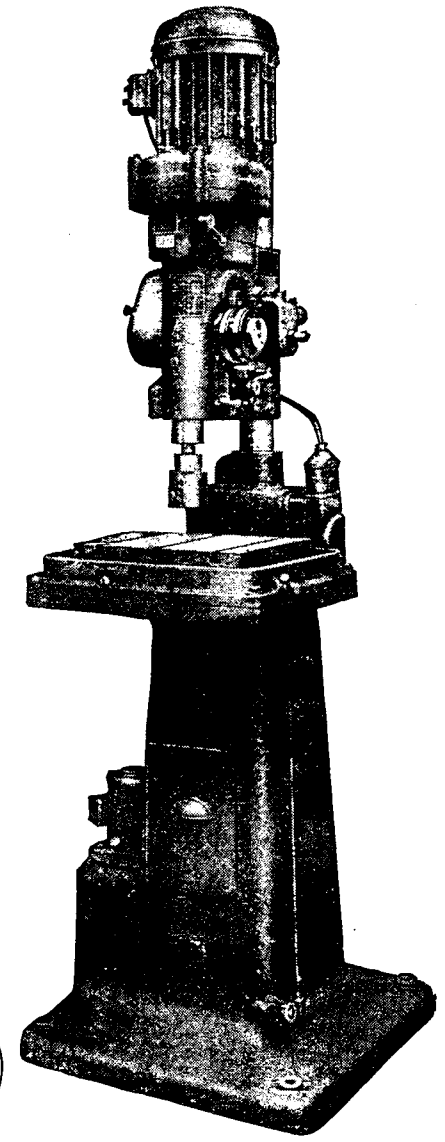
Это то количество, которое производится фирмой Darwins Limited в год. Сотни разных типов магнитов поставляются нами. Вес магнитов колеблется между долей унции вплоть до 40 англ. фунтов.

Все магниты производятся из высококачественной электростали при помощи электротока высокой частоты и подвергаются тщательной термической обработке и магнитной проверке.

Вот почему спрос на магниты Darwins так высок.

DARWINS LIMITED.

SHEFFIELD АНГЛИЯ



УЛЬТРОМАТ

автоматический

резьбонарезный станок

с электрическим включением

Автоматизация рабочего процесса / Надежное электрическое управление / Точное ограничение глубины подачи / Высокое число оборотов / Полное использование производительности быстро-режущих резцов / Точная работа передачи, отсутствие муфт и диференциальн. передачи / Простое обслуживание / Очень высокая производительность.

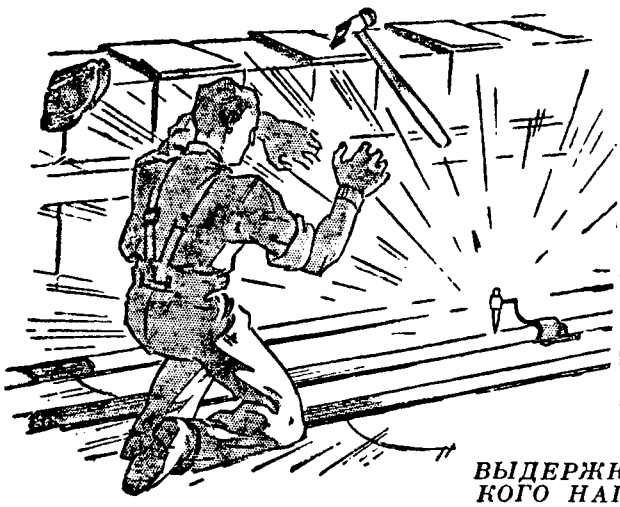
Требуйте наш проспект № 967

HAHN & KOLB • STUTTGART

ГАН и КОЛЬБ • ШТУТГАРТ

6747

Неужели Вы прокалываете Ваши кабели, чтобы убедиться, есть ли в них ток?



ВЫДЕРЖКА ИЗ ИНСТРУКЦИЙ ПО УХОДУ ЗА СЕТЯМИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОДНОГО КРУПНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

„ ..... и если, при вскрытии грунта, возникает малейшее сомнение относительно правильности местоположения кабеля, то необходимо проверить его положение по плану при помощи поверочных испытаний..."

Испробовали ли Вы для этих испытаний прибор для местонахождения кабеля фирмы

Standard?

Бесчисленное множество несчастных случаев вызываются ошибками при распознавании кабелей.
Испытательный прибор **"Standard"** является единственным аппаратом на рынке, безошибочно определяющим любой кабель на любом участке.

Этот прибор отличается простотой конструкции и мгновенностью действия. Если Вы до сих пор еще не приобрели этих приборов, то просим затребовать проспект и цены.

Standard Telephones and Cables Limited

NORTH WOOLWICH, LONDON, E. 16 - АНГЛИЯ
Телегр. адрес : WESTOPHONE, LONDON.

Отделения и представительства во всем мире

ШКОДА

Проволочные канаты для всех надобностей
Электрические кабели для всех напряжений
Динамо-проволоки
производит высокого качества
и поставляет

КАБЛО АКЦИОНЕРНЫЙ КАБЕЛЬНЫЙ И ТРОСОВЫЙ ЗАВОД
АДРЕС: STAROMESTSKE NAMESTI 16. ТЕЛЕФОН: 244-17, 260-69. ТЕЛЕГР. АДРЕС: LANAKABEL

В ПРАГЕ 1.

НОВОСТЬ:
исключительное производство патент-проволочно-канатной системы

ТРУ-ЛАЙ-КАБЛО и упругие валы „ТЕЛЕФЛЕКС“ для Чехословакии

Завод в Кладно, телефон 62, телеграфн. адрес: Кабло, Кладно.

1

FERRANTI

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР
переменного и постоянного тока

Этот новый прибор с вращающейся катушкой измеряет миллиамперы постоянного тока, вольты постоянного тока, вольты и омы переменного тока.
Этот измеритель представляет собою комплектный прибор со встроенным элементом в 1½ вольта.

ПРЕДМЕТЫ ИЗМЕРЕНИЯ:

МИЛЛИАМПЕРЫ ПОСТ. ТОКА 0-1, 7.5, 30, 150, и 750.
ВОЛЬТЫ ПОСТ. ТОКА 0-3, 15, 150, 300, 450 и 600.
ВОЛЬТЫ ПЕРЕМ. ТОКА 0-15, 150, 300, 450 и 600. От 20 до 4000 периодов в сск.
} 1000 ом на вольт

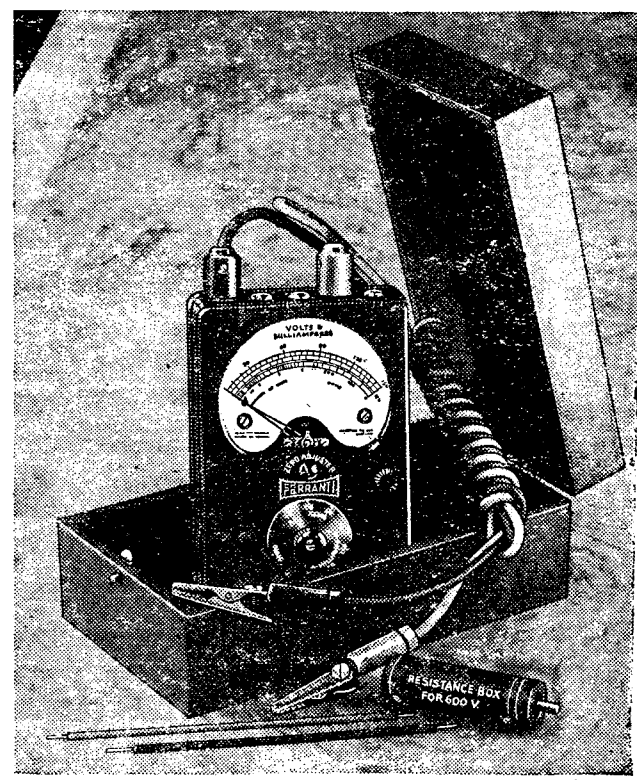
МИЛЛИАМПЕРЫ ПЕРЕМ. ТОКА 0-1.

СОПРОТИВЛЕНИЯ в пределах от 0 до 50.000 ом прибор измеряет сам по себе, а для предела измерения от 0 до 30 мегом требуется внешний источник постоянного тока до 600 вольт.

РАЗМЕРЫ 3⅜″ × 4⅛″ × 2¼″

ЦЕНА 6 фунт., 6 шиллинг. и 6 пенсов, включая солидный ящик и все принадлежности.

Требуйте проспект In. 1.



FERRANTI LTD. HOLLINWOOD, LANCS. (АНГЛИЯ)

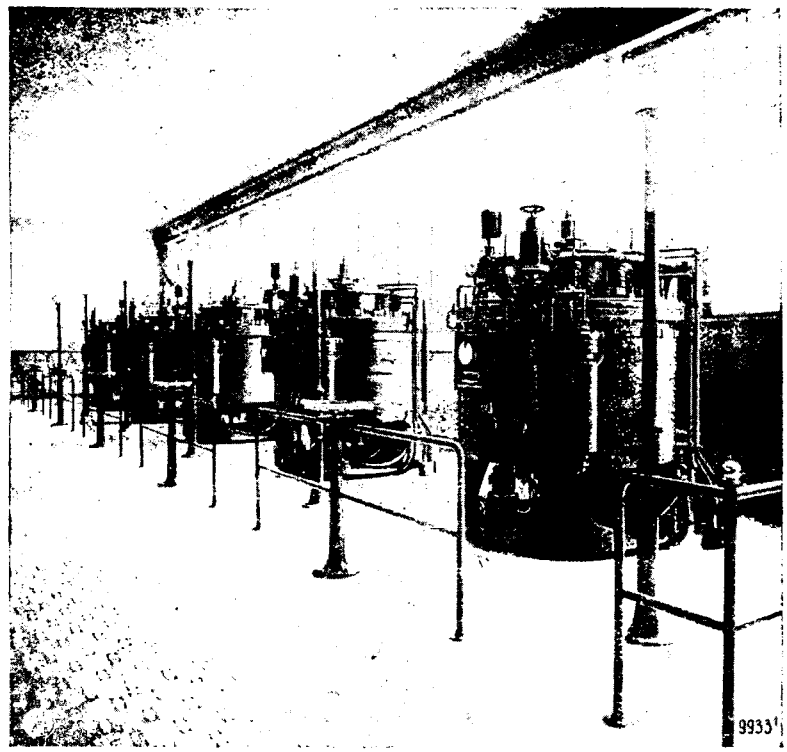
ЛОНДОНСКАЯ КОНТОРА;
BUSH HOUSE, ALDWYCH, LONDON, W.C.2.

ATELIERS DE CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES DE CHARLEROI

CHARLEROI — БЕЛЬГИЯ

A·C·E·C

Все касающееся конструкции электрооборудования



5 ртутных выпрямителей — 1850 ампер — 600 вольт

Ртутные выпрямители Гарантия Безопасность Многочисленные референции

A·C·E·C

MARQUE DÉPOSÉE

MARQUE DÉPOSÉE

DRAKA

N.V. HOLLANDSCHE DRAAD- EN KABELFABRIEK AMSTERDAM — HOLLAND

адрес для телеграмм: DRAKA · AMSTERDAM · ГОЛЛАНДИЯ

специальность:
все сорта проволоки и кабелей для электричества с резиновой изоляцией.

DRAKA

Сплавы для сопротивлений

Манганин
для измерительных инструментов,

удельное сопротивление 0,43 ома, температурный коэффициент ±0.00001, термическая сила (по сравнению с медью) + 1 микровольт на 1° Ц.

Изабеллин
свободный от никеля сплав для технических сопротивлений,

удельное сопротивление 0,50 ома, температурный коэффициент —0.00002, удельный вес 7,9—8.

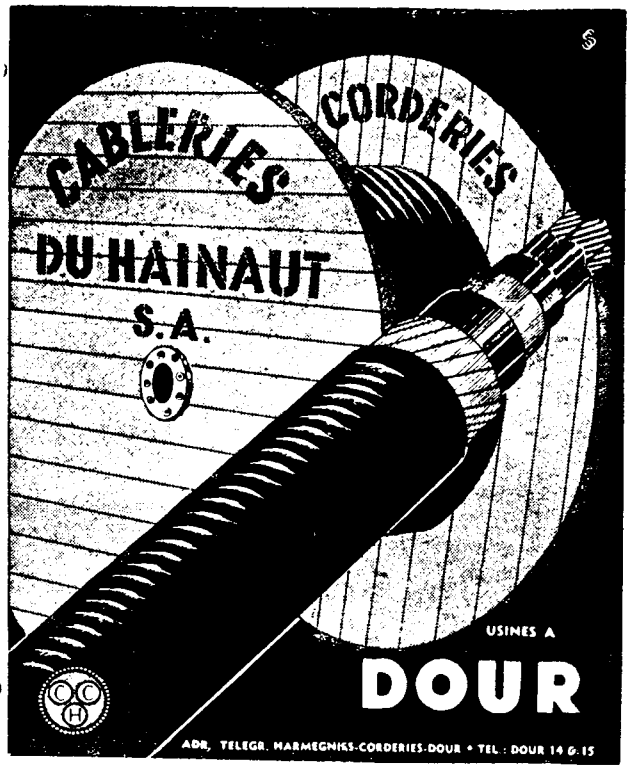
Оба сплава содержат от 12 до 13% марганца, вырабатываемого в Дилленбурге из лучшего советского железняка

Изабелленхютте в течении почти 50 лет является единственным производителем сплава манганин, широко употребляемого на всем свете, а также в СССР для прецизионной измерительной техники.

Нововыпущенный сплав Изабеллин жароупорен до 600° и широко употребляется для сильно нагруженных технических сопротивлений и пусковых реостатов.

ISABELLEN-HÜTTE / HEUSLER K. G. / DILLENBURG (ГЕРМАНИЯ)

6741



Кабели для сильного тока с резиновой изоляцией и с пропитанной бумагой.
Контрольные кабели - Телефонные кабели.
Проволока и кабели с резиновой изоляцией.

CABLERIES et CORDERIES du HAINAUT, S.A., DOUR.
Бельгия.

Мавометр WG пригоден:

в лаборатории,
для инсталляционных,
монтажных,
кустарных,
радиотехнических и
научно-исследовательс. работ

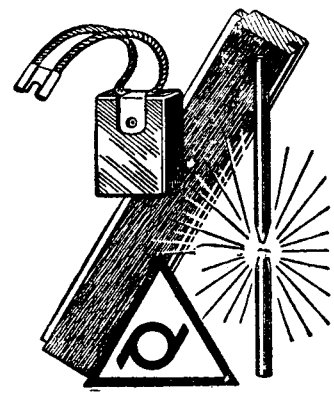
(Обратите внимание на предыдущие об'явления!)

6706

GOSSEN
FABRIK ELEKTRISCHER MESSGERÄTE
ERLANGEN/BAYERN

Dr. Alb. Lessing
Nürnberg O, Schloßstraße 24
Германия **Основ. в 1872 г.**

Щетки
для всевозможных электрических машин из графита, а также из чистого и облагороженного угля или из смеси угля с металлическим. порошком.



угольные пластины
с канавкой и пружиной или без таковых,

угольные электроды
для электрической сварки,

трубы, тигели и уплотняющие кольца из угля,
все сорта

осветительных углей

6745