

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1951



ГОСЭНЕРГОИЗАТ

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

8

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

8
1951
АВГУСТ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

СОДЕРЖАНИЕ

Письмо товарищу И. В. Сталину рабочих, работниц, инженеров, техников и служащих электростанций и сетей Московской энергетической системы Министерства электростанций	3
К. М. Поливанов, А. В. Нетушил, Н. М. Бурдак и Л. В. Кузьменко — Применение электроосмотического воздействия в гидротехнических сооружениях	5
В. А. Веников и А. В. Иванов-Смоленский — Синхронный генератор для динамического моделирования электрических систем	19
А. Б. Подольнер, Г. К. Аладжалов, С. В. Крестников, В. П. Крылов и С. Г. Фельдман — Автотрансформаторы с плавным регулированием напряжения	26
В. Л. Фабрикант и Г. Т. Грек — Определение оптимальных параметров быстроснабжающихся трансформаторов тока для релейной защиты	30
В. Н. Ужов — О новых типах отечественных электроагрегатов для питания электрофильтров	37
Л. И. Штурман и О. И. Золотарев — Определение к. п. д. и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей при непрерывно меняющейся нагрузке	43
И. М. Постников и А. И. Важнов — Электромагнитный момент синхронной машины при малых качаниях	47
Ю. И. Аносов — Асинхронные муфты скольжения	53
В. А. Борисов — Регулировочные характеристики электромашинного усилителя-двигателя	58
В. Е. Боголюбов — Расчет квазирелаксационных колебаний в феррорезонансных цепях с дросселями насыщения	64
Е. К. Михайлова — Дроссельный делитель для измерения больших постоянных токов и малых сопротивлений	69
А. И. Фюрстенберг — Простой метод независимого измерения емкости	72
О. М. Богатырев — Определение постоянных интегрирования при решении дифференциального уравнения высокой степени	74
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
Н. А. Киклевич — Упрощенные подсчеты пусковых и максимальных моментов короткозамкнутых электродвигателей, питаемых от маломощной сети	82
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
Об обозначениях в символических и операционных равенствах. По поводу символических обозначений.	85
ПО СГРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Передвижные теплофикационные электрические котлы. Об эффективности перевода двигателя рудничного ручного электросверла на ток повышенной частоты. Уменьшение погрешностей трансформаторов тока. Гиробус. Защита от перенапряжений электрооборудования, присоединенного к воздушным линиям через кабельные вставки. Электрически управляемая тиксотропия.	89
ХРОНИКА	
Совещание энергетиков нефтяной промышленности	92
БИБЛИОГРАФИЯ	
В. С. Квашнин — Книга Ю. В. Корицкого „Производство слюдяных электроизоляционных материалов“	93
Н. А. Шостьин — Книга М. О. Каменецкого „Первые русские электростанции“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96
Нограмма для определения поверхности трубчатых заземлителей из условий термической устойчивости (на третьей полосе обложки)	



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Гла-**
зунов, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, кандидат техн. наук
И. А. Сыромятников, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**.

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

Адрес для телеграмм: Москва Электричество

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый
ящик № 648

От рабочих, работниц, инженеров, техников и служащих электростанций
и сетей Московской энергетической системы Министерства электростанций

Председателю Совета Министров Союза ССР товарищу СТАЛИНУ Иосифу Виссарионовичу

Дорогой Иосиф Виссарионович!
Под руководством коммунистической партии, Вашим гениальным и мудрым водительством успешно выполнен послевоенный пятилетний план становления и развития народного хозяйства УССР.

Наша страна за последнее время достигла новых выдающихся успехов в коммунистическом строительстве. По Вашему указанию сооружаются грандиозные стройки коммунизма — Куйбышевская, Ленинградская и Каховская гидроэлектростанции, Волго-Донской, Главный Туркменский, Днепро-Украинский и Северо-Крымский каналы. Советские энергетики твердо помнят указания Ленина и Ваши, товарищ Сталин, об особом значении электрификации СССР в великом деле строительства коммунистического общества. Вместе со всем советским народом нашей любимой родины энергетики, не покладая рук, работают на укрепление и расширение энергетической системы СССР.

Электростанции Московской энергетической системы бесперебойно снабжают энергией промышленность, транспорт, коммунальное хозяйство, бытовые нужды населения Москвы, Московской, Тульской и других областей.

В 1950 году выработка электроэнергии по системе Мосэнерго составила 112,3 процента к заданию пятилетнего плана, сэкономлено сверх государственного плана 39,4 тысячи тонн условного топлива, 76 млн. киловатт-часов электроэнергии за счет снижения потерь в сетях и достигнуто снижение себестоимости тепловой и электрической энергии на 19,5 млн. рублей.

В настоящее время 38 процентов всей мощности тепловых электростанций Мосэнерго составляет оборудование высокого давления и высоких температур пара, дающее большой экономический

эффект. Вместе с тем, внедрение системной автоматизации, автоматизации процессов горения и питания котлов, а также автоматизации и телеуправления гидростанциями повысило надежность и экономичность работы системы.

По инициативе московских и уральских энергетиков широко развернулись на электростанциях скоростные ремонты энергетического оборудования, позволившие электростанциям Мосэнерго за счет сокращения простоя в капитальном ремонте котлов и турбогенераторов выработать дополнительно в прошлом году 200 млн. киловатт-часов электроэнергии.

Мы вполне осознаем, дорогой товарищ Сталин, что эти успехи не являются пределом и что мы имеем все возможности работать еще лучше на благо нашей любимой Родины.

В ответ на Вашу заботу о развитии советской энергетики мы, работники системы Мосэнерго, еще выше поднимем знамя социалистического соревнования — испытанного метода коммунистического строительства и принимаем следующие обязательства на 1951 год:

1. Перевыполнить годовой план по выработке электрической и тепловой энергии, обеспечить бесперебойное снабжение электроэнергией и теплом потребителей Московской энергосистемы.

2. Обеспечить прирост мощности: генераторной — на 11 процентов, трансформаторной — 12 процентов, синхронных компенсаторов — 14 процентов и увеличить протяженность высоковольтных линий электропередачи на 12 процентов.

3. Добиться снижения удельного расхода топлива на выработку электрической и тепловой энергии, сэкономив против плана 30 тыс. тонн условного топлива, и снизить на 50 млн. киловатт-часов потери в сетях и расход электроэнергии на собственные нужды.

4. Снизить себестоимость электроэнергии и за счет этого дать сверхплановую прибыль в размере 12 млн. рублей.

5. Обеспечить отличное качество ремонтных работ, сократив сроки ремонта энергетического оборудования на 3 процента от установленного плана.

6. Довести автоматизацию процессов горения на котлах до 80 процентов от общей паропроизводительности котлов и завершить работы по автоматизации и телемеханизации гидроэлектростанций, четырех высоковольтных подстанций и всех фидеров Московской кабельной сети.

7. Выполнить силами предприятий Мосэнерго годовой план по вводу жилой площади в эксплуатацию в размере 9 628 кв. метров к 5 декабря с. г.

Мы призываем всех рабочих, инженерно-технических работников и служащих электростанций и сетей широко развернуть социалистическое соревнование за выполнение и перевыполнение установленных на 1951 г. государственным пла-

ном количественных и качественных показателей, за высокую культуру эксплуатации, за внедрение передовой техники и скоростных методов ремонта оборудования на электростанциях и в сетях, за быстрейший ввод новых энергетических мощностей, линий электропередачи, подстанций жилой площади и предприятий и учреждений культурно-бытового обслуживания трудящихся.

Дорогой Иосиф Виссарионович!

Мы заверяем Вас, что примем все меры для выполнения своих социалистических обязательств

От всего сердца желаем Вам многих лет жизни, здоровья и сил на благо и счастье советского народа.

Да здравствует партия Ленина — Сталина — вдохновитель и организатор строительства нового коммунистического общества!

Да здравствует наша славная Родина!

Да здравствует наш любимый вождь и учитель великий Сталин!

Обсуждено и принято на собраниях рабочих, работниц, инженеров, техники и служащих электростанций и сетей Московской энергетической системы.

[Газета „Правда“, 12 июля 1951]



Применение электроосмотического воздействия в гидротехнических сооружениях¹

Доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ,
кандидат техн. наук, доц. А. В. НЕТУШИЛ, инж. Н. М. БУРДАК

Московский энергетический институт им. Молотова

кандидат техн. наук Л. В. КУЗЬМЕНКО,

Гидропроект

В 1807 г. московский физик Ф. Ф. Рейс обнаружил [Л. 1], что под действием электрического поля влага, содержащаяся в грунтах, перемещается в сторону направления вектора напряженности электрического поля. Это явление получило название электроосмоса. В последние годы электроосмос находит применение в различных областях техники [Л. 2—5].

В условиях крупного гидроэнергетического строительства, проводящегося в СССР, электроосмотическое воздействие на грунтовые воды имеет особенное значение. В настоящее время можно говорить о двух практических задачах — водопонижении и осушении грунтов, которые разрешимы с помощью электроосмотического воздействия на процессы фильтрации грунтовых вод. Первая из этих задач — водопонижение — возникает в практике строительства, например, при рытье котлованов, а вторая — осушение — имеет особенное значение при возведении земляных сооружений намывным способом.

Рытье котлованов в грунтах, насыщенных грунтовыми водами, требует снижения уровня воды, что достигается установкой по периметру котлована ряда колодцев или скважин (дренажных колодцев или иглофильтров), из которых специальными насосами откачивается вода. В песчаных грунтах, хорошо фильтрующих воду, эта мера приводит к быстрому снижению уровня грунтовых вод. Однако в глинистых или илистых грунтах с низкими фильтрационными свойствами откачивание воды через колодцы или скважины крайне медленно снижает уровень грунтовых вод. Требуется специальные меры, принудительно за-

Электроосмотическое водопонижение и электродренирование представляют практический интерес для гидротехнического и гидроэнергетического строительства. В статье описано применение электроосмотического воздействия на процесс фильтрации грунтовых вод. На основе анализа общего дифференциального уравнения фильтрации дана методика измерения электроосмотических постоянных грунтов. Изложен метод электрогидродинамической аналогии при электроосмотическом воздействии.

ставляющие воду двигаться в грунте по направлению к колодцам. Такой мерой является электроосмотическое воздействие.

На рис. 1 показан пример применения электроосмоса при осушении кот-

лована [Л. 6]. Установка вдоль откоса ряда дырчатых и сплошных труб при подключении к ним напряжения постоянного тока привела к усиленному движению грунтовых вод в направлении дырчатых труб, подключенных к минусу источника. Сплошные трубы подсоединены к плюсу источника. После нескольких дней воздействия электрическим током котлован был осушен и в нем стало возможно продолжение работ. Аналогичные результаты были получены и в ряде других случаев [Л. 5—7].

В 1950 г. Ф. Ф. Энгелем и независимо от него Б. С. Федоровым [Л. 2] этот метод был применен для снижения уровня грунтовых вод при рытье котлованов в илистых, плохо фильтрующих воду грунтах. На рис. 2 изображена схема водопонижения в установке Ф. Ф. Энгеля. Система иглофильтров 5, подключенных к насосной установ-

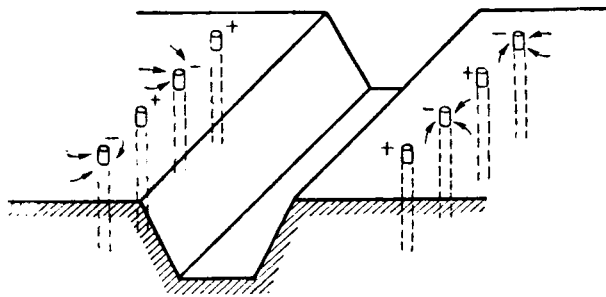


Рис. 1. Расположение положительных электродов (+) и дренажных труб (—), одновременно служащих отрицательными электродами в устройстве электрического дренажа для понижения уровня в котловане (стрелки показывают движение воды).

¹ Доклады К. М. Поливанова и А. В. Нетушила на эту тему были обсуждены на научно-методической и научно-технической конференциях МЭИ им. Молотова.

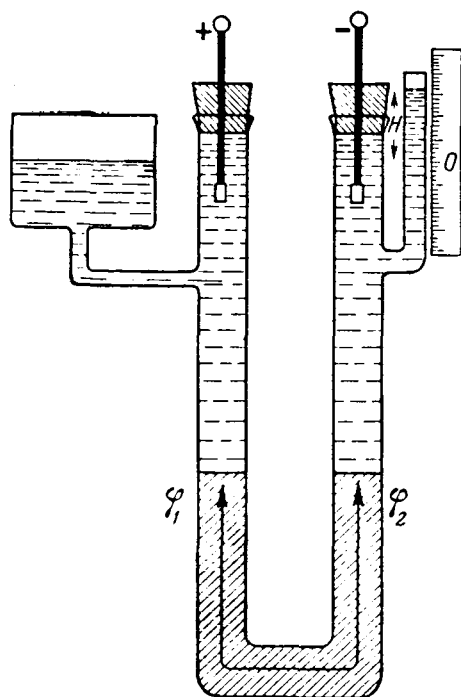


Рис. 5. Установка для определения электроосмотических свойств грунта.

то в практике строительства намывных плотин можно повысить возможную скорость намыва плотин без угрозы аварий и, самое главное, дать возможность возведения земляных плотин способом гидромеханизации из разных грунтов, которые до сих пор браковались строителями (например, из лессовых, глинистых и тонкозернистых грунтов).

Для правильного применения электродренажа, для расчета и проектирования электродренажных установок необходимы: а) подробное изучение явления электроосмоса, б) определение параметров, характеризующих электроосмотические свойства грунтов, и в) разработка методов расчета гидродинамических полей в грунтах при электроосмотическом воздействии на процессы фильтрации. Настоящая работа представляет собой первую попытку разрешения этих вопросов.

Электроосмос. Электроосмотические явления наблюдаются в заполненных жидкостью капиллярных трубках и пористых телах (в последних поры также образуют сеть капиллярных трубок). В такой системе, при наличии электрического поля, жидкость оказывается подверженной действию дополнительных сил, в результате чего в системе устанавливается новое состояние равновесия, отличное от равновесия, существовавшего при отсутствии электрического поля и определявшегося законами гидродинамики.

На рис. 5 и 6 изображены устройства для наблюдения электроосмотических явлений в лабораторных условиях. Первое из них представляет U-образную трубку (рис. 5), нижняя часть которой заполнена пористой средой. Вся трубка заливается жидкостью, подводимой из открытого резервуара (слева), с противоположной стороны имеется открытая пьезометрическая трубка. Че-

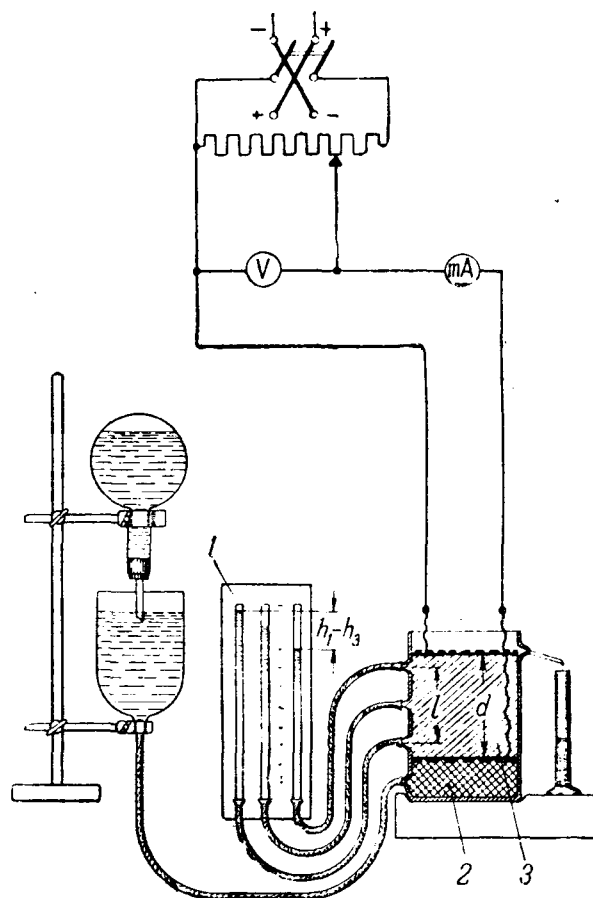


Рис. 6. Прибор для определения коэффициента фильтрации и электроосмотического коэффициента песка и песка с добавками.

1 — пьезометры; 2 — фильтр из гравия; 3 — грунт.

рез отверстия в пробках в жидкость погружаются электроды, соединяемые с источником э. д. с. Очевидно, что в условиях гидростатического равновесия уровень подъема жидкости в пьезометрической трубке должен совпадать с уровнем жидкости в резервуаре (что и наблюдается при отключенном источнике э. д. с.). После включения источника э. д. с. уровень в пьезометрической трубке начинает подниматься до тех пор пока не устанавливается новое состояние равновесия. При изменении полярности тока происходит изменение давления противоположного знака.

Второе устройство для наблюдения электроосмоса изображено на рис. 6. В широкой трубке между решетчатыми электродами заключена пористая среда, через которую просачивается жидкость из резервуара. Просочившаяся жидкость может стекать через отверстие в трубке в водомерный сосуд. Если электроды не соединены с источником э. д. с., и свободный уровень жидкости в резервуаре совпадает с уровнем отверстия, то в рассматриваемой системе не происходит никакого движения жидкости. При включении источника э. д. с. условия равновесия нарушаются, и через отверстие начинает вытекать жидкость. Для установления гидростатического равновесия уровень резервуара должен быть понижен на вполне определенную высоту, опреде-

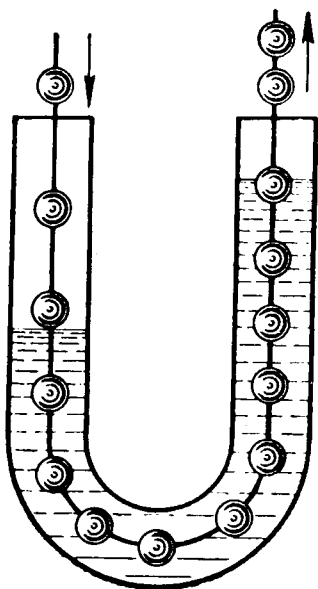


Рис. 7. Модель повышения давления при наличии электроосмоса.

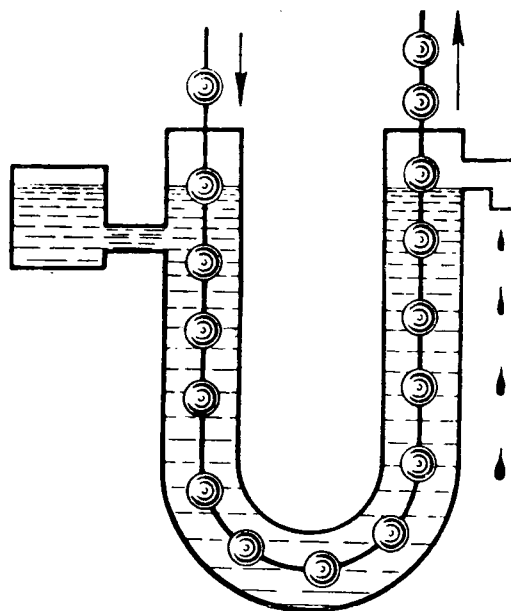


Рис. 8. Модель электроосмотического перемещения жидкости.

ляемую видом жидкости и видом пористой среды. При изменении направления тока, напротив, уровень резервуара должен быть на такую же высоту дополнительно повышен.

В рассматриваемом сейчас устройстве могут изучаться также условия гидродинамического равновесия и влияние, оказываемое на них электрическим полем. Опыт показывает, что при отсутствии электрического поля и достаточно медленном движении жидкости скорость истечения прямо пропорциональна перепаду давления, т. е. разности уровней жидкости в резервуаре и отверстия для стока. После соединения электродов с источником э. д. с. скорость просачивания жидкости изменяется, и через сравнительно небольшой промежуток времени устанавливается новое состояние гидродинамического равновесия.

В опытах с просачиванием воды через грунты при наличии поля, направление которого соответствует полярности, указанной на рис. 6, скорость истечения жидкости увеличивается прямо пропорционально разности потенциалов, устанавливаемой между электродами. Как и в предыдущем опыте, наблюдается изменение знака наблюдаемого результата при изменении полярности электродов.

Грубой аналогией, отражающей, однако, основные черты наблюдаемых явлений, может служить модель, изображенная на рис. 7 и 8. В этой модели движущиеся под действием электрического поля заряженные коллоидные или молекулярные частицы заменены цепочкой шариков. Очевидно, что при движении такой цепочки в U-образной трубке, частично заполненной жидкостью, установится квазистатическое равновесие, при котором уровни жидкости в левой и правой половине окажутся различными, если жидкость не может выливаться (рис. 7). Если же уровень жидкости в левой и правой половине U-образной трубки принужденно остается одинаковым

(рис. 8), то увлекаемая цепочкой жидкость придет в движение и будет выливаться через отверстие в трубке, несмотря на равенство уровней резервуара и отверстия.

Что касается физической стороны явления, то для ее понимания полезно рассмотреть приближенную теорию электроосмоса, основы которой были даны Гельмгольцем и Смолуховским [Л. 9]. При соприкосновении жидкости и твердых стенок капиллярной трубки, вследствие электрохимического взаимодействия молекул, стенка и жидкость оказываются разноименно заряженными. Стенка заряжается отрицательно, а равный положительный заряд распределяется по толще примыкающей жидкости, причем плотность объемного заряда постепенно убывает с увеличением расстояния до стенки (рис. 9, левая часть). Идеализируя картину, можно представить себе, что объемный заряд сосредоточен в тонком слое, отстоящем на расстоянии d от стенки, и характеризуется поверхностной плотностью σ (рис. 9, правая часть).

Такая система представляет собой плоский конденсатор, обладающий емкостью на единицу площади

$$C_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0}{d} \quad (1)$$

и зарядом σ . Очевидно, что между "электродами" такого конденсатора, т. е. между слоем положительного заряда и стенкой, должна существовать разность потенциалов

$$\zeta = \frac{\sigma}{C_0} = \frac{\sigma d}{\epsilon \epsilon_0} \quad (2)$$

Силы, препятствующие оседанию положительно заряженных частиц непосредственно на стенке,

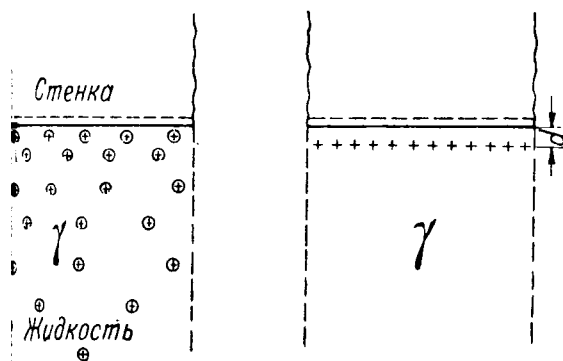


Рис. 9. Распределение зарядов в жидкости при соприкосновении с твердой стенкой.

обусловлены молекулярным движением жидкости² поэтому величину ζ (дзета-потенциал) называют электрокинетическим потенциалом. Дзета-потенциал зависит прежде всего от рода соприкасающихся тел; косвенно он зависит и от диаметра капилляров, поскольку от него зависит действительное распределение объемного заряда и, следовательно, степень погрешности, вносимая предположением о существовании заряженного слоя плотностью заряда σ на расстоянии d от стенки.

Основываясь на предположении о распределении заряда в виде заряженного слоя, легко составить уравнение для движения жидкости капиллярной трубке, происходящего под действием электрического поля.

Если напряженность электрического поля E параллельна оси капиллярной трубки, то на единицу поверхности заряженного слоя действует сила

$$F = \sigma E, \quad (3)$$

подталкивающая в движение этот слой и смежные слои, хотя бы и нейтральные, частицы жидкости. Развивая ту же идеализированную картину, можно представить себе, что движущийся заряженный слой представляет собой как бы оболочку, окружающую всю внутреннюю область капиллярной трубки. В таком случае при установившемся режиме в очень длинной капиллярной трубке постоянного сечения скорость движения жидкости внутри оболочки не должна зависеть от скорости самой оболочки.

При движении оболочки со скоростью v относительно стенок в соответствии с теорией внутреннего движения вязкой жидкости, разработанной Н. П. Петровым [Л. 10], легко подставить силу трения, противодействующую движению оболочки,

$$F = 2\pi r l \eta \frac{v}{d} \quad (4)$$

² Уравнение, которому должно подчиняться распределение объемного заряда, может быть записано так:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} = c e^{-\frac{(\varphi - \varphi_0)}{kT}} \cdot q_0,$$

где левая часть двойного равенства представляет собой уравнение Пуассона, а правая — выражает вероятность скопления заряженных частиц с зарядом q_0 на потенциальном уровне φ ; φ_0 — потенциал стенки.

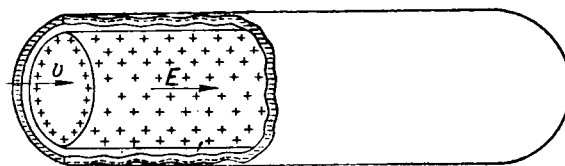


Рис. 10. Идеализированная картина перемещения жидкости под действием электрического напряжения.

или на единицу поверхности оболочки

$$F_0 = \eta \frac{v}{d}, \quad (5)$$

где η — коэффициент вязкости.

В этом выражении принято, что

$$\frac{dv}{dr} \approx \frac{v}{d}. \quad (6)$$

Приравнявая (3) и (5) для установившегося движения жидкости и выражая σ через ζ потенциал по (2), получаем:

$$\epsilon \epsilon_0 \cdot \frac{v}{d} = \sigma E \quad (7)$$

и т.и

$$v = E \frac{\sigma d}{\eta} = E \frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta}{\eta}. \quad (8)$$

Полный расход жидкости через сечение капилляра (полагая $r \gg d$)

$$V = v \pi r^2 = E \frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta \pi r^2}{\eta}. \quad (9)$$

Полученное выражение может рассматриваться как весьма приближенное. В дополнение к ранее отмеченным упрощающим допущениям следует отметить следующие: рассматриваемая оболочка при ее движении внутри капилляра должна рассматриваться скорее как полупроницаемая решетка, чем как сплошная непроницаемая трубка; во-вторых, следует подчеркнуть, что вывод предполагает очень большую длину капиллярной трубки (по сравнению с ее радиусом), и, наконец, что замена диффузного распределения заряда его распределением в ограниченном слое сколько-нибудь допустима, повидимому, только для трубок вполне определенного диаметра (как для очень малых, так и для очень больших трубок такая замена совершенно не приемлема).

Однако указанные оговорки отражаются главным образом на значении коэффициента пропорциональности между V и E и на его зависимости от радиуса, тогда как в рассматриваемой сейчас задаче нас прежде всего интересует существование пропорциональности между V и E . Как в случае капилляров разного сечения, так и в случае пористой среды должна сохраняться пропорциональность между средней скоростью движения жидкости под действием электрического поля v , и приложенным полем

$$v = k E = -k \cdot \text{grad } \varphi. \quad (10)$$

Очевидно и то, что коэффициент k_1 будет тем больше, чем больше поверхностный заряд σ или, другими словами, чем больше дзета-потенциал и диэлектрическая проницаемость жидкости. Заметим, что вследствие искривления каналов в пористой среде, конечно, увеличивается длина пути, приходящаяся на элементарное перемещение в направлении E , что в свою очередь приводит к уменьшению коэффициента k_1 . Однако при беспорядочном расположении всех каналов направление средней скорости v совпадает со средним направлением напряженности поля.

Кроме электроосмотических сил, движение жидкости в пористой среде может происходить под действием чисто гидромеханических сил. При малых скоростях (когда не сказываются явления турбулентности) закон фильтрации в пористых телах выражается уравнением

$$v_m = -k \operatorname{grad} h, \quad (11)$$

где v_m — скорость;

k — коэффициент фильтрации;

h — так называемое пьезометрическое давление или напор.

Величина h обычно выражается в сантиметрах водяного столба (отсчитываемых от любого уровня, принятого за нулевой) и соответствует подъему жидкости в пьезометрической трубке.

При наличии электроосмотической фильтрации обычно одновременно действуют и гидромеханические силы, при этом по принципу независимого действия результирующая скорость жидкости выражается уравнением

$$v = v_m + v_e = -k \operatorname{grad} h - k_1 \operatorname{grad} \varphi. \quad (12)$$

Объединяя операцию пространственного дифференцирования и вводя новый коэффициент, характеризующий электроосмотические и фильтрационные свойства среды,

$$k_2 = \frac{k_1}{k}, \quad (13)$$

можем записать уравнение (12) в такой форме:

$$v = -k \operatorname{grad} (h + k_2 \varphi). \quad (14)$$

Как при наличии, так и при отсутствии электроосмотических воздействий это уравнение является основным для расчета процессов фильтрации.

Так как в области движения воды

$$\operatorname{div} v = 0 \quad (15)$$

(уравнение сплошности, соответствующее условиям несжимаемости жидкости), то из последних двух выражений приходим к уравнению Лапласа

$$\nabla^2 (h + k_2 \varphi) = 0. \quad (16)$$

Как известно, для интегрирования этого уравнения необходимо знать граничные условия. Для пьезометрического давления граничные условия определяются обычно тем, что на поверхности соприкосновения жидкости с атмосферой („на зеркале“)

$$h = y, \quad (17)$$

где y — просто высота данной точки над уровнем, от которого отсчитывается подъем воды в пьезометрической трубке. Граничные условия для φ совпадают с обычными условиями для электрического поля.

Из всего сказанного очевидно, что для определения электроосмотического воздействия процессы фильтрации важно знать коэффициенты k и k_2 (см. приложение I).

Применение метода электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) к расчету процессов фильтрации при наличии электроосмотического воздействия. При изучении гидродинамических полей в грунтах широко пользуются методом электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), предложенным акад. Н. Н. Павловским [Л. 12]. Этот метод позволяет на электролитической модели гидротехнического сооружения определить гидродинамическое поле, грани движения грунтовых вод и расход воды через различные части сооружения.

В основе метода ЭГДА лежит подобие уравнений движения грунтовых вод

$$v = -k \operatorname{grad} h \quad (18)$$

и электрического тока в проводящей среде и дели

$$\Delta = -\Gamma \operatorname{grad} \Phi. \quad (19)$$

В уравнениях (11) и (18) большими буквами обозначены все величины, относящиеся к модели, а малыми — к реальной задаче.

Здесь v — скорость просачивания (фильтрации) воды;

$h = y + \frac{p}{\rho g}$ — измеряемый (пьезометрический) напор;

y — высота над уровнем, принимаемым за начало отсчета;

p — давление, обычно давление грунтовых вод;

g — ускорение силы тяжести;

ρ — плотность воды;

k — коэффициент просачивания (фильтрации);

Δ — плотность электрического тока;

Γ — электропроводность;

Φ — электрический потенциал.

Задавая соответствующие граничные условия в электролитической модели, легко получить картину электрического поля, соответствующую

гидродинамическому полю в реальном сооружении. Если потенциалы электролитической модели пропорциональны пьезометрическим напорам гидротехнического сооружения, а поверхности, соответствующие границам движения грунтовых вод, выполнены из изолирующих пластин, то жидкие электроды модели оказываются пропорциональными расходам воды, а плотности токов в различных точках пропорциональны скоростям фильтрации грунтовых вод.

Наиболее сложным является задание границы движения грунтовых вод в установившемся режиме — так называемой депрессионной поверхности. Эта поверхность имеет прямое сообщение с окружающей атмосферой и на ней, как и свободной поверхности воды, добавочное явление отсутствует ($p=0$), а следовательно, пьезометрическое давление $h=y$. Определение депрессионной поверхности или, в случае плоского поля, депрессионной кривой производится в электролитической модели из условия $h=y$ и $\Phi = Ku$ путем ряда последовательных приближений. Как показано выше в уравнениях (12) — (14), в случае электроосмотического воздействия, скорость фильтрации

$$v = -k \text{grad } h - k_1 \text{grad } \varphi = -k \text{grad } (h + k_2 \varphi). \quad (14, a)$$

Применение метода ЭГДА возможно и в этом случае [Л. 14, 15], однако условия моделирования изменяются, так как изменяется выбор аналогичных граничных условий. Обозначая по-прежнему величины, относящиеся к модели, большими буквами, запишем уравнения, относящиеся к модели и к действительному процессу:

$$\Delta = -I \text{grad } \Phi, \quad v = -k \text{grad } (h + k_2 \varphi); \quad (19)$$

здесь

$$k_2 = \frac{k_1}{k}.$$

Ограничиваясь плоской задачей

$$h = h(x, y) \text{ и } \varphi = \varphi(x, y) \quad v_z = 0, \quad (20)$$

рассмотрим выбор граничных условий для достаточно общего случая (рис. 11) просачивания воды из прудка на вершине симметричной наклонной при наличии стока воды с нижних ее краев, где депрессионная кривая выходит на поверхность, а также через дренажные трубы [Л. 13]. Дренажные трубы служат одновременно отрицательным электродом; их потенциал $|\varphi_1| = -\varphi_1$. Положительные электроды имеют потенциал

$$\varphi_2 = U + \varphi_1, \quad (21)$$

здесь U — напряжение источника, соединенного электродом. Положительные электроды выполнены в виде сплошных труб и поэтому не могут служить для стока воды.

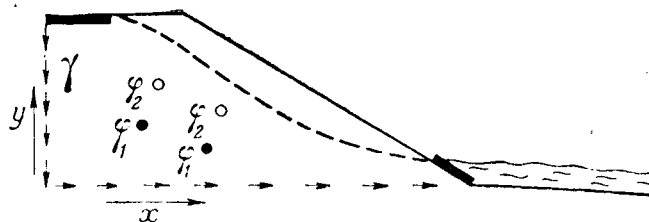


Рис. 11. Гидромеханическая система.

- — водосливные электроды, имеющие потенциал $\varphi_1 = -\varphi_1$;
- — непроницаемые электроды имеющие потенциал $\varphi_2 = U + \varphi_1$;
- — линии скорости v ;
- — депрессионная кривая;
- — — — — прудок-отстойник.

Пусть распределение потенциала в земле под действием приложенного к электродам напряжения U выражается функцией

$$\varphi = \varphi(x, y), \quad (22)$$

вид которой может быть найден или расчетным путем или путем измерений на электролитической модели.

В выражении потенциала естественно принять равным нулю потенциал земли в удаленных точках (φ_∞), где уже не сказывается возмущающее действие электродов. При этом разумеется, что можно принять значение φ_∞ равным любой постоянной величине, которая прибавится в качестве аддитивной постоянной ко всем значениям потенциала, найденным при $\varphi_\infty = 0$.

В силу того, что ток, выходящий из положительных электродов, и ток, входящий в отрицательные электроды, равны току питающего источника, система электродов из удаленных точек может рассматриваться как плоский диполь. Поле плоского диполя, как известно, быстро убывает: создаваемый им потенциал обратно пропорционален расстоянию до плоского диполя. При этом потенциал дренажных отрицательных электродов окажется зависящим от расположения и формы всех электродов. Этот потенциал в силу линейности среды (независимость γ от E) всегда прямо пропорционален приложенному напряжению U

$$\varphi_1 = mU. \quad (23)$$

После найденного распределения потенциалов легко перейти к определению граничных условий для получения соответствующего поля в плоской электролитической ванне (или в проводящей пластине).

Граничные условия в модели (рис. 12). 1. На открытом прудке давление грунтовых вод (p) равно нулю, поэтому потенциал электрода, соответствующего прудку,

$$\Phi_n = K(y_n + k_1 \varphi_n); \quad (24)$$

здесь K — постоянный коэффициент пропорциональности для ЭГДА;

y_n — высота прудка,

φ_n — потенциал прудка, определяемый по (21) и в большинстве реальных случаев — постоянный.

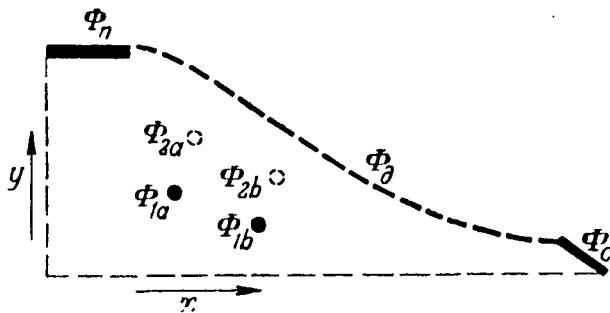


Рис. 12. Поле в электролитической ванне, соответствующее рис. 11.

--- изолирующие стенки ванны, залитой электролитом с проводимостью Γ ;
 — электроды с принужденно заданными потенциалами.

Если бы φ_n в разных точках прудка оказался различным, то и в электрической модели следовало бы изменять от точки к точке потенциал электрода.

2. Депрессионная кривая является линией тока, поэтому она должна быть представлена непроводящей перегородкой. На депрессионной кривой $p=0$, поэтому ее форма должна быть подобрана так, чтобы потенциал на ней

$$\Phi_\delta = K(y_\delta + k_2 \varphi_\delta), \quad (25)$$

где y_δ и φ_δ — переменные высота и потенциал разных точек депрессионной кривой.

3. Потенциал на линии стока принужденно задается равным:

$$\Phi_c = K(y_c + k_2 \varphi_c), \quad (26)$$

где y_c и φ_c — переменные высота и потенциал разных точек на линии стока.

4. Потенциал дренажных труб, являющихся отрицательными электродами (для них $p=0$), задается принужденно:

$$\Phi_1 = K(y_1 + k_2 \varphi_1) = K(y_1 + k_2 mU). \quad (27)$$

Для разных электродов y_1 может иметь разные значения, тогда как φ_1 остается постоянным.

5. Непроницаемые электроды должны оставаться изолированными от источника тока, поскольку ток аналогичен потоку воды, исходящему из электрода, а электроды по условию непроницаемы. Тот потенциал, который эти электроды примут

$$\Phi_2 = K\left(y_2 + \frac{p_2}{\gamma p} + k_2 \varphi_2\right), \quad (28)$$

может быть легко измерен. При известных Φ_2 , φ_2 , и y_2 может быть определено давление грунтовых вод вблизи электрода (которое, конечно, может изменяться электроосмотическими силами)

$$p_2 = \gamma p \left(\frac{1}{K} \Phi_2 - y_2 - k_2 \varphi_2 \right). \quad (29)$$

При этом разумеется, что водосливными или непроницаемыми могут быть как положительные, так и отрицательные электроды.

На основании изложенного могут быть на ны граничные условия для ЭГДА и в др гидротехнических задачах (приложение II). I в водосливных трубах искусственно понижа давление (хотя бы посредством откачивания них и воды и воздуха), в граничные условия водосливного электрода должно вводиться с цательное p (давление меньше атмосферн вместо слагаемого, соответствующего давлк грунтовых вод.

Обращает на себя внимание то обстояте во, что в электролитической ванне положите ным непроницаемым электродам не задается н нужденный потенциал посредством соедине с источником. Следовательно, их наличие, к лось бы, не влияет на получающуюся карт гидродинамического поля (при малых разм электродов они вообще могут не вводиться в з ну). Это, конечно, совсем не так: влияние фом и расположения положительных непроницаем электродов выражается в значении тех потенц лов, которые задаются другим электродам в значении потенциалов, которые должны б выбраны при проведении граничной линии (депрессионной кривой).

Поясним сказанное двумя простыми при рами.

Пример. 1. Представим себе, что система электро составлена из параллельных труб, оси которых расш жены на двух concentрических окружностях (рис где слева показано расположение труб, а справа карт поля в одном секторе).

Пусть наружный ряд труб обладает потенциа φ_b , а внутренний φ_a . В таком случае во внутренней ласти (вблизи оси окружностей) потенциал будет р φ_a , а во внешней области (при радиусе, значите большем радиуса внешней окружности) потенциал р (или очень близок) потенциалу φ_b и по условию при мается равным нулю.

Если внешние электроды положительные, то при делировании поля в электролитической ванне по ко устанавливаются круговые электроды с потенциалом

$$\Phi_1 = K(y_1 - k_2 U).$$

Если же внешние электроды отрицательны, то моделировании электродам, расположенным почти такому же кольцу, следует придать потенциал

$$\Phi_1 = K(y_1 - k_2 0).$$

Из приведенных результатов очевидно, что более ин сивная влаготдача, а следовательно, и более нм выход депрессионной кривой, соответствует тому чаю, когда в качестве непроницаемых положительных электродов выполнены электроды наружного кольца.

Пример. 2. Пусть при расположении вблизи дец сионной кривой парал лельного ей ряда поло жительных непроницае мых электродов и при отрицательном электро-

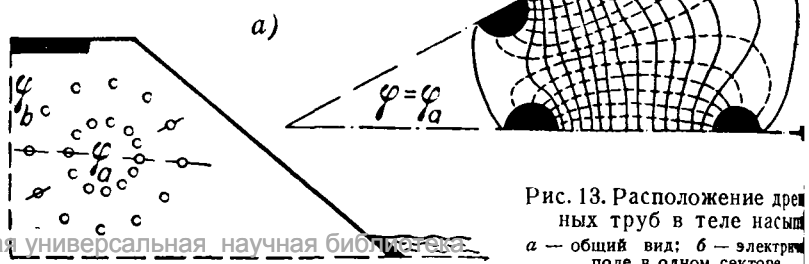


Рис. 13. Расположение дренажных труб в теле насыпи
 а — общий вид; б — электростатическое поле в одном секторе.

в соединенном с прудком, потенциалы электродов относительно бесконечно удаленной точки соответственно равны

$$\varphi_n = -\frac{U}{2}, \quad \varphi_2 = +\frac{U}{2}. \quad (32)$$

В этом случае, как это видно из применения указанных выше граничных условий для моделирования, депрессионная кривая должна понизиться. Действительно, в рассматриваемом примере

$$\Phi_n = K \left(y_n - k_2 \frac{U}{2} \right), \quad (33)$$

$$\Phi_0 = K (y_0 + k_2 \varphi_0),$$

при φ_0 , близком к $\frac{U}{2}$,

$$\Phi_c = K (y_c + k_2 \varphi_c).$$

Правда, при этом φ_c также оказывается положительным.

Выводы. 1. На основании проведенных исследований можно с уверенностью утверждать, что в целом ряде случаев электроосмотическое водопонижение и электродренирование могут найти широкое применение в практике гидростроительства.

2. Электроосмотическое воздействие на процесс фильтрации следует сочетать с применением дренажа или иглофильтрового водопонижения, в которых электроосмотическое воздействие сможет существенно изменять условия фильтрации воды.

3. Наибольший эффект от применения электроосмоса следует ожидать в илистых и суглинистых грунтах, а также в глинах. Для чистых песчаных грунтов, обладающих высокими коэффициентами фильтрации, электроосмотическое ускорение фильтрации, повидимому, ничтожно.

4. Физико-химическое состояние грунта (плотность, коллоидная структура, химический состав воды и др.) оказывает значительное влияние на его электроосмотические свойства. Так, например, простое высушивание естественного пльвуна последующим увлажнением существенно изменяет его электроосмотические свойства.

5. Разработаны практически удобные методы измерения электроосмотического коэффициента — для различных грунтов. В зависимости от фильтрационных свойств грунтов меняется тип рекомендуемых измерительных устройств (приложение I).

6. Разработан метод расчета и моделирования фильтрационных процессов при электроосмотическом воздействии.

Для проведения расчета (разновидность ЭГДА) необходимо знать кроме геометрических размеров сооружения три основных параметра грунта: электропроводность γ , коэффициент фильтрации k и коэффициент электроосмоса k_1 или k_2 .

Разработанный метод позволяет произвести технический расчет производственных электродренажных установок (приложение II).

Приложение I. Расчеты фильтрации при наличии электроосмоса в условиях лабораторных опытов. Рассмотрим применение уравнений (14) — (17) к условиям простейших лабораторных

установок и покажем, как на их основании могут быть объяснены результаты наблюдений.

В случае установки, изображенной на рис. 5, $v = 0$ и значит из уравнения (14) следует, что

$$\text{grad } h = -k_2 \text{ grad } \varphi. \quad (I, 1)$$

Если подъем воды в пьезометрической трубке, изображенной справа, равен H , длина участка трубки, заполненного пористой средой (испытываемым грунтом), равна l , а разность потенциалов между границами пористой среды $\varphi_1 - \varphi_2 = U$, то из уравнения (I, 1) следует

$$\frac{H}{l} = k_2 \frac{U}{l}, \text{ или } k_2 = \frac{U}{H}. \quad (I, 2)$$

Заметим, что при этом разность потенциалов между электродами может заметно отличаться от U за счет падения потенциала между электродами и поверхностями испытываемого грунта. Следует учесть, что для расчета процессов фильтрации в той или иной среде необходимо знать также коэффициент фильтрации k : он может быть легко определен на том же приборе рис. 5 хотя бы по наблюдению скорости опускания уровня в пьезометрической трубке после отключения источника э. д. с. Из того же уравнения (14) или (11) очевидно, что

$$-\frac{dH}{dt} = v \frac{S_m}{S_n} = k \frac{l}{l} \frac{S_m}{S_n} \quad (I, 3)$$

или

$$H = H_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ где } \frac{t}{\tau} = k \frac{S_m}{S_n} \frac{t}{l}, \quad (I, 4)$$

а S_m и S_n — соответственно сечения трубки с грунтом и пьезометрической трубки, t — время.

Точно так же легко расшифровать результаты опытов с прибором, изображенным на рис. 6. Поддерживая постоянную разность уровней резервуара и стока (H), зная сечение грунта (S) и его толщину (l), по измеренной скорости вытекания воды (расходу $V_0 = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, где ΔQ — изменение объема воды в мензурке), находим из уравнения (11) коэффициент фильтрации

$$k = \frac{V_0}{S} \cdot \frac{l}{H}$$

$$\left(\text{так как } v = \frac{V_0}{S}, \text{ а } \left| \text{grad } h \right| = \frac{H}{l} \right).$$

После подключения электродов к источнику скорость вытекания изменяется: она увеличивается до V_1 при совпадении направлений E и v и уменьшается до V_2 при встречном включении. Зная напряжение между электродами U , по уравнению (12) находим:

$$k_1 = \frac{(V_1 - V_0) - (V_2 - V_0)}{2S \frac{U}{l}}. \quad (I, 5)$$

Установка, подобная изображенной на рис. 6, была применена для определения коэффициентов k , k_1 и $k_2 = k_1$ волюжского песка с различными примесями глины (от 0 до 10%) при фильтрации дистиллированной воды. Результаты измерения представлены на рис. I, 1 (стр. 12).

Как видно из кривых, электроосмотическое воздействие на фильтрацию воды через песок оказывается чрезвычайно слабым, во всяком случае — при фильтрации чистой воды. Весьма вероятно, что органические примеси значительно увеличивают значения коэффициентов k_2 и k_1 .

В случае суглинков и глин (и, вероятно, в случае илистых грунтов) электроосмотическое воздействие значительно сильнее.

Рассмотрим еще две группы опытов, из числа проведенных в лаборатории Вибротехноэлектротехники МЭИ.

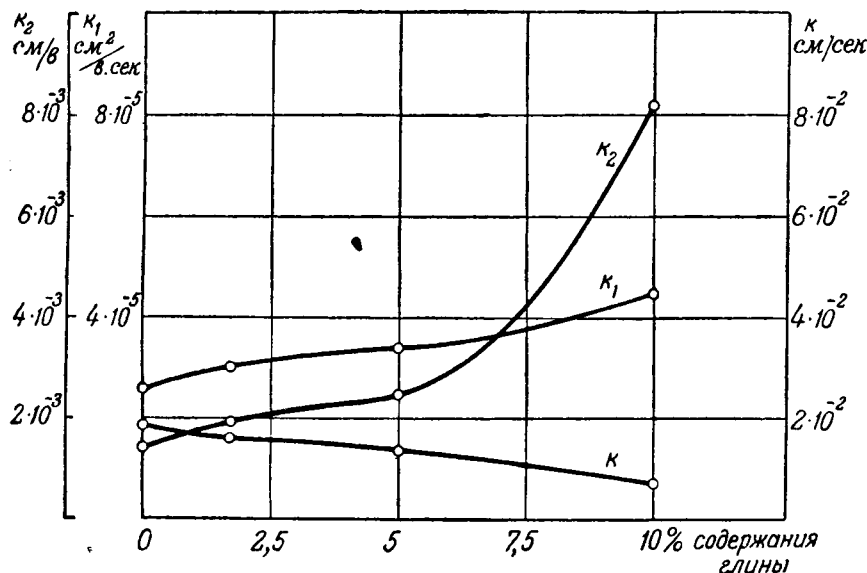


Рис. 1.1. График зависимости коэффициентов k , k_1 и k_2 от процентного содержания глины.

Первая из них служит для разъяснения вопроса о возможности характеризовать процессы электроосмотической фильтрации отношением количества воды Q , вытекшей в единицу времени (под действием электроосмоса) к току, протекавшему между электродами

$$n_1 = \frac{Q}{it}, \quad (1,6)$$

или к напряжению, приложенному между электродами

$$n_2 = \frac{Q}{Ut}. \quad (1,7)$$

Хотя обе величины (n_1 и n_2) не являются сколько-нибудь достаточными для характеристики электроосмотических свойств грунта или эффективности электроосмотической установки, однако часто именно подобные показатели приводятся в качестве результатов опыта. В самом деле, не зная расположения электродов, а также источников и стоков жидкости и, наконец, коэффициента фильтрации грунта, на основании показателей n_1 или n_2 нельзя определить необходимых для расчета процессов фильтрации двух коэффициентов из числа k , k_1 и k_2 . Нам приходится встречаться и с постановкой такого вопроса: какая из двух величин n_1 или n_2 является характерной для электроосмотических процессов, т. е. зависит ли количество переносимой влаги от тока или от напряжения.

На рис. 1, 2 изображена прямоугольная ванна с непроводящими стенками. Пространство между рядом параллельных электродов, проникаемых для воды, заполнено грунтом (в наших опытах суглинком). С внешней стороны электроды граничат с водой, имеющей одинаковые уровни свободных поверхностей. При отсутствии электрического поля система находится в состоянии гидростатического равновесия. Если соединить электроды с источником и установить между ними напряжение U (крайние электроды положительные, средний отрицателен), то под действием электрического поля вода приходит в движение и начинает стекать в мензурку. При этом величина $n_2 = \frac{Q}{Ut}$ остается постоянной и не зависит от расстояния l между парой разноименных параллельных электродов, присоединенных к источнику с напряжением U . Напротив, другой „показатель“ $n_1 = \frac{Q}{it}$ в условиях рассматриваемого опыта изменяется. Полученная из опытов зависимость значений показателей n_1 и n_2 от расстояния между электродами показана на рис. 1, 3. Постоянство показателя n_2 в рассматриваемых условиях опыта полностью соответствует требованиям, следующим из уравнения (14).

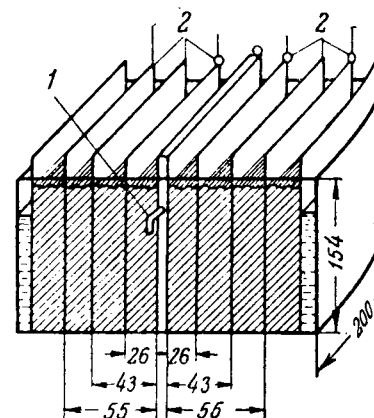


Рис. 1,2. Ванна, применяющаяся для проверки двух показателей скорости фильтрации.

1 — сток, соединенный с катодом; 2 — пластины, поочередно служившие анодом.

Действительно, обозначим через l_0 полную длину пути жидкости в грунте, а через l расстояние между электродами, находящимися под напряжением U . В том случае из постоянства скорости v на всей длине l_0 следует, что

$$\text{grad } h_1 = \text{grad } (h_2 + k_2 \varphi) = \text{grad } h_2 + k_2 \text{grad } \varphi. \quad (1,8)$$

В этом равенстве $\text{grad } h_1$ и $\text{grad } h_2$ — соответствующие градиенты пьезометрического напора в области, где отсутствует электрическое поле, и в области, где наряду с градиентом пьезометрического напора действуют электроосмотические силы. Кроме того, из данных условий опыта известно, что полный перепад пьезометрического напора равен нулю, т. е.

$$(l_0 - l) \text{grad } h_1 + l \text{grad } h_2 = 0, \quad (1,9)$$

а

$$l |\text{grad } \varphi| = U. \quad (1,10)$$

Из равенств (1,8) — (1,10) находим, что

$$\text{grad } h_1 = \frac{l}{l_0} k_2 \text{grad } \varphi$$

или

$$|\text{grad } h_1| = \frac{l}{l_0} k_2 \frac{U}{l} = \frac{k_2}{l_0} \cdot U. \quad (1,11)$$

т. е., что градиент пьезометрического напора в области, где отсутствует поле, не зависит от расстояния между электродами, а зависит только от напряжения U , полной длины l_0 и от коэффициента k_2 . Но по равенству (1,11) той же величине равен и градиент суммы $h_2 + k_2 \varphi$. Таким образом, в условиях описываемого опыта

$$\frac{Q}{t} = V = v \cdot S = k \frac{k_2}{l_0} U, \quad (1,12)$$

Из проведенного здесь анализа легко указать условия опыта, при которых неизменным должен оставаться цгой „показатель“. Действительно, равенство

$$n_1 = \frac{Q}{it} = \text{const.} \quad (1,13)$$

должно выполняться, если весь грунт, через который фильтруется вода, заполняет только межэлектродное пространство. Применительно к рис. 1, 2, это значит, что меняется расстояние l_0 , а напряжение приложено всегда к крайним электродам.

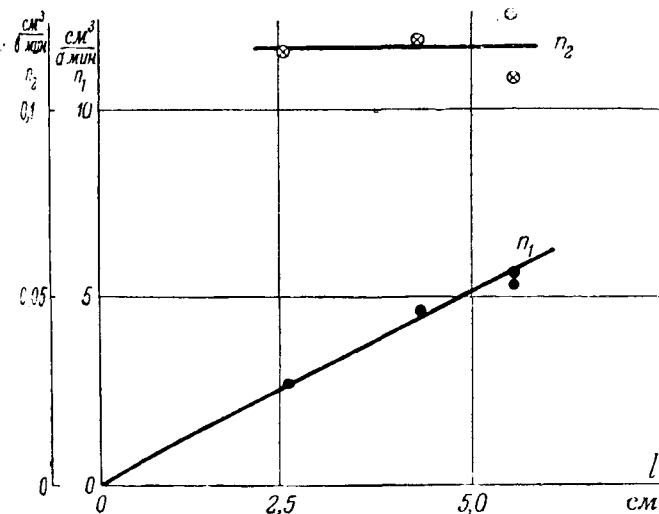


Рис. 1.3. Зависимости двух показателей электроосмотической фильтрации от расстояния между катодом и анодом при неизменном положении уровня воды в резервуаре. По горизонтальной оси отложено расстояние между электродами.

Изложенное с достаточной ясностью показывает, до какой степени лишен смысла вопрос о том, пропорционально току или напряжению количество протекающей жидкости, и до какой степени неполноценными являются показатели n_1 и n_2 при отсутствии подробных данных об условиях эксперимента.

В заключение рассмотрим последнюю группу опытов, производившихся, в отличие от описанных выше, во-первых, в условиях неоднородных полей, а во-вторых, при совпадении конфигурации поля электрического и поля пьезометрического напора (в опытах, рассматривавшихся выше, поверхности равного h совпадали с поверхностями равного φ).

Эти опыты производились с фильтрацией воды через суглинок, заложённый в прямоугольную ванну с непрозрачными стенками. Сток воды производился через решетчатую трубку, расположенную почти горизонтально и проходившую через середину ванны.

Наблюдения велись одновременно на двух ваннах, подобных одна другой. Одна из таких ванн (большая) показана на рис. 1.4. Все линейные размеры другой ванны (малой) были, уменьшены вдвое. Электрическое поле в суглинке создавалось электродами, одним из которых являлась сточная трубка (—), а другим (+) плоские электроды, расположенные вертикально по двум боковым стенкам, параллельным оси сточной трубки. Ставились опыты и при горизонтальном расположении положительного электрода на поверхности суглинка. Результаты этих опытов также подтвердили справедливость приведенных выше основных уравнений (12) — (14).

Соответствующая картина электрического поля схематически показана на рис. 1.5 (слева). Как видно из рисунка, нами не учитывалась возможность протекания тока через воду, налитую над поверхностью грунта (его верхняя граница принята за линию тока). Это допущение основано на том, что проводимость чистой воды значительно меньше проводимости грунта.

В условиях описываемого опыта приток воды с пьезометрическим давлением H мог происходить как через верхнюю границу суглинка и воды, так и через боковые границы суглинка с электродами, ввиду малого сопротивления фильтрации вдоль поверхностей электродов. Таким образом, поверхностью равного потенциала $\varphi = H$ оказывалась поверхность трех стенок, поверхностью нулевого потенциала $h = 0$ являлась сточная трубка. Соответствующая картина поля пьезометрического напора показана на рис. 1.5 (справа). Пьезометрическое поле имеет такой вид как при наличии, так и при отсутствии электроосмотического воздействия.

Очевидно, что гидродинамическая проводимость может быть найдена, как соответствующая электрическая

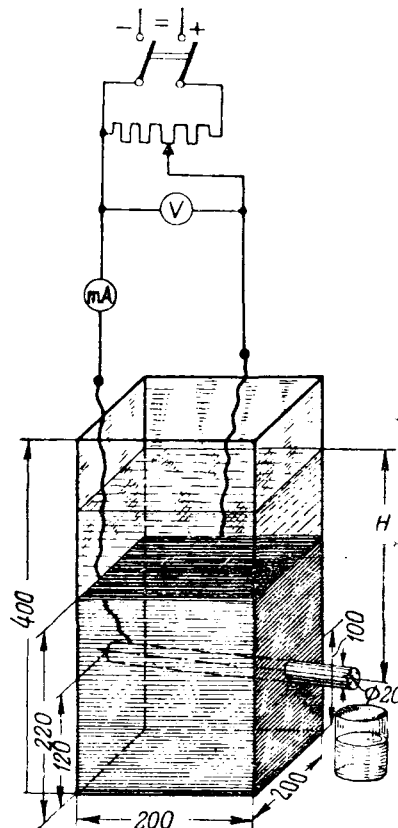


Рис. 1.4. Схема установки для испытания фильтрации при горизонтальном расположении дрена.

проводимость, деленная на γ (геометрическая проводимость g_0) и умноженная на k или

$$g_z = k g_0. \quad (1.14)$$

Аналогично электроосмотическая проводимость

$$g_{zo} = k_1 g_0. \quad (1.15)$$

Методы расчета или экспериментального определения геометрической проводимости хорошо известны. Так, для поля, показанного на рис. 1.5 слева [Л. 11],

$$g_{01} = \frac{2\pi l}{\ln \frac{a}{2\pi r} + \frac{\pi a}{2b}}, \quad (1.16)$$

а для поля, показанного на том же рисунке справа, аналогично

$$g_{02} = \frac{2\pi l}{\ln \left(\frac{2a}{\pi r} \operatorname{th} \frac{\pi b}{2a} \right)}; \quad (1.17)$$

здесь l — осевая длина ванны (равная длине сточной трубки),

r — радиус трубки;

a — ширина ванны;

b — высота ванны, заполненной грунтом.

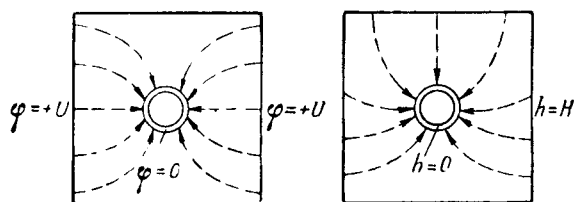


Рис. 1.5. Схематическое изображение электрического (слева) и пьезометрического (справа)

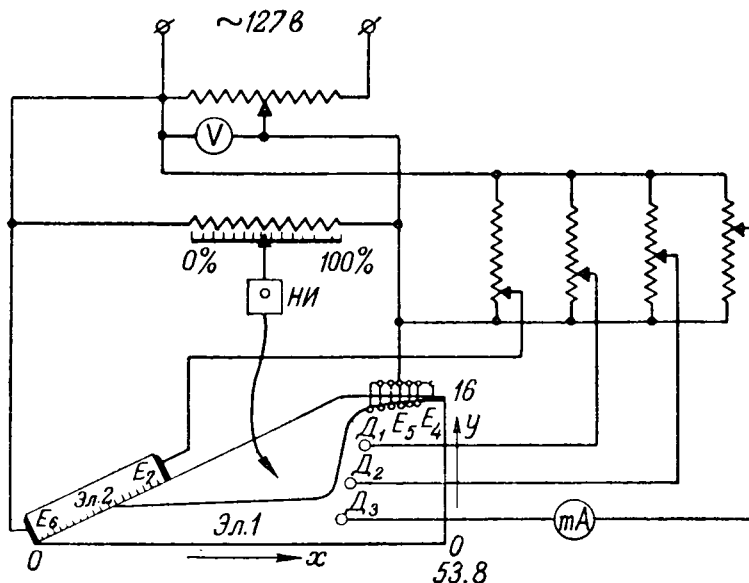


Рис. II,1. Схема модели плотины.

Теперь на основании уравнений (I,14) — (I,15), имея данные опытов, легко определить коэффициенты фильтрации

$$k = \frac{V_{max}}{H \cdot g_{02}} \quad (I,18)$$

и коэффициенты электроосмоса

$$k_1 = \frac{V_{so}}{U g_{01}} \quad \text{и} \quad k_2 = \frac{k_1}{k}; \quad (I,19)$$

здесь V_{so} — разность между полной скоростью вытекания воды (V) и скоростью вытекания воды в тех же условиях, но при отсутствии электрического поля (V_{max}).

Для суглинка получаем $k = 0,006$ см/час, $k_1 \approx 0,06$ см²/час. в и $k_2 = \frac{k_1}{k} = 10$ см/в.

Из приведенного здесь анализа опытов с достаточной уверенностью можно полагать уравнения (12) — (15) применимыми к реальным процессам фильтрации при наличии электроосмотического воздействия.

Приложение II. Пример моделирования электроосмотического воздействия. С целью определения картины установившихся гидродинамических полей в намывных плотинах и значения электроосмотического воздействия были проведены опыты³ в электро-

³ Опыты производились аспирантом МЭИ К. К. Табаксом.

литической ванне с электронно-лучевым нуль-дикатором.

В первом опыте было определено положение депрессионной кривой и расходы воды в разных дренах при отсутствии электрического поля. В качестве грунта условно был принят суглинок, обладающий коэффициентом филь-

ции $k = 0,005 \frac{\text{см}}{\text{час}}$. В качестве образца для

дели была принята насыпь высотой 32 м шириной основания 200 м, осушаемая с помощью шести дренах, расположенных в теле плоты. Пьезометрический напор в каждом дренах принимался равным его высоте.

Моделировалась одна из симметричных половин плотины в масштабе 1:200.

На рис. II,1 показана схема модели. Электроды D_1, D_2, D_3 и D_4 являлись моделями дренах и прудка на вершине насыпи. Электрод в дренах E_5 моделировал инфильтрацию в плоти. Для определения выхода депрессионной кривой на откос в нижней части откоса была расположена ванна с насыщенным раствором NaCl, соединенная с основной ванной металлической гребенкой. Необходимое распределение потенциала в этой ванне создавалось электродами E_7 , питаемыми от соответствующего пьезометра. Электролит в основной ванне имел удельное сопротивление $\rho_1 = 4980$ ом. см. Удельное сопротивление соляного раствора $\rho_2 = 4,46$ ом. см.

Потенциал в электролитической ванне измерялся в процентах по отношению к потенциалу прудка. Потенциал модели в точке, соответствующей нижней точке откоса принимался $\Phi_0 = 0$, а прудка $\Phi_n = 40$ в. Так как высота прудка $h_n = 32$ м, то коэффициент пересчета пьезомет-

ического напора в потенциал Φ (%) $\tau_1 = \frac{100\%}{32 \text{ м}} = 3,12 \frac{\%}{\text{м}}$

Депрессионная кривая была определена методом последовательных приближений. Стенка электролитической ванны, моделирующая депрессионную кривую, выполнялась из пластилина. В результате двух последовательных приближений (рис. II,2) получена депрессионная кривая с точностью порядка 2%, соответствующая граничным условиям. На рис. II,2 показаны значения Φ , измеренные в электролитической ванне и рассчитанные по формуле

$$\Phi (\%) = \frac{h}{16} \cdot 100\%.$$

Индексами 1 и 2 отмечены точки, относящиеся к первому и второму приближению.

Измерение токов в моделях при найденной депрессионной кривой (второе приближение) дало следующие значения:

$$I(D_1) = 0,4 \text{ ма},$$

$$I(D_2) = 0,4 \text{ ма},$$

$$I(D_3) = 3,2 \text{ ма}.$$

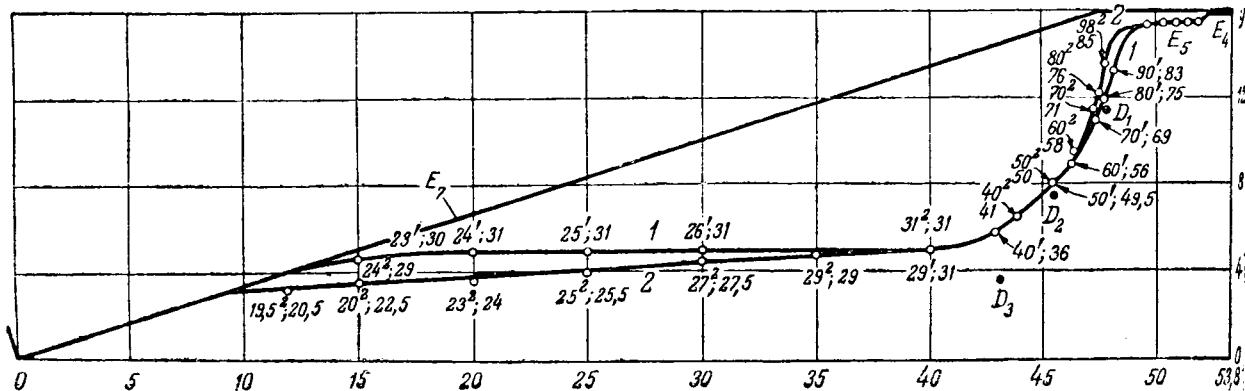


Рис. II,2. Распределение потенциалов по депрессионной кривой.

1 — первое приближение; 2 — второе приближение.

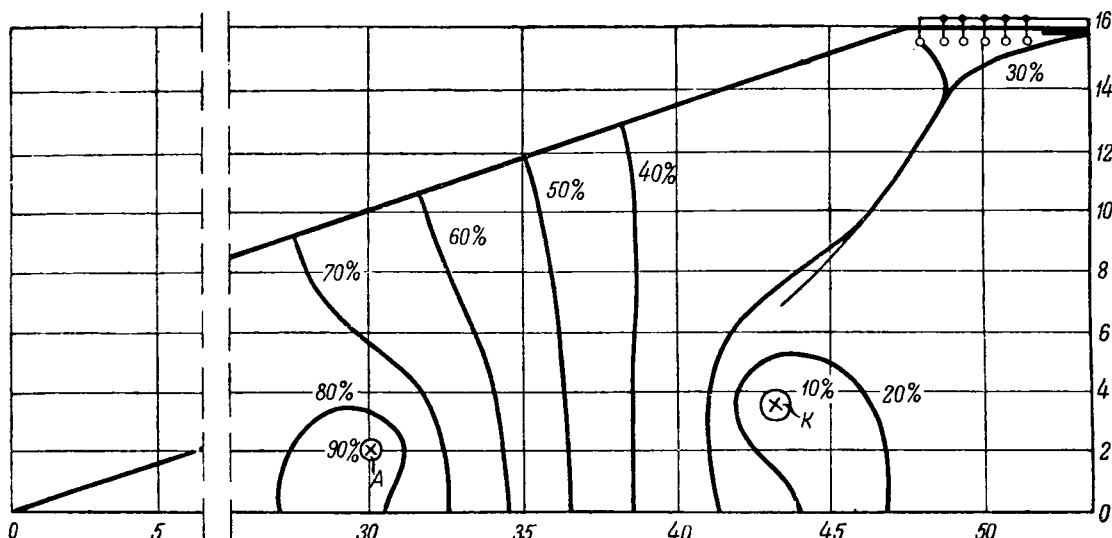


Рис. 11.3. Картина электрического поля между электродами в плотине.

Мощный ток модели прудка-отстойника $I(E_4) = 4,25$ ма. Таким образом, на откос выходит всего $\frac{0,25}{4,25} 100 \approx 6\%$

общего водяного потока прудка.

Для расчета производительности 1 пог. м дрена (i) можно воспользоваться формулой

$$i = I k p = \frac{(h_n + k_2 \varphi_n) \cdot 10^{-1}}{\Delta \Phi_n} \left[\frac{\text{л}}{\text{м.час}} \right], \quad (\text{II}, 1)$$

где h_n — высота прудка над основанием насыпи, см;

φ_n — напряжение, соответствующее высоте прудка, в;

Δ — толщина слоя электролита в ванне (1,55 см).

Подставляя значения, получаем:

$$i(D_1) = 0,05 \text{ л/м.час},$$

$$i(D_2) = 0,05 \text{ л/м.час},$$

$$i(D_3) = 0,425 \text{ л/м.час}.$$

Как видно из расчета, принятый коэффициент фильтрации суглинка приводит к весьма малой производительности дрена. Однако даже такая малая производительность в установившемся режиме заметно влияет на характер кривой. Для песка, коэффициент фильтрации которого на несколько порядков выше, соответственно выше и производительность дрена.

Рассмотрим теперь, как изменится гидродинамическое поле, если оставить только два нижних дрена, но между ними и специально установленными анодами приложить разность потенциалов в 200 в. Будем считать, что насыпь расположена на основании, представляющем большое сопротивление как для токов, так и для воды (например, глинистый грунт).

В первом приближении примем удельное сопротивление грунта в осушенной области, в которой удалена дренационная влага, равным удельному сопротивлению области, насыщенной водой. Тогда электрическое поле в грунте может быть найдено на соответствующей электролитической модели. Если полное напряжение между электродами — катодами и анодами — принять за 100%, то распределение линий равного потенциала, найденное с помощью электролитической ванны, можно изобразить действием кривых, показанных на рис. 11.3. Так как напряжение между дренами и прудком оказывается равным $U = 60$ в, то для коэффициента электроосмотической фильтрации $k_1 = 0,05 \frac{\text{см}}{\text{в.час}}$ или $k_2 = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{в}}$ значение функ-

ции Φ в процентах можно определить следующим обра-

зом, где a_2 — некоторый коэффициент пропорциональности. Полагая φ дрена равным нулю, принимаем для дрена

$$\Phi_D = a_2 h_D.$$

Для прудка $\varphi_n = 60$ в, а $h_n = 32$ м. Таким образом, $h_n + k_2 \varphi_n = 38$ м.

Принимаем $\Phi_n = 100\%$ и, следовательно, $a_2 = \frac{1}{0,38} = 2,64 \text{ \%}/\text{м}$. В таком случае значение функции $\Phi(\%)$ для любой точки поля можно выразить следующим образом:

$$\Phi(\%) = 2,64 (h + 0,1 \varphi). \quad (\text{II}, 3)$$

Если h и φ также выражены в процентах

$$h(\%) = \frac{100}{32} h \text{ и } \varphi(\%) = \frac{100}{200} \varphi, \text{ то для } \Phi(\%) \text{ получаем:}$$

$$\Phi(\%) = 0,84 h(\%) + 0,53 \varphi(\%). \quad (\text{II}, 4)$$

На депрессионной кривой $h = y$.

Определение депрессионной кривой производилось методом последовательных приближений на модели, схема которой изображена на рис. 11.4. В связи с тем, что настоящий опыт явился, повидимому, первым опытом моделирования гидродинамического поля при электроосмотическом воздействии, пришлось сделать четыре последовательных приближения. На рис. 11.5 в знаменателе дробей указано четыре последовательных значения $\Phi(\%)$ изме-

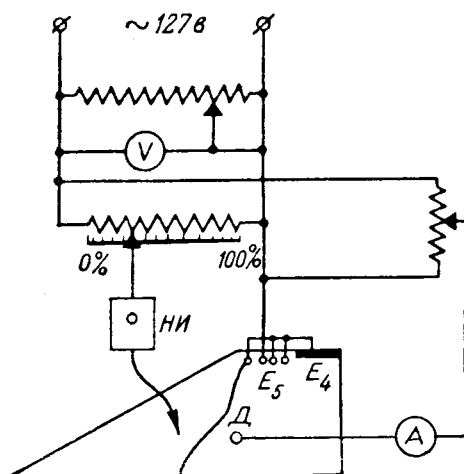
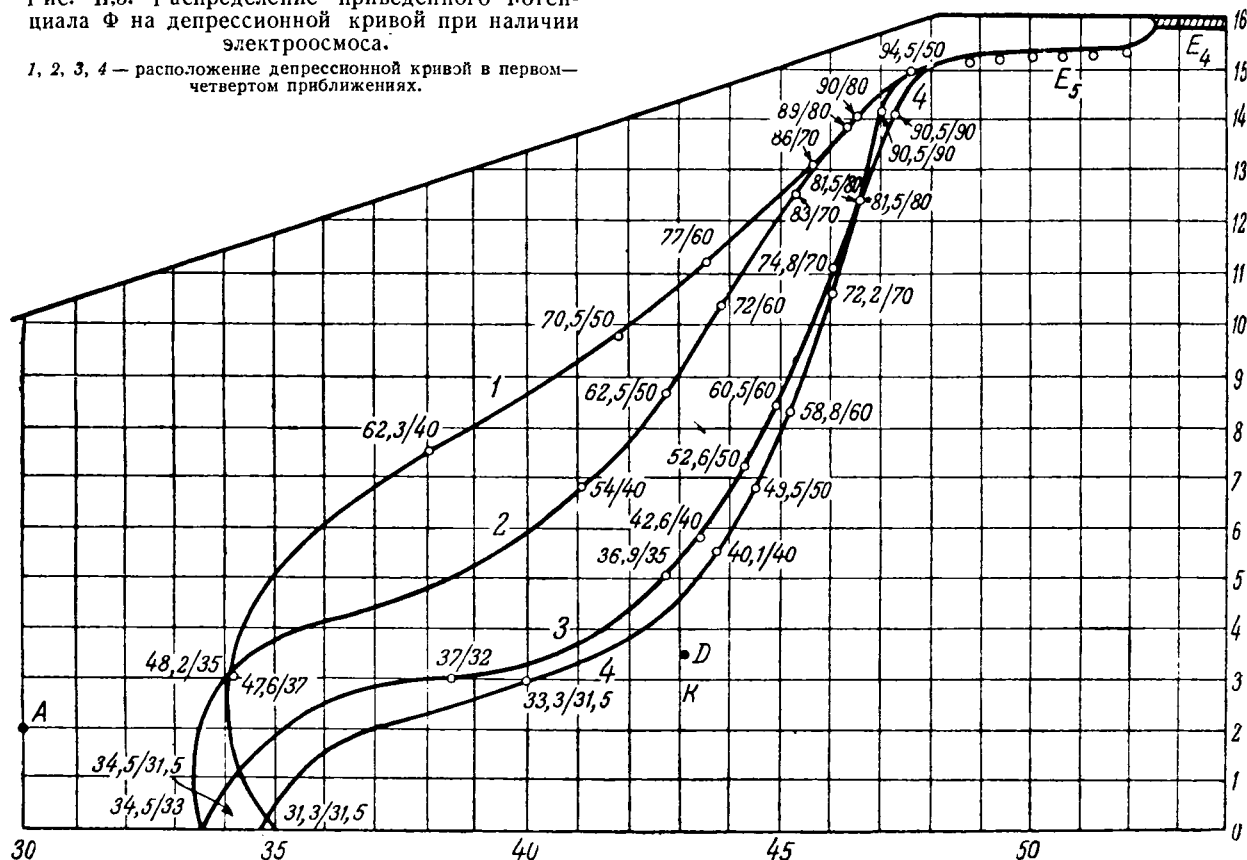


Рис. 11.4. Схема электрической модели для определения депрессионной кривой при наличии электроосмоса.

$$\Phi(\%) = a_2 (h + k_2 \varphi)$$

Рис. II.5. Распределение приведенного потенциала Φ на депрессионной кривой при наличии электроосмоса.

1, 2, 3, 4 — расположение депрессионной кривой в первом—четвертом приближениях.



репных в ванне, а в числителе приведены значения, подсчитанные по формуле (II.4).

Как видно из чертежа, последнее четвертое приближение дает наиболее близкий к расчетным значениям результат. В процессе последовательного приближения выявилось осушение области, примыкающей к откосу, и незначительный отход депрессионной кривой в верхней ее части от ядра сооружения. Для депрессионной кривой, полученной при четвертом приближении, было найдено значение тока модели дрена $I_D = 360$ ма при напряжении $\Phi = 40$ в и удельном сопротивлении электролита $\rho = 55$ ом/см. Пересчитывая по формуле (II.1) на производительность 1 пог. м дрена, получаем $i_D = 0,61 \frac{\text{л}}{\text{м.час}}$. Сравнение полученного расхода с результа-

том расчета для трех дренах при отсутствии электроосмотического воздействия показывает, что применение электроосмоса должно привести к значительному изменению положения депрессионной кривой (рис. II.2 и рис. II.5) при сравнительно небольшом изменении расхода воды через дрена.

Проведенные опыты показали, что при наличии электроосмотического воздействия на процесс фильтрации определение с помощью ЭГДА депрессионной кривой и производительности дрена не на много сложнее, чем при решении чисто фильтрационных задач.

Литература

1. Ф. Рейс. О новом проявлении гальванического электричества. Москва, Soc. Nat. Mem. II, 1809.
2. В. А. Тюрин. Исследования Рейса. Электричество, № 20, 1901.
3. Х. М. Шмидт. Искусственное водопонижение уровня грунтовых вод способом иглофильтров. Гидротехническое строительство, стр. 9, № 11, 1950.
4. Б. Лысин. Очистка глины при помощи электрического тока. Керамика и стекло, стр. 131, № 5, 1925.
5. W. Schaad und R. Haefeli. Электрокинетические явления и их применение в строительной технике. Schweizerische Bauzeitung, т. 65, № 16, 17, 18, 1947.

5. Б. П. Горбунов. Использование электроосмоса как средства обезвоживания намытых лессовидных грунтов. Диссертация. Академия наук Узбекской ССР. Ташкент, 1949.

6. Д. Т. Маклин и Д. В. Ральф. Дренаж грунтов электрическим методом. Civil Eng., т. 40, стр. № 464, 1945.

7. Б. А. Ржаницын. Электрохимическое закрепление грунтов. Гидрогеология и инженерная геология. Сборник статей № 5, 7—18. Госуд. изд. геологической литературы, 1940.

8. Г. Н. Роев. Намывные и полунамывные плотны. Гостройиздат, 1938.

9. Физический словарь, Электроосмос, Электрофор. т. 5. ГОНТИ, 1939.

10. Н. П. Петров. Гидродинамическая теория смазки. Под ред. Л. С. Лейбензона. Академия наук СССР, 1948.

11. А. В. Нетушил, К. Б. Исаев и С. К. Федоров. Применение системы формул Максвелла для расчета сопротивлений между электродами при электропрогреве бетона. Электричество, стр. 56, № 6, 1949.

12. Н. Н. Павловский. Теория движения грунтов под гидротехническими сооружениями. Изд. науч. мелиорационного института, Петроград, 1922.

13. Л. В. Кузьменко. Способ возведения намытых плотин. Авторское свидетельство № 73349 по заявке от 30 апреля 1947.

14. К. М. Поливанов и А. В. Нетушил. Способ электромоделирования гидродинамических полей. Авторское свидетельство по заявке № 436955—III от 11 ноября 1950 г.

15. Н. М. Бурдак, А. В. Нетушил и К. М. Поливанов. Электролитическая ванна для осуществления способа электромоделирования гидродинамических полей и депрессионной кривой в грунтах. Авторское свидетельство по заявке № 441932—III кл. 42 с. гр. 26/02 от 18 января 1951.

Синхронный генератор для динамического моделирования электрических систем

*Кандидат техн. наук, доц. В. А. ВЕНИКОВ
и кандидат техн. наук А. В. ИВАНОВ-СМОЛЕНСКИЙ*

Московский энергетический институт им. Молотова

Сооружение линий электропередачи на больших расстояниях и создание мощных энергетических систем требуют уточнения методов расчета, изучения работы нового оборудования и новых схем регулирования в рабочих условиях. Проведение экспериментов в реальных системах не только затруднительно, но зачастую невозможно.

Динамическая модель электрической системы, включающая агрегаты мощностью не более 10—15 кВА и построенная с соблюдением физического подобия, позволяет провести почти все интересные инженерные исследования.

При моделировании электрической системы наиболее сложной задачей является создание модели мощного генератора с его системой возбуждения. В динамической модели, сооруженной в МЭИ им. Молотова, эта задача решается двумя путями: 1) путем применения переделанных стандартных машин, используемых при пониженной мощности [Л. 1]; 2) путем применения специально проектированных машин-моделей [Л. 1, 3, 7]. В обоих случаях, как показал опыт, для обеспечения оптимальных соотношений генератор-модель и все машины системы возбуждения должны проектироваться как единое целое. Схема агрегата динамической модели МЭИ показана на рис. 1а и 1б.

В качестве синхронного генератора в модели должен применяться специально спроектированный генератор-модель, имеющий сменные роторы, позволяющие в широких пределах изменять индуктивные сопротивления машины. Идея, положенная в основу конструирования этого генератора, частично осуществлена в опытных генераторах первой очереди, построенных в МЭИ на базе серийных генераторов СГ-60. Эти генераторы использовались только на $1/5$ своей габаритной мощности и переделывались так, чтобы максимально приблизиться к описанной ниже оптимальной конструкции. Однако показатели их, как будет показано ниже, значительно хуже, чем у специального генератора.

Изложен опыт проектирования динамической модели МЭИ, которая в настоящее время применяется для исследований режимов электропередачи Куйбышев — Москва и Сталинград — Москва. Указаны практические пути изготовления на базе малых типовых машин генераторов-моделей и компенсаторов активного сопротивления.

Установившиеся и переходные режимы системы-модели могут быть физически подобны режимам мощной системы только при определенном соотношении между пара-

метрами сети и машины, входящими в критерии подобия [Л. 4]. Изменяя масштабы времени, тока и напряжения, можно подбирать параметры сети так, чтобы изображать одной и той же машиной-моделью различные генераторы.

Можно изменять параметры генератора-модели путем изменения (против номинальной) мощности агрегата. Однако, в связи с необходимостью сохранить достаточно высокий к. п. д. турбины и генератора и получить желательные характеристики турбины, диапазон такого рода изменений довольно ограничен. Затруднительно также сохранить неизменными (при изменении мощности генератора-модели) характеристики первичного двигателя при моделировании его двигателем постоянного тока.

Таким образом, построение специального синхронного генератора-модели, имеющего переменные параметры при неизменной мощности, представляется весьма желательным. Такой генератор позволит изучать влияние изменения параметров машины при неизменных параметрах сети.

Основным критерием, обеспечивающим подобие электрических процессов, является сохранение одинаковым отношения $\frac{x}{R}$ у обмоток рото-

ра и статора модели и оригинала. Осуществление этого требования равносильно созданию мало-мощного синхронного генератора со столь же малым относительным активным сопротивлением его обмоток, как и у мощного. Такая задача настолько затруднительна, что некоторые инженеры считали решение ее невозможным.

Однако выполненные авторами работы позволяют считать, что эта задача может быть решена путем отказа от геометрического подобия и изменения некоторых конструктивных мероприятий (выбор наименьшего допустимого по технологиче-

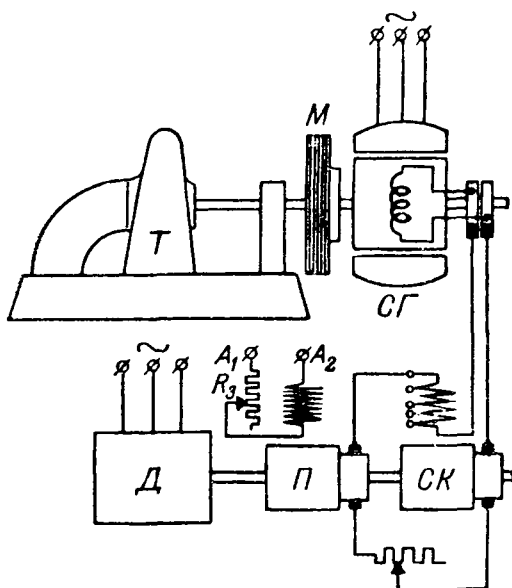


Рис. 1а. Схема агрегата модели МЭИ.
Т — турбина; М — маховик; СГ — синхронный генератор;
СК — серийный компенсатор; П — преобразователь на-
пряжения; Д — двигатель.

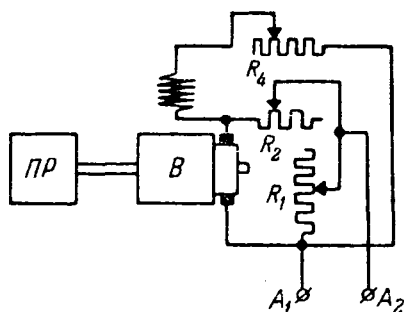


Рис. 1б. Схема соединения
возбуждителя.
В — возбуждатель; ПР — привод;

ским соображениям зазора, применение полузакрытого паза на статоре, снижение линейной нагрузки якоря и индукции в воздушном зазоре при значительном увеличении габаритов машины). Отказ от геометрического подобия деталей машины и ее магнитных полей вполне допустим, поскольку задачи, решаемые на динамической модели, относятся к области подобия цепей [Л. 4].

При создании машин-моделей на базе типовых машин эта задача может быть решена только частично.

Сконструированный в соответствии с указанными выше принципами генератор модели МЭИ мощностью 20 кВА, 1000 об/мин имеет три смежных ротора, которые позволяют получить $x_{ad} = 0,85; 0,55; 0,40$. Наименьшие воздушные зазоры при этом соответственно равны 2,0; 3,5; 4,9 мм. Паз статора генератора показан на рис. 2. Число пазов статора — 45, линейная нагрузка $A_s = 66$ а/см, расчетная индукция в воздушном зазоре $B_s = 3020$ гс; основные размеры: $D = 480$ мм и $l = 340$ мм.

Относительное активное сопротивление обмотки статора в проекте удалось получить не-

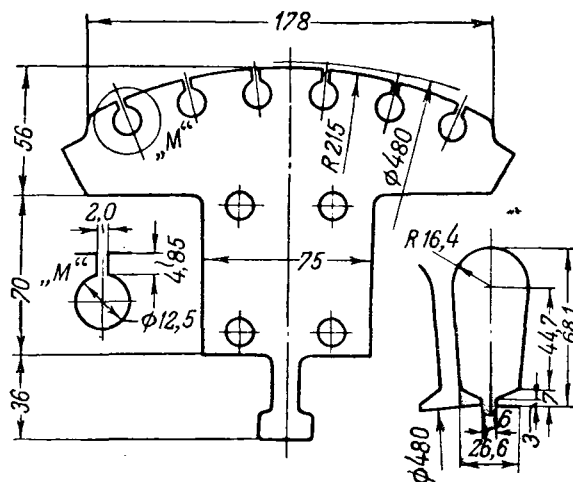


Рис. 2. Лист полюса и паз статора генератора-модели.

сколько меньшим, чем в мощных генераторах ($r_a = 0,003$). Снизить одновременно в той же мере активное сопротивление обмотки возбуждения не удалось. Препятствием этому послужило, как видно из кривых рис. 3, увеличение потерь и постоянной инерции М до величин больших, чем в мощных машинах.

В машине-модели, построенной на базе генератора СГ-60, активное сопротивление статора не удалось получить меньше чем 0,009. Постоянная времени обмотки возбуждения оказалась порядка 1,1 сек; реактивные сопротивления $x_d = 0,55$, $x_q = 0,35$, $x'_d = 0,07$.

Весьма малое переходное сопротивление получающееся в этой машине, равно как и в специально сконструированной машине-модели, легко увеличивается до требующихся значений включением последовательно с обмоткой возбуждения значительного реактивного сопротивления. При проектировании специальной машины модели, равно как и при переделках ее из типовой, большое значение имеет правильный выбор соотношений между размерами сердечника полюса ротора и сечением обмотки возбуждения а также шириной паза и зубца статора.

Проведенное исследование показало ошибочность существовавшего мнения о том, что при заданных основных размерах машины и значениях сопротивления x_{d0} , при постоянной инерции и нормальной характеристике холостого хода минимальное значение активных сопротивлений ротора и статора получается в случае максимального количества меди в обмотках. Это подтверждается кривыми рис. 4, иллюстрирующими влияние относительного расчетного воздушного зазора машины $\delta = \frac{\delta_{cp} k_d}{\tau}$ на величину относительного активного сопротивления обмотки статора r_a , постоянную времени обмотки возбуждения T_{d0} и на структуру активных частей статора и ротора, характеризуемую отношениями

$$\text{и } \frac{b_z}{l_z}.$$

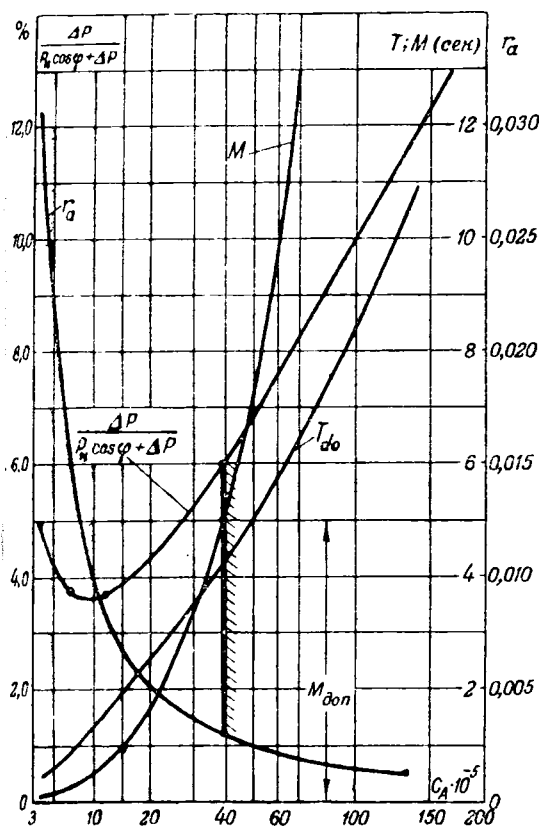


Рис. 3. Зависимость параметров генератора-модели от его основных размеров.

Кривые рис. 4 соответствуют машине-модели, имеющей следующие данные: $P=20$ ква, $n=1000$ об/мин; $U=230$ в; $q=2,5$; $x_{ad}=0,85$; $D=480$ мм; $l=340$ мм; $M=5$ сек. Размеры зубца статора и сердечника полюса выбраны таким образом, что при любом зазоре сохраняется нормальная характеристика холостого хода, отвечающая всем типам существующих машин [Л. 5], и сохраняется соответствующее распределение падения магнитного напряжения между участками магнитной цепи.

Рис. 4 показывает, что минимум r_a и максимум T_{do} отвечают некоторым значениям зазора. При излишне большом количестве меди на статоре и роторе (при малых отношениях $\frac{b_m}{b_p}$ и $\frac{b_z}{t_z}$ и больших воздушных зазорах) получаются значительно менее благоприятные значения r_a и T_{do} .

Реализовать полностью оптимальные значения постоянной времени T_{do} и активного сопротивления все же не удастся, так как при этих значениях воздушный зазор получился бы меньше допустимого по технологическим соображениям ($\delta=1,5 \dots 2$ мм).

Интересно отметить, что при заданной постоянной времени (например, $M_{don}=5$ сек) большее значение машинной постоянной C_A получается у машины с большей величиной

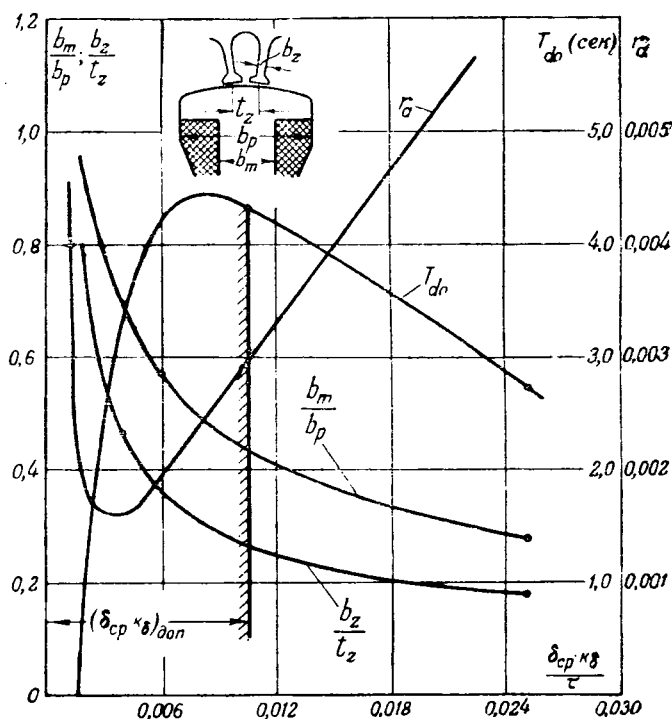


Рис. 4. Влияние величины воздушного зазора на параметры генератора-модели.

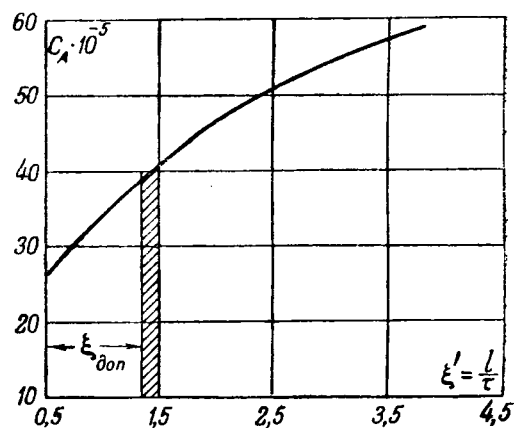


Рис. 5. Зависимости допустимого значения машинной постоянной от отношения $\frac{e}{\tau}$ при $M=5$ сек.

отношения $\xi = l/\tau$ (рис. 5), так как $C_A = \xi^{2/5}$. Из рис. 3 видно, что при увеличении C_A возрастают интересующие нас постоянные времени T_{do} и $T_a \approx \frac{1}{r_a}$. Кривые рис. 3 построены при следующих постоянных значениях: $P=20$ ква, $U=230$ в, $n=1000$ об/мин, $x_{ad}=0,85$, а также при $\xi = l/\tau = 1,35$ и $\delta_{мин} = 0,00417 D$. Две последние величины приняты в модели МЭИ по конструктивным соображениям.

Интересно отметить, что при некотором значении C_A имеет место минимум суммарных потерь в машине ΔP .

Осуществление указанных выше принципов и конструктивных мероприятий позволяет получить следующие совершенно необычные для

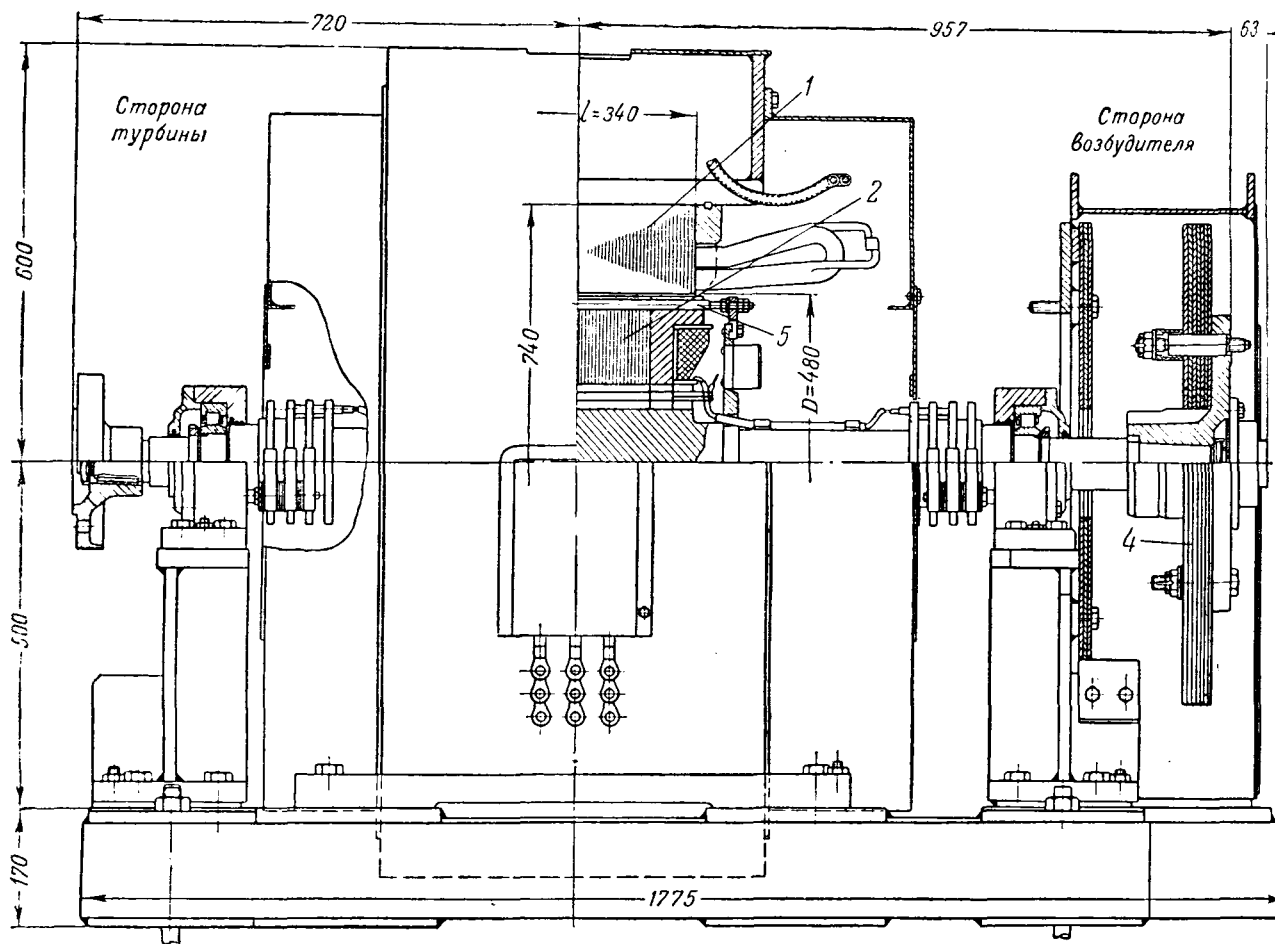


Рис. 6. Продольный разрез синхронного генератора-модели.

1 — статор; 2 — ротор; 3 — фундаментная плита; 4 — маховая масса; 5 — съемная демпферная клетка.

малых машин значения постоянной времени обмотки возбуждения: $T_{a0} = 3,5 \text{ сек}$ при $x_{ad} = 0,85$; $T_{a0} = 2,3 \text{ сек}$ при $x_{ad} = 0,55$; $T_{a0} = 1,8 \text{ сек}$ при $x_{ad} = 0,40$.

В случае приближенного моделирования изменением масштаба времени полученные значения постоянной T_{a0} достаточны, но при моделировании с сохранением масштаба времени может потребоваться увеличение T_{a0} до 6—9 сек. Для этого в цепь обмотки возбуждения вводится специальный серийный компенсатор, который описан ниже.

Для исследования влияния демпферной обмотки у специального генератора-модели предусмотрена съемная демпферная клетка, позволяющая осуществлять продольное и поперечное демпфирование и изменять сопротивление стержней. Конструкция ее ясна из рис. 6. Размеры стержней демпферной обмотки выбраны так, чтобы значения ее постоянных времени были близки к соответствующим постоянным времени мощных гидрогенераторов ($T_{d \text{ макс}} = 0,04 \text{ сек}$).

В машине-модели, построенной на базе СГ-60, моделирование демпферной клетки осуществлялось только частично в продольной оси съемными «демперными воротниками».

Мероприятия, принятые при проектировании машины, имели своей целью обеспечить физическое подобие процессов. Условия геометрического подобия элементов машины и ее магнитных полей не соблюдались. Например, для получения необходимого значения индуктивного сопротивления рассеяния демпферной клетки по продольной оси $x_{f \sigma_1}$ и сверхпереходного сопротивления x_d'' демпферный стержень пришлось заглубить на величину, большую, чем это следовало бы по условию геометрического подобия крупной машине. Шлиц стержня сделан соответственно более узким (рис. 2).

Это объясняется стремлением получить в модели возможно меньший воздушный зазор, что в свою очередь, приводит к значительно меньшему, чем в крупной машине, отношению $\frac{\delta}{\tau}$.

В то же время отношение

$$\frac{x_{f \sigma_1}}{x_{ad}} = k_f \frac{n s \delta}{b \tau},$$

где n — число демпферных стержней на полюс;
 b — ширина шлица паза демпферной клетки;
 s — высота шлица паза демпферной клетки;
 δ — воздушный зазор;
 τ — полюсное деление;
 k_f — коэффициент.

Следовательно, для сохранения равенства отношений $\frac{x_{fz}}{x_{ad}}$ в крупной машине и в машине-модели необходимо большее отношение $\frac{s}{b}$.

В целях получения необходимого рассеяния ютки возбуждения полюсным наконечникам машины-модели следует придать специальную форму (рис. 2), а в дальнейшем значения переднего индуктивного сопротивления и соответствующей постоянной времени корректировать введением в цепь обмотки возбуждения дополнительного дросселя.

Путем выполнения на статоре полузакрытого паза (рис. 2) и применения магнитного клина удалось обеспечить подобие потоков рассеяния статора, которое нарушалось при геометрически удобном открытом пазе.

Характеристика холостого хода генератора является стандартной при роторе с любым x_{ad} . Это возможно в связи с наличием в сердечнике полюса специальных окон, увеличивающих насыщение (при переходе к более низким x_{ad}).

Соотношения между падениями магнитного напряжения на различных участках магнитной цепи, которые удалось получить в машине-модели, находятся в тех же пределах, что и в крупных гидрогенераторах. Это оказывает существенное влияние на ход моделируемых процессов, позволяя более правильно отразить нелинейность изменения коэффициентов рассеяния.

Постоянная инерции генератора изменяется с помощью маховика M с переменным маховым моментом (рис. 1а).

Как уже было сказано выше, естественное падение постоянной времени обмотки возбуждения, даже у специального синхронного генератора-модели (T_{d0}) в большинстве случаев оказывается ниже требуемого. Поэтому для уменьшения активного сопротивления цепи возбуждения в цепь включается серийный компенсатор СК (рис. 1а).

Серийный компенсатор (рис. 7), представляющий собой ненасыщенный серийный генератор постоянного тока, вращаемый с неизменной скоростью двигателем D , не может самовозбуждаться и не является самостоятельным источником ЭДС. Но он создает в цепи, в которую введен, дополнительное активное сопротивление [Л. 2, 6]. Величина этого сопротивления регулируется путем переключения секций серийной обмотки. Число витков обмотки может быть сделано любым от одного витка до максимума.

К системе возбуждения предъявляется следующее основное требование: результирующее активное сопротивление цепи возбуждения (с учетом компенсации) не должно изменяться более чем на 5% при любом изменении тока возбуждения в переходном режиме. Выполнение этого тре-

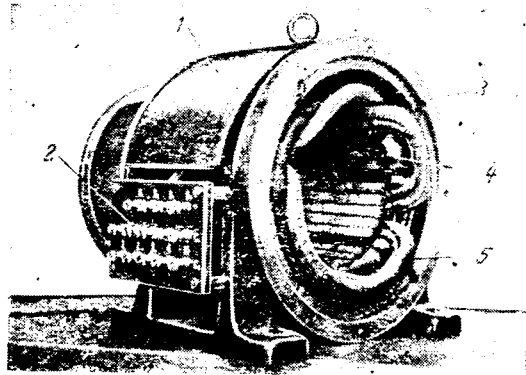


Рис. 7. Статор серийного компенсатора.
1 — станина; 2 — щиток; 3 — промежуточное кольцо;
4 — компенсационная обмотка; 5 — серийная обмотка.

бования возможно при условии сохранения неизменной величины.

$$r_f' = \Sigma r - \frac{E_c}{i_f},$$

где Σr — суммарное естественное сопротивление цепи возбуждения;

i_f — ток возбуждения;

E_c — э. д. с. серийного компенсатора;

r_f' — результирующее сопротивление.

Постоянство сопротивления Σr обеспечивается применением меднографитных щеток при низких плотностях тока. Для сохранения постоянства отношения $\frac{E_c}{i_f}$ необходимо принять меры к уни-

чтожению остаточного намагничивания, получению линейной характеристики намагничивания серийного компенсатора и ослаблению влияния вихревых токов в станине на поток машины. Характеристику холостого хода компенсатора удастся получить практически линейной в любых установившихся и переходных режимах, которые могут встретиться при проведении исследований на системе-модели.

Уничтожение остаточного намагничивания станины, оказывающего существенное влияние на точность компенсации при переходных режимах, достигается путем применения двух специальных вибраторных обмоток, которыми снабжена станина компенсатора и которые схематически показаны на рис. 8. Эти обмотки питаются переменным током 150 гц. Катушки вибраторной обмотки B_s охватывают спинку ламелированной станины, а обмотки B_z — группы зубцов главного полюса.

Особенность этих обмоток состоит в том, что они, в противоположность обычной перемещающей обмотке в электромашином регуляторе, не имеют потокоцепления ни с одной из других обмоток машины. Это видно из рис. 8, на котором показаны схемы вибраторных обмоток в простейшем исполнении, картина их потоков Φ_{fz} и Φ_{bz} для мгновенного значения направления токов и пазовый слой станины. На рис. 8 показаны также сечения катушек главных полюсов G , ка-

тушек компенсационной обмотки K и обмотки дополнительных полюсов D .

Эффективность действия предлагаемых вибраторных обмоток обуславливается главным образом отсутствием потокоцепления с другими обмотками, что отличает их от обмоток, применявшихся ранее. Пульсации тока в вибраторной обмотке вызывали пульсации тока в других обмотках машины, с которыми она была связана, в результате чего имело место значительное ослабление потока вибраторной обмотки.

Экспериментальное исследование показывает, что применение вибраторной обмотки на опинке понижает остаточное напряжение в 5—6 раз. При одновременном действии обеих обмоток остаточное намагничение практически исчезает.

Оптимальное значение частоты тока, питающего перемагничивающую обмотку, зависит от конструкции машины; особенно сильно сказывается здесь толщина стальных листов станины. Для описанного выше компенсатора оптимальная частота оказалась равной примерно 150 гц.

Такие вибраторные обмотки могут быть с большим эффектом применены в электромашинах усилителях и других специальных электрических машинах.

Ввиду того, что генератор имеет сменные роторы, а серийный компенсатор может уменьшить сопротивление цепи возбуждения в 2—3 раза, напряжение, требуемое от возбудителя, в номинальном режиме генератора, изменяется в весьма широких пределах (в 4—5 раз). Это обстоятельство препятствует непосредственному включению серийного компенсатора между обмоткой возбуждения и возбудителем, так как при таком включении было бы невозможно обеспечить работу возбудителя во всех номинальных режимах на желательном участке характеристики намагничивания.

В динамической модели МЭИ связь между возбудителем и обмоткой возбуждения генератора осуществляется при помощи электромашиного преобразователя напряжения (П, рис. 1а), якорь которого включен в цепь возбуждения, а обмотка возбуждения A_1A_2 через сопротивление R_3 питается от возбудителя B (рис. 1б). Такая схема позволяет изменять тип привода возбудителя, схему его питания и дает возможность исследовать все существующие системы возбуждения синхронных генераторов.

Электромашиный преобразователь Π так же, как и серийный компенсатор $СК$, должен обладать линейной характеристикой намагничивания, сохраняющейся при увеличении потока в 10—15 раз. В нем должно быть практически устранено остаточное намагничивание, так как только в этом случае он сможет без искажения преобразовывать напряжение возбудительного аппарата U_B в напряжение, действующее на обмотку возбуждения синхронного генератора U_{Π} , сохраняя при этом заданное отношение $\frac{U_{\Pi}}{U_B}$.

Поэтому преобразователь, так же как и компенсатор, снабжен компенсационной и вибраторно обмотками и отличается от последнего только значительно большим числом витков обмотки возбуждения главных полюсов.

Сопротивление R_1 (рис. 1б) оказывается необходимым для сохранения подобия в потреблении мощности на вращение возбудителя, так как мощность, потребляемая обмоткой A_1A_2 , сама по себе весьма незначительна.

Сопротивление R_2 может быть необходимо для осуществления высоких форсировок возбуждения.

Сопротивление R_3 служит для регулирования отношения U_{Π}/U_B .

Собственные индуктивности преобразователя и компенсатора оказываются ничтожно малыми по сравнению с индуктивностью обмотки возбуждения генератора. Суммарная индуктивность компенсатора и преобразователя составляет менее 1% индуктивности обмотки возбуждения генератора. При отсутствии компенсационных обмоток индуктивность компенсатора и преобразователя была бы в несколько раз больше, что значительно увеличило бы погрешности, вносимые этими машинами в переходных режимах.

Щетки серийного компенсатора и преобразователя, а также щетки на кольцах ротора синхронного генератора должны быть, как показывает опыт эксплуатации модели МЭИ, меднографитовыми, так как только при этом условии удается получить достаточно низкое значение суммарного переходного сопротивления и обеспечить постоянство результирующего сопротивления всей цепи. Переходное сопротивление электрографитовых щеток, зависящее от тока, достигает 20—40% от результирующего сопротивления (при напряжении на обмотке возбуждения 20—40 в и указанных выше значениях компенсаций), что приводит к значительному искажению эффекта компенсации в переходных режимах.

Выбор напряжения на обмотке возбуждения генератора в значительной мере определяется сортом щеток и допустимой величиной переходного сопротивления. Напряжение на обмотке возбуждения, равное 20 в ($x_{ad} = 0,85$), может быть принято только в случае применения меднографитовых щеток, суммарное переходное сопротивление которых не превышает 1—2% от результирующего сопротивления цепи возбуждения (с учетом компенсации).

Применение перечисленных мер позволяет получить при 2—3-кратном уменьшении результирующего сопротивления цепи возбуждения и 5—6-кратных бросках тока возбуждения или соответствующей форсировке точность компенсации порядка 3—5%. Большие значения компенсации ведут к большим ошибкам, поэтому при проектировании синхронного генератора должны быть приняты меры к увеличению естественной постоянной времени обмотки возбуждения.

На рис. 9 приведены три осциллограммы и менения тока возбуждения синхронного генератора.

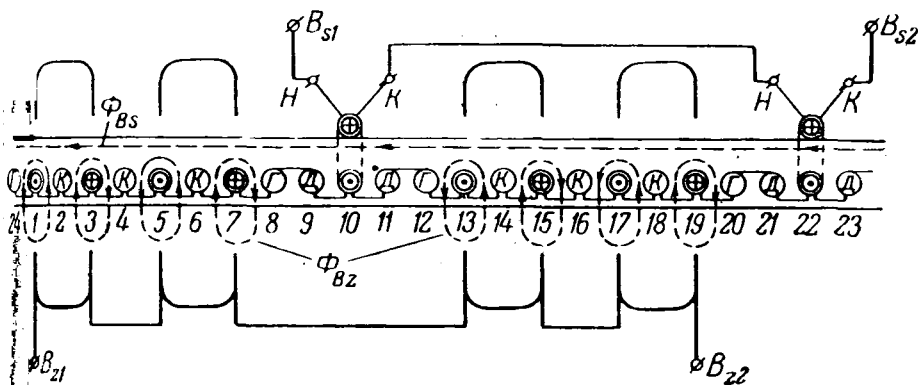


Рис. 8. Схема vibratorных обмоток.

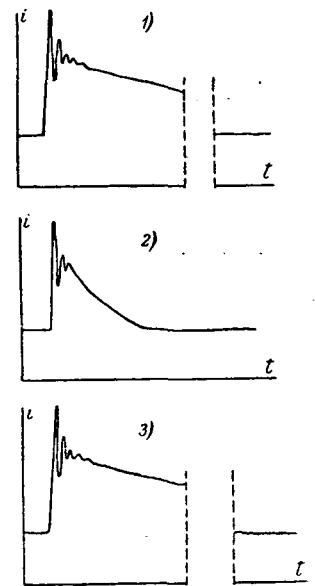


Рис. 9. Осциллограммы тока возбуждения синхронного генератора-модели.

при трехфазном коротком замыкании на шине генератора. Осциллограмма 1 снята при собственном сопротивлении обмотки возбуждения, осциллограмма 2 — при введении в цепь возбуждения сопротивления r_0 , равного сопротивлению обмотки возбуждения r_f , осциллограмма 3 — при введении добавочного сопротивления, но с компенсацией его с помощью компенсатора. Видно из рис. 9, осциллограммы 1 и 3 практически не отличаются друг от друга, что свидетельствует о достаточной точности компенсации. Преобразователь напряжения и серийный компенсатор можно объединить в одну машину, в которую две магнитные системы и общий якорь одним коллектором [Л. 4]¹. В этом случае суммарное переходное сопротивление щеток в цепи возбуждения уменьшается примерно на 30%. Однако двухмашинный агрегат значительно легче изготовить на базе серийных асинхронных машин машин постоянного тока и проще эксплуатировать. При двухмашинном агрегате исключается явление индуктивной связи между серийной обмоткой компенсатора и обмоткой возбуждения преобразователя через коммутирующиеся секции. Такая связь особенно опасна при больших коммутациях.

Серийные машины для изготовления двухмашинного возбуждательного агрегата следует выбирать так, чтобы внутренний диаметр статора синхронной машины превышал на 4—6 мм диаметр якоря машины постоянного тока. После проведения ряда вариантов расчетов обычно удается использовать якорь с нормальными обмоточными данными. Это позволяет взять от машины постоянного тока обмотанный якорь, щеточную систему, щиты и станину без полюсов. От асинхронной машины следует взять листы активной стали детали ее крепления.

Для образования главных и дополнительных полюсов в листах стали должна быть вырублена часть зубцов. Например, при 24 зубцах на статоре (рис. 8) должны быть вырублены зубцы между пазами 8—9 и 20—21. Внутри станины шины постоянного тока устанавливаются ребра, обрабатываемые затем под посадку листов асинхронной машины.

Ламелированная магнитная система снабжается четырьмя обмотками: секционированной серийной (или независимой) компенсационной, дополнительной, дополнительных полюсов и vibratorной.

В машине-компенсаторе МЭИ применен стартер асинхронной машины серии Урал Р-52 и якорь от машины постоянного тока ПН-85.

Заключение. Проведенная работа показала возможность создания малой модели синхронной машины, полностью подобной мощным синхронным генераторам с их системой возбуждения.

Для получения оптимальных параметров машина-модель должна быть специально сконструирована согласно принципам, изложенным в настоящей статье.

Изготовление машин-моделей возможно на базе серийных машин путем их относительно простой переделки, приближающей их к описанной конструкции, однако их параметры не могут полностью удовлетворить всем требованиям, возникающим при моделировании электрических систем.

Описанные в настоящей статье компенсатор и преобразователь постоянного тока могут найти применение не только для моделирования, но и для других целей.

В работах по проектированию и испытанию агрегатов динамической модели МЭИ, кроме авторов настоящей статьи, участвовали: Л. З. Рубинштейн, Л. С. Лифшиц. Авторами были учтены предварительные разработки, ранее проводившиеся по инициативе В. А. Веникова на кафедре электрических машин МЭИ (доценты Ф. А. Горяинов и М. С. Михайлов-Микулинский при консультации профессоров Г. Н. Петрова и Ю. С. Чёчета). По отдельным вопросам, связанным с конструкцией специального генератора, ценные советы были получены от проф. Г. Н. Петрова, проф. А. Е. Алексеева и чл.-корр. АН СССР М. П. Костенко. Основные работы по сооружению агрегатов проводились на кафедре электрических машин МЭИ мастерами А. Я. Титуниным, М. М. Балаханским, М. А. Паульманом и М. А. Песчаненко.

¹ Конструкция предложена М. С. Михайловым-Микулинским.

Литература

1. В. А. Веников. Критерии подобия электромеханических явлений и применение их к моделированию электросистем. Электричество, № 4, 1945.

2. М. П. Костенко и Е. Д. Трейвиш. Моделирование электрических машин и трансформаторов при экспериментальном исследовании устойчивости. Труды ЛПИ, № 1, 1946.

3. М. П. Костенко. Электродинамическая модель для исследования устойчивости. Электричество, № 9, 1950.

4. В. А. Веников. Применение теории подобия физического моделирования в электротехнике. Госэнергоиздат, 1949.

5. В. А. Толвинский. Универсальная приведенная характеристика генераторного холостого хода динамических электрических машин и ее аналитическое выражение. Электросила, № 2—3, 1945.

6. В. А. Веников. Серийный генератор постоянного тока, как отрицательное сопротивление. Электричество, № 1, 1945.

7. В. И. Иванов. Электродинамическая модель электропередачи Куйбышев — Москва, Труды ЛПИ, № 1941.

[7. 12.]



Автотрансформаторы с плавным регулированием напряжения

Инж. А. Б. ПОДОЛЬНЕР, Г. К. АЛАДЖАЛОВ,
инж. С. В. КРЕСТНИКОВ, В. П. КРЫЛОВ, С. Г. ФЕЛЬДМАН

Завод „Гостеасвет“, Москва

Применение новых электротехнических установок и видов технологии и необходимость разрешения нашей промышленностью ряда технических проблем создали потребность в относительно мощных электрических машинах или аппаратах, способных осуществить плавное регулирование напряжения под нагрузкой в широких пределах.

На основании запросов ряда потребителей о возможности создания специальных регуляторов напряжения, отвечающих определенным техническим требованиям, Московский электромеханический завод «Гостеасвет» в 1948 г. запроектировал и освоил серийный выпуск автотрансформаторов с плавным регулированием напряжения под нагрузкой промышленного назначения. В 1948—1950 гг. завод выпустил около 500 автотрансформаторов и снабдил ими многие предприятия, получив ряд положительных отзывов об эксплуатационных качествах этих аппаратов.

Ниже приводится краткое описание и технические данные серии автотрансформаторов с плавным регулированием напряжения под нагрузкой, выпускаемых заводом «Гостеасвет».

Проектирование. В основу проектирования серии автотрансформаторов с плавным регулированием напряжения под нагрузкой был положен автотрансформатор стержневого типа с оголенными прямоугольными обмотками, по которым перемещаются токосъемные коммутирующие металлические устройства — щетки.

Для упрощения технологического процесса в серийном выпуске в основу проектирования были положены следующие принципы.

1. Универсализм деталей и их взаимозаменяемость.

Описывается серия автотрансформаторов с плавным регулированием напряжения под нагрузкой, разработанная и освоенная серийным выпуском электромеханическим заводом «Гостеасвет»; также рассмотрены принципы, положенные в основу проектирования серии.

2. Разработка типовых узлов, которые позволяют укомплектовывать различные типы автотрансформаторов.

3. Максимальная простота технологии изготовления отдельных деталей сборки узлов и автотрансформаторов в целом.

4. Создание конструкций, не требующих применения изолированной обмоточной меди.

Для обеспечения универсализма деталей были разработаны внутризаводские нормы, которые охватывают 70—75% деталей, входящих в автотрансформаторы различных мощностей и типов. Были типизированы следующие основные узлы: сердечники магнитопроводов, обмотки, узлы контактных шин, кронштейны для крепления контактных шин, рамы основания, токосъемные коммутационные устройства — металлические щетки.

Основные типовые узлы. Сердечники магнитопроводов прямоугольной формы собираются из трансформаторной стали марки Э3А—Э4А толщиной 0,5 мм. Изоляция пластин сердечника производится путем окраски эмалью с последующей печной сушкой. Сердечники стягиваются бандажным шпагатом диаметром 2 мм.

Обмотки выполнены однослойными, прямоугольной формы (рис. 1), собираются из штампованных неизолированных пластин красной меди (рис. 1,а). Витки изолируются друг от друга теми же штампованными пластинами из гетинакса. Сверху и снизу обмотки заканчиваются медными бронзовыми рамками, которые служат оконечными токосъемными шинами. Штампованные пластины обмотки, а также и оконечные шины имеют по углам четыре круглых отверстия, через которые пропущены изолированные стяжки шпильки. Усилие затяжки обеспечивает контакт между отдельными пластинами обмотки. Вд

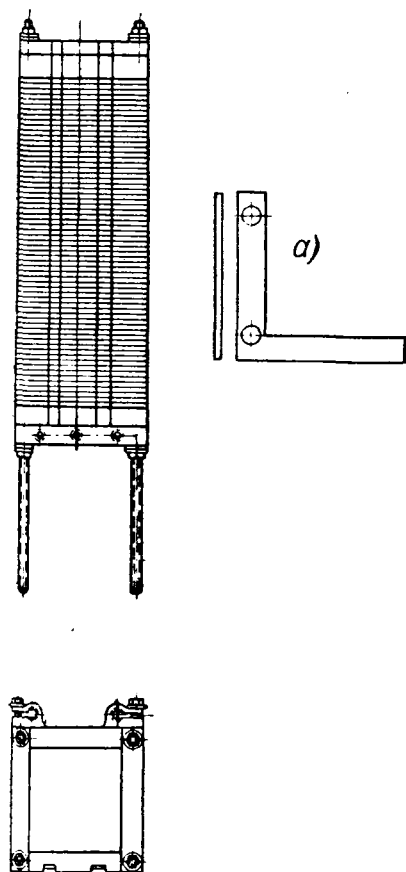


Рис. 1. Обмотка.

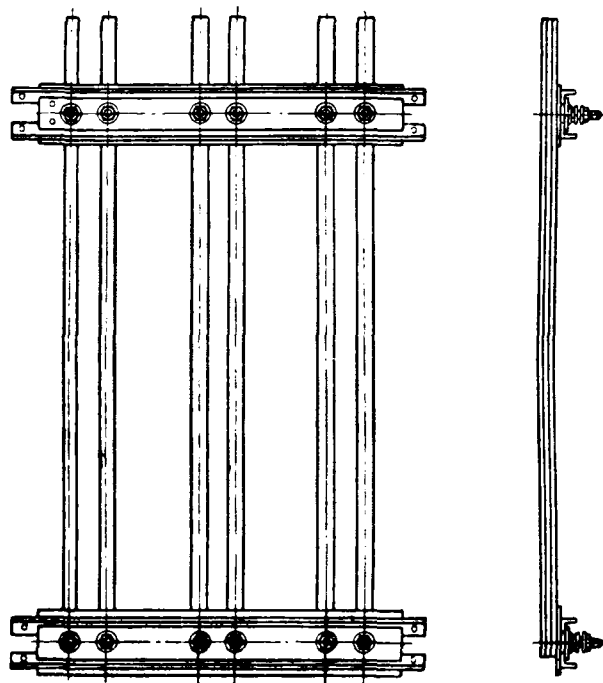


Рис. 2. Узел контактных шин.

Обмотка профрезерована от двух до десяти токосъемных дорожек, являющихся коллекторами, по которым перемещаются токосъемные устройства — щетки.

Контактные шины (рис. 2) служат направляющими для щеток. Этот узел также является токопередающим устройством от щетки к нагрузке. Количество шин в узле, в зависимости от типа автотрансформатора, колеблется от двух до пятидесяти. Шины монтируются на гетинаксовых пластинах. Узел контактных шин посредством головок крепится к стальным кронштейнам.

Рамы основания автотрансформаторов сварные.

Токосъемное коммутирующее устройство — электрическая щетка (рис. 3) — состоит из металлического корпуса, в который вмонтированы пять стальных стержней. На каждый стержень намотана лента сопротивления. Нижние концы каждого сопротивления при помощи гибкого проводника соединяются с токосъемными медными пластинами толщиной 0,8 мм. Пластины изолированы друг от друга прокладками из листового гетинакса. Вторые концы сопротивлений электрически соединены к корпусу щетки.

Съем тока с обмотки обеспечивается путем приведения в контакт медных пластин щетки с коллекторной дорожкой обмотки. Пружинающий жгут, закрепленный на корпусе щетки, передает ток на контактную шину, к которой присоединяется нагрузка.

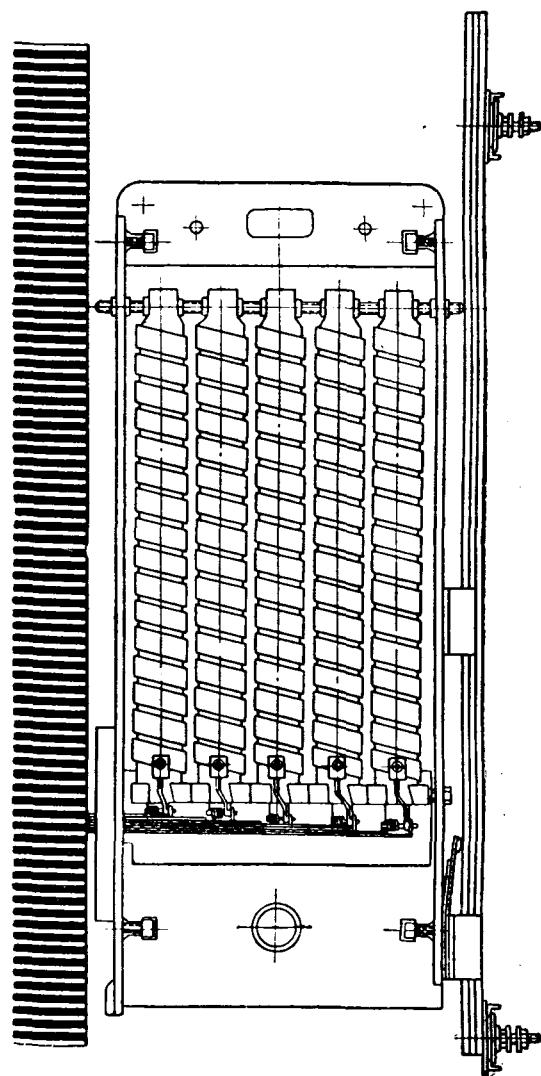


Рис. 3. Токосъемное коммутирующее устройство (щетка).

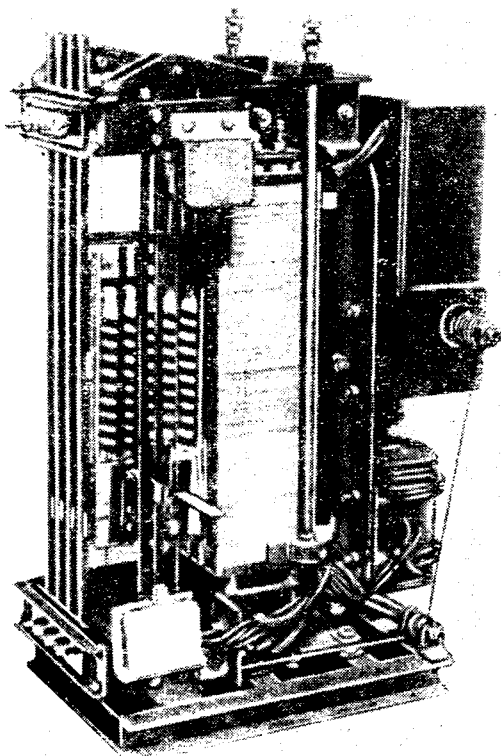


Рис. 4. Автотрансформатор типа ГНП-8Д/220.

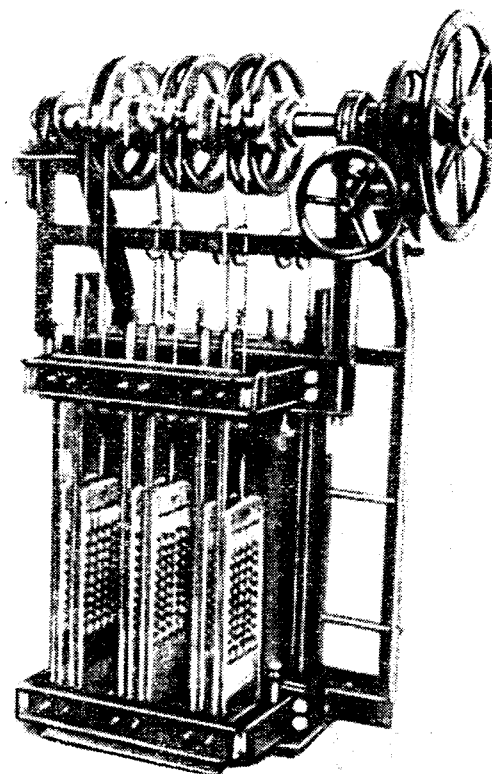


Рис. 6. Автотрансформатор типа РН-30,б.

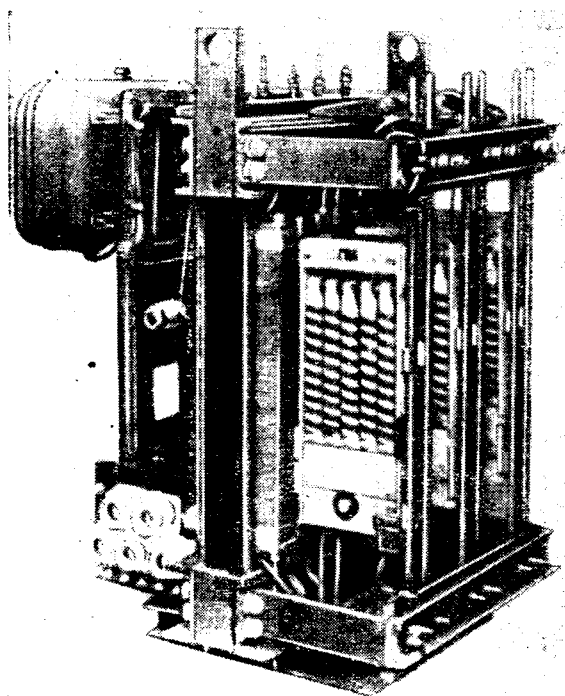


Рис. 5. Автотрансформатор типа ТЗЗ.

Контактные пластины замыкают несколько витков обмотки, в которых возникают токи, циркулирующие по этим виткам. Эти токи ограничены до безопасного значения сопротивлениями, намотанными на фарфоровые стержни. Для токов, циркулирующих по короткозамкнутым виткам,

щеточные сопротивления соединены последовательно, для токов нагрузки — параллельно. Теря и падение напряжения в этих контурах практически невелики.

Конструкция автотрансформаторов. Шк типов выпускаемых автотрансформаторов дан в таблице. Однофазные автотрансформаторы изготавливаются двух типов: РНП-8/220 с ручным приводом и РНП-8Д/220 с электроприводом (рис. 4).

На один из стержней двухстержневого магнитопровода насажена обмотка. Второй стержень (холостой) вместе с двумя ярами стягивается сварными П-образными консолями из углерода и швеллера. Обмотка автотрансформатора имеет четыре токосъемные коллекторные дорожки, которым перемещаются четыре щетки. Автотрансформатор РНП-8/220 закрыт кожухом, конструкция которого обеспечивает его нормальное охлаждение. РНП-8/220 изготавливается в открытом исполнении.

Трехфазные автотрансформаторы собираются из вышеописанных типовых узлов и отличаются или числом щеток фазы, или приводом.

На рис. 5 дан фотоснимок автотрансформатора типа ТЗЗ. Особенностью конструкции этого автотрансформатора является то, что щетки положены с одной стороны обмоток, а элемент электропривода — электродвигатель, редуктор и магнитный пускатель, — с другой их стороны.

Автотрансформатор типа ТЗЗ-2 отличается от ТЗЗ величиной питающего напряжения и с

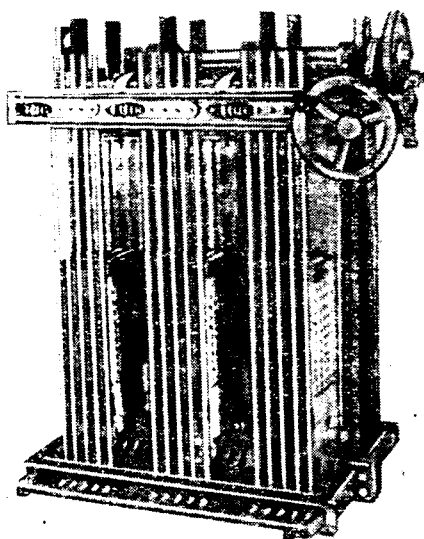


Рис. 7. Автотрансформатор типа РНП-66/380.

существенно несколько большими размерами по сравнению с типом РН-30/6.

Особенностью автотрансформатора типа РН-30/6 (рис. 6) является ручной привод.

Привод состоит из рамы, основного вала с двумя тросовыми шкивами, подшипниками, оси шкивов, узла медленного хода, тросов и прокладок щеток. Каждая щетка механически связана при помощи троса с тросовым шкивом. Тросовые шкивы привода устроены таким образом, что дают возможность либо отдельно перемещать щетки, либо механически связывать их вместе. Основной вал приводится во вращение

Обозначение	Наименование
	Обмотка автотрансформатора
	Щетка автотрансформатора
	Нагревательный элемент электропечи

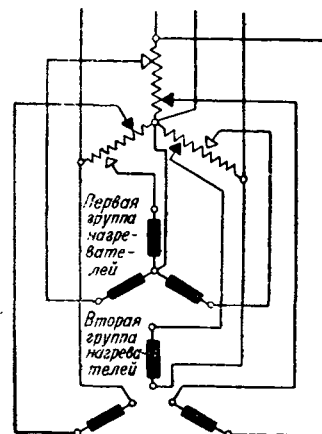


Рис. 8. Встречное включение нагрузки для трехфазного автотрансформатора.

при помощи штурвала (грубая регулировка) или при помощи узла медленного хода (точная регулировка).

Автотрансформатор типа РН-75/15 по конструктивному оформлению аналогичен автотрансформатору РН-30/6, отличаясь от него мощностью, числом щеток и габаритами (таблица).

На рис. 7 показан автотрансформатор типа РНП-66/380. В этом автотрансформаторе щетки (30 шт.) расположены с двух противоположных сторон обмоток. На валу привода закреплены два тросовых барабана. Средние точки двух тросов закреплены в средней части барабанов, а крайние точки связаны с объединяющими щетки штокками. Вал привода приводится во вращение при помощи червячной передачи.

При вращении вала привода одна половина тросов наматывается на барабаны, поднимая

Основные данные автотрансформаторов завода „Гостеасвет“ промышленного назначения

Тип	Число фаз	Мощность, кВа	Напряжение питающей сети, в	Степень регулирования напряжения, в	Пределы регулирования напряжения, в	Число регулируемых цепей	Максимальная нагрузка на 1 регулирующую цепь, а	Максимальная, регулируемая нагрузка, а	Схема включения нагрузки	Режим работы	Коэффициент загрузки	Управление	Вес, кг	к. п. д.
РН-8,230	1	20	220	0,7	0—220	1	91,0	91,0	прямая		1	ручное дистанционное	120	
РН-8,230	1	20	220	0,7	0—220	1	91,0	91,0	прямая		1	ручное дистанционное	160	
РН-30/6	3	30	127 220	0,55	0— $\frac{127}{220}$	6	6×40	—			1	ручное	400	
РН-33/220	3	75	127 220	1,0	0— $\frac{127}{220}$	2 трехфазные	100	200			1	ручное	460	
РН-33/380	3	130	220 380	1,0	0— $\frac{220}{380}$	2 трехфазные	100	200			1	ручное	550	
РН-75/15	3	75	127 220	0,55	0— $\frac{127}{220}$	9 однофазные	3×40 6×80	—	встречная	длительный	0,7	ручное	650	0,0...0,98
РН-66/380	3	260	220 380	1,0	0— $\frac{220}{380}$	2 трехфазные	200	400			1	ручное	760	
РН-25	3	25	127 220	0,55	0— $\frac{127}{220}$	1 трехфазная	65	65	прямая		1	дистанционное	350	
РН-43	3	43	220 380	1,0	0— $\frac{220}{380}$	1 трехфазная	65	65	прямая		1	дистанционное	460	

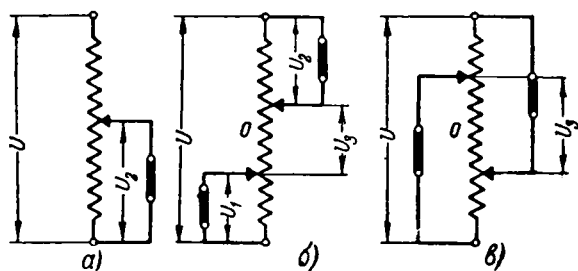


Рис. 9.

а — прямое включение нагрузки; б — первый режим со встречным включением нагрузки; в — второй режим со встречным включением нагрузки.

щетки, расположенные по одну сторону обмоток, вторая сматывается, опуская противоположные. Система привода рассчитана на способ встречного включения нагрузок, когда максимумы напряжений на одной половине нагрузок соответствуют верхнему положению щеток, а на другой — нижнему. Автотрансформатор заключен в разборный кожух.

Автотрансформаторы РНП-33/220 и РНП-33/380 по своим основным параметрам и конструктивным данным аналогичны автотрансформатору

РНП-66/380, отличаюсь от него мощностью, числом щеток, приходящихся на одну фазу, и размерами.

Основные параметры. В таблице сведены основные параметры автотрансформаторов.

Номинальные мощности автотрансформаторов указаны в таблице из условия, что мощность нагрузки в процессе регулирования напряжения не меняется как функция вторичного напряжения $P_2 = f(U_2)$; паспортные величины мощностей соответствуют высшим напряжениям.

В столбце число регулируемых цепей указаны «две трехфазные» — следует понимать работу в схеме рис. 8.

При «прямом» способе включения нагрузки (таблица) все щетки имеют максимум напряжения на одном конце обмотки автотрансформатора (рис. 9, а). При встречном способе включения нагрузки одна половина щеток имеет максимум напряжения на одном конце, а вторая половина — на противоположном конце обмотки автотрансформатора. Движение щеток происходит одновременно и симметрично относительно середины обмотки (рис. 9, б, в).

[9, 12, 13]



Определение оптимальных параметров быстро насыщающихся трансформаторов тока для релейной защиты

Кандидат техн. наук, доц. В. Л. ФАБРИКАНТ и инж. Г. Т. ГРЕК

Москва

Введение. Быстронасыщающиеся трансформаторы тока оправдали себя как средство повышения чувствительности быстрой действующей дифференциальной защиты силовых трансформаторов. В последнее время они применяются также в схемах дифференциальной защиты генераторов и шин.

Сущность эффекта быстрого насыщения может быть объяснена следующим образом: если к первичной обмотке трансформатора подвести симметричный синусоидальный переменный ток с амплитудой $I_{1\text{ макс}}$ (рис. 1, а), то изменение потока магнитопровода определяется отрезком ac , так как поток изменяется по полной петле гистерезиса $ABCD$. Если в первичную обмотку помимо переменной слагающей с амплитудой $I_{1\text{ макс}}$ ввести подмагничивающую постоянную слагающую I_p (рис. 1, б), то изменение магнитного потока $a'a''-c''c'$

Дается способ определения оптимальных параметров быстро насыщающихся трансформаторов тока для релейной защиты путем испытаний при подмагничивании постоянным током. Приведены результаты определения оптимальных параметров для трансформаторной стали, стали ХВП и пермаллоя.

будет меньше, так как поток изменяется по частичной петле гистерезиса $A'B'C'D'$. Изменение магнитного потока определяет величину тока

э. д. с., индуктированной во вторичной обмотке. Тем самым в первом случае (рис. 1, а) э. д. с. ток во вторичной обмотке будут больше, чем во втором случае (рис. 1, б). Реле защиты, включенное через быстронасыщающийся трансформатор, автоматически загружается при токах, содержащих аperiodические слагающие.

Данное свойство позволяет выполнить дифференциальную защиту достаточно высокой чувствительности к коротким замыканиям в защищаемой зоне, так как трансформатор хорошо трансформирует симметричный переменный ток, и чувствителен к значительным токам небаланса, содержащим аperiodические слагающие.

Рассмотрение природы токов небаланса и дифференциальной защиты трансформаторов пока

ет, что в нормальном режиме через дифференциальную цепь защиты — первичную обмотку — протекает ток небаланса, обусловленный недостаточно точным выбором коэффициента трансформации трансформаторов тока или выравняющих автотрансформаторов тока и величиной установленного тока намагничивания защищаемого трансформатора. При внешних коротких замыканиях вследствие увеличения первичного тока и существующих погрешностей трансформаторов ток небаланса возрастает; наибольшее возмещение этого тока имеет место в первые моменты внешних коротких замыканий.

Наибольшие токи небаланса дифференциальной защиты силовых трансформаторов наблюдаются при включении защищаемых трансформаторов на короткой ход или при восстановлении напряжения после отключения внешнего короткого замыкания. В этих случаях в первичной обмотке защищаемого трансформатора, а следовательно, в первичных обмотках трансформаторов тока, становящихся с питающей стороны, появляются токи намагничивания, некомпенсируемые токами других обмоток и определяющие собой ток небаланса защиты.

Броски тока намагничивания содержат явно выраженную апериодическую составляющую, вследствие чего при включении реле дифференциальной защиты трансформаторов через быстроснасыщающиеся трансформаторы и правильном выборе параметров защита не сработает от тока небаланса. В этих случаях апериодическая составляющая затухает относительно медленно. Поэтому в момент ее затухания полный ток намагничивания достигает величины, близкой к установившемуся току холостого хода, который не достаточен для срабатывания реле. Включение реле через быстроснасыщающиеся трансформаторы вызывает загромождение и при коротких замыканиях в защищаемой зоне, так как в токе короткого замыкания в первые моменты также содержится апериодическая составляющая, однако в этих случаях она затухает значительно быстрее и может вызвать только небольшое замедление действия защиты. Надежность действия защиты при коротких замыканиях в защищаемой зоне обеспечивается тем, что к моменту затухания апериодической составляющей значение периодической составляющей близко к первоначальному или даже несколько больше его. Ток небаланса дифференциальной защиты шин и генераторов обусловлен идентичностью токов намагничивания трансформаторов тока и достигает наибольшего значения в первые моменты внешних коротких замыканий. Этот ток небаланса также содержит медленно затухающую апериодическую составляющую, что позволяет при включении реле через трансформатор предотвратить неправильное действие и повысить чувствительность защиты. На целесообразность применения быстроснасыщающихся трансформаторов для дифференциальной защиты указали И. Д. Кутявин [Л. 1, 2] и ЦНИЭЛ МЭС. Работы ЦНИЭЛ МЭС [Л. 3] подтвердили эффективность применения этих трансформаторов в дифференциальных защитах различных элементов

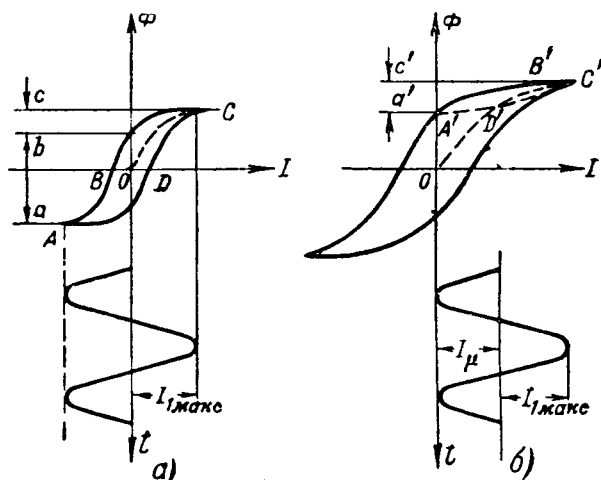


Рис. 1. Диаграмма изменения магнитного потока при симметричном и смещенном переменном токе.

тов. ЦНИЭЛ также было внедрено в эксплуатацию значительное число комплектов дифференциальной защиты с применением специальных реле с быстроснасыщающимися трансформаторами. В работах Теплоэлектропроекта и МЭИ [Л. 4] была подтверждена эффективность применения этих трансформаторов.

Сопоставление всех перечисленных работ показало, что до сих пор нет единой точки зрения по вопросу об оптимальных параметрах трансформаторов. И. Д. Кутявин [Л. 1] считает, что целесообразно выбирать трансформатор так, чтобы в условиях трогания реле при подведении к нему синусоидального переменного тока индукция в магнитопроводе соответствовала бы максимальной магнитной проницаемости (7—8 кГс). ЦНИЭЛ рекомендует [Л. 3] выполнять трансформатор так, чтобы при трогании реле и синусоидальном первичном токе индукция для трансформаторной стали была порядка 12—14 кГс. В работе ТЭП была указана также оптимальная индукция порядка 10—12 кГс.

Существование оптимального значения магнитной индукции B_m можно показать следующим образом: если при синусоидальном токе изменение магнитного потока определяется отрезком ac (рис. 1, а), то при том же значении максимальной магнитной индукции, но при полностью смещенном токе, изменение магнитного потока определяется отрезком bc . Отношение $\frac{bc}{ac}$ характеризует

степень загромождения реле, включенного через трансформатор, при смещенных токах. Это отношение зависит от B_m и при некотором его значении имеет минимальное значение.

Как показано в работах ТЭП и МЭИ, на эффективность трансформатора существенное влияние имеет правильный выбор коэффициента распределения мощности

$$\alpha = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2'}{I_1}, \quad (1)$$

где P_2 — полная мощность, потребляемая на

P_1 — мощность, подводимая к первичной обмотке;

I_1 — первичный ток;

I_2 — вторичный ток трансформатора, приведенный к первичной обмотке.

α определяется при синусоидальном первичном токе и индукции в магнитопроводе, имеющей место при срабатывании реле. В работе ТЭП для трансформаторной стали рекомендуется $\alpha \approx 0,25$.

Для уточнения оптимальных параметров быстро-насыщающихся трансформаторов и методики их расчета, а также для выявления целесообразности применения магнитопроводов из новых ферромагнитных материалов (сталь ХВП, пермаллой) лабораторией Теплоэлектропроекта было проведено исследование трансформаторов при подмагничивании постоянным током.

Исследование при подмагничивании постоянным током. Несимметричный ток, протекающий через первичную обмотку трансформатора, можно рассматривать как сумму периодической и апериодической слагающих. Трансформация апериодической слагающей, как показывают расчеты, не имеет существенного влияния на величину вторичного тока: ею обусловлен только очень кратковременный пик вторичного тока. Определяющей является трансформация периодической слагающей в условиях подмагничивания магнитопровода апериодической слагающей первичного тока. Не имеет существенного значения также скорость затухания апериодической слагающей. Поэтому эту слагающую можно заменить при испытаниях постоянным незатухающим током, что было предложено И. Д. Кутявиным. Эффект затухания учитывается изменением параметров трансформатора при уменьшении постоянной слагающей.

В работе ТЭП и диссертации Н. Т. Кобяковой [Л. 4] было показано, что трансформаторы с различными магнитопроводами, питающие реле с различным потреблением при трогании, будут себя вести одинаково в отношении трансформации произвольного несимметричного первичного тока во вторичную цепь, если при синусоидальном первичном токе и при трогании реле они имеют одинаковую индукцию в магнитопроводе и одинаковый коэффициент распределения мощности α . Таким образом, в задачу исследования входит определение оптимальной индукции и α .

Из рассмотрения схемы замещения (рис. 2) можно установить существование оптимального значения α . При заданной индукции B_m , при срабатывании реле и синусоидальном первичном токе

$$\alpha = \frac{z_n}{(z_n + z_2')}. \quad (1)$$

В первом приближении можно считать углы полных сопротивлений z_n и z_2' равными, тогда в выражении для α можно подставлять абсолютные значения z_n и z_2' .

При подмагничивании постоянной слагающей сопротивление z_n снизится до $z_{n\mu}$, так как

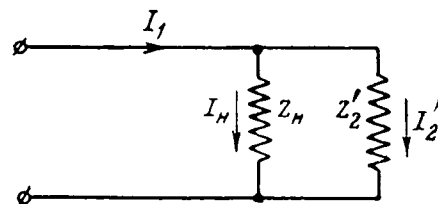


Рис. 2. Схема замещения быстро-насыщающихся трансформаторов.

z_n — полное сопротивление ветви намагничивания; z_2' — полное сопротивление вторичной цепи, приведенное к первичной цепи; P_1 — мощность, потребляемая всем устройством; P_2 — мощность, потребляемая вторичной цепью.

в условиях срабатывания реле магнитопровод уже насыщен. Коэффициент α упадет до α_p

$$= \frac{z_{n\mu}}{z_{n\mu} + z_2'}. \quad (2)$$

Вторичный ток в результате под-

магничивания уменьшится. Относительное грубое изменение защиты можно охарактеризовать коэффициентом

$$c_\alpha = \frac{\alpha}{\alpha_p} = \frac{1 + \frac{z_2'}{z_{n\mu}}}{1 + \frac{z_2'}{z_n}}. \quad (3)$$

Исследуем показатель c_α при α , близких к нулю и неизменных индукции B_m и сопротивлении

Определим знак частной производной $\frac{\partial c_\alpha}{\partial z_2'}$

$$= -\frac{z_n}{z_{n\mu}^2} \frac{\partial z_{n\mu}}{\partial z_2'} \quad \text{при малых } \alpha. \quad (4)$$

При увеличении z_2' вследствие относительно возрастания доли постоянной слагающей в ток ветви намагничивания происходит уменьшение

$z_{n\mu}$, а следовательно, $\frac{\partial z_{n\mu}}{\partial z_2'} > 0$, и производная

$$\frac{\partial c_\alpha}{\partial z_2'} < 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial z_2'} > 0. \quad (5)$$

Таким образом, при увеличении α (с нуля) показатель c_α нарастает до $\frac{z_n}{z_{n\mu}} > 1$, а при $\alpha = 1$ показатель $c_\alpha = 1$. Следовательно,

при некотором значении α ($0 < \alpha < 1$) имеет место максимум показателя c_α , т. е. существует оптимальный коэффициент распределения мощности α .

Оптимальными параметрами трансформатора B_m и α надо принять те их значения, при которых подмагничивающий апериодический ток $I_{1\mu}$ вызывает максимальное увеличение переменной слагающей первичного тока, необходимой для трогания реле. Количественно увеличение переменной слагающей первичного тока можно охарактеризовать коэффициентом

$$\varepsilon = \frac{I_{1\mu}}{I_1}, \quad (6)$$

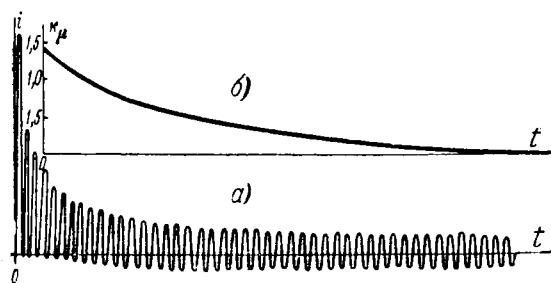


Рис. 3. Изменение коэффициента смещения броска тока намагничивания.

где I_1 — эффективное значение первичного синусоидального тока, при котором вторичный ток имеет заданную величину I_2 ;

$I_{1\mu}$ — эффективное значение переменной слагающей первичного тока, обуславливающей при подмагничивании трансформатора током $I_{1\mu}$ то же значение вторичного тока I_2 .

При испытаниях трансформатора первичный ток можно охарактеризовать коэффициентом смещения

$$k_{\mu} = \frac{I_{1\mu}}{I_{1\mu}}, \quad (3)$$

т. е. отношением постоянной слагающей $I_{1\mu}$ к эффективному значению переменной слагающей первичного тока $I_{1\mu}$. При первичном токе, содержащем изменяющиеся во времени апериодическую и периодическую слагающие, с достаточной точностью можно определить k_{μ} для каждого полупериода или периода по тому же выражению (3). Например, зависимость коэффициента k_{μ} от времени для броска тока намагничивания, изображенного на рис. 3, а, дана на рис. 3, б. В этом случае при $t=0$ $k_{\mu} \approx \sqrt{2}$. При установившемся токе намагничивания (ток холостого хода) $k_{\mu} = 0$.

При мощных трансформаторах тока в некоторых случаях кривая броска намагничивающего тока даже несколько отрывается от оси времени, чему соответствует $k_{\mu} > \sqrt{2}$. При мало-мощных трансформаторах тока броски, как правило, смещены частично относительно оси времени, чему соответствуют в первый момент $k_{\mu} < \sqrt{2}$.

Уменьшение k_{μ} при затухании броска тока намагничивания сопровождается уменьшением переменной составляющей этого тока. Каждому значению k_{μ} соответствует некоторый ток $I'_{1\mu}$. Кривая 1 рис. 4 дает максимальные из возможных значения $I'_{1\mu}$. Для предотвращения ложного действия защиты необходимо, чтобы кривая зависимости $I'_{1\mu} = f(k_{\mu})$ лежала выше кривой $I_{1\mu} = f(k_{\mu})$. Экспериментальные данные не позво-

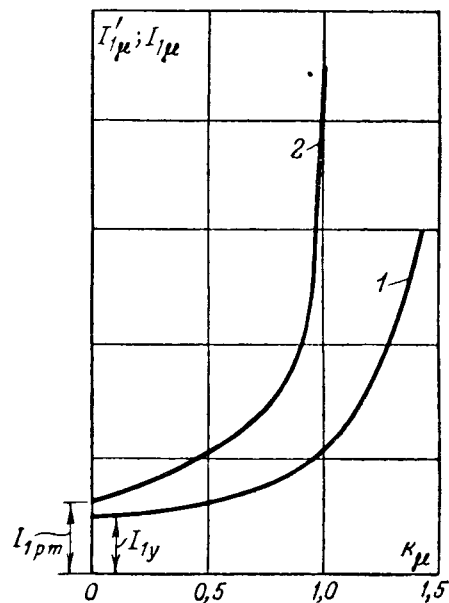


Рис. 4.

1 — зависимость переменной слагающей $I'_{1\mu}$ броска тока намагничивания; 2 — зависимость переменной слагающей первичного тока $I_{1\mu}$ при трогании реле от коэффициента смещения k_{μ} ; I_{1pm} — первичный ток трогания реле, включенного через трансформатор при симметричном переменном токе; I_{1y} — установившийся ток холостого хода.

ляют с достаточной степенью точности построить кривые вида 1 рис. 4 для различных условий, чему препятствует большое число факторов, влияющих на эту характеристику. Учитывая, что при коротком замыкании в зоне защиты через небольшой промежуток времени можно считать $k_{\mu} \approx 0$, следует стремиться к возможно резкому возрастанию кривой 2, иначе говоря к возможно более высоким показателям $\epsilon = \frac{I'_{1\mu}}{I_{1\mu}}$

для каждого значения k_{μ} .

Испытание при подмагничивании постоянным током и бросках тока намагничивания. Для испытаний были выполнены трансформаторы с магнитопроводами из трансформаторной стали, холоднокатаной стали высокой проницаемости (ХВП) и молибденового пермаллоя. Помимо первичной обмотки переменного тока w_1 , была намотана подмагничивающая обмотка постоянного тока w'_1 (рис. 5). В цепь обмотки w'_1 был включен дроссель D для запираания индуктированного в ней переменного тока. К вторичной обмотке с числом витков w_2 была подсоединена нагрузка с углом $\varphi_n = 60^\circ$, что соответствует углу электромагнитных реле серии ЭТ-520.

Для более точного измерения индукции намагничивалась тонким проводом измерительная обмотка с числом витков $w'_2 = w_2$. Индукция определялась путем подсчета по показаниям высокоомного вольтметра, включенного на измерительную обмотку. Обмотка w'_2 располагалась

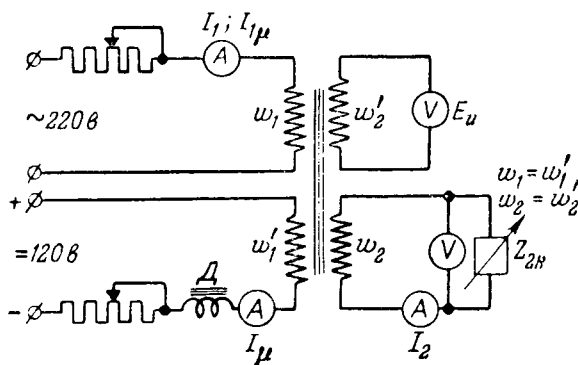


Рис. 5. Схема испытаний быстродействующих трансформаторов при подмагничивании постоянным током.

в непосредственной близости к магнитопроводу в целях снижения эффекта рассеяния.

Были сняты характеристики $\varepsilon = f(\alpha)$ для нескольких значений B_m и показателя k_μ , а также характеристики $\varepsilon = f(k_\mu)$ для нескольких значений B_m и α .

Пример семейства характеристик $\varepsilon = f(\alpha)$ для $k_\mu = 1$, снятых на трансформаторе с магнитопроводом из стали ХВП, приведен на рис. 6. Характеристики $\varepsilon = f(\alpha)$ для других исследованных материалов аналогичны рис. 6, т. е. для каждого материала и значения B_m имеется максимум показателя ε при некотором α . Величина k_μ мало влияет на значения B_m и α , при которых ε достигает максимального значения, иначе говоря кривая $\varepsilon = f(k_\mu)$ для некоторых значений B_m и α лежит выше, чем аналогичные кривые для других значений B_m и α , не пересекаясь с ними. Значения B_m и α , при которых ε имеет наибольшую величину, очевидно, и являются оптимальными. Сравнительные результаты испытаний трансформаторов приведены в табл. 1.

Наивысший эффект с точки зрения величины ε дает применение молибденового пермаллоя. Для более точного исследования зависимости показателя

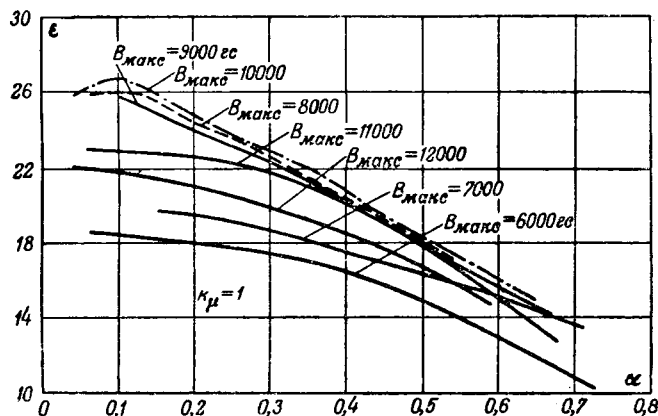


Рис. 6. Характеристики $\varepsilon = f(\alpha)$ при $k_\mu = 1$ в различных значениях $B_{макс}$ при трогании реле для трансформаторов из стали ХВП.

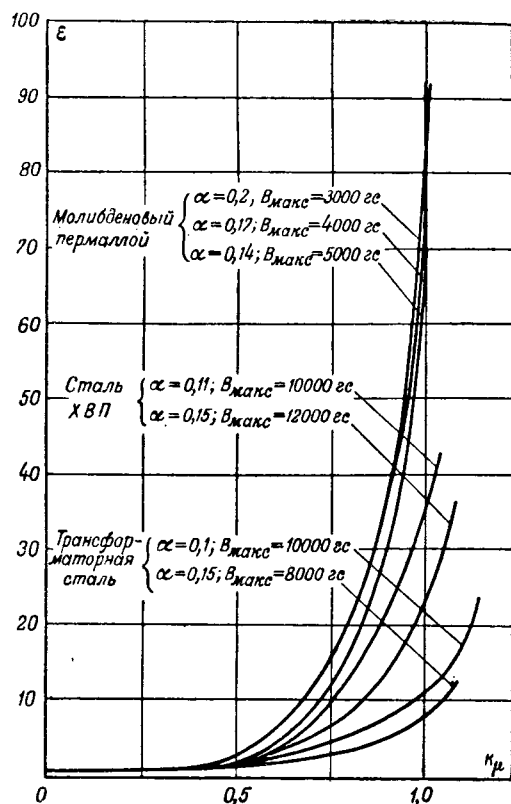


Рис. 7. Характеристики $\varepsilon = f(k_\mu)$ для трансформаторов из различных материалов.

Таблица

Материал магнитопровода	Оптимальные параметры		Показатель ε	
	$B_m, \text{ кгс}$	α	$k_\mu = 1$	$k_\mu = 1$
Молибденовый пермаллой	3...4	0,14	84...87	2,5
Сталь ХВП	9...10	0,1 0,12	22,5...35	2
Трансформаторная сталь	9...10	0,1 0,15	7,5...10,7	1,4

теля ε от коэффициента смещения k_μ при B и α , близких к оптимальным, были сняты характеристики

$$\varepsilon = f(k_\mu) \text{ при } B_m = \text{const и } \alpha = \text{const.}$$

Характеристики $\varepsilon = f(k_\mu)$ для трансформаторной стали, стали ХВП и молибденового пермаллоя приведены на рис. 7. Из кривых рис. 7 очевидно преимущество по показателю ε молибденового пермаллоя и затем стали ХВП.

Для проверки правильности выбора параметров трансформатора на основании испытаний при подмагничивании постоянным током было проведено испытание при бросках тока намагничивания. Были изготовлены трансформаторы из трансформаторной стали, стали ХВП и молибденового пермаллоя. Трансформаторы из сталей питаются реле ЭТ-521/0,2 с уставкой тока трогания 0,15 А. Для уменьшения размеров трансформаторов

из пермаллоя в качестве нагрузки было использовано высокочувствительное реле ЭТД-551/40 с уставкой 0,03 а. Обмоточные данные выбирались так, что первичный ток трогания всех реле был одинаков и составлял 2,5 а.

Для одновременной проверки правильности выбора параметров по методу ЦНИЭЛ было испытано реле ЦНИЭЛ, в котором использовано реле ЭТ-521/0,2 с уставкой 0,15 а. Отпайка первичной обмотки выбиралась из условия получения первичного тока трогания 2,5 а. Таким образом, все трансформаторы, помимо трансформатора из пермаллоя, были испытаны в одинаковых условиях как по величине первичного тока трогания и тока трогания реле, так и по изменению их нагрузки. Трансформатор из пермаллоя испытывался при другой нагрузке. Однако, как указывалось выше, при изменении нагрузки сохранения значений B_m и α неизменными условия работы быстронасыщающегося трансформатора не меняются.

Первичные обмотки всех трансформаторов были соединены последовательно с обмоткой нагрузочного лабораторного трансформатора. Питание схемы производилось от потенциал-регулятора с напряжением до 600 в. Установившийся ток холостого хода нагрузочного трансформатора при 600 в составлял 1,2 а — порядка половины первичного тока трогания реле. Включение цепи производилось толчком при помощи промежуточного реле. Осциллографировался первичный и вторичные токи и фиксировалось замыкание контактов реле. Лабораторный трансформатор включал в первый момент полностью смещенные полюсы тока намагничивания ($k_\mu = \sqrt{2}$), величина которых зависела от напряжения и момента включения трансформатора.

Установившийся ток холостого хода регулировался изменением подводимого напряжения. Для испытаний при неполностью смещенных полюсах тока параллельно обмотке нагрузочного трансформатора включался реостат, регулирование которого изменялась степень смещения первоначального броска тока. Результаты осциллографирования приведены в табл. 2. В таблице — число срабатываний; i_2^* — максимальное значение вторичного тока в долях тока трогания;

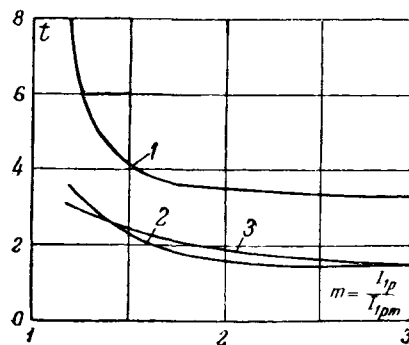


Рис. 8. Характеристики зависимости времени действия от тока реле, включенных через быстронасыщающиеся трансформаторы.

1 — пермаллой; 2 — ХВП; 3 — трансформаторная сталь.

I_1^* — отношение установившегося тока к первичному току трогания.

Были рассмотрены случаи, соответствующие включению трансформатора на холостой ход при $k_\mu = \sqrt{2}$; $k_\mu < \sqrt{2}$ и при коротком замыкании в зоне защиты ($k_\mu = 0$).

Для проверки надежности действия реле при коротких замыканиях в зоне защиты были сняты зависимости времени действия реле от кратности первичного тока (рис. 8).

Несколько большее время действия реле при трансформаторе из пермаллоя обусловлено применением при испытаниях реле ЭТД-551/40 со сравнительно несколько большим временем срабатывания, чем реле серии ЭТ-520.

Была определена зависимость кратности вторичного тока m_2 от кратности первичного синусоидального тока m_1 для всех трансформаторов (рис. 9). Характеристики $m_2 = f(m_1)$ сняты для крайних значений рекомендуемой магнитной индукции при трогании реле, приведенных в табл. 1. Кратность вторичного тока m_2 при $m_1 = 5$ (так называемый коэффициент надежности) больше для стали ХВП (около 1,7) и меньше для трансформаторной стали (около 1,45).

Выводы. 1. Испытания при бросках тока намагничивания подтвердили, что материалы, дающие наивысший эффект при испытаниях с подмагничиванием, также дают наилучшую отстройку

Таблица 2

$I_p, а$	k_μ	I_1^*	Число опытов	Пермаллой		ХВП		Э4АА		Трансформатор ЦНИЭЛ	
				n	i_2^*	n	i_2^*	n	i_2^*	n	i_2^*
1,2	$\sqrt{2}$	0,48	10	0	0,55	0	0,6...0,7	0	0,8...0,9	0	0,85...0,93
1,5	$1... \sqrt{2}$	0,6	6	0	0,6	0	0,8	0	1,1*	0	1,2*
1,6	0,9...1,2	0,66	3	0	0,7	0	0,9	2	1,2	3	1,2
1,75	0,8...1,1	0,7	4	0	0,85	2	1,1	4	1,25	4	1,25
2,4	0,6...1	0,96	8	2	1,15	8	1,2	8	1,25	8	1,2
3,75	0	1,5	5	5	1,3	5	1,3	5	1,25	5	1,15

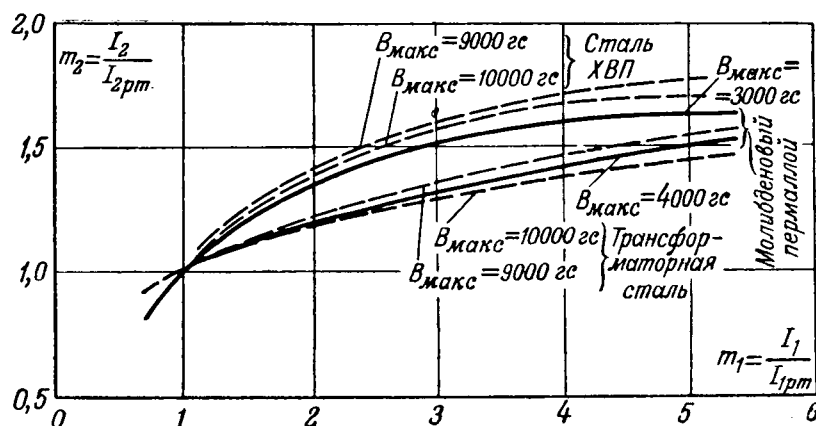


Рис. 9. Зависимость кратности вторичного тока m_2 от кратности первичного тока m_1 для трансформаторов из различных материалов.

от бросков тока, содержащих апериодические слагающие.

2. Оптимальными значениями индукции B_m и коэффициента распределения мощности α являются значения, приведенные в табл. 1.

3. Наивысший эффект даст молибденовый пермаллой.

4. Для всех исследованных материалов характер изменения показателя ϵ в функции коэффициента смещения k_μ таков, что при небольших k_μ (0,5...0,6) ϵ мало отличается от единицы. При k_μ выше 0,6 показатель ϵ начинает резко увеличиваться. Наибольшее увеличение ϵ имеет место для молибденового пермаллоя. Такой характер зависимости $\epsilon = f(k_\mu)$ является желательным, так как наибольшее значение k_μ имеет место в первый момент включения трансформаторов на холостой ход или в первые моменты внешних коротких замыканий, когда велики периодические слагающие тока и требуется наибольшее загроуление защиты.

5. По кратности вторичного тока m_2 наилучшие результаты дает сталь ХВП.

6. Широкое внедрение магнитопроводов молибденового пермаллоя может быть ограничено размерами магнитопроводов (при существующих мощностях трогания наиболее употребительных реле серии ЭТ-520), что объясняется малой удельной мощностью намагничивания пермаллоя.

Препятствием к широкому внедрению пермаллоя может также явиться сложность термической обработки и сборки. Реально пока ограничиваться на заводское производство трансформаторов с магнитопроводами из стали ХВП.

Литература

1. И. Д. Кутявин. Быстронасыщающиеся трансформаторы для дифференциальных защит. Электрические станции, № 8, 1946.
2. Н. Ф. Шишкин. Эксплуатация дифференциальной защиты силовых трансформаторов с применением ЭТ-520. Электрические станции, № 3, 1947.
3. М. И. Царев. Применение быстронасыщающихся трансформаторов в дифференциальных защитах. Электрические станции, № 8, 1948.
4. Н. Т. Кобякова. Дифференциальная защита не работающая при бросках тока намагничивания, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, МЭИ, 1949.

150. 4



О новых типах отечественных электроагрегатов для питания электрофильтров

Инж. В. Н. УЖОВ

Трест „Газоочистка“

Электрофильтры, применяемые для очистки промышленных газов от пыли и тумана, получили в Советском Союзе весьма широкое распространение. Сотни электрофильтров отечественной конструкции работают в

различных отраслях промышленности, являясь во многих случаях необходимым и важным технологическим звеном производства.

Не менее важно значение электрофильтров, устанавливаемых для очистки выбросных промышленных газов от вредных примесей в санитарных целях.

В 1949 г. Правительством издано постановление: «О мерах борьбы с загрязнением атмосферного воздуха и об улучшении санитарно-гигиенических условий населенных мест». Этим постановлением запрещено утверждение проектов строительства промышленных предприятий и электростанций, если в проектах не предусмотрены пылеулавливающие устройства. Самыми совершенными и самыми эффективными газоочистными и пылеулавливающими аппаратами являются электрофильтры.

В СССР советскими специалистами разработаны и применены ряд оригинальных и весьма совершенных конструкций электрофильтров, очищающих газы на 99,9% и являющихся образцами в технике газоочистки.

В области конструирования и применения электрофильтров Советский Союз занимает ведущее место. В качестве примера можно указать, что мокрые электрофильтры для очистки доменного газа были разработаны и впервые применены в Советском Союзе. Только после оборудования нескольких наших металлургических заводов мокрыми электрофильтрами отечественной конструкции подобные аппараты стали применяться в США.

Как известно, современные промышленные электрофильтры питаются выпрямленным током

Дан анализ схемы и конструкции выпускающегося в СССР электроагрегата АФ-18 для питания электрофильтров. На основе эксплуатационного опыта и анализа электрических характеристик существующих типов электрофильтров даются рекомендации к выпуску нескольких типов автоматизированных электроагрегатов для питания электрофильтров. Приводится принципиальная электрическая схема, рекомендуемая для новых автоматизированных электроагрегатов.

высокого напряжения. В зависимости от типа электрофильтра рабочее напряжение обычно лежит в пределах 45 000...100 000 в, а потребляемый ток в пределах 10...800 ма.

Для питания электрофильтров Министерством

электропромышленности выпускается повысительно-выпрямительный электроагрегат типа АФ-18, превосходящий по своим качествам аналогичные агрегаты, выпускаемые за границей.

Электроагрегат АФ-18 имеет следующие номинальные данные: мощность 18 ква, выпрямленное напряжение 90 кв (амплитудное значение), выпрямленный ток 200 ма, напряжение питающей сети 220—380—500 в, частота 50 гц.

Схема электроагрегата АФ-18 приведена на рис. 1.

Электроагрегат АФ-18 имеет ручное управление. Являясь в эксплуатации достаточно надежным, он удовлетворял требованиям эксплуатации, когда электрические газоочистные установки были относительно небольшими и простыми в обслуживании. За последние годы в СССР разработаны и сооружены весьма крупные электрические газоочистные установки, очищающие от 300 000 до 1 000 000 м³ и более газа в час. Таковы, например, установки для очистки дымовых газов электростанций от золы, установки для очистки доменного газа и др. Управление работой электрофильтров в этих установках автоматизировано. Количество электроагрегатов для питания электрогазоочистительных установок подобного рода доходит до 20...30 и более.

Совершенно естественно, что выпуск питающих агрегатов только типа АФ-18 является совершенно недостаточным.

Все многообразие типов электрофильтров, обладающих разными электрическими характеристиками, можно разбить на три группы и соответственно этим группам следует организовать выпуск трех типов электроагрегатов.

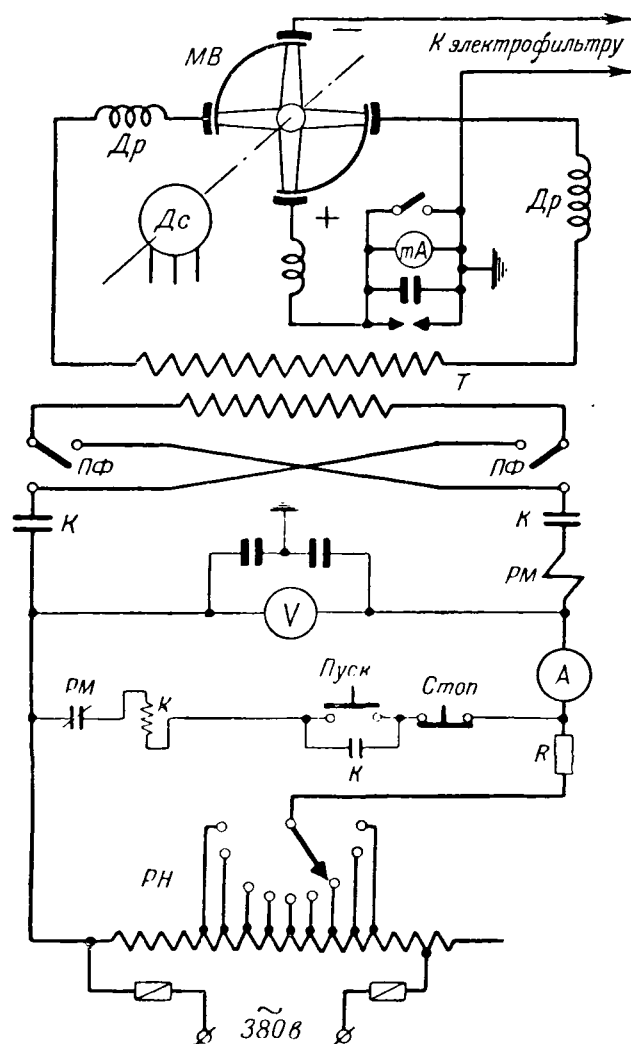


Рис. 1. Принципиальная схема электроагрегата АФ-18.

МВ — механический выпрямитель; Др — дроссель; Дс — конденсатор; Т — трансформатор; ПФ — переключатель фаз; РМ — максимальное реле; РН — регулятор напряжения; К — контактор.

Известно, что в процессе работы электрическая прочность электрофильтра изменяется вследствие изменений параметров очищаемого газа и местных накоплений уловленной пыли. Для наиболее эффективной работы электрофильтра его электроды необходимо держать под максимальным напряжением. Поэтому во время работы приходится регулировать напряжение, подаваемое на электрофильтр. У агрегата АФ-18 регулирование осуществляется с помощью автотрансформатора с коммутатором на стороне низшего напряжения без разрыва тока. Недостатками этого регулятора напряжения является то, что он дает не плавное, а ступенчатое изменение напряжения, наличие коммутатора со скользящим контактным устройством неудобно в эксплуатации и, наконец, к этому регулятору трудно приспособить автоматический привод. Наиболее целесообразным является применение бесконтактного регулятора напряжения, например, сдвоенного (чтобы не получить сдвига фаз) потенциал-регулятора с приводом, управляемым регулируемым вспомогательным двигателем. Серийное

производство таких регуляторов необходимо организовать в самое ближайшее время.

Автоматическое регулирование заданного электрического режима можно осуществить или с помощью угольного регулятора по типу, выпускаемому для регулирования напряжения генераторов, или с помощью специально сконструированного реле.

Получение высокого напряжения в агрегате АФ-18 производится трансформатором, а выпрямление переменного тока вращающимся механическим выпрямителем.

Попытка применения в качестве выпрямителя для агрегатов питания электрофильтров катодных и газотронов себя не оправдала из-за короткого срока их службы и непригодности этих аппаратов к проходящим коротким замыканиям, характерным для работы электрофильтров.

Механический выпрямитель, являясь в эксплуатации более надежным аппаратом, имеет и ряд недостатков.

1) Во время замыкания и размыкания контактов образуются перенапряжения в цепи трансформатор — выпрямитель — электрофильтр.

Эквивалентная схема этой цепи дана на рис.

В этой схеме постоянные цепи имеют примерно следующие значения: активное сопротивление электрофильтра $R = 3 \cdot 10^5 \text{ ом}$; емкость электрофильтра $C_p = 18 \cdot 10^{-8} \text{ ф}$; емкость трансформатора $C_m = 2,22 \cdot 10^{-10} \text{ ф}$; активное сопротивление трансформатора $r = 1 \cdot 10^4 \text{ ом}$; индуктивность трансформатора $L = 110 \text{ гн}$.

Как известно, для приведенной схемы справедливо следующее уравнение:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right) \frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{LC} \left(\frac{r}{R} + 1 \right) U_c = e$$

$$U_c = U_{cnp} + U_{cсв}$$

Для свободной слагающей напряжения уравнение будет иметь вид:

$$\frac{d^2 U_{cсв}}{dt^2} + \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right) \frac{dU_{cсв}}{dt} + \frac{1}{LC} \left(\frac{r}{R} + 1 \right) U_{cсв} = 0.$$

По подсчетам, произведенным С. Е. Росткинской [Л. 3], колебания, образующиеся в момент замыкания контактов механического выпрямителя,

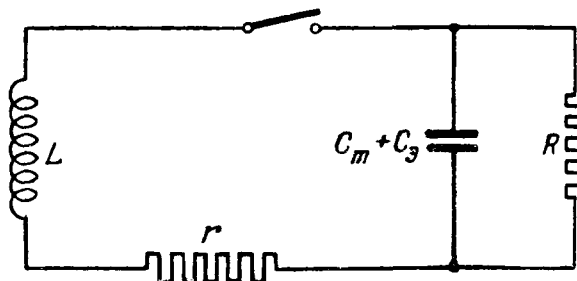


Рис. 2. Эквивалентная схема механического выпрямителя.

я, имеют частоту, превышающую частоту сети пятикратного значения. Колебания эти могут вышать напряжение в пределах 20%.

В момент обрыва тока в трансформаторе образуются колебания напряжения с частотой, 20 раз превышающей частоту сети. Под влиянием этих колебаний, непосредственно после обрыва тока, может произойти повторное замыкание. В результате повторного замыкания емкость катушки разряжается и перезаряжается. Поэтому при очередном замыкании следующего полюса искрогашение происходит при очень значительной разности напряжений. Образующиеся вследствие этого колебания имеют значительную амплитуду и могут повысить напряжение почти вдвое.

С увеличением емкости электрофильтра амплитуда колебаний увеличивается, а это приводит к тому, что уменьшается величина угла, в пределах которого выпрямитель может нормально работать (без перекрытий), поэтому при коротких электрофильтрах или при длинных кабельных линиях, питающих электрофильтр, необходимо уменьшать угол замыкания (рис. 3)

$$\beta = k + \delta - \frac{\pi}{2}.$$

Так как определить заранее оптимальный угол замыкания электрофильтра затруднительно, то М. Бамдас и Г. В. Голодолинский [Л. 1] предложили делать щетки выпрямителя из двух разлетающихся частей, что себя вполне оправдало. Величина изменяемого угла должна лежать в пределах 70...100 электрических градусов.

В целях уменьшения перенапряжений, возникающих при коммутации тока выпрямителем, главную цепь агрегата АФ-18 включается омическое сопротивление порядка 1...3 ом.

2) Вторым серьезным недостатком механического выпрямителя является наличие открытых электрических дуг, возникающих при переключениях. В этих электрических дугах происходит окисление азота воздуха в окись азота, переходящую затем в закись азота — бурый ядовитый газ. При работе нескольких электроагрегатов в одном помещении необходимо устройство специальной приточно-вытяжной вентиляции из-за опасности этих газов и их сильного коррозионного воздействия на все металлические части.

3) Существенным недостатком механического выпрямителя является относительно большое падение напряжения на выпрямителе. Величина падения напряжения колеблется от 10 до 15%. При воздушных зазорах между выпрямителями и щетками в 2,5...3,0 мм падение напряжения достигает 9...10 кВ [Л. 2]. С увеличением зазоров падение напряжения возрастает еще более.

4) Механическим выпрямителем создаются радиопомехи. Для их устранения приходится применять специальные дроссели, включаемые в цепь, идущую к электрофильтру, и экранировать помещение преобразовательной подстанции заземленной сеткой.

5) Выпрямитель, вращающийся со скоростью 1500 об/мин, требует тщательного наблюдения во время работы.

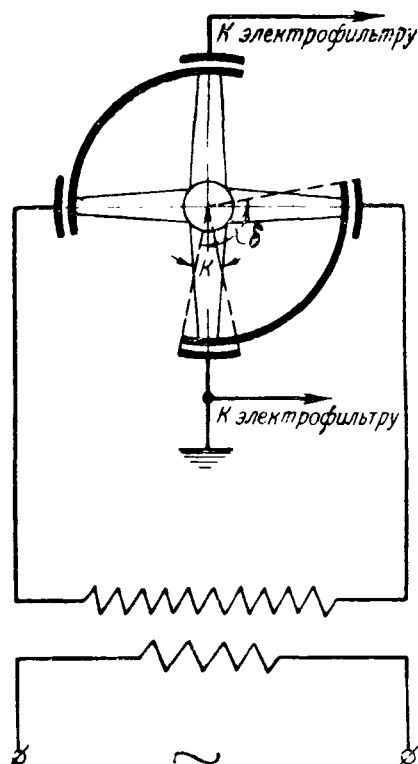


Рис. 3. Однофазный высоковольтный механический выпрямитель.

При пуске механического выпрямителя нельзя заранее указать полярность щеток, тогда как в электрофильтрах необходимо подавать минус на коронирующие электроды и плюс на осадительные, поэтому приходится применять устройства для определения полярности тока. У агрегата АФ-18 фазоуказателем служит неоновая лампа. По характеру свечения электродов неоновой лампы устанавливается переключатель фаз трансформатора.

Процесс установления требуемой полярности следует автоматизировать, например, по схеме рис. 5 (цепь ВШ — РП — СВ). Такое устройство, выполненное одним из заводов Министерства электропромышленности, вполне себя оправдало при промышленных испытаниях.

Более совершенными следует считать полупроводниковые выпрямители, а именно селеновые.

Селеновый выпрямитель свободен от всех перечисленных недостатков механического выпрямителя и имеет падающую вольтамперную характеристику, что и требуется по характеру работы электрофильтров. При селеновом выпрямителе случайные разряды в электрическом поле электрофильтра не смогут перейти в дуги короткого замыкания, так как в эти моменты будет снижаться напряжение селеновым выпрямителем, т. е. селеновый выпрямитель одновременно выполняет функции буферного сопротивления.

К организации серийного производства электроагрегатов с селеновыми выпрямителями Министерство электропромышленности должно приступить как можно быстрее.

Электрический режим электрофильтра отличается возникновением проходящих кратковременных коротких замыканий (пробоев) из-за об-

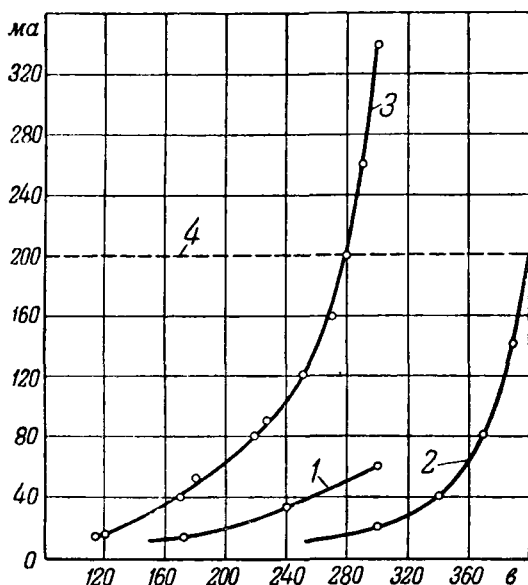


Рис. 4. Электрические характеристики наиболее распространенных типов электрофильтров, характеризующих группы.

1 — характеристика электрофильтра М-64; 2 — характеристика электрофильтра К-72; 3 — характеристика электрофильтра ДМ-156; 4 — номинальные данные электроагрегата АФ-18.

валов пыли или образования струй жидкости. При напряжении, близком к пробойному, т. е. характерному для электрофильтров, такие случайные пробои довольно часто переходят в затяжные короткие замыкания, вызывающие срабатывание защиты и отключение электроагрегата, что ведет к недопустимому пропуску неочищенного газа.

В момент возникновения кратковременных пробоев напряжение на электроfiltре должно автоматически снижаться, а после их затухания опять автоматически повышаться. Один из возможных вариантов такого устройства изображен на схеме рис. 5.

Как уже отмечалось, существующие типы электрофильтров можно разбить на три группы:

1. Электрофильтры, улавливающие туманы кислот относительно небольшой концентрации и хорошо электропроводную пыль, уголь, сажу и др. Сюда относятся электрофильтры, устанавливаемые в производствах контактной и башенной серной кислоты, на целлюлознобумажных фабриках, сажевых заводах, углеразмольных установках и углесушилках.

Эта группа электрофильтров работает при относительно высоком напряжении 60...80 кВ (амплитудное значение) и потребляет на одно электрическое поле сравнительно небольшой ток 20—80 мА.

2. Электрофильтры, улавливающие туман серной кислоты при больших концентрациях, золу при сжигании тощих углей и углей АШ, пыли цветных металлов. Сюда относятся электрофильтры, устанавливаемые в отделениях концентрирования серной кислоты на крупных электростанциях, на заводах цветной металлургии и др.

Эта группа электрофильтров работает в диапазоне напряжений 60...100 кВ и потребляет ток порядка 120...200 мА на одно электрическое поле

3. Электрофильтры, улавливающие огарковую пыль, доменную пыль мокрым способом, смолу при сжигании подмосковного угля.

Сюда относятся электрофильтры, устанавливаемые на сернокислотных заводах, при доменных печах, на газогенераторных станциях и коксохимических заводах, на электростанциях.

Эта группа электрофильтров может потреблять на одно электрическое поле ток порядка 300...350 мА при напряжении 50...60 кВ¹ (рис. 4), что электроагрегат АФ-18 не может обеспечить.

Электрические характеристики электрофильтров определяются не только величиной приложенного к электродам напряжения и потребляемым током, но и формой кривой выпрямленного напряжения.

При однофазном трансформаторе можно питать электрофильтр одно- или двухполупериодным напряжением; при трехфазном трансформаторе-выпрямителе может быть выполнен трехфазный со средней точкой или по схеме шестифазного выпрямителя.

Выбор наиболее оптимальной схемы питания зависит от технологических параметров очищаемого газа и физических свойств взвешенных в газе частиц.

Процесс электрической очистки газов в электроfiltре можно разделить на следующие стадии: зарядка взвешенных частиц; движение заряженных частиц к осадительному электроду; удержание на стенке осадительного электрода осевших частиц.

Максимальный заряд частицы

$$q = 0,19 \cdot 10^{-11} \rho^2 E,$$

где q — заряд частиц, κ ;

E — напряженность поля, В/см;

ρ — радиус частицы, см.

Максимальный заряд, который может получить частица радиуса ρ в электрическом поле, пропорционален величине напряженности поля.

Движение частицы к осадительному электроду в основном происходит под действием силы электрического поля, равной

$$F = qE = 0,19 \cdot 10^{-11} \rho^2 E^2.$$

Сила, действующая на заряженную частицу, находящуюся в электрическом поле, пропорциональна квадрату напряженности электрического поля. По достижении осадительного электрода слой пыли удерживается на нем как силами сцепления, так и электрическим полем.

Таким образом, процесс электрической очистки газов зависит в основном от величины градиента потенциала.

Градиент потенциала (при неизменных размерах электродов) является функцией тока короны и, например, для трубчатого электрофильтра при питании постоянным током выражается

¹ Приведенные величины электрического режима электрофильтров относятся к питанию их током от двухполупериодного выпрямителя.

для воздуха следующей зависимостью:

$$E_x = \sqrt{\frac{2i_0\gamma}{k} + \left(\frac{r}{x}\right)^2 \left(E_0^2 - \frac{2i_0\gamma}{k}\right)} [\text{в/см}],$$

$$\text{ток короны } i_0 = \frac{2k}{R^2 \ln \frac{R}{r}} U(U-U_0) \frac{1}{9} [\text{ма/м}].$$

Здесь i_0 — ток, ма/м; $k = 1,8 \dots 2,1$ — подвижность ионов, $\frac{\text{см}}{\text{сек}} \frac{\text{в}}{\text{см}}$; r — радиус коронирующего электрода, см; $\gamma = 9 \cdot 10^6$; $E_0 = 31\delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}}\right)$ — критический коронный градиент, в/см; $\delta \approx 1$ — относительная плотность воздуха; x — расстояние от си коронирующего электрода, см; R — радиус сачительного электрода, см; U — приложенное напряжение, кв; $U_0 = 31\delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}}\right) r \ln \frac{R}{r}$ — критическое напряжение для отрицательной короны, кв.

При питании электрофилтра имеются два принципиально различных способа повышения напряжения: путем увеличения приложенного напряжения или же применением соответствующей цепи выпрямления. Так, при трехфазном выпрямителе среднее значение выпрямленного тока при одинаковом амплитудном значении приложенного напряжения в 1,5 раза больше, а при применении однополупериодного в два раза меньше, чем в случае двухполупериодного выпрямителя.

Выбор наиболее оптимального типа механического выпрямителя должен производиться на основании данных о физических свойствах улавливаемой пыли, состава газа и электрической характеристики электрофилтра. Здесь нельзя дать рецепта на все случаи, однако можно сделать некоторые рекомендации.

1. Электрофилтры первой группы характеризуются довольно спокойной работой, потребуют относительно небольшой ток и небольшую мощность. Для этой группы основным типом следует считать двухполупериодный выпрямитель.

2. Электрофилтры второй группы могут быть разделены на две подгруппы: улавливающие хорошо проводящую и плохо проводящую пыль.

Для электрофилтров первой подгруппы основным типом механического выпрямителя следует считать двухполупериодный выпрямитель.

Для электрофилтров другой подгруппы характерно то, что время работы на поверхности адгезивных электродов скапливаются вместе пылью большие электрические заряды. Это часто приводит к образованию обратной короны и резкому ухудшению очистки. Увлажнение газа и борьбы с этим явлением не всегда возможно. В этих условиях оказывается целесообразным применение однополупериодного выпрямителя, так как при этом удлиняется время разряда слоя пыли. Одновременно удаляется, не вызывая искрообразования, увеличить напряжение на электрофилтре и улучшить очистку газа.

3. Электрофилтры третьей группы характеризуются относительно большим потреблением

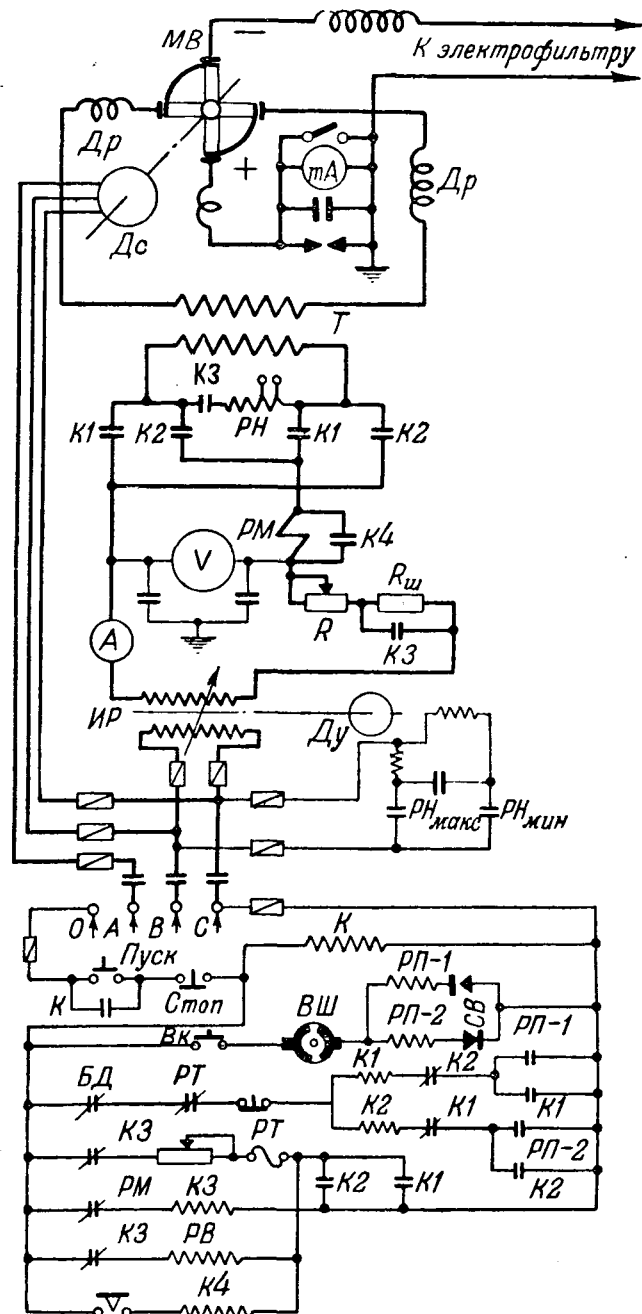


Рис. 5. Принципиальная схема автоматизированного однофазного электроагрегата для питания электрофилтра. МВ — механический выпрямитель; Др — дроссель; Дс — синхронный электродвигатель; Т — трансформатор; ИР — индукционный регулятор напряжения; К — контактор; РМ — максимальное реле; СВ — селеновый выпрямитель; РВ — реле времени; РП — реле промежуточное; ВШ — выпрямительная шайба; БД — блокировка двери; Ду — двигатель управления; РН — реле напряжения; РТ — тепловое реле.

тока (до 250—350 ма на одно электрическое поле). В то же время они отличаются неспокойной работой вследствие образования проводящих цепочек пыли или жидкости.

Для этой группы электрофилтров целесообразно применение трехфазных выпрямителей. Это обусловлено тем обстоятельством, что однофазный выпрямитель может надежно работать при токах, не превышающих 200 ма; при больших токах интенсивность дуг размыкания приводит к катастрофическому износу контактных частей и заеданию дуг. Коммутация у трехфазного

выпрямителя значительно лучше. Кроме того, трехфазные агрегаты экономичнее по затратам меди, стали и обеспечивают равномерную загрузку питающей сети.

Произведенный анализ позволяет сделать вывод о необходимости выпуска отечественной промышленностью трех типов (А, Б, В) автоматизированных электроагрегатов для электрофильтров для питания от сети 220, 380 и 500 в со следующими номинальными данными.

Тип	А	Б	В
Номинальные данные			
Тип выпрямителя	Двух-полупериодный	Одно и двух-полупериодный	Трех-фазный
Мощность на стороне высшего напряжения, <i>кв</i> а . .	7	18	30
Выпрямленный ток, <i>ма</i> . .	75	200	450
Амплитудное напряжение после выпрямителя, <i>кв</i> .	100	100	78

На рис. 5 дана схема электроагрегата с автоматическим пуском заданной полярности, поддержанием на электрофилтре заданного напряжения и понижением напряжения в моменты образования искровых разрядов в электрофилтре с последующим восстановлением напряжения. Его работа происходит следующим порядком.

Нажатием кнопки «пуск» включается главный контактор *К*. Напряжение подается на электродвигатель *Дс* и регулятор напряжения *ИР*, одновременно включается контактор *КЗ*, шунтирующий сопротивление $R_{ш}$. Кнопкой *Вк* подается напряжение на высоковольтный трансформатор. При этом замыкается цепь одного из реле: *РП1* или *РП2*, питающихся через синхронно вращающуюся коллекторную шайбу, сидящую на валу *Дс*, и через селеновые выпрямители *СВ*. В зависимости от направления тока в этой цепи замкнется цепь катушки одного из контакторов *К1* или *К2*, который подаст через трансформатор напряжение на электрофилтр требуемой полярности.

Необходимая величина напряжения на электрофилтре автоматически поддерживается с помощью реле напряжения *РН* с двумя контактами — максимальным, минимальным — и вспомогательным двигателем *Ду*, действующим на регулятор напряжения.

При возникновении пробоев в электрофилтре и повышении тока сверх установленной величины сработает реле максимального тока *РМ* и своими нормально закрытыми контактами разомкнет

цепь катушки контактора *КЗ*. В цепь трансформатора будет введено сопротивление $R_{ш}$. Напряжение на трансформаторе автоматически снизится на величину падения напряжения в сопротивлении $R_{ш}$ и дуга должна погаснуть. Одновременно с отключением контактора *КЗ* возбуждается реле времени *РВ*, питающееся через нормально закрытые контакты контактора *КЗ*, и через установленное время замкнет цепь катушки контактора *К4*. Последний зашунтирует реле максимального тока *РМ*, которое придет в исходное положение и замкнет своими нормально закрытыми контактами цепь катушки контактора *КЗ*; тем самым зашунтируется сопротивление $R_{ш}$ и отключит реле времени *РВ* и контактор *К4*. Напряжение на трансформаторе (электрофилтре) будет восстановлено. Если дуга в электрофилтре не погасла, цикл автоматического снижения напряжения на электрофилтре повторится.

При отключении контактора *КЗ* замыкается цепь теплового реле *РТ*. При повторении цикла снижения напряжения сверх установленного предела (3...4) биметаллический элемент реле *РТ* отключит цепь трансформатора. Электрофилтр будет выключен, и дежурный персонал оповещен звуковым и световым сигналом.

Массовое внедрение в промышленность высокоэффективных газоочистных аппаратов — электрофильтров с различными характеристиками вызывает необходимость выпуска также нескольких типов электроагрегатов для их питания. Лучшим типом выпрямителя для электрофильтров следует считать селеновый. До разработки и освоения промышленностью электроагрегатов с селеновыми выпрямителями необходим выпуск электроагрегатов с механическими выпрямителями трех видов: 1) 7 кв, 75 ма, 100 кв; 2) 18 кв, 200 ма, 100 кв; 3) 30 кв, 450 ма, 78 кв.

Первые два вида в однофазном исполнении, а третий — в трехфазном.

Литература

1. А. М. Бамдас. Трансформаторно-выпрямительные агрегаты для электрической очистки газов. Госэкогиздат, 1945.
2. С. П. Жебровский. Электрофильтры. Госэкогиздат, 1950.
3. С. Е. Ростковская. Успехи рентгентехники. вып. I, 1937.
4. В. Н. Ужов. Обслуживание электрофильтров. Геохимиздат, 1944.
5. В. Н. Ужов. К статье Ю. В. Баймакова „Интегрированные электрические фильтры для пылеулавливания“. Электричество, № 4, 1948.
6. Б. Л. Шнейерсон. Электрическая очистка газов. Металлургиздат, 1950.

[12. 1. 14]



Определение к. п. д. и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей при непрерывно меняющейся нагрузке

Кандидат техн. наук Л. И. ШТУРМАН и кандидат техн. наук О. И. ЗОЛОТАРЕВ

Всесоюзный нефтяной научно-исследовательский институт

В ряде установок асинхронные двигатели работают при непрерывно меняющейся нагрузке, например, в приводе станков качалок для

добычи нефти на нефтяных промыслах. Для оценки экономичности различных типов асинхронных двигателей необходимо знание к. п. д. и $\cos \varphi$ на таком рода нагрузки. Знание действительных значений к. п. д. и $\cos \varphi$ для этих случаев также необходимо для правильного подсчета величины потребляемой энергии, мощности трансформаторов и расчета электрических сетей.

Имеется большое число работ, посвященных изучению работы асинхронных двигателей при переменной нагрузке. В некоторых определяются только потери [Л. 1], а формул для к. п. д. нет; в других работах приведены формулы к. п. д. для одного частного случая [Л. 2] или же предлагаются формулы, для пользования которыми необходимо проведение довольно сложных вычислений [Л. 3]. Общие формулы для $\cos \varphi$ асинхронного двигателя при переменной нагрузке рассмотрены в ограниченном числе работ [Л. 3, 5].

В настоящей работе выводятся простые формулы эксплуатационных значений к. п. д. и коэффициента мощности, для пользования которыми достаточно знания коэффициента формы кривой нагрузки и значений к. п. д. и $\cos \varphi$ двигателя при неизменной по времени нагрузке.

Имеется переменная нагрузка, являющаяся заданной функцией времени: $P_2 = f(t)$, где P_2 — мгновенное значение полезной мощности на валу асинхронного двигателя.

Пользование общеизвестной формулой для

$$\eta_u = \frac{\int_0^t P_2 dt}{\int_0^t \frac{P_2}{\eta} dt} \quad (1) \quad \text{и}$$

Выводятся формулы для к. п. д. и $\cos \varphi$ асинхронного двигателя при непрерывно меняющейся нагрузке, позволяющие судить об экономичности различных типов двигателей, если известны к. п. д. и $\cos \varphi$ при неизменной по времени нагрузке и коэффициент формы кривой мощности на валу двигателя.

чающихся случаев, когда величина k — коэффициент формы кривой нагрузки, может быть вычислена аналитически. Например, график нагрузки

ки уравновешенных станков-качалок с достаточной точностью может быть представлен суммой постоянной составляющей и синусоиды. В ряде других случаев коэффициент k известен, так как знание его необходимо для производства других расчетов. Во всех этих случаях нижеприводимые формулы представляют существенные преимущества по сравнению с формулой (1).

Коэффициент формы кривой полезной мощности

$$k = \frac{P_{2k}}{P_{2c}},$$

где P_{2k} и P_{2c} — соответственно, среднеквадратичное и среднее значение полезной мощности.

Для определения действительного к. п. д. за цикл исходим из равенства:

$$\eta_u = \frac{P_{2c}}{P_{2c} + Q}, \quad (2)$$

где Q — среднее за цикл значение потерь при переменной нагрузке.

Полагаем, что двигатель выбран по среднеквадратичной мощности. Для общности считаем, что $P_{2k} < P_{2н}$, где $P_{2н}$ — номинальная мощность двигателя.

Обозначим η_x — к. п. д. двигателя при полезной мощности, равной P_{2k} и постоянной по времени нагрузке. Тогда

$$Q = \frac{1 - \eta_x}{\eta_x} P_{2k} \quad (3)$$

$$\eta_u = \frac{\eta_x}{\eta_x + (1 - \eta_x) k}. \quad (4)$$

к. п. д. за цикл может быть значительно облегчено для тех частных, практически часто встречающихся случаев, когда величина k — коэффициент формы кривой нагрузки, может быть вычислена аналитически. Например, график нагрузки

Формула (4) указывает характер изменения к. п. д. при непрерывно меняющейся нагрузке

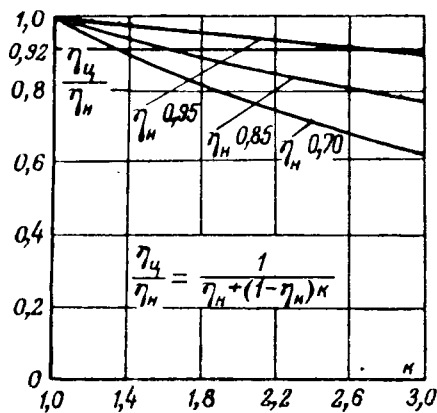


Рис. 1. Зависимость отношения к. п. д. за цикл к номинальному к. п. д. от коэффициента формы k .

в зависимости от коэффициента формы кривой мощности на валу двигателя.

Из этой же формулы видно, что $\eta_{\text{ц}}$ существенно зависит как от величины коэффициента формы кривой k , так и от величины $\eta_{\text{к}}$. Если в области высоких значений $\eta_{\text{к}}$ (например, 0,95) к. п. д. мало зависит от k при его изменении в широких пределах, то в области низких значений $\eta_{\text{к}}$ (например, 0,7) изменение $\eta_{\text{ц}}$ значительно.

На рис. 1 представлена зависимость $\eta_{\text{ц}}$ от $\eta_{\text{к}}$ и k для частного случая, когда $P_{2\text{к}} = P_{2\text{н}}$ и $\eta_{\text{к}} = \eta_{\text{н}}$, где $\eta_{\text{н}}$ — к. п. д. двигателя при постоянной по времени номинальной нагрузке.

Формула (4) и кривые рис. 1 дают возможность сравнить к. п. д. двигателей с нормальным и повышенным скольжением при $P_{2\text{к}} = P_{2\text{н}}$. Как известно, двигатели с повышенным скольжением имеют большие потери, а следовательно, более низкий к. п. д., чем двигатели с нормальным скольжением при постоянной по времени нагрузке. Однако эти двигатели при правильном выборе и использовании маховых масс могут сохранить постоянную мощность на валу при переменной нагрузке, иначе говоря, двигатель с повышенным скольжением может быть выбран так, чтобы он работал при значении k , близком к единице. Тогда

$$P_{2\text{с.н}} = P_{2\text{к.н}} = P_{2\text{н.н}},$$

где индекс n показывает, что данные величины написаны для двигателя с повышенным скольжением.

Можно принять, что к. п. д. двигателя с повышенным скольжением в среднем на 8 % ниже к. п. д. двигателя с нормальным скольжением при постоянной номинальной нагрузке. Для соответствующим образом подобранного двигателя с повышенным скольжением $\eta_{\text{цн}} = \eta_{\text{нн}}$, поэтому $\eta_{\text{цн}}$ может быть представлен на рис. 1 горизонтальной линией. Это позволяет судить, при каких значениях $\eta_{\text{к}}$ и k тот или иной двигатель имеет более высокий к. п. д.

Формула (4) дает возможность вычислить к. п. д. различных типов асинхронных двигателей при непрерывно меняющейся нагрузке, для решения вопроса об экономичности той или иного типа двигателя необходимо еще знание коэффициента мощности. Под коэффициентом мощности при непрерывно меняющейся нагрузке $\cos \varphi_{\text{ц}}$ следует понимать такую величину, которая дает возможность определить среднее квадратичное значение потребляемого этим двигателем тока $I_{1\text{к.ц}}$.

Тогда

$$I_{1\text{к.ц}} = \frac{P_{1\text{с}}}{m U_1 \cos \varphi_{\text{ц}}},$$

где $P_{1\text{с}}$ — средняя величина активной мощности за один цикл;

m — число фаз;

U_1 — фазное напряжение на зажимах двигателя.

На основании ранее приведенных соображений:

$$P_{1\text{с}} = \frac{P_{2\text{с}}}{\eta_{\text{ц}}} = \frac{P_{2\text{к}}}{k \eta_{\text{ц}}},$$

тогда

$$I_{1\text{к.ц}} = \frac{P_{2\text{к}}}{k \eta_{\text{ц}} m U_1 \cos \varphi_{\text{ц}}}.$$

При постоянной по времени нагрузке двигателя

$$I_{1\text{к}} = \frac{P_{2\text{к}}}{\eta_{\text{к}} m U_1 \cos \varphi_{\text{к}}}.$$

Сравнив выражения для $I_{1\text{к.ц}}$ и $I_{1\text{к}}$ из (5) и при непрерывно меняющейся и эквивалентной постоянной по времени нагрузке, получим:

$$\cos \varphi_{\text{ц}} = \cos \varphi_{\text{к}} \frac{\eta_{\text{к}}}{k \eta_{\text{ц}}}.$$

Подставив сюда $\frac{\eta_{\text{к}}}{\eta_{\text{ц}}}$ из формулы (4), найдем

$$\cos \varphi_{\text{ц}} = \cos \varphi_{\text{к}} \left(\frac{\eta_{\text{к}}}{k} + 1 - \eta_{\text{к}} \right).$$

Представляет интерес сравнить формулу с аналогичной формулой В. А. Шубенко [Л], полученной значительно более сложным путем и несколько более сложной.

Пользуясь круговой диаграммой и введя ряд допущений, В. А. Шубенко вычисляет значения реактивной A_p и активной A_a энергии за время t . Затем определяется

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{ц}} = \frac{A_p}{A_a} \text{ и } \cos \varphi_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{ц}}}}.$$

Из формул В. А. Шубенко можно получить после простых преобразований в наших обозначениях:

$$\cos \varphi_{\text{ц}} = \cos \varphi_{\text{к}} \left(\frac{\eta_{\text{к}}}{k} + 1 - \eta_{\text{к}} \right) \times \sqrt{\frac{1}{1 + \left[\left(1 - \frac{1}{k} \right) \eta_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}} \right]^2}}.$$

формула, по указанию ее автора, может давать ошибку до 5—7 %. Легко убедиться, что разница между формулами (7) и (8) не выходит за пределы точности последней для практически встречающихся значений η_x , $\cos \varphi_x$ и k .

Отношение $\frac{\cos \varphi_u}{\cos \varphi_n}$ для частного случая, когда $P = P_{2n}$ и $\cos \varphi_x = \cos \varphi_n$, представлено на рис. 2, как функция от k .

Очевидно, что при $k > 1$, иначе говоря, при непрерывно меняющейся нагрузке, $\cos \varphi_u < \cos \varphi_n$. Двигатель с повышенным скольжением выбран так, что для него $P_{2c} = P_{2k} = P_{2n}$ ($k = 1$), будет работать с постоянным $\cos \varphi_u = \cos \varphi_n$. Если учесть, что двигатель с повышенным скольжением имеет $\cos \varphi_n$ не ниже, чем двигатель с нормальным скольжением, то при непрерывно меняющейся нагрузке коэффициент мощности будет выше у двигателей с повышенным скольжением.

Характерной величиной является выражение

$$\frac{\eta_u}{\eta_x} \cdot \frac{\cos \varphi_u}{\cos \varphi_x} = \frac{1}{k}, \quad (9)$$

полученное на основании (4) и (7) и представленное в виде функции k на рис. 3 для $P_{2k} = P_{2n}$, $\eta_x = \eta_n$ и $\cos \varphi_x = \cos \varphi_n$.

Двигатель с повышенным скольжением имеет к. п. д., равный примерно 0,9 от к. п. д. двигателя с нормальным скольжением. При повышенном скольжении $\cos \varphi$ двигателя остается постоянным и практически он не меньше, чем $\cos \varphi_n$. Очевидно, при $k < 1,1$ энергетические показатели выше у двигателя с нормальным скольжением, а при $k > 1,1$ они могут быть больше для двигателя с повышенным скольжением.

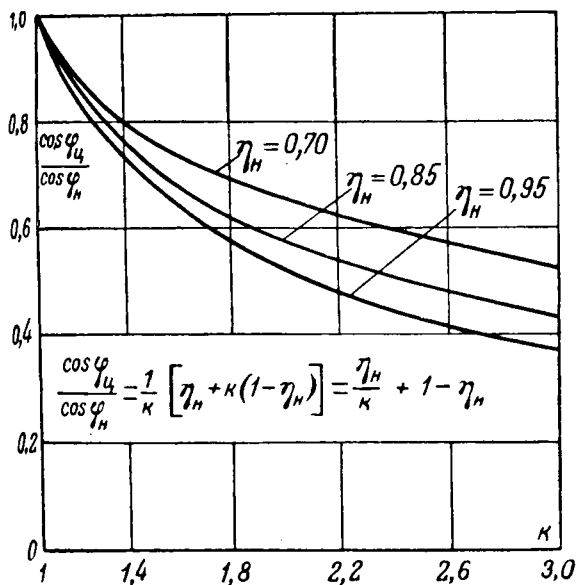


Рис. 2. Зависимость отношения $\frac{\cos \varphi_u}{\cos \varphi_n}$ от коэффициента

формы k при разных номинальных к. п. д. $\eta_n = 0,4$;

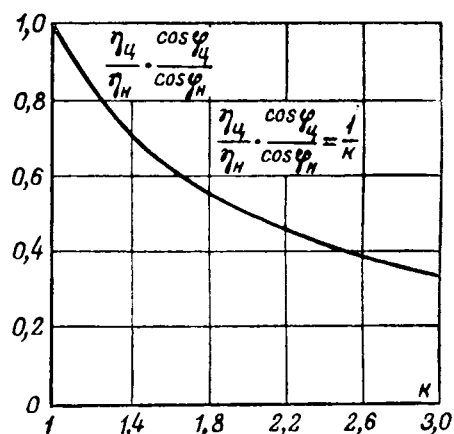


Рис. 3. Зависимость отношения $\frac{\eta_u \cos \varphi_u}{\eta_n \cos \varphi_n}$ от коэффициента формы k .

Выведенные формулы дают возможность относительно просто производить количественную оценку экономичности того или иного типа асинхронного двигателя для привода различных механизмов с непрерывно меняющейся нагрузкой.

Значения η_x и $\cos \varphi_x$ можно определить по характеристикам двигателей или известным расчетным путем [Л. 3, 4].

Пример. Рассмотрим асинхронные двигатели единой серии А с нормальным (АОП-51-4) и с повышенным (АОС-51-4) скольжением в случае привода современного станка-качалки. Каталожные данные двигателей для номинального режима приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип двигателя	P_n , кВт	U , в	I_n , а	n_n , об/мин	s_n , %	η_n	$\cos \varphi_n$	$\eta_n \cos \varphi_n$
АОП-51-4	4,5	380	9,5	1 440	4	0,845	0,85	0,72
АОС-51-4	3,8	380	8,5	1 290	14	0,772	0,855	0,66

В табл. 1 приведены данные для длительной номинальной мощности 3,8 кВт двигателя АОС-51-4. Изменения η и $\cos \varphi$ рассматриваемых двигателей в зависимости от нагрузки приведены в табл. 2 (по данным Технического отдела Главэлектромашпрома МЭП).

Таблица 2

Нагрузка, кВт	АОП-51-4			АОС-51-4		
	η	$\cos \varphi$	$\eta \cos \varphi$	η	$\cos \varphi$	$\eta \cos \varphi$
4,5	0,845	0,85	0,718	—	—	—
4,0	0,856	0,838	0,717	—	—	—
3,8	0,858	0,821	0,705	0,772	0,855	0,66
3,6	0,861	0,823	0,708	0,775	0,838	0,65
3,4	0,862	0,81	0,70	0,777	0,82	0,637
3,2	0,862	0,795	0,695	0,777	0,81	0,628

Примем в соответствии с экспериментальными данными типичные для станков глубоконасосных установок коэффициенты формы кривой:

для двигателя с нормальным скольжением

для двигателя с повышенным скольжением

$$k_n = 1,05.$$

Тогда для двигателя с нормальным скольжением

$$P_{2c} = \frac{P_{2n}}{k} = \frac{4,5}{1,4} = 3,2 \text{ кВт};$$

$$\eta_{\text{ц}} = 0,794.$$

Активная мощность, потребляемая двигателем,

$$P_{1c} = \frac{3,2}{0,749} = 4,03 \text{ кВт}.$$

Полная мощность, потребляемая двигателем,

$$\frac{P_{1c}}{\cos \varphi_{\text{ц}}} = \frac{4,03}{0,645} = 6,25 \text{ кВА},$$

где $\cos \varphi_{\text{ц}} = 0,645$ вычислен по формуле (7).

Потери в линиях и питающей системе примем равными 10% от потребляемой двигателем мощности, т. е. 0,626 кВт.

Для двигателя с повышенным скольжением при $P_{2c} = 3,2 \text{ кВт}$ получим $P_{2k} = 3,2 \cdot 1,05 \approx 3,4 \text{ кВт}$.

Двигатель необходимо выбрать с $P_{2n} = 3,8 \text{ кВт}$ и длительной нагрузке, так как следующая меньшая мощность для серии А недостаточна. Для вычислений следует принять $\eta_{\text{х}} = 0,777$ и $\cos \varphi_{\text{х}} = 0,82$, соответствующие табл. 2 мощности $P_{2k} = 3,4 \text{ кВт}$. Результаты вычислений сведены в табл. 3.

Проведенный расчет показывает, что двигатель с повышенным скольжением в рассматриваемом случае выгоднее двигателя с нормальным скольжением, хотя к. п. д. при постоянной нагрузке у второго двигателя выше.

Таблица 3

Сравниваемые величины	Двигатель с нормальным скольжением	Двигатель с повышенным скольжением
P_{2c} , кВт	3,2	3,2
k	1,4	1,05
P_{2k} , кВт	4,5	3,4
P_{2n} , кВт	4,5	3,8
$\eta_{\text{х}}$	0,845	0,777
$\eta_{\text{ц}}$	0,794	0,77
$\cos \varphi_{\text{х}}$	0,85	0,82
$\cos \varphi_{\text{ц}}$	0,645	0,79
$\eta_{\text{х}} \cos \varphi_{\text{х}}$	0,718	0,636
$\eta_{\text{ц}} \cos \varphi_{\text{ц}}$	0,512	0,608
Потери в двигателе, кВт . .	0,83	0,82
$\frac{P_{2c}}{\eta_{\text{ц}} \cos \varphi_{\text{ц}}}$, кВА	6,26	5,26
Потери в питающей системе, кВт	0,626	0,526
Суммарные потери, кВт . . .	1,456...1,46	1,346...1,35
Потребляемая мощность, кВт	4,66	4,55

Литература

1. Л. Б. Гейлер. Оптимальное скольжение асинхронного двигателя при переменной нагрузке. Электричество, № 3, 1947.
2. А. А. Минин. Применение асинхронных моторов с повышенным скольжением для насосной эксплуатации. Нефтяная промышленность СССР, № 7/12, декабрь, 1948.
3. А. Т. Голован. Электропривод. Теоретические основы. Госэнергоиздат 1948.
4. Л. Б. Гейлер. Построение кривой к. п. д. электрических двигателей. Электричество, № 4, 1941.
5. В. А. Шубенко. О коэффициенте мощности и реактивной мощности электроприводов переменного тока. Сборник ВНИТОЭ, № 7, Свердловск, 1948.

[15. 9. 13]



Электромагнитный момент синхронной машины при малых качаниях

доктор техн. наук, проф. И. М. ПОСТНИКОВ, кандидат техн. наук А. И. ВАЖНОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Расчет синхронного двигателя, предназначенного для работы с пульсирующей нагрузкой, должен быть произведен особенно тщательно в отношении возможностей возникновения колебаний и их амплитуды.

Недостаточно точное определение успокоительных и синхронизирующих моментов двигателя для отдельных гармоник момента нагрузки может привести к недопустимым колебаниям тока и мощности, в результате нормальная эксплуатация установки может оказаться невозможной.

В ходе исследования, произведенные на одной из установок мощностью 4 000 квт, которая должна работать при номинальных данных в режиме резонансных колебаний, побуждают обратить внимание на некоторые существенные факты, относящиеся к теории и практике такого рода установок, в частности, на электромагнитные моменты синхронной машины установившихся качаниях. При расчетах координат и проверке их на опыте оказалось, что расчет для отдельных гармонических составляющих момента M_{ω} соответственно известному уравнению:

$$m \frac{d^2 \delta_{\omega}}{dt^2} + M_{d\omega} \frac{d \delta_{\omega}}{dt} + M_{s\omega} \delta_{\omega} = \\ = M_{\omega} \sin(\omega t + \varphi_{\omega}) \left(m = \frac{T_j}{2\pi f} \right),$$

для более точного определения коэффициентов успокоительного $M_{d\omega}$ и синхронизирующего $M_{s\omega}$ моментов, чем это принято было делать.

Здесь $M_{s\omega}$ — „статический“ коэффициент синхронизирующего момента, определяемый статической угловой характеристикой; $M_{d\omega}$ — „динамический“ коэффициент синхронизирующего момента, возникающий от дополнительных токов в обмотках при качаниях.

Даны выражения для коэффициентов синхронизирующего и успокоительного моментов синхронной машины при малых качаниях ротора. Результаты соответствуют случаю, когда по продольной оси ротора имеются две обмотки — успокоительная и обмотка возбуждения, — а по поперечной оси — только успокоительная. Выражения для коэффициентов моментов получены с помощью эквивалентных схем, позволивших упростить результат, практически не снижая точности в определении моментов синхронной машины при качаниях.

Вопросу об электромагнитных моментах синхронной машины при установившихся качаниях, установившемся скольжении и других переходных режимах посвящено весьма большое число работ. Однако окончательные расчетные формулы для

моментов или отличаются большой сложностью и малой наглядностью, или, если они выражены в простой форме, имеют весьма частный характер, например для случая отсутствия успокоительной обмотки или, наоборот, при учете действия только успокоительной обмотки (Рихтер). Между тем, в процессе качаний участвуют и успокоительная обмотка и обмотка возбуждения. Поэтому желательно иметь возможно универсальные и простые формулы для расчета.

В статье приводятся достаточно точные и удобные для применения выражения коэффициентов успокоительного и синхронизирующего моментов синхронной машины, полученные с помощью эквивалентных схем. Применяется обычная система относительных единиц за исключением того, что в качестве единицы времени выбрана секунда.

Электромагнитный момент синхронной машины. Электромагнитный момент при качаниях M_{ϕ} имеет некоторое среднее значение $M_{\phi 0}$. Это среднее значение, вообще говоря, не равно статическому моменту, определяемому по статической угловой характеристике $M_{\phi} = f(\theta)$. Однако в случае достаточно малых колебаний, когда без большой погрешности можно принять $\sin \delta \approx \delta$ (δ — малое изменение угла θ), возможно считать, что среднее значение момента при качаниях равно его статическому значению при $\theta = \theta_0$. Дополнительные моменты при качаниях, как известно, можно представить в виде суммы двух составляющих: одной, возникающей при бесконечно медленном изменении угла нагрузки на величину δ и, следовательно, при отсутствии переходных токов в роторе (при малых углах δ эта составляющая, очевидно, пропорциональна δ),

и составляющей, обусловленной переходными токами в статоре и роторе.

Примем обычные в теории синхронных машин обозначения:

- U — напряжение на статорных зажимах синхронной машины;
- E_o — э. д. с., индуцированная в статорной обмотке основным полем полюсов;
- θ — угол нагрузки;
- $x_d(p)$ и $x_q(p)$ — операторные индуктивности по продольной и поперечной осям машины;
- x_d и x_q — синхронные индуктивности по продольной и поперечной осям машины.

Считая напряжение, приложенное к обмотке возбуждения, неизменным, активное сопротивление статорной обмотки равным нулю и пренебрегая квадратами малого приращения угла, можно получить известное выражение электромагнитного момента в виде:

$$M_\psi = \frac{UE_o}{x_d} \sin \theta_o + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta_o + \\ + \left[\frac{UE_o}{x_d} \cos \theta_o + U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta_o \right] \delta + \\ + U^2 \left\{ \cos^2 \theta_o \left[\frac{1}{x_q(p)} - \frac{1}{x_q} \right] + \right. \\ \left. + \sin^2 \theta_o \left[\frac{1}{x_d(p)} - \frac{1}{x_d} \right] \right\} \delta. \quad (1)$$

Из (1) находим среднее значение момента

$$M_{\psi o} = \frac{UE_o}{x_d} \sin \theta_o + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta_o.$$

Дополнительный момент, возникающий при бесконечно медленном изменении угла θ , — иначе говоря, синхронизирующий момент, определяемый статической угловой характеристикой:

$$\Delta M_\psi = \left[\frac{UE_o}{x_d} \cos \theta_o + U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta_o \right] \delta = M_{sy} \delta. \quad (2)$$

Из (2) следует, что коэффициент синхронизирующего момента

$$M_{sy} = \frac{dM_{\psi o}}{d\theta_o}. \quad (3)$$

Это определение M_{sy} следует и из физических соображений. Наконец, согласно (1), дополнительный момент, обусловленный переходными токами как статора, так и ротора:

$$\Delta M'_\psi = U^2 \left\{ \cos^2 \theta_o \left[\frac{1}{x_q(p)} - \frac{1}{x_q} \right] + \right. \\ \left. + \sin^2 \theta_o \left[\frac{1}{x_d(p)} - \frac{1}{x_d} \right] \right\} \delta. \quad (4)$$

Дополнительные моменты при качаниях.
Коэффициент синхронизирующего момента M_{sy} .

Формулы (2), (3) практически неудобны, так требуют определения угла нагрузки по угловой характеристике, что, во-первых, связано с неизбежными графическими погрешностями, а второе, во-вторых, они требуют особого построения для каждого режима нагрузки и коэффициента мощности. На практике режимы нагрузки и коэффициенты мощности встречаются в различных комбинациях, и изучение зависимости M_{sy} от активной мощности и $\cos \varphi$ становится затруднительным. Возможно, однако, выразить величину M_{sy} непосредственно через среднее значение тока нагрузки I и $\cos \varphi$ и вычислить ее аналитически.

Пользуясь основной диаграммой э. д. в приложении нами показано, что без учета переходных токов в цепях ротора коэффициент синхронизирующего момента

$$M_{sy} = \frac{1}{1+b^2} \left[\frac{U^2}{x_d} \pm P_r + P_a \cdot b + \right. \\ \left. + U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) (1-b^2) \right]; \quad b = \frac{P_a}{\frac{U^2}{x_q} \pm P_r},$$

где $P_r = UI \sin \varphi$ и $P_a = UI \cos \varphi$. Знак плюс соответствует режиму перевозбуждения и минус — недовозбуждения машины.

Моменты, обусловленные переходными токами при малых установившихся качаниях. Если рассмотреть малые колебания угла θ и считать полный угол колебания δ , состоящий из ряда гармонических порядка ν , т. е. $\delta = \delta_m e^{j\nu t}$ и $\delta = \sum \delta_\nu$, то операторные индуктивности x_d и $x_d(p)$ превратятся в комплексные операторы сопротивлений:

$$\begin{aligned} x_q(p) &= x_q(j\omega_\nu) = Z_q, \\ x_d(p) &= x_d(j\omega_\nu) = Z_d, \end{aligned}$$

где ω_ν — круговая частота колебаний порядка ν .

Комплексные операторы сопротивлений Z_q и Z_d имеют известное представление в виде эквивалентных схем по продольной и поперечным осям машины, весьма основательно рассмотренные, например в [Л. 2, 5, 6].

Достаточно, обыкновенно, рассмотреть в продольной оси две обмотки и в поперечной одну (успокоительную). При этом полуэквивалентные схемы для продольной и поперечной осей, представленные на рис. 1, а. Эквивалентные схемы можно упростить известным методом вынесения намагничивающего контура [Л. 2] после чего они принимают вид, представленный на рис. 1, б. На рис. 1, а и б приняты следующие обозначения: x_{ad} и x_{aq} — сопротивления взаимной индукции статора и ротора в продольной и поперечной осях машины; x_s , x_r , x_{sd} и x_{sq} — индуктивные сопротивления рассеяния, соответственно, обмоток статора, возбуждения и

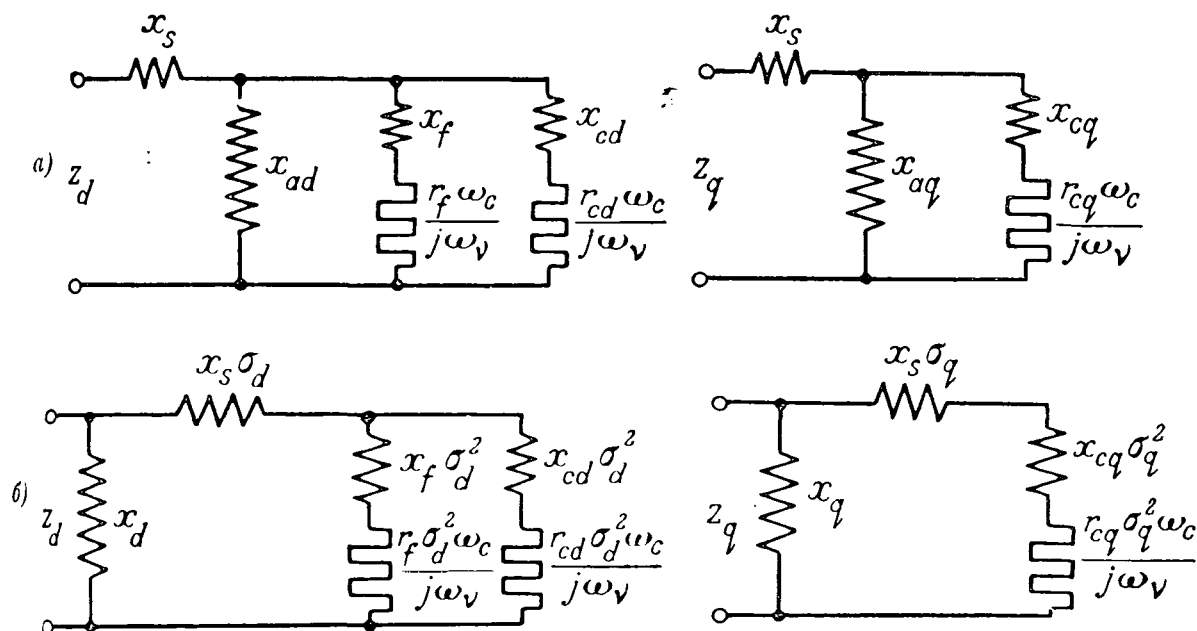


Рис. 1.

ительной обмотки в продольной и поперечной осях; r_f , r_{cd} и r_{cq} — активные сопротивления обмотки возбуждения и успокоительной обмотки их же осей.

Операторы проводимостей $\frac{1}{x_q(j\omega_v)}$ и $\frac{1}{x_d(j\omega_v)}$ по рис. 1, б могут быть записаны в виде:

$$\frac{1}{x_q(j\omega_v)} = \frac{1}{x_d} + \frac{1}{Z_{2d}} \quad \text{и} \quad \frac{1}{x_q(j\omega_v)} = \frac{1}{x_q} + \frac{1}{Z_{2q}}, \quad (6)$$

где Z_{2d} и Z_{2q} обозначены эквивалентные комплексные сопротивления вторичных цепей машины по продольной и поперечной осям.

В случае необходимости выражения для Z_{2d} и Z_{2q} могут быть получены и из точной эквивалентной схемы [Л. 6].

Таким образом, дополнительный момент от переходных токов при качаниях, учитывая (4), (5) и (6), будет иметь вид:

$$\Delta \dot{M}'_{\psi} = U^2 \left[\cos^2 \theta_o \frac{1}{Z_{2q}} + \sin^2 \theta_o \frac{1}{Z_{2d}} \right] \dot{\delta}. \quad (7)$$

Представим полные сопротивления Z_{2d} и Z_{2q} в виде:

$$Z_{2d} = x_{2d} + \frac{r_{2d} \omega_c}{j\omega_v} = x_{2d} (1 - j\rho_{dv}),$$

$$Z_{2q} = x_{2q} + \frac{r_{2q} \omega_c}{j\omega_v} = x_{2q} (1 - j\rho_{qv}),$$

где x_{2d} , r_{2d} , x_{2q} и r_{2q} — эквивалентные индуктивные и активные сопротивления вторичных цепей машины, соответственно, в продольной и поперечной осях;

ω_c — круговая частота тока статора;

$$\rho_{dv} = \frac{r_{2d} \omega_c}{x_{2d} \omega_v} \quad \text{и} \quad \rho_{qv} = \frac{r_{2q} \omega_c}{x_{2q} \omega_v},$$

причем декременты ρ_{dv} и ρ_{qv} могут быть выражены через декременты для основной гармонической колебаний ($v=1$) как:

$$\rho_{dv} = \frac{1}{v} \rho_{d1} \quad \text{и} \quad \rho_{qv} = \frac{1}{v} \rho_{q1}.$$

Тогда выражение (7) может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{M}'_{\psi} = & U^2 \left[\frac{\cos^2 \theta_o}{x_{2q}(1 + \rho_{qv}^2)} + \frac{\sin^2 \theta_o}{x_{2d}(1 + \rho_{dv}^2)} \right] \dot{\delta} + \\ & + U^2 \left[\frac{\cos^2 \theta_o}{x_{2q}(1 + \rho_{qv}^2)} \rho_{qv} + \frac{\sin^2 \theta_o}{x_{2d}(1 + \rho_{dv}^2)} \rho_{dv} \right] \times \\ & \times \frac{1}{\omega_v} \frac{d\dot{\delta}}{dt} = \Delta \dot{M}'_{\psi s} + \Delta \dot{M}'_{\psi d} = M_{sev} \dot{\delta} + M_{dv} \frac{d\dot{\delta}}{dt}. \quad (8) \end{aligned}$$

В (8) $\Delta \dot{M}'_{\psi s}$ — дополнительный синхронизирующий момент от переходных токов; M_{sev} — соответствующий коэффициент синхронизирующего момента; $\Delta \dot{M}'_{\psi d}$ — успокоительный момент от переходных токов, а M_{dv} — коэффициент успокоительного момента. Из (8) следует:

$$M_{sev} = U^2 \left[\frac{\cos^2 \theta_o}{x_{2q}(1 + \rho_{qv}^2)} + \frac{\sin^2 \theta_o}{x_{2d}(1 + \rho_{dv}^2)} \right], \quad (9)$$

$$M_{dv} = U^2 \left[\frac{\cos^2 \theta_o}{x_{2q}(1 + \rho_{qv}^2)} \rho_{qv} + \frac{\sin^2 \theta_o}{x_{2d}(1 + \rho_{dv}^2)} \rho_{dv} \right] \frac{1}{\omega_v}. \quad (10)$$

Полный коэффициент синхронизирующего момента при установившихся качаниях

$$M_{sv} = M_{sy} + M_{sev}. \quad (11)$$

Формулы (9) и (10) для определения дополнительного коэффициента синхронизирующего момента M_{sev} и коэффициента успокоительного момента M_{dv} — универсальные, так как содержат параметры x_{2d} , r_{2d} и x_{2q} , r_{2q} , эквивалентные любой схеме вторичной цепи машины в продольной и поперечной осях. Обыкновенно, однако, достаточно считать, что в поперечной оси имеется одна (успокоительная) обмотка, а в продольной оси имеется две обмотки: обмотка возбуждения и успокоительная обмотка.

В этом случае (рис. 1, б):

$$x_{2q} = \left(x_{cq} + \frac{x_s}{\sigma_q} \right) \sigma_q^2; \quad r_{2q} = r_{cq} \sigma_q^2, \quad (12)$$

где

$$\sigma_q = 1 + \frac{x_s}{x_{aq}};$$

$$\rho_{qv} = \frac{r_{2q} \omega_c}{x_{2q} \omega_v} = \frac{r_{cq} \omega_c}{\left(x_{cq} + \frac{x_s}{\sigma_q} \right) \omega_v}.$$

Параметры продольной оси могут быть удобно представлены для частного случая малых активных сопротивлений обмотки возбуждения $\left(\rho_{fv} = \frac{r_f \omega_c}{x_f \omega_v} \leq 0,05 \dots 0,2 \right)$. Если на эквивалентной схеме для продольной оси (рис. 1, б) вынести на внешние зажимы контур, определяемый параметрами обмотки возбуждения, то оказывается, что эквивалентная проводимость вторичной цепи

$$\frac{1}{Z_{2d}} = \frac{1}{x_{f\phi} (1 + \rho_{f\phi}^2)} + \frac{1}{x_{cd\phi} (1 + \rho_{cd\phi}^2)} + j \left[\frac{\rho_{f\phi}}{x_{f\phi} (1 + \rho_{f\phi}^2)} + \frac{\rho_{cd\phi}}{x_{cd\phi} (1 + \rho_{cd\phi}^2)} \right], \quad (13)$$

где эквивалентные индуктивности обмотки возбуждения ($x_{f\phi}$) и успокоительной обмотки ($x_{cd\phi}$):

$$\left. \begin{aligned} x_{f\phi} &= \sigma_d^2 \left(x_f + \frac{x_s}{\sigma_d} \right), \quad x_{cd\phi} = \sigma_d^2 \sigma_2^2 \left(x_{cd} + \frac{x_s}{\sigma_d \sigma_2} \right) \\ \text{и} \\ \rho_{f\phi} &= \frac{r_f \omega_c}{\left(x_f + \frac{x_s}{\sigma_d} \right) \omega_v}, \quad \rho_{cd\phi} = \frac{r_{cd} \omega_c}{\left(x_{cd} + \frac{x_s}{\sigma_d \sigma_2} \right) \omega_v}, \\ \sigma_d &= 1 + \frac{x_s}{x_{ad}}, \quad \sigma_2 = 1 + \frac{x_s}{x_f} \frac{1 + j\rho_{fv}}{1 + \rho_{fv}^2}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\text{где } \rho_{fv} = \frac{r_f \omega_c}{x_f \omega_v}.$$

Приближенно можно принять

$$\sigma_2 \approx 1 + \frac{x_s}{x_f}.$$

В этом случае возможно просто суммировать отдельные составляющие моментов, обусловленные действием отдельных обмоток ротора машины.

Подставляя (13) в (7), получим:

$$M_{sev} = U^2 \left[\frac{\cos^2 \theta_0}{x_{2q} (1 + \rho_{qv}^2)} + \frac{\sin^2 \theta_0}{x_{cd\phi} (1 + \rho_{cd\phi}^2)} + \frac{\sin^2 \theta_0}{x_{f\phi} (1 + \rho_{f\phi}^2)} \right], \quad (15)$$

$$M_{dv} = U^2 \left[\frac{\cos^2 \theta_0}{x_{2q} (1 + \rho_{qv}^2)} \rho_{qv} + \frac{\sin^2 \theta_0}{x_{cd\phi} (1 + \rho_{cd\phi}^2)} \rho_{cd\phi} + \frac{\sin^2 \theta_0}{x_{f\phi} (1 + \rho_{f\phi}^2)} \rho_{f\phi} \right] \frac{1}{\omega_v}, \quad (16)$$

где эквивалентные параметры отдельных обмоток определяются согласно (12) и (14).

Как показывает выражение (15а), основной составляющей дополнительного синхронизирующего момента для первой гармонической колебаний ($v=1$) является момент от обмотки возбуждения, так как $\rho_{fv}^2 \ll 1$, а ρ_{q1} и $\rho_{cd\phi}$ гораздо больше единицы. Для более высоких частот колебаний начинают играть свою роль синхронизирующие моменты успокоительной обмотки. Например, в случае синхронного двигателя данные которого приводятся ниже для основной гармонической колебаний ($v=1$) и номинальной нагрузки на валу, составляющая дополнительного синхронизирующего момента успокоительной обмотки равна примерно 10 от полной величины M_{sev} ; а для второй гармонической колебаний ($v=2$) ее величина уже достигает примерно 30% M_{sev} .

Из (15б) следует, что для первой гармоники колебаний успокоительный момент, наоборот, создается в основном успокоительной обмотки, хотя нельзя пренебрегать и успокоительным моментом от обмотки возбуждения. Успокоительные моменты, естественно, получаются максимальными при $\rho_v = 1$, поэтому при высоких частотах ($v > 1$) успокоительные моменты обмотки возбуждения весьма незначительны. Наоборот, эти моменты от успокоительной обмотки приближаются к максимальному значению.

Если возникает необходимость в более точном определении эквивалентных сопротивлений в продольной оси x_{2d} и r_{2d} , то они могут быть найдены из эквивалентной схемы рис. 1, б:

индуктивное сопротивление

$$x_{2d} = \sigma_d^2 \left(x_{cf} + \frac{x_s}{\sigma_d} \right), \quad (17)$$

активное сопротивление

$$r_{2d} = \frac{\omega_v}{\omega_c} x_{cf} \rho_{cf} \sigma_d^2. \quad (18)$$

Здесь декременты

$$\rho_{cf} = \frac{x_{cd}(1 + \rho_{cdv}^2) \rho_{fv} + x_f(1 + \rho_{fv}^2) \rho_{cdv}}{x_{cd}(1 + \rho_{cdv}^2) + x_f(1 + \rho_{fv}^2)},$$

$$\rho_{cdv} = \frac{r_{cd} \omega_c}{x_{cd} \omega_v} \text{ и } \rho_{fv} = \frac{r_f \omega_c}{x_f \omega_v}.$$

индуктивность двух параллельных ветвей схемы на рис. 1, б

$$x_{cf} = \frac{1}{a(1 + \rho_{cf}^2)},$$

$$a = \frac{x_f(1 + \rho_{fv}^2) + x_{cd}(1 + \rho_{cdv}^2)}{x_f x_{cd}(1 + \rho_{fv}^2)(1 + \rho_{cdv}^2)}.$$

декремент $\rho_{dv} = \frac{r_{2d} \omega_c}{x_{2d} \omega_v}$ равен согласно (16а) и

16

$$\rho_{dv} = -\frac{x_{cf} \rho_{cf}}{x_{cf} + \frac{x_s}{\sigma_d}}. \quad (16в)$$

тем образом, при точном определении M_{sev} и по (9) и (10) необходимо вычислять параметры x_{2d} и ρ_{dv} согласно (16а) и (16в).

Как показывают расчеты, первый и второй тоды дают практически одинаковые результаты. Поэтому расчет дополнительного синхронизирующего момента может быть произведен достаточной точностью по формуле (15а). Частота собственных колебаний

$$\omega_{cv} = \sqrt{\frac{2\pi f}{T_j} (M_{sy} + M_{sev})}$$

является зависимой от порядка γ вынуждающего момента. Таким образом, проверка на резонанс желательна для каждой гармонической составляющей, как показано в приложении 2.

Приложение 1. Аналитическое определение коэффициента синхронизирующего момента, соответствующего статической угловой характеристике. Из диаграммы рис. 2 имеем:

$$E_o = U \cos \theta_o + I_d x_d,$$

$$I_d = I \sin(\varphi + \theta_o).$$

Принимая во внимание, что $\cos 2\theta_o = \cos^2 \theta_o - \sin^2 \theta_o$ и $\cos^2 \theta_o = \frac{1}{1 + \tan^2 \theta_o}$, согласно (2) получаем:

$$M_{sy} = \frac{\frac{U^2}{x_d} + UI \sin \varphi + UI \cos \varphi \tan \theta_o + U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) (1 - \tan^2 \theta_o)}{1 + \tan^2 \theta_o}. \quad (1,1)$$

Выражая $\tan \theta_o$ через параметры машины, получим:

$$\tan \theta_o = \frac{I_d x_q}{E_o - I_d x_d} = \frac{I x_q (\cos \varphi - \sin \varphi \tan \theta_o)}{U},$$

откуда находим:

$$\tan \theta_o = \frac{I \cos \varphi}{\frac{U}{x_q} + I \sin \varphi} \quad (1,2)$$

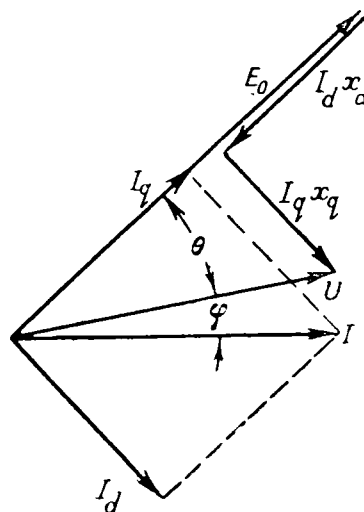


Рис. 2.

Выражения (1,1) и (1,2) получены для режима перевозбуждения машины. Эти же выражения будут справедливы и для режима недо возбуждения, если в них подставлять угол φ с отрицательным знаком. Подставляя в выражение (1,1) значение $\tan \theta_o$ из (1,2), получим для любого режима возбуждения искомый коэффициент синхронизирующего момента в функции средних значений тока нагрузки, $\cos \varphi$ и напряжения сети:

$$M_{sy} = \frac{\frac{U^2}{x_d} \pm UI \sin \varphi + UI \cos \varphi \left(\frac{\frac{UI \cos \varphi}{\frac{U^2}{x_q} \pm UI \sin \varphi}}{\frac{U^2}{x_q} \pm UI \sin \varphi} \right)}{1 + \left(\frac{UI \cos \varphi}{\frac{U^2}{x_q} \pm UI \sin \varphi} \right)^2} + \frac{U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \left[1 - \left(\frac{\frac{UI \cos \varphi}{\frac{U^2}{x_q} \pm UI \sin \varphi}}{\frac{U^2}{x_q} \pm UI \sin \varphi} \right)^2 \right]}{1 + \left(\frac{UI \cos \varphi}{\frac{U^2}{x_q} \pm UI \sin \varphi} \right)^2}. \quad (1,3)$$

Для неявнополюсных машин ($x_d = x_q$) выражение (1,3) упрощается и имеет вид:

$$M_{sy} = \frac{\frac{U^2}{x_d} \pm UI \sin \varphi + UI \cos \varphi \left(\frac{-\frac{UI \cos \varphi}{\frac{U^2}{x_q} \pm UI \sin \varphi}}{\frac{U^2}{x_q} \pm UI \sin \varphi} \right)}{1 + \left(\frac{UI \cos \varphi}{\frac{U^2}{x_q} \pm UI \sin \varphi} \right)^2}. \quad (1,4)$$

Приложение 2. Пример. $P = 4000$ квт, $U = 6000$ в, $I = 448$ а, $\cos \varphi = 0,9$ (опережающий), $n = 125$ об/мин, $f = 50$ гц, $GD^2 = 800$ т.м², $T_j = 8,6$ сек (ротора и маховика). Параметры в относительных единицах: $x_d = 0,837$, $x_q = 0,505$, $x_s = 0,134$, $x_{cd} = 0,085$, $x_{cq} = 0,064$, $x_f = 0,135$, $r_{cd} = 0,074$, $r_{cq} = 0,057$, $r_f = 0,001$.

Первая гармоническая момента нагрузки (компрессор) имеет круговую частоту $\omega_1 = 13,1 = \frac{2\pi \cdot 125}{60} \frac{1}{\text{сек}}$, что в относительных единицах дает:

$$\frac{\omega_1}{\omega_{1c}} = \frac{13,1}{314} = 0,042.$$

Расчет производится для номинальной нагрузки для первой и второй гармонических частот качаний. По формуле (1,2) для номинального режима угол нагрузки θ_0 ($U=1$, $I=1$)

$$\theta_0 = \arctg \frac{0,9}{\frac{1}{0,505} + 0,435} = 20^\circ.$$

Коэффициент синхронизирующего момента M_{sy} по статической угловой характеристике

$$M_{sy} = \frac{1}{1+b^2} \left[\frac{1}{x_d} + \sin \varphi + b \cos \varphi + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) (1-b)^2 \right] \approx 2;$$

$$b = \frac{\cos \varphi}{\frac{1}{x_q} + \sin \varphi}.$$

Эквивалентные параметры вторичной цепи двигателя по поперечной оси согласно (12) будут:

$$\sigma_q = 1 + \frac{0,134}{0,371} = 1,36; \quad x_{2q} = \left(0,064 + \frac{0,134}{1,36} \right) 1,36^2 = 0,3.$$

Декремент для первой гармонической $\nu=1$

$$\rho_{q1} = \frac{0,057}{0,163 \cdot 0,042} = 8,32 \text{ и для второй } \rho_{q2} = 4,16.$$

Эквивалентные параметры вторичной цепи по продольной оси согласно (14)

$$\sigma_d = 1 + \frac{0,134}{0,703} = 1,19; \quad \sigma_2 = 1 + \frac{0,134}{0,135} = 2,0.$$

Эквивалентная индуктивность обмотки возбуждения по (14)

$$x_{f\sigma} = (1,19)^2 \cdot \left(0,135 + \frac{0,134}{1,19} \right) = 0,348.$$

Эквивалентная индуктивность успокоительной обмотки по (14).

$$x_{cd\sigma} = (1,19)^2 \cdot 2^2 \cdot \left(0,085 + \frac{0,134}{1,19 \cdot 2} \right) = 0,78.$$

Соответствующие декременты для первой и второй гармонических:

$$\rho_{f\sigma 1} = \frac{0,001}{0,25 \cdot 0,042} = 0,1; \quad \rho_{f\sigma 2} = 0,05;$$

$$\rho_{cd\sigma 1} = \frac{0,074}{0,142 \cdot 0,042} = 12,8; \quad \rho_{cd\sigma 2} = 6,4.$$

Коэффициенты синхронизирующего момента переходных токов в обмотках возбуждения и успокоительной по (15а) (для $\nu=1$ и $\nu=2$) равны:

$$M_{se1} = 1^2 \left[\frac{0,88}{0,3(1+8,322)} + \frac{0,12}{0,78(1+12,8)} + \frac{0,12}{0,348(1+0,12)} \right] = 0,39;$$

$$M_{se2} = 1^2 \left[\frac{0,88}{0,3(1+4,162)} + \frac{0,12}{0,78(1+6,42)} + \frac{0,12}{0,348(1+0,052)} \right] = 0,51.$$

По (15б) коэффициенты успокоительного момента $\nu=1$ и $\nu=2$

$$M_{d1} = 1^2 \left[(0,042 \cdot 8,32 + 0,001 \cdot 12,8 + 0,342 \cdot 0,1) \right] \frac{1}{13,1} = 0,03$$

$$M_{d2} = 1^2 \left[0,16 \cdot 4,16 + 0,004 \cdot 6,4 + 0,345 \cdot 0,05 \right] \frac{1}{26,2} = 0,027$$

Таким образом, уравнение колебаний будет:

$$m \frac{d^2 \delta_\nu}{dt^2} + M_{d\nu} \frac{d \delta_\nu}{dt} + (M_{sy} + M_{se\nu}) \delta_\nu = M_\nu \sin(\omega_\nu t + \varphi)$$

($m = \frac{Tj}{2\pi f}$), или для первой гармонической

$$\frac{8,6}{314} \cdot \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + 0,03 \frac{d \delta_1}{dt} + (2 + 0,39) \delta_1 = M_1 \sin(\omega_1 t + \varphi)$$

и для второй:

$$\frac{8,6}{314} \cdot \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} + 0,027 \frac{d \delta_2}{dt} + (2 + 0,51) \delta_2 = M_2 \sin(\omega_2 t + \varphi)$$

Как видно, в случае близости к резонансу явление синхронизирующим моментом от переходных может быть недопустимым. Кроме того, частота свободных колебаний может быть различной для разных гармоник для первой гармоники она равна:

$$\omega_{c1} = \sqrt{\frac{314}{Tj} (M_{sy} + M_{se})} =$$

$$= \sqrt{\frac{314}{8,6 \cdot 2,39}} = 9,3 \frac{1}{сек}.$$

В данном случае ω_{c1} меньше первой гармоники возбуждающей силы (см. выше) $\omega_1 = 13,1 \frac{1}{сек} = 2\pi \frac{125}{60}$.

Отметим, что точное определение ω_{c1} важно и для расчета так называемого коэффициента усиления колебаний, равного для ν -ой гармоники

$$\beta_\nu = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{M_{d\nu} 2\pi f}{Tj \omega_{c\nu}} \cdot \frac{\omega_\nu}{\omega_{c\nu}} \right)^2 + \left[\left(\frac{\omega_\nu}{\omega_{c\nu}} \right)^2 - 1 \right]^2}};$$

Расчет коэффициентов синхронизирующего и успокоительного моментов по точным формулам (9) (10), (11) дает практически те же результаты с точностью до третьего десятичного знака. Поэтому достаточно точно брать их по формулам (15а, б).

Литература

1. А. А. Горев. Основные уравнения неустойчивого режима синхронной машины. Труды ЛПИ, № 5, 1949.
2. М. П. Костенко. Электрические машины (часть). ГЭИ, 1949.
3. Р. А. Лютер. О моментах вращения синхронной машины при периодических ее качаниях. Электричество, № 2, 1940.
4. Е. Я. Казовский. Вращающие моменты синхронных машин при больших качаниях. Электросила, 1945.
5. Г. И. Штурман. Асинхронный запуск синхронных машин. Электричество, № 19, 1933.
6. T. M. Linville. Starting Performance of Sal Pole Synchronous Motors Tr. ATEE, apr. 1930.

[27, 11.]



Асинхронные муфты скольжения

Инж. Ю. И. АНОСОВ

Москва

Электродинамическая муфта¹ является разновидностью электрической машины, у которой и индукторы, и обмотка якоря вращаются. На одном из валов закреплена половина муфты с индукторами, а на другом валу — вторая половина обмоткой, в которой индуцируется напряжение при пересечении ее вращающимся потоком индукторов. Ток, вызванный этим напряжением, взаимодействует с потоком индукторов и, таким образом, крутящий момент передается с ведущей части на ведомую.

Работу муфты скольжения можно рассмотреть с двух точек зрения. Согласно одной, изложенной Скомороховым в [Л. 4], муфта рассматривается как асинхронная машина, в которой вращающееся поле создается потоком вращающихся индукторов. Это позволяет изучить работу муфты на основании соответствующей круговой диаграммы. Следует отметить, что в указанной работе была впервые дана теория муфты скольжения. Однако ближе к физике процессов, происходящих в муфте, является предложенное Касьяновым [1] рассмотрение муфты как синхронной машины, работающей в режиме установившегося короткого замыкания и с весьма низкой частотой — порядка 0,5—1,5 гц, определяемой скольжением и числом полюсов муфты. Такой метод удобен еще и тем, что позволяет использовать при расчете муфты методику расчета синхронных машин.

Мы опускаем здесь изложение теоретической основы вопроса и расчета муфты. Это достаточно изложено в отечественной литературе в ряде работ [Л. 1—4]. В статье сделана попытка рассмотреть некоторые конструкции муфт и схемы управления, представляющие, на наш взгляд, наибольший интерес.

Понятно, что в муфте, вообще говоря, нельзя считать «статор» и «ротор» как это имеет место в нормальных машинах. Однако для удобства дальнейшего изложения условимся называть ротор ту половину муфты, которая несет вторичную обмотку, иначе говоря, ту часть, в которой

Рассмотрены физические процессы, происходящие в муфтах скольжения. Описаны типы и конструкции этих муфт, схемы их возбуждения и управления, а также указана область их применения.

индуцируется напряжение под действием вращающегося потока индукторов.

Вторичная обмотка муфты может быть выполнена по типу беличьей клетки или же иметь контактные кольца, связывающие ее с внешней цепью.

При выполнении этой обмотки по типу беличьей клетки она может быть выполнена с двумя клетками. Иногда ротор выполняется вовсе без обмотки — в этом случае на поверхность ротора наносится тонкий слой хорошо проводящего материала, например меди. Для улучшения пусковых характеристик можно также сделать в необмотанном роторе глубокие прорезы.

Если вторичная обмотка выполнена с контактными кольцами, то внешней цепью обмотки может быть, например, реостат. Тогда, изменяя его сопротивление, можно регулировать скольжение ведомой части и влиять на скоростные характеристики муфты. Энергия, доставляемая ведущим валом, частично передается на ведомый вал в виде механической же энергии, частично потребителю, включенному во вторичную обмотку, в виде электрической. Потребителем, например, может быть электродвигатель, вращающий те же ходовые колеса тепловоза, что и ведомый вал муфты. Описано такое использование муфты для зарядки аккумуляторов, а также для освещения. Иногда для подобных целей на роторе при основной короткозамкнутой обмотке делают дополнительную обмотку с кольцами.

Дальнейшим развитием этой конструкции являются каскадные муфты. В этом выполнении муфта и двигатель, включенный в ее обмотку, выполнены в виде одной машины. Такое выполнение усложняет муфту, но одновременно значительно расширяет возможности ее использования. В частности, каскадные муфты применяются для реверсивных приводов и как редукторы.

Примером такой муфты может быть конструкция Скоморохова и Лобко (советский патент № 16061, 1928 г.). В этой муфте (рис. 1) на ведущем валу сидит индуктор синхронной машины 1. Ведомый элемент имеет две трехфазные обмотки 2 и 3, магнитно несвязанные друг с другом. Трехфазные обмотки электрически соединены

¹ Иногда ее еще называют асинхронная муфта скольжения.

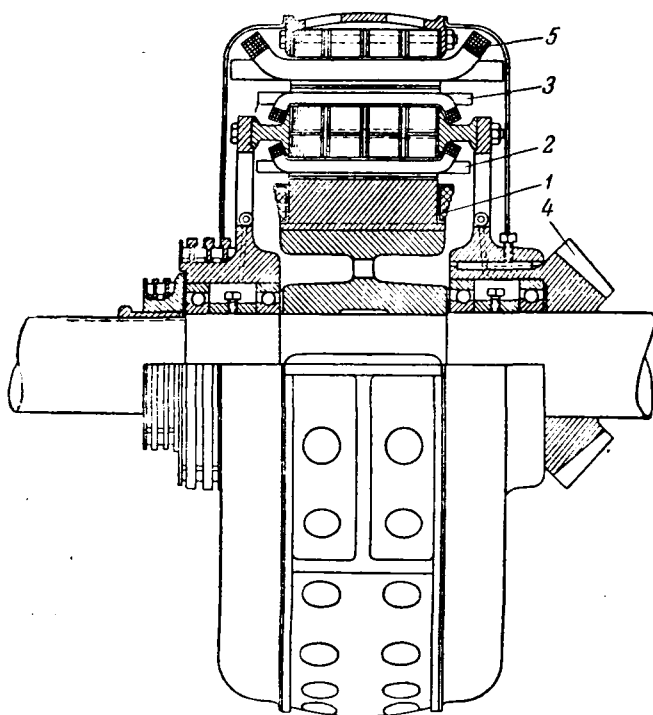


Рис. 1.

одна с другой. На неподвижной части муфты расположена трехфазная обмотка 5, замкнутая на регулировочный реостат. При вращении ведущего вала обмотки 1 и 2 образуют синхронный генератор, питающий обмотку 3 двигательной части. В зависимости от соотношения чисел полюсов обмоток можно получить нужное соотношение скоростей ведущего и ведомого валов. Это соотношение может быть переменным, если обмотки 2 и 3 выполнить с переключением числа полюсов. Плавная регулировка скорости вращения достигается изменением сопротивления в обмотке статора 5. Через коническую зубчатку 4 муфта связана с ведомым механизмом. В другой, более поздней советской муфте [Л. 8], аналогичной по конструкции муфте Скоморохова, для реверсирования ведомого вала статорные обмотки генератора и двигателя соединены не непосредственно, а через переключатель, позволяющий менять порядок чередования фаз в двигательной части и тем реверсировать ведомый вал при неизменном направлении вращения ведущего.

Следует заметить, что задача реверсирования в приводах с муфтами скольжения обычно решалась установкой двух муфт, ведущие части которых вращались в разные стороны. Иногда устанавливались две первичные системы (индукторы) с разных сторон одной вторичной. В зависимости от потребного направления вращения ведомого вала, возбуждалась соответствующая магнитная система. Громоздкость такого решения задачи, весьма важной для транспортных механизмов, ясна. Как попытку решить задачу реверса чисто электрическим путем, кратко рассмотрим муфту, описанную в [Л. 10].

На ведущем валу сидит индуктор синхронного генератора, статорная обмотка которого помеще-

на на неподвижной части машины. На ведущем валу также сидит ротор асинхронного двигателя с беличьей клеткой. Ротор охватывает ведомый элемент, на котором размещены две трехфазные обмотки. При ходе «вперед» генератор не возбужден, в одну из обмоток ведомого элемента дается постоянный ток. Все соединение работает как обычная муфта скольжения. При ходе «назад» генератор возбуждается, его напряжение дается на вторую обмотку ведомой части, а первая обмотка отключается. Частота генератора и число полюсов второй обмотки выбраны так, что при неподвижной беличьей клетке ведомый элемент должен иметь двойную скорость по отношению к ведущему. При вращении же ведущего вала относительная скорость валов остается прежней — двойной, а абсолютная ведомого вала равна скорости ведущего с учетом скольжения.

Следует отметить, что там же [Л. 10] описана каскадная муфта, отличающаяся от муфты Скоморохова лишь тем, что на неподвижной части взамен трехфазной обмотки размещена обмотка возбуждения постоянного тока и, следовательно, двигательная часть муфты работает как синхронный двигатель. Это отличие не только не дает никаких существенных преимуществ сравнительно с выполнением по типу асинхронного двигателя, но даже уменьшает возможности муфты, лишая ее плавной регулировки и требуя питания второй обмотки постоянным током. Понятно, что о муфте Скоморохова в указанной статье нет упоминания.

Интересно вообще несколько остановиться на роли отечественной науки в развитии асинхронных муфт и их применений.

Впервые применить муфту скольжения на тепловозов было предложено в 1925 г. в журнале «Электричество» [Л. 5]. В этой же статье было отмечено, что для целей тяги более пригодна будет каскадная включение муфты скольжения с коллекторной машиной. Теория и расчет асинхронных муфт были впервые даны А. А. Скомороховым в 1928 г. [Л. 4].

Описанные в более ранней иностранной (преимущественно патентной) литературе каскады были выполнены в основном с машинами постоянного тока. Лишь в двух-трех строках патентного описания (даже не в формулировке предельного патента) вскользь отмечалась возможность выполнения каскадных муфт с использованием машин переменного тока. В муфте Скоморохова впервые появляется именно каскадная асинхронная муфта, как своеобразная цельная конструкция, доведенная до практической осуществимой формы.

Магнитный поток, необходимый для работы муфты, может быть получен различными способами. Например, муфта может возбуждаться сетью постоянного тока, от собственных управляемых возбудителей — машин или же управляемых выпрямителей. Наконец, муфта может быть возбуждена самовозбуждающейся или с постоянными магнитами.

Формы выполнения самовозбуждающихся муфт очень разнообразны. В [Л. 3] описана му-

с трехфазной вторичной обмоткой, к которой включен полупроводниковый выпрямитель, выделенный ток которого питает индукторы. Иногда применяется дополнительная обмотка на статоре, снабженная коллектором. Описывалась также машина, в которой обе части имеют трехфазную обмотку — одна короткозамкнутую, а другая — с конденсатором, в которую включены конденсаторы. Таким образом, работа системы возбуждения подобна работе асинхронного генератора. Можно полагать, что наиболее жизненной будет система с полупроводниковым выпрямителем, как самая простая и удобная.

Следует отметить одну особенность муфты самовозбуждения с полупроводниковым выпрямителем [Л. 3]. Ее скольжение (а следовательно и скорость ведомого вала при неизменной скорости ведущего) не зависит от момента нагрузки. При увеличении момента нагрузки скольжение увеличивается, следовательно, возрастает индуцированное напряжение во вторичной обмотке вместе с ним возбуждение муфты. В результате увеличения возбуждения муфта переходит на другую характеристику, и скольжение при новом моменте остается прежним. Подобная особенность характеристики муфты может представлять для некоторых применений интерес. Понятно, что, применяя регулирование тока возбуждения, можно и для самовозбуждающейся муфты получить необходимую характеристику.

Желание обойтись без возбуждения постоянным током вызвало появление муфт с постоянными магнитами. Например, была описана муфта с постоянными магнитами подковообразной формы, влитыми в корпус муфты с помощью немагнитного сплава заподлицо с поверхностью расточенной. Ведомая часть этой муфты выполнена по типу ротора асинхронного двигателя с беличьей клеткой. Для получения возможности регулирования муфты с постоянными магнитами иногда изготовляют так, что одна из частей муфты может перемещаться в осевом направлении, чем и регулируется величина потока, сцепляющегося с вторичной обмоткой. Муфты с постоянными магнитами можно применять в нерегулируемых передачах большой мощности, например в измерительных приборах. Однако они могут быть удобно использованы и в силовых передачах как предохранители от перегрузки.

Как и во всякой электрической машине, в передаче момент пропорционален потоку первичной системы и току вторичной. Следовательно, в конце концов, передаваемый муфтой момент определяется потоком индуктора. Таким образом, регулирование скорости ведомого вала может быть осуществлено путем регулирования магнитного потока муфты, что достигается путем регулирования тока в ее обмотке возбуждения. Такое регулирование по своей физической сущности одинаково с регулированием асинхронных двигателей изменением напряжения на зажимах статора. Оно особенно удобно для приводов, в которых момент сильно зависит от скорости, например, вентиляторы или гребные винты. Самый простой способ, а именно регули-

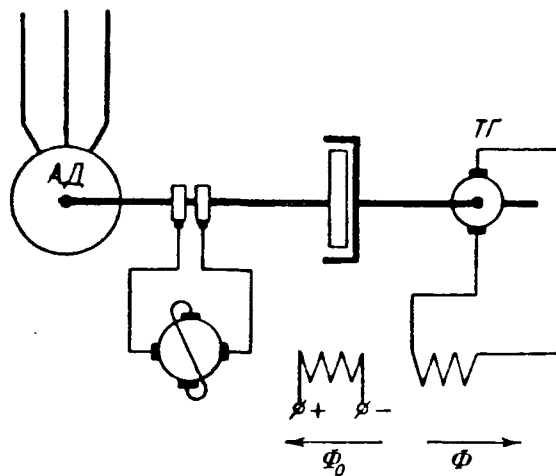


Рис. 2.

рование тока возбуждения при помощи реостата и питание обмотки возбуждения от общей сети постоянного тока, мало применим, во-первых, потому, что общая сеть постоянного тока обычно отсутствует, во-вторых, подобный способ питания затрудняет автоматизацию.

В случае применения для возбуждения отдельного генератора обычно регулирование переносится в цепь его возбуждения. Для увеличения чувствительности и ускорения регулирования в качестве такого генератора иногда применяют электромашиный усилитель.

В одной из таких схем (рис. 2) электромашиный усилитель имеет две обмотки управления. На одну подается эталонное напряжение, на другую — напряжение тахогенератора ведомого вала. Магнитные потоки обмоток направлены встречно. При падении скорости напряжение на выходе усилителя возрастает. Увеличивается также ток возбуждения муфты и передаваемый ею момент и восстанавливается прежнее значение скорости. В другой схеме (рис. 3) на вторую обмотку управления подано напряжение, пропорциональное току статора двигателя, вращающего ведущий вал. При возрастании нагрузки двигателя возбуждение муфты снижается, падает также передаваемый момент, что предохраняет двигатель от недопустимых перегрузок.

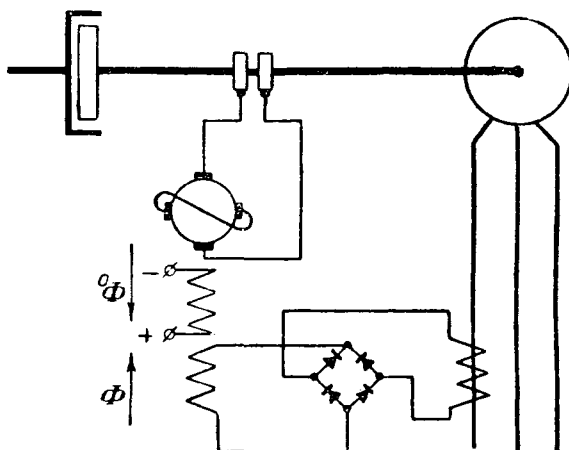


Рис. 3.

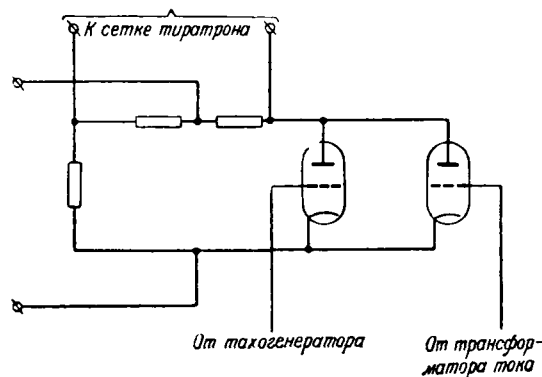


Рис. 4

В последнее время для управления муфтами получили распространение электронные схемы. В качестве примера рассмотрим схему, описанную в [Л. 9]. Обмотка возбуждения муфты питается от сети переменного тока через тиратрон. Напряжение возбуждения регулируется путем изменения напряжения на сетке тиратрона. Для управления тиратроном применена мостовая схема (рис. 4), тремя плечами которой являются одинаковые активные сопротивления, а четвертое плечо — переменное. В качестве переменного плеча применен триод, на сетку которого подается выпрямленное напряжение тахогенератора, сидящего на выходном валу. На одну диагональ моста подается напряжение от эталонного выпрямителя, стабилизированное при помощи газоразрядных ламп. С другой диагонали снимается напряжение на сетку тиратрона. При отклонении скорости выходного вала от заданной изменяется напряжение тахогенератора, а следовательно, и напряжение на сетке лампы в плече моста и напряжение на сетке тиратрона. Это вызывает изменение напряжения возбуждения муфты, следовательно, и передаваемого ею момента. При необходимости ограничения передаваемого момента параллельно лампе в плече моста присоединяется вторая лампа, на сетку которой подается выпрямленное напряжение от трансформатора тока в цепи статора двигателя. Таким образом, общее сопротивление переменного плеча моста (а следовательно, и режим муфты) определяется как скоростью, так и нагрузкой двигателя. Для повышения устойчивости регулирования применены противоколебательные цепи.

Весь агрегат — асинхронный двигатель и муфта — выполнен как одна машина в общем корпусе (рис. 5). В корпусе размещена статорная обмотка асинхронного двигателя 1, присоединенная к питающей сети. Ротор двигателя 2 сидит на пустотелом валу 3, выполненном заодно с ротором муфты 4. Внутри этого пустотелого вала проходит вал 5, являющийся выходным валом всего агрегата. На валу 5 закреплена магнитная система муфты 6 и тахогенератор 7, через блок 8, содержащий выпрямительное устройство и электронную схему, управляющую скоростью агрегата. Стрелками показан путь охлаждающего воздуха. Такие агрегаты выполняются до мощности 75 л. с. со скоростью вращения

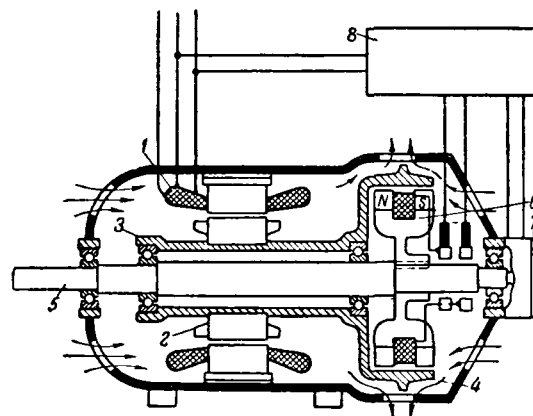


Рис. 5

100...30 000 об/мин. Точность поддержания заданной скорости описанной схемой — порядка 0,1%.

В установках, предъявляющих менее строгие требования к точности регулирования, могут быть применены более простые средства. Например, описывалась схема регулирования скорости ведомого вала путем периодического отключения цепи возбуждения. Этот процесс может управляться или центробежным регулятором, размыкающим контакты при превышении заданной скорости [Л. 6], или же прерывателем, расположенным на ведомом валу и управляющим возбуждением муфты через электронную схему. В частности [Л. 6], подобный способ предлагался для привода генераторов от двигателей с непостоянной скоростью. Такое использование муфты может представлять интерес для электростанций с ветряными двигателями.

В некоторых случаях имеет значение не столько постоянство скорости вообще, сколько поддержание синхронного хода обеих полумуфт — ведущей и ведомой. Для этого могут быть использованы все способы, обычно применяемые для поддержания синхронного вращения. Например, применяются механические и электрические дифференциалы, сравнивающие скорости ведущего и ведомого валов и воздействующие на возбуждение муфты при расхождении этих скоростей, тахогенераторы, вспомогательные машины и т. п.

В качестве датчика, управляющего возбуждением муфты, может быть применен и фотозаместитель. В одной из подобных схем собственно датчик перемещает шторку, открывающую доступ свету на фотоэлемент, управляющий выпрямителем, питающим возбуждение.

В отношении нагрева муфта ничем не отличается от любой другой машины. Вопросы охлаждения особенно важны для муфт, работающих в тормозном режиме, когда все энергия торможения должна быть рассеяна. Такой тормоз с жидким охлаждением применен в буровых станках [Л. 7]. Полусы индукторов имеют герметически закрытые обмотки, обтекаемые водой. Ротор тормоза выполнен в виде полого цилиндра без обмотки, внутренняя поверхность которого покрыта тонким слоем меди для уменьшения сопротивления вихревым токам. Заметим, что в литературе указывалось на использование горячей

ды, выходящей из системы охлаждения муфты, технологических целей.

Области применения асинхронных муфт очень разнообразны. В горной промышленности они применяются для привода подъемных машин, буровых станках, как регуляторы подачи доломита и в качестве тормозов во вращающихся машинах экскаваторах. Они применяются в приводах ударной нагрузкой или с тяжелым пуском — прессах, в прокатных станах, для опрокидывания конвертеров в металлургической промышленности, в намоточных станках, в центрифугах. Широко их применение в транспорте — в тепловозах, автомобилях и тракторах, на судах. Применять муфты удобно во всех случаях, когда работа одного привода ставится в зависимость от работы другого, например в приводах подачи. Асинхронные муфты дают очень удобное решение задачи переключения движения в том случае, когда ведущая и ведомая части разделены стенкой, например, когда ведомая часть находится в атмосфере газов, а ведущая — в вакууме. Как на пример такого использования муфты, можно указать на привод движущихся пластин конденсатора переменной емкости, помещенных в вакууме. Для целей силового привода такая «передача через стенку» не только рациональна, неизбежна большая толщина стенки по соображениям механической прочности при выполнении ее из керамики или пластика, что вызовет большое рассеяние магнитного потока; выполнение перегородки из металла нецелесообразно вследствие появления вихревых токов. Но для целей управления или в измерительных приборах такие передачи применяются вполне успешно.

Большое распространение имеют муфты для привода рабочих машин, требующих регулирования скорости от нерегулируемого двигателя. Такого рода муфта в сочетании с синхронным двигателем мощностью 13 000 квт применена для регулирования скорости вращения вентилятора аэродинамической трубы. В некоторых конструкциях ротор муфты, охватывающий снаружи индуктор, несет на себе непосредственно и лопасти вентилятора. Указывалось [Л. 9] на применение асинхронных муфт к приводам металлорежущих станков. Можно думать, что приводы с асинхронной муфтой и асинхронным двигателем в одном корпусе будут значительно компактнее и проще, чем, например, система двигатель-генератор. Легкость автоматизации работы муфты делает выгодным ее применение в приводах для станков в автоматических линиях.

Муфты скольжения нашли применение и в приводных приводах. В этом случае вращающиеся регулируемые двигатели (например, асинхронные) соединяются с соответствующими рабочими валами через муфту скольжения. При необходимости поддержания синхронного хода с одним из двигателей системы — ведущим — возбуждение всех муфт питается от тахогенератора на

валу этого ведущего двигателя. Если же нужно обеспечить определенный закон изменения скорости отдельных ведомых валов в зависимости от скорости ведущего двигателя, то можно применить любой регулятор, воздействующий на возбуждение отдельных муфт в зависимости от скорости ведущего двигателя. Довольно простое решение можно получить при помощи соответственно подобранных нелинейных сопротивлений в цепи возбуждения каждой муфты.

Следует подчеркнуть необходимость более широкого внедрения муфт скольжения в нашу промышленность, в частности комплектных приводов асинхронный двигатель — муфта скольжения, выполненных в одном корпусе, как одна машина. Большие возможности асинхронной муфты дают ей право на большее внимание, чем то, которым она пользуется теперь.

В заключение нам кажется нелишним обратиться внимание на вопрос терминологии. В настоящее время термин «электромагнитная муфта» применяется одинаково как к муфтам трения, в которых нажатие поверхностей трения осуществляется за счет усилия, создаваемого электромагнитом, так и к муфтам, в которых передача крутящего момента происходит в результате взаимодействия магнитного потока одной системы с током другой, т. е. к муфтам скольжения. Эти две системы муфт отличаются по своему принципу действия, физическим процессам, происходящим в них, по своей конструкции. Полагаем, что следовало бы сохранить термин электромагнитная муфта лишь за муфтами трения, в которых поверхности трения прижимаются друг к другу усилием, создаваемым электромагнитом, для муфт скольжения же, стоящим значительно ближе к электрическим машинам, чем к электромагнитным механизмам, следует найти какой-либо более удобный термин, например, — электродинамические или электромашины муфты.

Литература

1. В. Т. Касьянов. Скользящие электромагнитные муфты для гребных приводов. Электросила, № 2—3, 1945.
2. Е. К. Мезин. Круговые диаграммы электромагнитной асинхронной муфты. Электричество, № 4, 1947.
3. Е. К. Мезин. Самовозбуждающаяся электромагнитная асинхронная муфта. Электричество, № 5, 1948.
4. А. А. Скоморохов. Электрическая муфта асинхронного типа. Электричество, № 3—4, 1928.
5. И. Стецула. Асинхронная муфта и ее применение в тепловозах. Электричество, № 5, 1925.
6. А. А. Фонарев. Муфта для стабилизации скорости генераторов малой мощности. ВЭП, № 2, 1940.
7. Н. К. Архангельский. Электромагнитные муфты скольжения и их применение в буровых станках. Энергетический бюллетень, № 4, 1948.
8. Бюллетень изобретений, № 2, 1949.
9. Electronics, стр. 102—106, № 8, 1945.
10. Power, № 2, 1946.
11. BEAMA Journales, стр. 123—8, № 106, стр. 172—7, № 107; стр. 219—25, № 108, 1946.

[9. 4. 1951]



Регулировочные характеристики электромашинного усилителя-двигателя

Кандидат техн. наук, доц. В. А. БОРИСОВ

Ивановский энергетический институт им. Ленина

Автор показал, [Л. 1], что реактивный электромашинный усилитель может быть использован в качестве двигателя. При этом были рассмотрены основные свойства электромашинного усилителя-двигателя и выявлены его главные достоинства и недостатки. В этой статье исследуются вопросы, связанные с регулированием его скорости, в частности при наличии дополнительной параллельной или последовательной пусковой обмоток. Эти вопросы представляют большой интерес, так как электромашинный усилитель-двигатель, будучи дорогой и сложной машиной, может найти практическое применение только в том случае, если он будет обладать особыми ценными регулировочными свойствами.

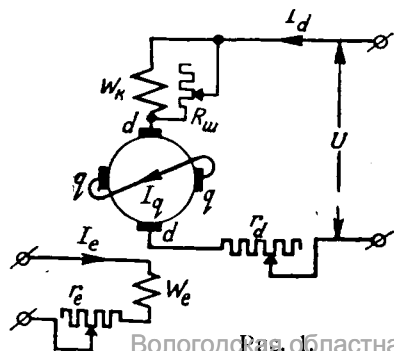
Электромашинный усилитель без дополнительных обмоток (рис. 1). Регулирование скорости электромашинного усилителя-двигателя принципиально возможно шестью основными способами: 1) изменением тока в обмотке управления или 2) степени компенсации, 3) введением сопротивления в поперечную цепь якоря или 4) дополнительной э. д. с. в поперечную цепь, 5) изменением сопротивления продольной цепи, 6) изменением напряжения на зажимах.

Регулирование изменением тока в обмотке управления I_e . Примем для упрощения, что магнитная система не насыщена, а н. с. реактивных размагничивающих полей коммутационных и вихревых токов пропорциональна скорости вращения и величине поля в зоне коммутации, тогда согласно [Л. 1, 4] можно получить следующую зависимость (в относительных величинах) для скорости вращения от тока управления I_e

$$v = \frac{\omega}{\omega_{он}} = v \sqrt{\frac{(1-\epsilon)(1-i_d)}{i_e - \epsilon + i_d(\epsilon + \delta)}}, \quad (1)$$

где

$$\omega_{он} = \sqrt{\frac{U_n}{C_d I_{ен} \omega_e - U_n b}},$$



Анализируются различные способы регулирования электромашинного усилителя-двигателя без пусковых обмоток. Рассматривается влияние коммутационных и вихревых токов на регулировочные характеристики. Приводятся уравнения регулировочных характеристик с параллельной пусковой обмоткой. Сравнивается расход мощности при регулировании для обычного двигателя с параллельным возбуждением и электромашинного усилителя-двигателя. Приводятся опытные регулировочные характеристики электромашинного усилителя. На основании анализа делается вывод, что электромашинный усилитель-двигатель может найти применение в автоматизированных регулируемых электроприводах, небольшой мощности.

скорость холостого и при номинальном напряжении U_n , числе витков w_e и номинальном токе обмотки управления I_e

$$i_d = \frac{I_d}{I_{dk}}; \quad i_e = \frac{I_e}{I_{ен}}$$

$$I_{dk} = \frac{U_n}{R_d},$$

$$\delta = \frac{I_{dk} k_{fa} \omega_a (1 - \psi)}{I_{ен} \omega_e};$$

$$\epsilon = \frac{F_{rdo}}{I_{ен} \omega_e},$$

где F_{rdo} — н. с. реактивных полей при скорости $\omega_{он}$;

I_d, R_d — ток и сопротивление продольной цепи

C_d — конструктивная постоянная;

k_{fa} — коэффициент формы кривой н. обмотки якоря ($k_{fa} \approx 0,5$);

ψ — коэффициент компенсации.

Соотношение (1) получено для случая регулирования при постоянной мощности ($I_d = \text{пост}$). Анализ (1) показывает, что вид регулировочной характеристики зависит от степени компенсации δ и величины реактивных полей. При $\psi = 1$ и $\epsilon = 0$

$$v = \sqrt{\frac{1 - i_d}{i_e}}.$$

В случае недокомпенсации ($\psi < 1$) скорость уменьшается, а при перекомпенсации ($\psi > 1$) больше, чем при полной компенсации.

Из уравнения (1) далее следует, что при одном и том же относительном уменьшении тока возбуждения скорость вращения при наличии размагничивающего действия реактивных полей ($\epsilon \neq 0$) возрастает быстрее, чем при отсутствии этих полей. Если при полной компенсации ток возбуждения уменьшить до величины $i_{ekp} = \epsilon(1 - i_d)$, то скорость двигателя возрастет до бесконечно большой величины.

Так как $F_{rd} \equiv \omega I_q \equiv E_d = U - I_d R_d$ — по результирующей продольная н. с. F_d изменяется лишь за счет изменения н. с. обмотки управления. Очевидно, что как при наличии так и при отсутствии реактивных полей это изменение по абсолютной величине будет одним и тем же. Таким образом, основное ценное свойство электромашинного усилителя — ничтожная малая затрата мощности на управление — сохраняется при наличии реактивных полей.

Вращающий момент

$$M_d = \frac{M_d}{M_n} = \frac{v(i_e + \delta)[1 - \epsilon - v^2(i_e - \epsilon)]}{[1 - \epsilon + (\epsilon + \delta)v^2]^2}, \quad (2)$$

$$M_{dk} = \frac{U_n}{\omega_{он} R_d}.$$

Из уравнения (3) можно получить, что в случае регулирования при постоянном моменте (= пост) с уменьшением тока возбуждения скорость вращения не может возрастать бесконечно; она имеет некоторое максимальное значение:

$$v_{\max} = \frac{1}{4i_d}. \quad (4)$$

Согласно уравнению (2) скорость вращения уменьшается в значительной степени, чем меньше и. с. по продольной оси. Поэтому при работе на повышенных скоростях резко усиливается влияние неукompенсированной части продольной реакции якоря, остаточного магнетизма реактивных полей. Кроме того, при ослаблении тока уменьшается максимальный момент двигателя и жесткость механических характеристик. Влияние этих факторов обуславливает недостаточно устойчивую работу при высоких скоростях, и вряд ли окажется возможным получить диапазон регулирования рассматриваемым способом выше 1:2,5—1:3. В лаборатории электропривода Ивановского энергетического института удалось получить практически диапазон регулирования приблизительно 1:2.

Регулирование скорости изменением степени компенсации производится шунтированием компенсационной обмотки сопротивлением $R_{ш}$. При уменьшении $R_{ш}$ ток, протекающий компенсационной обмоткой, уменьшится, и часть н. с. продольной реакции якоря окажется неукompенсированной. Поэтому продольный и поперечный потоки на нагрузке возрастут, и скорость вращения понизится.

Помимо изменения скорости, шунтирование компенсационной обмотки позволяет повысить плавную способность усилителя.

Остальные способы регулирования не представляют большого практического значения и мы будем останавливаться на них.

Параллельная пусковая обмотка w_{mq} (рис. 2). При анализе регулировочных свойств двигателя пусковыми обмотками ограничимся теми же методами способами регулирования, которые были рассмотрены выше.

Регулирование скорости изменением тока обмотки управления. Как и в предыдущем случае, характеристики двигателя удобнее выражать в относительных единицах, приняв за основную скорость вращения при холостом ходе $\omega_{от}$. Обозначим I_{em} ток в обмотке управления, обеспечивающий при холостом ходе скорость $\omega_{от}$ в случае отсутствия тока в обмотке w_{mq} . Пренебрежем влиянием и сделаем относительно действия реактивных н. с. те же допущения, что и ранее. Регулирование при постоянной скорости. При указанных допущениях анализ показывает, что

$$\frac{I_e}{I_{em}} = \frac{(1 - \epsilon + \epsilon v^2)(1 - v - i_d) - v^2(\delta i_d - k f_a \epsilon v)}{v^2}. \quad (5)$$

В случае $\psi = 1$ и $\epsilon = 0$ уравнение может быть разрешено относительно скорости

$$v = \frac{-1 \pm \sqrt{1 \pm 4(1 - i_d)i_{em}}}{\pm 2i_{em}}. \quad (6)$$

Зависимость $v = f(i_{em})$ при $I_d = 0$ и $I_d = I_{dn}$ ($i_d = 0,133$) для двух значений тока в пусковой обмотке $I_{m1} = I_{mn}$ и $I_{m2} = \frac{I_{mn}}{2}$ показана на рис. 3. Кривые показывают, что при регулировании скорости вращения вниз она изменяется медленнее, чем при регулировании вверх. Это обусловлено тем, что при высоких скоростях величина э. д. с. E_q при том же значении тока I_e будет больше.

Из выражения (6), далее, видно, что при регулировании скорости вращения вверх по мере увеличения тока I_e подкоренное выражение все время уменьшается и при значении

$$i_{ekp} = \frac{1}{4(1 - i_d)} \quad (7)$$

обращается в нуль. При дальнейшем увеличении тока I_e подкоренное выражение становится отрицательным. Это означает физически, что размагничивающее действие поперечной реакции якоря становится настолько сильным, что уменьшение потока Φ_q не может быть скомпенсировано соответствующим увеличением скорости; противоз. д. с. двигателя уменьшается, и электрическое равновесие при данном значении тока I_d становится невозможным.

Из уравнения (6) и (7) следует, что максимальное значение скорости, которое можно получить при данном способе регулирования,

$$v_{\max} = 2(1 - i_d) < 2. \quad (8)$$

Следовательно, регулирование скорости вверх путем изменения тока I_e при отсутствии реактивных полей возможно лишь в пределе, меньшем 1:2.

Если регулирование производить не только вверх, но и вниз, то общий предел регулирования скорости за счет изменения тока I_e может быть расширен. Однако пуск двигателя в этом случае будет происходить при пониженном значении потока. Дальнейшее расширение диапазона регулирования скорости может быть достигнуто, если применить дополнительно регулирование путем изменения тока в обмотке w_{mq} . Отношение н. с. этих обмоток γ_m позволяет произвести сравнение чувствительности регулирования скорости за счет изменения тока в обмотке управления и обмотке w_{mq} .

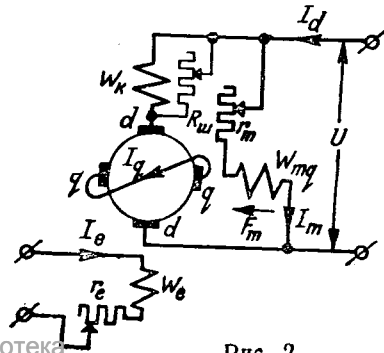


Рис. 2.

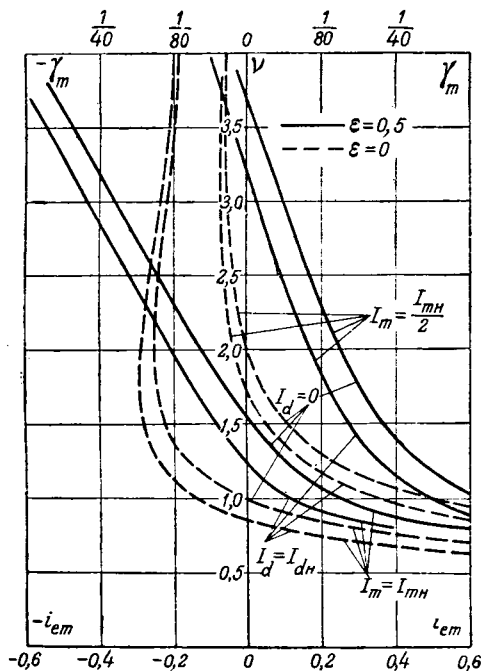


Рис. 3.

Это отношение будет:

$$\gamma_m = \frac{F_{em}}{F_m} = \frac{I_{qom} R_q}{U} \frac{\lambda_q}{\lambda_d} \frac{1}{(1-\epsilon)}, \quad (9)$$

где λ_d и λ_q — магнитные проводимости по продольной и поперечной осям;
 R_q — сопротивление поперечной цепи.

Обычно

$$\frac{\lambda_q}{\lambda_d} \approx 1; \quad I_{qom} = (0,3 \dots 0,5) I_{dH};$$

$$I_{dH} R_q = (0,05 \dots 0,1) U.$$

Поэтому в случае отсутствия реактивных полей

$$\gamma_m = (0,3 + 0,5) (0,05 + 0,1) = 0,015 \dots 0,05.$$

Отсюда следует, что чувствительность регулирования путем изменения тока I_e двигателя в десятки раз выше, чем при регулировании обычного двигателя параллельного возбуждения.

Реактивные поля оказывают существенное влияние на вид регулировочных характеристик и на пределы регулирования. Анализ показывает, что при $I_e = 0$ даже в случае полной компенсации ток в поперечной цепи I_{qo} не будет равен нулю:

$$I'_{qo} = - \frac{k_1 c \lambda_d F_m \omega^2}{R_q (1 + b \omega^2)}, \quad (10)$$

где k_1 и b — параметры, характеризующие влияние реактивных полей;
 c — конструктивная постоянная.

Знак минус указывает, что н. с. F_{aq} действует навстречу н. с. пусковой обмотки. В результате поперечный поток уменьшается, и скорость холостого хода повышается по сравнению со скоростью ω_{om} .

Регулировочные характеристики $v = f(i_{em})$, подсчитанные по (5), при наличии реактивных

полей ($\epsilon = 0,5$) показаны на рис. 3 совместно характеристиками при отсутствии этих полей.

Рассмотрение этих характеристик и анализ уравнения (5) показывают, что действие реактивных полей позволяет расширить пределы регулирования скорости вверх за счет изменения тока I_e до величины, превосходящей 1:2. Это является результатом того, что вследствие размагничивающего действия коммутационных и вихревых токов отрицательная F_{aq} при данном I_e возрастает не прямо пропорционально скорости, а медленнее и ограничивается до определенного предела [Л. 4, 5] скорости ω_k , после чего она начинает убывать.

Опытные регулировочные характеристики $v = f(I_e)$ и $I_q = \varphi(I_e)$ электромашинного усилителя с дополнительной обмоткой ω_{mq} показаны на рис. 4. Нанесенные на этом же рисунке расчетные кривые совпадают с опытными довольно близко. Расхождения в области низких скоростей объясняются влиянием насыщения.

Регулирование при постоянном моменте. Если машина полностью скомпенсирована, то

$$i_{em} = \frac{-\varphi \pm \sqrt{\varphi^2 - 4\psi\zeta}}{2\psi}, \quad (11)$$

где

$$\varphi = d(2v - 1) - 2k_{fa}\epsilon v^3; \quad d = 1 - \epsilon + \epsilon v^2; \quad (12)$$

$$\zeta = (d - k_{fa}\epsilon v^2) [d(v - 1) - k_{fa}v^3] + \mu_d a^2.$$

Зависимость $v = f(i_{em})$ при $\mu_d = 0,1$ и $\mu_d = 0$ в отсутствие реактивных полей ($\epsilon = 0$) и при наличии их ($\epsilon = 0,5$) дана на рис. 5. Эти кривые показывают, что при $\epsilon = 0$ в области скоростей больших $1,5\omega_{om}$, регулирование очень неустойчиво, так как ничтожные изменения тока в обмотке управления вызывают резкие скачкообразные изменения скорости. При $\epsilon \neq 0$ регулирование происходит плавно вплоть до максимальной возможной скорости, величина которой определяется (4). Таким образом, из анализа влияния реактивных полей в случае регулирования при $P_s = \text{пост}$ и $M_d = \text{пост}$ следует, что эти поля оказывают как положительное, так и отрицательное действие. С одной стороны, они вызывают необходимость увеличения н. с. обмотки управления, а следовательно, и их размеров, повышают расход мощности на управление. С другой стороны, они позволяют расширить пределы регулирования скорости вверх и повысить плавность регулирования.

Регулирование скорости изменением степени компенсации. Влияние неукompенсированной части н. с. продольной реакции якоря проявляется как качественно, так и количественно совершенно так же, как и в двигателе без дополнительных обмоток.

Для облегчения исследования влияния степени компенсации рассмотрим случай, когда $I_e = 0$ и реактивные поля отсутствуют. Тогда

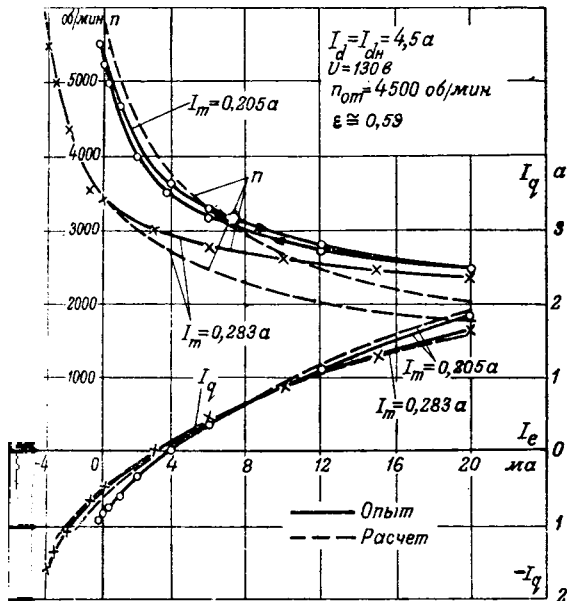


Рис. 4.

вление механической характеристики принимает вид

$$\nu_d = \frac{(1 + \delta\nu)(1 - \nu)}{(1 + \delta\nu^2)^2}. \quad (13)$$

наклон характеристик

$$\frac{d\nu}{d\nu_d} = -1 + \delta - 6\delta\nu + 3\delta\nu^2(1 - \delta) + 2\delta^2\nu^3. \quad (14)$$

при идеальном холостом ходе

$$\left(\frac{d\nu}{d\nu_d}\right)_{\nu=1} = -(1 + \delta). \quad (15)$$

При недокомпенсации $\delta > 0$ и $\frac{d\nu}{d\nu_d} < 0$ и ме-

ханические характеристики сходны по форме с характеристиками компаундного двигателя. Из [5], далее, следует, что наклон характеристик возрастает прямо пропорционально величине недокомпенсированной части н. с. реакции якоря.

При небольшой перекомпенсации, когда $-1 < \delta < 0$, жесткость характеристик будет выше, чем у двигателя параллельного возбуждения. В случае $\delta = -1$ характеристика становится бесконечно жесткой

$$\nu = 1 = \text{пост.} \quad (16)$$

при значительной перекомпенсации, когда $\delta < -1$, характеристики становятся возрастающими, неустойчивыми, как у противокомпаундного двигателя.

Опытные и расчетные характеристики $n = n(I_d)$ и $I_q = \varphi(I_d)$ при $I_e = \text{пост.}$ для различных значений коэффициента компенсации показаны на рис. 6. Они показывают, что уже при очень небольшом изменении степени компенсации форма характеристик двигателя существенно изменяется. Однако вследствие насыщения в практических условиях широкий диапазон регулирования получить затруднительно.

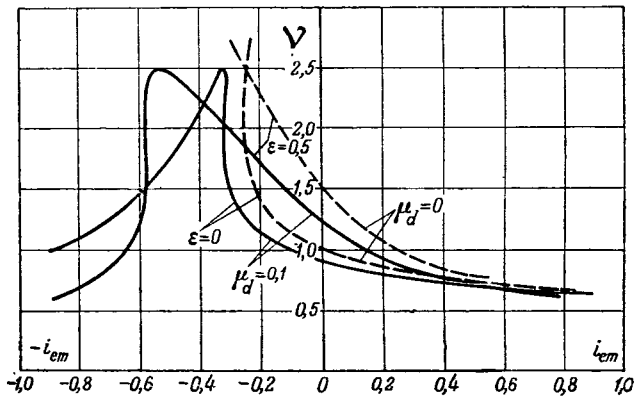


Рис. 5.

Следует еще отметить, что при испытаниях наблюдалось сильное влияние остаточного магнетизма. Так, всегда оказывалось, что характеристики машины $n = f(I_d)$ при увеличении нагрузки шли ниже, чем при обратном ходе, соотношение же для тока поперечной цепи было обратным.

Последовательная пусковая обмотка w_{dq} (рис. 7). Для упрощения анализа рассмотрим лишь случай, когда реактивные поля отсутствуют, и магнитная система не насыщена.

Обозначим: ω_n — номинальная скорость вращения двигателя в случае $I_q = 0$; M_{dn} — номинальный момент

$$\nu_n = \frac{\omega}{\omega_n}; \quad i_{em} = \frac{I_e}{I_{em}}; \quad \rho_d = \frac{I_{dn}R_d}{U_n};$$

$$\nu_{dn} = \frac{M_d}{M_{dn}}; \quad i_{dn} = \frac{I_d}{I_{dn}}; \quad M_{dn} = \frac{I_{dn}E_{dn}}{\omega_n};$$

$$\delta_n = \frac{I_{dn}\omega_n k_{fa}(1 - \psi)}{I_{em}\omega_e}.$$

Для характеристики двигателя можно найти следующее выражение

$$i_{dn} = \frac{1 \mp i_{em}(1 - \rho_d)\nu_n^2}{\rho_d + (1 - \rho_d)(1 + \delta_n\nu_n)\nu_n}, \quad (17)$$

$$\nu_{dn} = \frac{[1 \mp i_{em}(1 - \rho_d)\nu_n^2][1 + (\pm \rho_d i_{em} + \delta_n)\nu]}{[\rho_d + (1 - \rho_d)(1 + \delta_n\nu_n)\nu]^2}. \quad (18)$$

Характеристики $\nu_n = f_1(i_{dn})$ и $\nu_n = f_2(\nu_{dn})$ при полной компенсации для различных значений тока в обмотке управления показаны на рис. 8 и 9 сплошными линиями ($\rho_d = 0,167$). При больших нагрузках, когда основное поле, создаваемое последовательной обмоткой w_{dq} , велико, а ток I_q вследствие низкой скорости вращения мал, характеристики мало отличаются от характеристик обычного последовательного двигателя. По мере увеличения скорости вращения, влияние н. с. F_{aq} все более усиливается, и вид характеристик существенно изменяется.

При согласном действии последовательной обмотки и поперечной реакции якоря скорость вращения понижается, а характеристики машины сходны с характеристиками двигателя смешанного возбуждения. Жесткость характеристик увели-

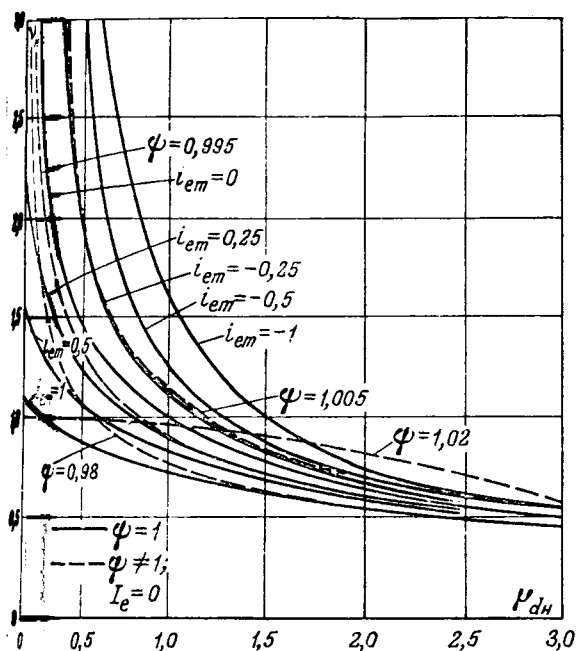


Рис. 9.

двигателя с последовательной пусковой обмоткой для значительного изменения скорости требуется затратить очень небольшую мощность в цепи обмотки управления. Также весьма существенно, что если в обычном двигателе последовательного возбуждения вследствие конструктивных затруднений трудно добиться плавного регулирования, то в рассматриваемой машине получить столь угодно плавное регулирование не представляет труда.

Регулирование изменением степени компенсации. Характеристики двигателя $v_n = f_1(i_{em})$ и $\omega = f_2(i_{em})$ при неполной компенсации и $I_e = 0$ показаны пунктирными линиями на рис. 8 и 9. При недокомпенсации скорость вращения падает. Характеристики же располагаются приблизительно параллельно характеристикам обычного двигателя последовательного возбуждения ($\psi = 1$; $I_e = 0$).

При перекомпенсации скорость вращения повышается. В противоположность двигателю с параллельной пусковой обмоткой механические характеристики получаются падающими — устойчивыми. Однако из анализа уравнений (17) и (18) следует, что при небольшой перекомпенсации недопустима, так как двигатель будет перегружен по току.

Характеристики двигателя, имеющего одновременно параллельную и последовательную пусковые обмотки, будут занимать промежуточное положение между характеристиками двигателя с параллельной и последовательной обмотками. Изменяя соотношение н. с. параллельной и последовательной обмоток, а также степень компенсации двигателя подобного типа, можно получать характеристики самой разнообразной формы, а за счет изменения тока в обмотке управления регулировать скорость вращения в широких пределах при очень малом потреблении мощности в цепях управления.

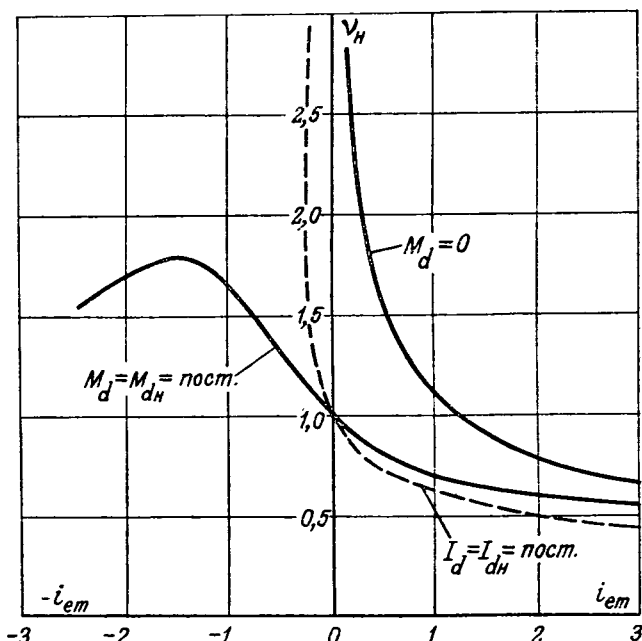


Рис. 10.

Выводы. 1. Из всех рассмотренных способов регулирования скорости электромашинного усилителя-двигателя особо ценным являются первые два способа: 1) изменение тока в обмотке управления и 2) изменение степени компенсации.

2. Путем изменения тока в обмотке управления можно осуществлять плавное регулирование скорости в широких пределах при очень малом потреблении мощности в цепях управления. Эта особенность является главнейшим достоинством двигателя, позволяющим производить автоматическое регулирование скорости его в зависимости от самых различных электрических и неэлектрических величин.

3. Путем изменения степени компенсации можно очень легко изменять форму естественной механической характеристики.

4. Сложность конструкции и высокая стоимость электромашинного усилителя, трудность выполнения на большую мощность, большие по сравнению с обычными двигателями постоянного тока габариты и вес ограничат область применения этого двигателя небольшими мощностями порядка 10...20 квт.

Литература

1. В. А. Борисов. Электромашинный усилитель в двигательном режиме. Электричество, № 8, 1950.
2. В. А. Борисов. Исследование работы электромашинного усилителя с поперечным возбуждением в двигательном режиме. Диссертация МЭИ, 1950.
3. В. С. Кулебакин. О работе электромашинных усилителей продольно-поперечного поля в режиме двигателя. Известия Академии наук СССР, ОТН, № 1, 1950.
4. В. С. Кулебакин. Основные статические характеристики амплидин-генераторов. Известия Академии наук СССР, ОТН, № 6, 1945.
5. Я. С. Эпштейн. Особенности проектирования амплидинов. Электричество, № 12, 1945.
6. Н. В. Горохов. Регулировочные характеристики шунтового двигателя постоянного тока. Электричество, № 9, 1947.

[13. 12. 1950]

Расчет квазирелаксационных колебаний в феррорезонансных цепях с дросселями насыщения

Кандидат техн. наук, доц. В. Е. БОГОЛЮБОВ

Московский энергетический институт
им. Молотова

В феррорезонансных цепях с дросселями насыщения при некоторых условиях получаются пе-

риодические импульсы тока. Такие импульсы могут быть в определенных целях использованы на практике, в особенности там, где нежелательно иметь механически движущиеся и изнашивающиеся детали. В частности, феррорезонансные цепи с дросселями насыщения могут быть применены для периодического возбуждения регистрирующих приборов, для мигающей сигнализации, для бесконтактных реле периодического действия и для ряда других целей.

В статье описывается методика расчета квазирелаксационных колебаний, возникающих при некоторых условиях в схеме рис. 1.

При малых значениях приложенного переменного напряжения колебаний нет, ток мал и отстает по фазе от напряжения. С повышением напряжения появляются сперва незначительные и быстрые, а затем все увеличивающиеся и замедляющиеся колебания «амплитуды» и «фазы»¹ тока. Форма колебаний делается резко несинусоидальной. При дальнейшем повышении напряжения колебания обрываются, и в цепи устанавливается режим большого емкостного тока.

Особый интерес для практического использования представляют колебания, имеющие наибольший период, однако, еще при таких напряжениях, когда колебания достаточно устойчивы.

При фиксированном токе подмагничивания колебания возможны при изменении напряжения сети в определенных пределах. Наоборот, при стабильном напряжении сети существует определенный диапазон возможных изменений тока подмагничивания I_0 , за пределами которого колебания не возникают.

С изменением тока подмагничивания соответственно меняется вольтамперная характеристика дросселя насыщения. Выбранный нами для расчета режим соответствует ниже описанной характе-

Предлагается простой приближенный метод расчета квазирелаксационных колебаний в феррорезонансных цепях с дросселями насыщения, пригодный для ориентировочных инженерных расчетов.

ристике. Эта характеристика должна располагаться по отношению к прямой, изображающей

зависимость напряжения на конденсаторе от тока, чтобы отсекаемые ею заштрихованные площади были равновелики (кривая 1, рис. 2). Колебания при этом подмагничивании получаются наиболее устойчивыми. Это подмагничивание будем в дальнейшем называть оптимальным или расчетным.

При больших значениях емкости расчетный режим получается при соответственно большем токе подмагничивания (кривая 2, рис. 2). При этом колебания амплитуд тока достигают соответственно больших значений. Таким образом величина емкости будет определяться требуемым значением тока.

Понятно, что нагрузка обмотки дросселя током и сердечника дросселя потоком будут увеличиваться вместе с емкостью конденсатора. Загрузка дросселя может быть задана величиной $x = \frac{\lg \alpha'}{\lg \alpha}$ (рис. 3), где α — угол, который разует с осью абсцисс прямая, проведенная в середину колена вольтамперной характеристики дросселя, α' — угол, образуемый с горизонталью вольтамперной характеристикой конденсатора. На рис. 3 представлена кривая намагничивания дросселя $B = f(H)$. Эта же кривая

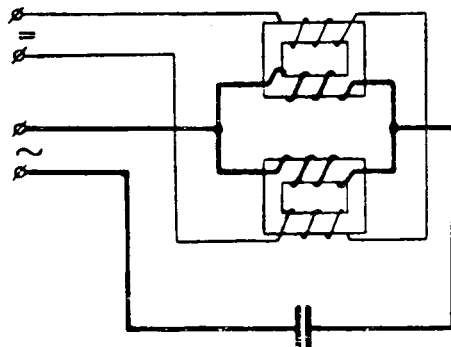


Рис. 1

¹ Если можно говорить об амплитуде и фазе ангармонического колебания.

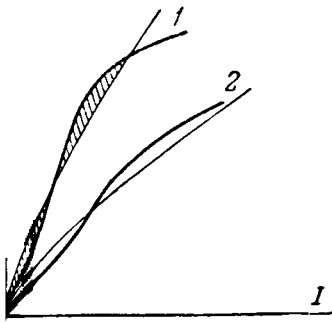


Рис. 2

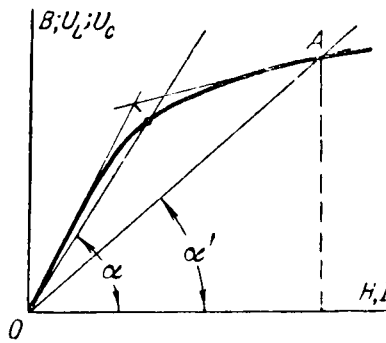


Рис. 3

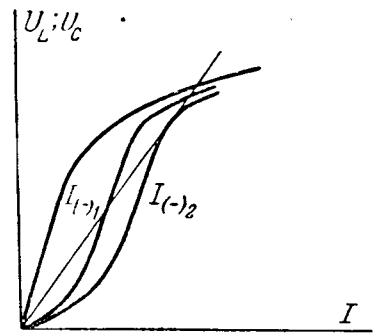


Рис. 4

другом масштабе дает реактивное напряжение на дросселе U_L , в зависимости от тока I . Прямая OA есть вольтамперная характеристика конденсатора $U_C = f(I)$.

Увеличивая емкость, нельзя увеличить период колебаний. Продолжительность периода определяется параметрами дросселя.

Обратимся теперь к выяснению влияния параметров дросселя на период колебаний.

Причина колебаний [Л. 2] кроется в периодическом появлении и исчезновении дополнительной подмагничивающей слагающей тока, которая соответственно меняет величину действующей индуктивности дросселя. Эта дополнительная слагающая тока, „средний ток“, записывается в контуре, образованном обмотками ременного тока. Продолжительность возникновения среднего тока сравнительно мала. Продолжительность исчезновения среднего тока в основном определяет период медленных колебаний.

Скорость затухания среднего тока $\frac{dI_c}{dt}$ была в ранее опубликованной статье автора [3].

$$\frac{dI_c}{dt} = - \frac{I_c R}{l + \frac{dl}{dI_c}} I_c \quad (1)$$

где R — сопротивление обмотки переменного тока дросселя. Величина l названа мерой индуктивности дросселя насыщения. Она равна отношению среднего значения результирующего магнитосодействия к среднему току:

$$l = \frac{\Psi_{p.c.}}{I_c}.$$

Из уравнения (1) следует, что скорость установления режима в дросселе насыщения определяется величинами l и R , отношение которых аналогично с линейной цепью было названо [4] мерой затухания дросселя насыщения

$$\delta_l = \frac{1}{\tau_l} = \frac{R}{l}.$$

В большинстве случаев на практике можно приближенно полагать l постоянной и равной одному из возможных значений этой величины.

(расчетное значение I_p). В этом случае решение уравнения (1) имеет такой вид:

$$I_c = I_{c.0} e^{-\delta_l t}.$$

Для приближенных расчетов можно принять (опыт это подтверждает), что период колебаний пропорционален величине, обратной мере затухания τ_l .

Перейдем непосредственно к рассмотрению приемов расчета колебаний.

Возможны следующие типы задач: 1) расчет параметров колебаний для заданного дросселя и 2) расчет параметров проектируемого дросселя. Первую задачу будем в дальнейшем называть прямой, вторую — обратной.

Прямая задача. Даны: 1) геометрические размеры дросселя, 2) марка стали сердечника, 3) числа витков обмоток переменного и постоянного тока, 4) ориентировочные пределы изменения тока или напряжений на дросселе и конденсаторе, которые должны иметь место в процессе колебаний.

Определить: 1) емкость конденсатора, 2) ток подмагничивания, 3) рабочее напряжение схемы, 4) период колебаний амплитуд.

Строим зависимость реактивной слагающей напряжений на дросселе от тока $U_L(I)$ при отсутствии подмагничивания (рис. 4). Не может вызвать затруднений и построение на том же графике семейства характеристик $U_L(I)$ при различных значениях поля подмагничивания [Л. 5, 6].

Емкость конденсатора будет определяться методом последовательных приближений. Задаемся величиной емкости конденсатора и строим его вольтамперную характеристику в тех же осях.

Будем называть предельным подмагничиванием, соответствующее вольтамперной характеристике дросселя, которая касается прямой $U_C = f(I)$, (кривая $I_{(-)2}$, рис. 4). Это наибольшее подмагничивание, при котором еще возможны колебания.

Для построения кривой зависимости активной слагающей напряжения от тока необходимо иметь таблицу потерь в стали. Вольтамперная характеристика ненагруженной схемы без труда находится путем геометрического суммирования активной и реактивной слагающих напряжений.

Пределы изменения тока при работе дросселя с оптимальным подмагничиванием, как показал

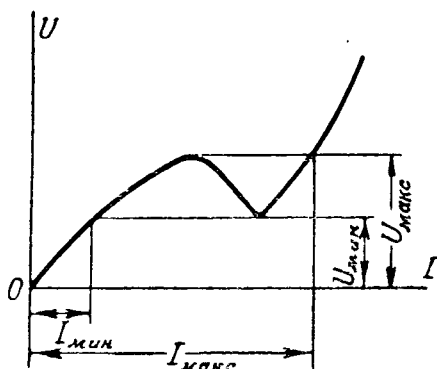


Рис. 5

опыт, можно оценить по вольтамперной характеристике схемы, построенной для предельного тока подмагничивания ($I_{\min} \dots I_{\max}$, рис. 5).

Сопоставляем полученный диапазон колебаний тока с данным. Задаемся новым значением емкости, вновь проделываем тот же расчет и т. д. Таким образом находим требуемую емкость конденсатора.

Для определения напряжения сети по найденной емкости строится результирующая вольт-

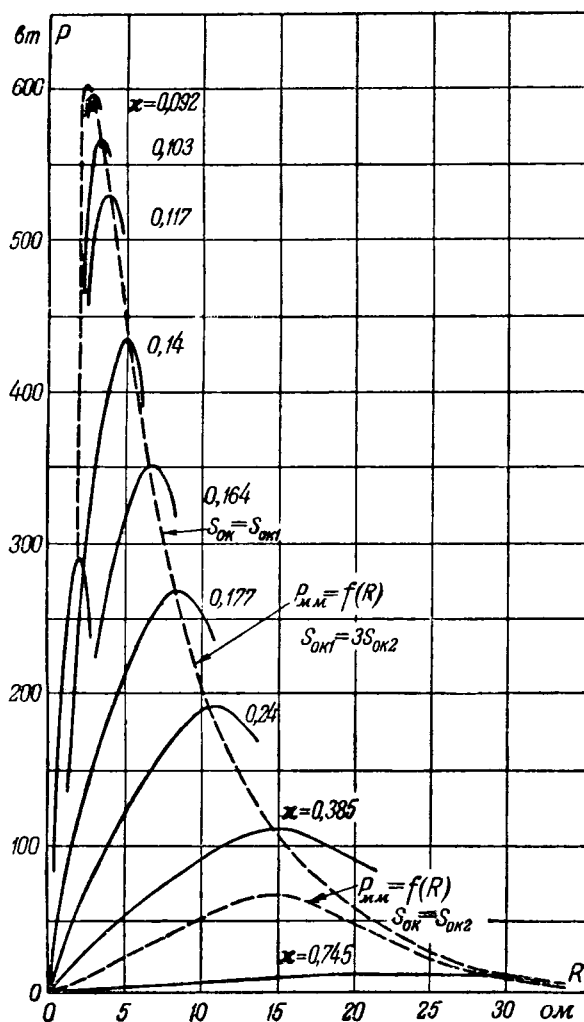


Рис. 6

амперная характеристика схемы. Напряжение сети U находится по эмпирической формуле

$$U = U_{\min} + k_p (U_{\max} - U_{\min}),$$

где величины U_{\min} и U_{\max} определяются по вольтамперной характеристике (рис. 5); эмпирический коэффициент k_p лежит в пределах от 0... Мы уже указывали, что наиболее интересны практического использования релаксационные колебания, получающиеся при напряжении близких к верхнему пределу напряжения, в котором еще возможны колебания (U_{\max} , рис. 5). Для таких режимов величину k_p следует брать в пределах 0,85 ... 0,97.

Перейдем к определению периода колебаний.

По величине I_{\min} и I_{\max} на кривой зависимости реактивного напряжения на дросселе тока (рис. 4) находим значения напряжения дросселе $U_{L \min}$, $U_{L \max}$ и соответствующие потокоцепления Ψ_{\max} и Ψ_{\min} (в дальнейшем эти величины обозначены b_1 и b_2).

Определяем постоянное потокоцепление, соответствующее расчетному току подмагничивания при отсутствии переменного тока (обозначено a).

Для упрощения дальнейших выкладок заменим кривую намагничивания кубической параболой $\Psi = k_1 \sqrt[3]{i}$ или $\Psi = \sqrt[3]{i}$; причем в последней формуле ток или потокоцепление следует изречь в каких-то условных единицах.

Средние значения результирующего потокоцепления a_{01} и a_{02} , соответствующие установившимся режимам с амплитудами переменного потокоцепления b_1 и b_2 , находим из соотношений [Л. 4]:

$$b_1 = \sqrt[3]{\frac{i_{(-)} \frac{1}{1,5} - a_{01}^2}{1,5}},$$

$$b_2 = \sqrt[3]{\frac{i_{(-)} \frac{1}{1,5} - a_{02}^2}{1,5}},$$

где $i_{(-)}$ — расчетный ток подмагничивания, приведенный к виткам первичной обмотки.

Средний ток, возникший в результате изменения амплитуды переменного потокоцепления от b_1 до b_2 , может быть определен по формуле [Л. 4]:

$$I_c = a_{01}^3 + \frac{3}{2} a_{01} b_2^2 - i_{(-)}.$$

Расчетная мера индуктивности дросселя в установившемся режиме находится, как среднее из ее крайних возможных значений:

$$L_p = \frac{a_{01} + a_{02}}{2}.$$

Теперь можно найти меру затухания дросселя и период колебаний по формуле $T = k_p \tau$, где k может принимать значения от 6,3 до 7 (если k_p выбрано в пределах 0,85 ... 0,97).

Таким образом, поставленную прямую задачу можно считать решенной.

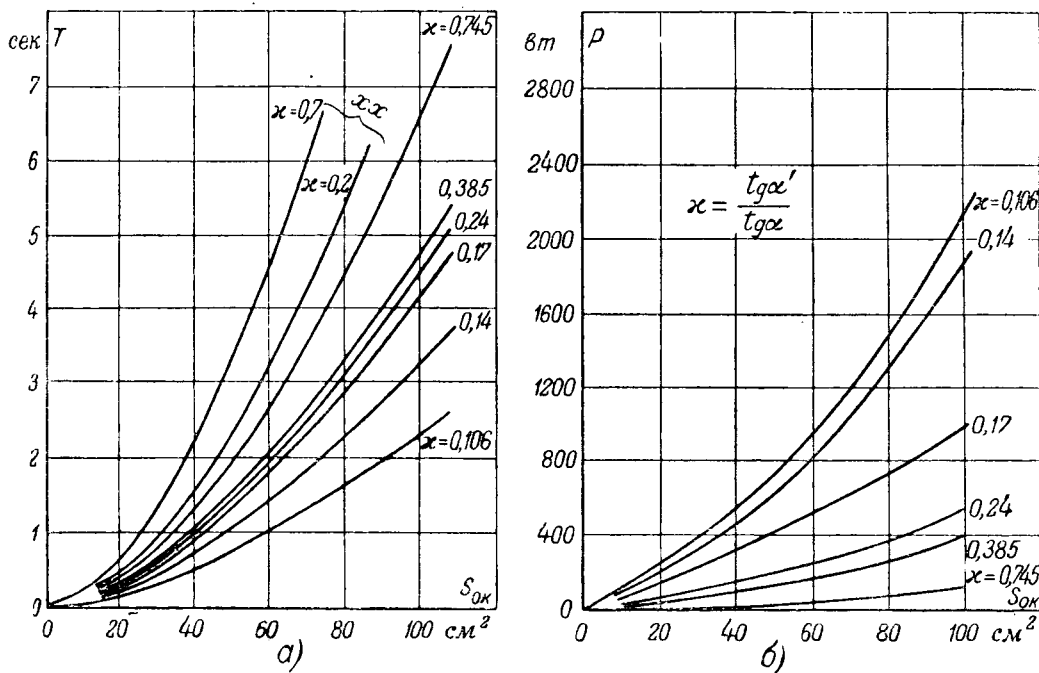


Рис. 7

Связь между параметрами дросселя и периодом становится особенно наглядной, если выразить размеры дросселя через один (например, сечение окна дросселя). Вопрос этот был только исследован автором на страницах журн. «Вестник электропромышленности». Это можно возможным в пределах ряда дросселей, параметры которых связаны между собой следующим образом: 1) окна всех дросселей геометрически подобны между собой; 2) сечения стали дросселей также подобны друг другу; 3) коэффициенты заполнения окна дросселей и сердечника дросселей сталью постоянны; 4) электромагнитные нагрузки (индукция и плотность тока) одинаковы.

В итоге расчетов были построены кривые, выявляющие связь меры затухания дросселя площадью сечения окна, а также кривые зависимости периода колебаний от площади сечения

На рис. 7, а приведена серия характеристик при различных x для случая не нагруженной схемы (помечены значком xx — «холостой»). Характеристики были проверены экспериментально для пяти дросселей с различными сечениями окон. Эксперимент дал вполне удовлетворительное совпадение с расчетом.

Для практического использования схемы нужно знать, как будет вести себя схема при наличии нагрузки. Нагрузка предполагается включенной в цепь переменного тока последовательно с конденсатором. Мощность, выделяемая в нагрузку, зависит от величины сопротивления нагрузки. Типичный график зависимости мощности нагрузки от ее сопротивления приведен на рис. 7, б (предполагается, что параметры дросселя постоянны).

Для каждого значения x существует свой максимум мощности при некотором оптимальном

сопротивлении нагрузки. Если взять сопротивление больше или меньше оптимального, то мощность нагрузки будет падать.

На рис. 6 дана пунктиром кривая, соединяющая все максимумы кривых мощности, в зависимости от сопротивления нагрузки $P(R)$ для различных x . Наибольший из всех максимумов мощности получается примерно тогда, когда сопротивление нагрузки равно сопротивлению дросселя. Для дросселей с меньшими сечениями окон и меньшими сопротивлениями кривые наибольшей мощности идут ниже, и максимумы их лежат дальше от оси ординат. Для сравнения на том же рис. 6 нанесена кривая наибольшей мощности для дросселя с вдвое меньшей площадью окна ($S_{ок1} = \frac{1}{3} S_{ок2}$).

В результате проведенного экспериментального исследования были построены кривые зависимости периода колебаний и мощности нагрузки от площади сечения окна [$T(S_{ок})$ и $P(S_{ок})$] в предположении, что сопротивления нагрузки оптимальные (рис. 7, а и б).

Эти кривые (рис. 7) будем называть обобщающими расчетными характеристиками.

Поставим более трудную и более ценную для практики задачу: определить параметры проектируемого дросселя для заданных колебаний.

Обратная задача. Рассмотрим два варианта постановки этой задачи. В варианте 1 даны: 1) напряжение сети, 2) мощность нагрузки, 3) период колебаний, 4) материал сердечника. Определить: 1) сечение окна и другие размеры магнитопровода, 2) число витков обмотки переменного тока, 3) емкость конденсатора, 4) ток и сечение меди.

По заданным периоду и мощности проводим две горизонталы на рис. 7, а и б. Выбираем такие

значения x , при которых требуемые площади окна и по периоду, и по мощности были бы близки друг к другу и минимальны. Из этих двух сечений окна выбираем большее.

Принятая величина x дает значение емкости конденсатора. Вместе с тем абсцисса точки пересечения характеристик (А, рис. 3) позволяет оценить значения напряженности поля и магнитной индукции в сердечнике дросселя. Располагая этими данными и исходя из конструктивных соображений [Л.1], находим длину средней силовой линии и сечение стали.

Кривая намагничивания сердечника нам дана, и для построения вольтамперной характеристики схемы нужно знать только число витков обмотки переменного тока.

Задаемся числом витков обмотки переменного тока w , строим вольтамперную характеристику схемы и оцениваем по ней пределы изменения тока ($I_{o \text{ мин}} \dots I_{o \text{ макс}}$). Найденный наибольший ток ($I_{o \text{ макс}}$) соответствует режиму работы схемы без нагрузки. Значение тока при нагрузке находим методом последовательных приближений. По величине тока $I_{o \text{ макс}}$ можно определить предварительное значение сопротивления нагрузки $R = \frac{P}{I_{o \text{ макс}}^2}$, где P — заданная мощность нагрузки.

Затем повторяем построение внешней характеристики с учетом полученного сопротивления нагрузки, находим второе приближение для тока и т. д. до тех пор, пока расхождения в получающихся значениях тока не сделаются достаточно малыми.

Остановившись на выборе тока и вместе с тем — на выборе вольтамперной характеристики, находим по ней напряжение сети. Найденному напряжению сети соответствует число витков, которым мы ранее задались. В координатах $U(w)$ наносим точку. Задаемся другим числом витков, вновь проделываем этот расчет и т. д. до получения кривой $U(w)$.

По заданному напряжению сети находим число витков.

Напомним, что полученное из расчета сопротивление нагрузки будет оптимальным, т. е. таким, в котором выделяется наибольшая мощность при данной емкости.

В варианте 2 даны: 1) мощность нагрузки, 2) наибольшее значение тока, 3) период колебаний, 4) материал сердечника. Найти: 1) сечение окна и другие размеры магнитопровода, 2) число витков обмотки переменного тока, 3) емкость конденсатора, 4) напряжение сети.

Задача решается так же, как и по варианту 1, включительно до момента определения наибольшего значения тока по вольтамперной характеристике с той, однако, разницей, что при построении вольтамперной характеристики учитываем известное сопротивление нагрузки. Полученное значение тока соответствует числу витков, которое мы ранее выбрали. Задаемся другими числами витков и получаем новые значения тока $I_{\text{макс}}$. Строим кривую зависимость тока $I_{\text{макс}}$ от числа витков w . По заданному $I_{\text{макс}}$ находим w . По полученному числу витков строим вольтамперную характеристику схемы и по ней находим требуемое напряжение сети. Для питания схемы от сети с иным напряжением необходимо установить промежуточный трансформатор.

Недостатком изложенных способов расчета является их малая точность. Сопоставив результаты расчета с данными опыта показывает, что процент ошибки может достигать 15—20. Преимущество изложенного метода заключается в его простоте и наглядности, и в возможности контролировать промежуточные результаты.

Литература

1. Г. Н. Петров. Трансформаторы. Госэнергоиздат, 1934.
2. В. Е. Боголюбов. Квазирелаксационные явления в феррорезонансных цепях с подмагничиванием. Электричество, № 6, 1949.
3. В. Е. Боголюбов. Квазирелаксационные явления в феррорезонансных цепях. Труды МЭИ, № 1, 1948.
4. В. Е. Боголюбов. Переходные процессы в цепях насыщения, вызванные изменением напряжения. Электричество, № 3, 1950.
5. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, 1948.
6. Boyajian, Theory of D — C excited Iron — core transformers, JALIEE, Oct, 1924.

[5.2]



Дроссельный делитель для измерения больших постоянных токов и малых сопротивлений

Кандидат техн. наук Е. К. МИХАЙЛОВА

ВНИИ метрологии им. Менделеева

Для измерения больших постоянных токов в промышленности применяются главным образом амперметры и ампервольметры, и в последнее время измерительные трансформаторы постоянного тока. Погрешность амперметров с шунтами лежит в пределах от 2 до 5%, погрешность измерительных трансформаторов постоянного тока обычно равна 1% и в лучшем случае составляет 0,5%. Такое положение не считается нормальным, так как требования, предъявляемые промышленностью к измерительным приборам большого постоянного тока, в наше время резко возросли.

С точки зрения этих требований и современного состояния измерительной техники погрешность приборов для измерения больших постоянных токов должна лежать в пределах от 0,2 до 0,5%, и для поверки указанных приборов должны быть созданы образцовые установки, обеспечивающие измерения с погрешностью не более 0,1%.

Изучение теории подмагничиваемых постоянных током дросселей привело к мысли о возможности разработки прибора для измерения больших постоянных токов, поверки шунтов и поверки трансформаторов постоянного тока с указанной выше точностью.

Разработанный автором дроссельный делитель (рисунк) представляет устройство, предназначенное для установления значений двух постоянных токов в определенном отношении друг к другу, определяемом коэффициентом делителя K . В наличии такого делителя тока измерение больших постоянных токов сводится к измерению меньшего вспомогательного тока. Делитель назван дроссельным, так как основным элементом являются дроссели нулевого ферромагнитного усилителя высокой чувствитель-

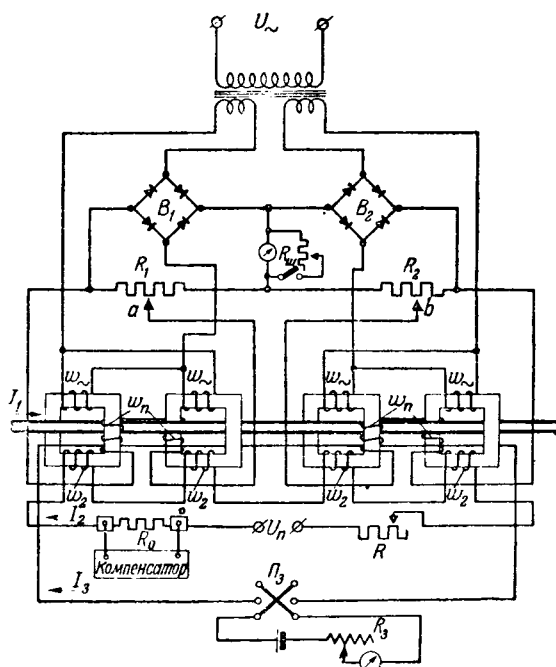
Рассматривается новое устройство для измерения больших постоянных токов. Измерение большого постоянного тока сводится к измерению значительно меньшего вспомогательного тока. Приводятся результаты проверки опытного образца прибора.

шого тока магнитным полем вспомогательного тока.

Компенсация происходит в том случае, когда

дроссели ферромагнитного усилителя используются в качестве ярма, охватывающего шину с большим током, дополнительные же обмотки, наложенные на эти дроссели, дают возможность создать магнитное поле равной напряженности, но направленное противоположно магнитному полю большого тока.

При полной компенсации обоих полей, т. е. при отсутствии показаний нулевого стрелочного



Дроссельный делитель тока для измерения больших постоянных токов и малых сопротивлений.

B_1 и B_2 — полупроводниковые выпрямители; R_1 и R_2 — сопротивления, шунтирующие обмотки обратной связи; a, b — подвижные контакты; w_1 — витки обмотки переменного тока; w_2 — витки обмотки обратной связи; w_3 — витки обмотки компенсирующего постоянного тока; I_1 — измеряемый большой ток; I_2 — компенсирующий ток; I_3 — вспомогательный постоянный ток для приведения делителя тока к состоянию компенсации.

гальванометра, включенного в индикаторную цепь выхода ферромагнитного усилителя, коэффициент делителя K определится отношением чисел витков обмотки, несущей большой постоянный ток, и обмотки с вспомогательным постоянным током.

$$K = \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}.$$

При неполной компенсации нулевой гальванометр покажет отклонение в ту или другую сторону, в зависимости от полярности ампервитков результирующего поля. Это даст возможность быстро отрегулировать вспомогательный ток до значения, соответствующего состоянию компенсации, и произвести измерение компенсирующего тока.

Чем больше требования к точности измерения большого постоянного тока, тем точнее нужно измерять компенсирующий ток. При производственных измерениях достаточно измерить ток I_2 стрелочным прибором класса 0,2 или 0,5. При поверочных работах значение I_2 определяется по напряжению на образцовом сопротивлении R_0 , измеренному потенциометром.

При очень высокой чувствительности дроссельного делителя тока, вследствие изменения сопротивлений контактов и значений самих нагрузочных сопротивлений с нагревом, очень затруднена балансировка делителя тока.

Решение этой экспериментально трудной задачи достигается введением дополнительной третьей цепи, питающейся от аккумулятора или от зажимов измеряемой цепи. Ток третьей цепи I_3 , идущий по одиночному проводу, продетому через кольцевые сердечники делителя, создает ампервитки, алгебраически складывающиеся с ампервитками большого тока.

Сопротивление R_3 позволяет изменять значение тока I_3 в достаточно широком диапазоне. Переключателем P_3 в случае надобности можно изменять направление тока I_3 .

Предварительно отрегулировав помощью R_2 при пониженной чувствительности гальванометра значение вспомогательного тока I_2 , всю дальнейшую регулировку до состояния компенсации производят очень тонко током I_3 при самой высокой чувствительности гальванометра. Во время выполнения поверочных работ при помощи тока I_3 можно получить непосредственно поправки к поверяемым величинам.

В схеме дроссельного делителя тока каждая половина дифференциального усилителя состоит из двух кольцевых сердечников с окном, достаточным для продевания шины, рассчитанной на прохождение большого тока.

Обмотки переменного тока двух сердечников каждой половины схемы соединены параллельно, но встречно. В любой полупериод в одном из сердечников постоянный ток совпадает по направлению с переменным током, а в другой полупериод они противоположны. Такое соединение обмоток обеспечивает уничтожение нечетных гармоник в цепях постоянного тока усилителя и дает почти полное освобождение цепи постоянного

тока от четных гармоник, так как они замыкаются в параллельных ветвях и не выходят за пределы разветвления.

Как видно из схемы, обмотки переменного тока присоединены к отдельным вторичным моткам трансформатора. В цепь этих обмоток включены полупроводниковые двухполупериодные выпрямители. Со стороны выпрямленного выпрямители соединены последовательно, с сопротивлениями R_1 и R_2 . В мостик между выпрямителями включен нулевой стрелочный гальванометр, зашунтированный сопротивлением $R_{ш}$ изменения чувствительности гальванометра. Следует иметь в виду, что различным сопротивлениям $R_{ш}$ соответствует не только различная чувствительность гальванометра, но и вообще изменение режима работы усилителя, так как соответственно изменяется активное сопротивление выхода.

Часть выпрямленного тока каждой половины схемы, определяемая условиями оптимального режима, регулируется положением контактов a и b и направляется в специальные обмотки. Эти обмотки для двух сердечников каждой половины схемы соединены последовательно и соединены с нулем. Назначение этих обмоток двоякое. Во-первых, они являются обмотками обратной связи, так по ним протекает часть выпрямленного тока выхода каждой половины схемы. Для одной половины схемы обратная связь является положительной, т. е. она увеличивает эффект подмагничивания вследствие совпадения направлений тока входа и тока обратной связи. Для второй половины схемы обратная связь отрицательна. В этой половине схемы ток обратной связи противоположен по направлению току входа и, следовательно, уменьшает эффект подмагничивания. Это обстоятельство дает возможность использовать обмотки обратной связи одновременно и в качестве обмоток предварительного поляризирующего подмагничивания, благодаря которому схема делается чувствительной к полярности тока входа.

Действительно, если обе половины схемы идентичны во всех отношениях, то при предварительном подмагничивании и отсутствии тока входа выпрямленные токи обеих половин схемы будут равны друг другу, и ток в гальванометре будет отсутствовать.

Величина начального реактивного сопротивления каждой половины схемы определяется оптимальными условиями работы усилителя и обеспечивается надлежащим выбором параметров: частоты переменного тока и выбором начального значения магнитной проницаемости материала сердечника. Выбор определяется величиной напряженности поля предварительного подмагничивания.

После установленного оптимального значения напряженности поля предварительного подмагничивания один из контактов, a или b , закрепляется, а другой же контакт остается свободным и служит для установления нуля усилителя.

При появлении сигнала на входе, что в дроссельном делителе тока соответствует отсутствию

насации ампервитков большого постоянного тока; ампервитками вспомогательного тока, равные обеих половин дифференциальной схемы не нарушено, и через гальванометр пойдет нулевой ток, полярность которого зависит от направления результирующего магнитного поля.

Предложенный способ поляризующего поля и установка усилителя на нуль являются простыми по сравнению с ранее известными способами. Благодаря совмещению функций обмоток w_1 и w_2 в качестве обмоток как обратной связи и обмоток поляризующего подмагничивания достигнута цель: увеличения подмагничивания в одной половине схемы и ослабления в другой вызывает резкое возрастание чувствительности схемы и делает возможным строгое выполнение условий оптимального режима.

Особо существенным является то, что благодаря автоматическому увеличению напряженности поляризующего поля с увеличением основного подмагничивающего поля предельное значение погрешности также автоматически увеличивается. Однако, такое автоматическое увеличение не является предельным, но расширение предела измерения усилителя может быть получено очень значительно.

В усилителе же с обычным способом создания основного поляризующего поля предельное значение основного подмагничивающего поля очень мало, что является существенным их недостатком. Действительно, предельным значением подмагничивающего поля в таких усилителях является значение напряженности поляризующего поля. Пока основное подмагничивающее поле меньше этого предельного значения, ток выхода усилителя возрастает с увеличением подмагничивания. Характеристика усилителя в этом участке является прямолинейной. Но после достижения предельного значения ток выхода падает до нуля («ложный нуль»), а затем переходит в область отрицательных значений. Следовательно, рабочим участком характеристики таких усилителей является участок, соответствующий подмагничиванию, не превосходящим напряженность поляризующего поля. А так как оптимальная напряженность поляризующего поля соответствует точке перегиба кривой намагничения, сня-

той на переменном токе, то для пермаллоя это означает, что предельное значение подмагничивающего поля лежит в области очень слабых полей.

При применении в качестве дроссельного делителя тока усилителей с малым предельным значением подмагничивающего поля «ложный нуль» можно легко принять за действительную компенсацию полей. В таком случае измерение большого тока будет содержать значительную погрешность.

В предложенной схеме с увеличением основного подмагничивающего поля увеличивается ток выхода, а следовательно, и напряженность поляризующего поля. Предельное значение подмагничивающего поля, а также и «ложный нуль» в этом случае сдвигаются в сторону больших полей, что исключает возможность появления погрешности.

Следует отметить также и то обстоятельство, что благодаря применению отрицательной обратной связи время запаздывания между полным эффектом на выходе усилителя и появлением подмагничивающего поля в сердечниках, несмотря на параллельность соединения обмоток переменного тока, очень незначительно.

Исследования прибора, проведенные в лаборатории электрических измерений ВНИИМ, дали следующие основные результаты.

1. Порог чувствительности делителя тока соответствует 5 мА постоянного тока, проходящего по одиночному проводу при номинальном токе делителя 15 000 А.

2. Прибор обеспечивает измерение больших постоянных токов, от 100 А до 15 000 А с точностью 0,1%.

3. Погрешности прибора, вызываемые влиянием внешних факторов, гистерезисными явлениями и рядом других причин, имеют порядок сотых и тысячных долей процента.

На основании полученных результатов испытания дроссельный делитель тока можно рекомендовать в качестве основного прибора для измерения больших постоянных токов с повышенной точностью, а также для проверки измерительных трансформаторов постоянного тока и шунтов на большие токи при номинальных их значениях.

[21. 11. 1949]



Простой метод независимого измерения емкости

Инж. А. И. ФЮРСТЕНБЕРГ

Геолого-исследовательское бюро Министерства Угольной промышленности

Автором был описан метод пропорциональных токов [Л. 1] для измерения емкости и индуктивности без помощи образцовых конденсаторов или индуктивностей. Переход на питание схемы от сети переменного тока существенно упрощает измерение. Предлагаемый метод измерения состоит в достижении равенства падений напряжения на активных сопротивлениях R_1 и R_3 (рис. 1).

Если сеть дает синусоидальное напряжение и схема уравновешена (т. е. $U_{A3} = U_{B3}$), то, очевидно,

$$\frac{U}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C_x}\right)^2 + R_1^2}} R_1 = \frac{U}{R_2 + R_3} R_3.$$

Как будет указано ниже, $R_1 \ll \frac{1}{\omega C_x}$, что позволяет под корнем пренебречь вторым слагаемым.

Тогда, получим:

$$C_x \approx \frac{1}{\omega R_1} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}; \quad (1)$$

здесь C_x — измеряемая емкость, ϕ ;
 R_1, R_2, R_3 — известные активные сопротивления, Ω ;
 ω — круговая частота колебаний, $1/\text{сек}$.

Равенство (1) справедливо при достаточно большом входном сопротивлении индикатора, когда можно пренебречь его шунтирующим действием на сопротивления R_1 и R_3 . При постоянстве величин R_2, R_3, ω переменное сопротивление R_1 может быть проградуировано непосредственно в единицах емкости.

Уравновешивание схемы производится в следующей последовательности.

1. Присоединив индикатор к сопротивлению R_3 , изменяют напряжение на зажимах схемы до тех пор, пока стрелка прибора отклонится на удобный для отсчета угол (не менее 20 делений шкалы).

2. Переключив индикатор, изменяют сопротивление R_1 до тех пор, пока не будет достигнуто первоначальное отклонение стрелки.

Приводится простая схема измерения емкости при частоте 50 гц, не нуждающаяся в применении образцовых конденсаторов или индуктивностей. Погрешность измерения составляет $\pm 0,3\%$.

3. Для проверки изменности напряжения сети производят еще 1-2 переключения и, если

нужно, корректируют величину сопротивления магазина R_1 .

Погрешность, обусловленная гармониками при индикаторе с квадратичной характеристикой, составляет:

$$\delta_r = \left[\sqrt{\frac{1 + 4\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + 9\left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 + \dots}{1 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 + \dots}} - 1 \right] 100$$

где U_1 — амплитуда напряжения основной гармоники;

U_2, U_3 — амплитуды соответствующих гармоник.

При использовании простого фильтра согласно данным, приведенным на рис. 2, можно полностью исключить из рассмотрения влияние гармоник сетевого напряжения.

Для надежной работы схемы следует пользоваться трансформатором мощностью не менее 50 в. Его вторичная обмотка должна давать 150—170 в.

Регулировку напряжения на зажимах измерительной схемы не следует осуществлять за счет

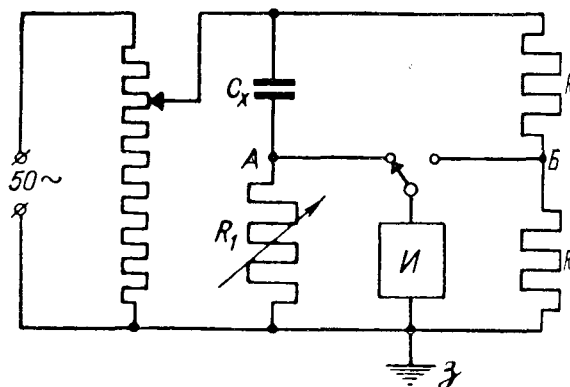


Рис. 1. Принципиальная схема.
И — индикатор.

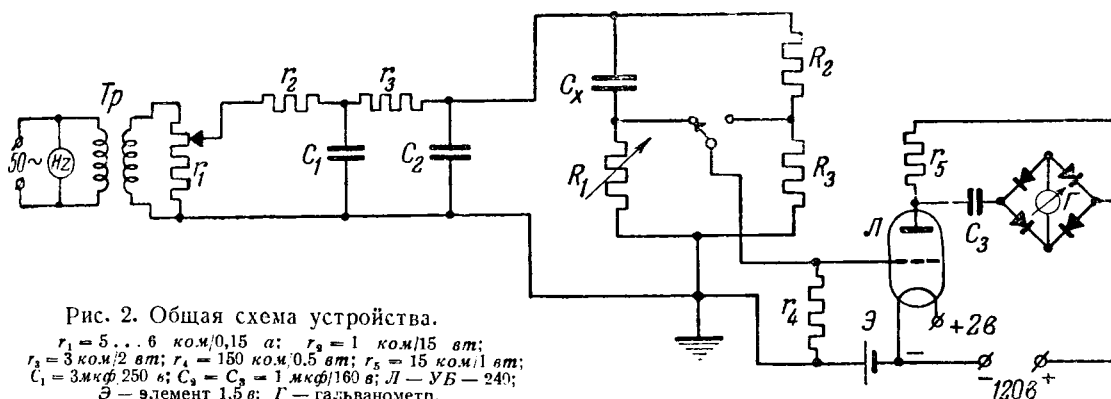


Рис. 2. Общая схема устройства.

$r_1 = 5 \dots 6 \text{ ком/0,15 а; } r_2 = 1 \text{ ком/15 вт;}$
 $r_3 = 3 \text{ ком/2 вт; } r_4 = 150 \text{ ком/0,5 вт; } r_5 = 15 \text{ ком/1 вт;}$
 $C_1 = 3 \text{ мкф/250 в; } C_2 = C_3 = 1 \text{ мкф/160 в; } Л - УБ - 240;$
 $Э - \text{элемент 1,5 в; } Г - \text{гальванометр.}$

тата в первичной обмотке трансформатора, как это привело бы к существенному искажению формы кривой напряжения.

Наиболее подходящим индикатором является реостатный усилитель, на выходе которого включен мостовой выпрямитель и магнитоэлектрический гальванометр, например, типа Φ с чувствительностью 0,2 мкА на 1 деление шкалы. В малогабаритных купроксах и входном напряжении порядка 30 мВ отклонение стрелки составляет 20 делений шкалы, что является вполне статочным [Л. 2].

Отметим, что при наличии в сети быстрых изменений напряжения порядка $\pm 1,5\%$ вероятная погрешность арифметического среднего из n измерений одной и той же величины будет не больше $\delta_k = +0,1\%$.

Стабилизация напряжения высоковольтным реостатом сокращает время, потребное для выполнения измерения. Впрочем, при большом числе измерений намного удобнее работать с обычными приборами.

Описанный выше индикатор при использовании чувствительного гальванометра является прибором с характеристикой, близкой к квадра-

Индикаторы с амплитудной или линейной характеристикой более подвержены влиянию гармоник и поэтому не могут быть рекомендованы. Во избежание возникновения существенной погрешности нужно, чтобы входное сопротивление было, по крайней мере, в 1 000 раз больше максимального значения R_1 . Поскольку изменение входного сопротивления индикатора является нежелательным усложнением метода, не следует допускать применения R_1 , превышающего примерно 1 500 ом.

Это требование подкрепляется также под-
 тенностью индикатора влиянию паразит-
 емкостных связей, наблюдающихся при
 $> 2...3 \text{ ком.}$ При $R_2 = 10 \text{ ком.}$, $R_3 = 5 \text{ ом}$ и
 $= 1000 \text{ мкмкф}$, $R_1 \approx 1600 \text{ ом.}$ Измерение
 емкостей потребовало бы, с одной сто-
 ра, более тщательного контроля изоляции кон-
 диктора (см. ниже) и, с другой стороны, пона-
 чась бы значительно увеличивать напряже-
 на конденсаторе, что связано с опасностью
 взрыва.

Беспроволочное сопротивление r_4 , шунтирующую цепь индикатора, применяется для

предотвращения отброса стрелки прибора, наблюдающегося при переключении вследствие обрыва цепи сетки. При $R_1 > 150 \text{ ом}$ влияние шунта должно быть принято во внимание с точностью порядка $\pm 5\%$.

Можно доказать, что активные потери в объекте измерения приводят к погрешности

$$\delta_p = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \operatorname{tg} \delta + 0,5 \operatorname{tg}^2 \delta \right) 100\%. \quad (3)$$

Так как $\frac{R_3}{R_2 + R_3}$ представляет малую дробь, равно как и квадрат коэффициента потерь ($\text{tg } \delta$), величина δ_0 очень мала.

Иногда случается, что измеряемый конденсатор имеет значительную утечку, вызванную загрязнением или влажностью. Поэтому перед началом измерений следует грубо измерить сопротивление изоляции конденсатора. Сопротивление изоляции должно быть по крайней мере в 50 раз больше, чем емкостное сопротивление измеряемого конденсатора.

Величины образцовых сопротивлений

Измеряемая емкость, <i>мкф</i>	R_1 , <i>ом</i>	R_2 , <i>ом</i>	R_3 , <i>ом</i>
0,001—0,01	1 600—160	10 000	5
0,01—0,1	1 600—160	10 000	50
0,1—10	640—6,4	10 000	200

Для повышения точности измерения необходимо проверять частоту сети.

Полагая, что погрешность постоянных сопротивлений и магазина сопротивления составляет $\pm 0,1\%$ и что погрешность частотомера равна $\delta_f \pm 0,2\%$, определим вероятную погрешность измерения:

$$\Delta = \pm \sqrt{\delta_{R_1}^2 + \delta_{R_2}^2 + \delta_{R_3}^2 + \delta_f^2 + \delta_k^2} =$$

$$= \pm \sqrt{0,1^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,2^2 + 0,1^2} \approx \pm 0,3\%.$$

Стрелочный частотомер может быть заменен электрическими часами с синхронным двигателем, показания которых сопоставляются с отсчетом по секундомеру. Включение секундомера производится при начале измерений, которое выбирается в момент, когда стрелка часов проходит через цифровую отметку. При окончании n -го уравнивания схемы экспериментатор смотрит на часы и одновременно нажимает кнопку секундомера.

В этом случае измеряемая величина вычисляется по формуле

$$C_x = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \frac{n}{\sum R_1} \frac{T_q}{314 T_c}; \quad (4)$$

здесь $\sum R_1$ — сумма значений R_1 , полученная в результате n уравниваний схемы;

T_q — время, отмеченное синхронными часами, сек;

T_c — время, указываемое секундомером, сек.

Частота колебаний сети бывает подвержена быстрым изменениям, достигающим $\pm 0,1\%$, поэтому при применении синхронных часов следует

затрачивать на каждое из n измерений примерно одинаковое время.

Опытная проверка метода дала хорошие результаты. Расхождения между измерениями, полученными данным методом, и точным методом составляло $\pm (0,2...0,3)\%$.

Внутренняя сходимость результатов измерений, определяемая при измерении двух конденсаторов по 1 000 мкмкф и двух конденсаторов 0,1 мкф (каждый из конденсаторов был измерен отдельно, а затем измерялись параллельно включенные однотипные конденсаторы) находилась в пределах $\pm (0,1...0,15\%)$.

Следует отметить, что в связи с тенденцией повышать стабильность частоты энергосистем в недалеком будущем не будет необходимости в контроле частоты во время измерений. Тогда предлагаемый метод измерения емкости еще более упростится.

Литература

1. А. И. Фюрстенберг. Измерение импедансов, емкости, индуктивности и частоты. Доклады Академии наук СССР, т. 51, стр. 273, № 4, 1946.
2. А. И. Фюрстенберг. Стрелочный прибор в качестве индикатора равных показаний и измерение потерь на сопротивлениях. Электричество, стр. 63, № 8, 1950.

[30, 5]



Определение постоянных интегрирования при решении дифференциального уравнения высокой степени

О. М. БОГАТЫРЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Если искомая функция определяется линейным дифференциальным уравнением высокой степени, то задача определения постоянных интегрирования, на основе заданных или ранее найденных начальных значений искомой функции и ее производных, сводится к совместному решению системы алгебраических уравнений с многими неизвестными. Эта весьма кропотливая и трудоемкая задача может быть значительно облегчена, если применить один из двух нижеисследованных способов ее решения.

Первый способ заключается в составлении операторного изображения дифференциального уравнения для искомой функции с последующим применением формулы разложения Хевисайда.

Два метода, описанные в статье, доведены до технического применения. Первый метод построен на базе операторного исчисления. Второй — основан на классическом решении задачи. Применение предложенных методов может облегчить расчеты переходных процессов в сложных системах высокого порядка.

Второй способ заключается в непосредственном вычислении известных постоянных интегрирования по готовым формулам, выведенным на основе последовательного и закономерного решения системы алгебраических уравнений.

Первый способ многим неизвестен и нуждается в описании и обработке. Второй способ представляет собой результат, полученный автором при закономерном решении системы уравнений. По количеству вычислений, вероятно, оба способа примерно одинаковы, и потому дать предпочтение одному из них пока не представляется возможным. Перейдем к описанию первого способа, причем для большей конкретности изложения рассмотрим дифференциальное уравнение 6-го порядка без правой части.

Первый способ. Пусть искомая функция задана уравнением 6-го порядка с постоянными коэффициентами:

$$(p^6 + d_5 p^5 + d_4 p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0) f(t) = 0, \quad (1)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования.

Как известно, решение такого уравнения имеет вид:

$$f(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t} + A_4 e^{p_4 t} + A_5 e^{p_5 t} + A_6 e^{p_6 t}, \quad (2)$$

p_1, p_2, \dots и т. д. — корни характеристического уравнения 6-й степени¹;

A_1, A_2, \dots и т. д. — постоянные интегрирования, определяемые на основании начальных условий. Эти начальные условия всегда в конечном счете сведутся к нахождению начальных значений искомой функции $f(t)$ и ее пяти производных.

Таким образом, будем считать известными:

$$f(0), f^I(0), f^{II}(0), f^{III}(0), f^{IV}(0), f^V(0).$$

Применим к заданному дифференциальному уравнению (1) преобразование Лапласа-Карсона, и напишем изображение этого уравнения в виде функции оператора p .

$$\text{Пусть } f(t) \div F(p). \quad (3)$$

Тогда, переписывая уравнение (1) в виде

$$f^{VI}(t) + d_5 f^V(t) + d_4 f^{IV}(t) + d_3 f^{III}(t) + d_2 f^{II}(t) + d_1 f^I(t) + d_0 f(t) = 0 \quad (4)$$

принимая во внимание, что

$$\left. \begin{aligned} d_0 f(t) &\div d_0 F(p); \\ d_1 f^I(t) &\div d_1 p [F(p) - f(0)]; \\ d_2 f^{II}(t) &\div d_2 p^2 \left[F(p) - f(0) - \frac{f^I(0)}{p} \right]; \\ d_3 f^{III}(t) &\div d_3 p^3 \left[F(p) - f(0) - \frac{f^I(0)}{p} - \frac{f^{II}(0)}{p^2} \right]; \\ d_4 f^{IV}(t) &\div d_4 p^4 \left[F(p) - f(0) - \frac{f^I(0)}{p} - \frac{f^{II}(0)}{p^2} - \frac{f^{III}(0)}{p^3} \right]; \\ d_5 f^V(t) &\div d_5 p^5 \left[F(p) - f(0) - \frac{f^I(0)}{p} - \frac{f^{II}(0)}{p^2} - \frac{f^{III}(0)}{p^3} - \frac{f^{IV}(0)}{p^4} \right]; \\ f^{VI}(t) &\div p^6 \left[F(p) - f(0) - \frac{f^I(0)}{p} - \frac{f^{II}(0)}{p^2} - \frac{f^{III}(0)}{p^3} - \frac{f^{IV}(0)}{p^4} - \frac{f^V(0)}{p^5} \right], \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где p является уже множителем, — изображение уравнения (1) или (4) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} F(p)[d_0 + d_1 p + d_2 p^2 + d_3 p^3 + d_4 p^4 + d_5 p^5 + p^6] = \\ = p[d_1 f(0) + d_2 f^I(0) + d_3 f^{II}(0) + d_4 f^{III}(0) + \\ + d_5 f^{IV}(0) + f^V(0)] + p^2[d_2 f(0) + d_3 f^I(0) + \\ + d_4 f^{II}(0) + d_5 f^{III}(0) + f^{IV}(0)] + p^3[d_3 f(0) + \\ + d_4 f^I(0) + d_5 f^{II}(0) + f^{III}(0)] + p^4[d_4 f(0) + \\ + d_5 f^I(0) + f^{II}(0)] + p^5[d_5 f(0) + f^I(0)] + p^6 f(0). \end{aligned} \quad (6)$$

Вводя обозначения:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= d_1 f(0) + d_2 f^I(0) + d_3 f^{II}(0) + d_4 f^{III}(0) + \\ &\quad + d_5 f^{IV}(0) + f^V(0); \\ b_2 &= d_2 f(0) + d_3 f^I(0) + d_4 f^{II}(0) + d_5 f^{III}(0) + f^{IV}(0); \\ b_3 &= d_3 f(0) + d_4 f^I(0) + d_5 f^{II}(0) + f^{III}(0); \\ b_4 &= d_4 f(0) + d_5 f^I(0) + f^{II}(0); \\ b_5 &= d_5 f(0) + f^I(0); \\ b_6 &= f(0) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

и разлагая полином 6-й степени от p , представляющий собой характеристическое уравнение, на множители:

$$\begin{aligned} H(p) &= d_0 + d_1 p + d_2 p^2 + d_3 p^3 + d_4 p^4 + d_5 p^5 + p^6 = \\ &= (p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)(p - p_4)(p - p_5)(p - p_6) \end{aligned} \quad (8)$$

где $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ — вышеупомянутые корни характеристического уравнения, получим уравнение (6) в виде:

$$F(p) \cdot H(p) = b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4 + b_5 p^5 + b_6 p^6 = G(p). \quad (9)$$

¹ Случай равных корней не рассматривается. В случае двух равных корней можно принять корни разными, прибавившими на малую величину ϵ , и после определения постоянных интегрирования A_1, A_2, \dots и т. д. (так как для разных корней) перейти к пределу при $\epsilon \rightarrow 0$.

при этом 2 члена, стремящиеся к бесконечности, следует объединить и раскрыть неопределенность вида $(\infty - \infty)$. Метод определения корней, рекомендуемый автором, изложен в специальной статье (Электричество, № 8, 1950).

По формуле разложения Хевисайда получим искомую функцию $f(t)$

$$F(p) = \frac{G(p)}{H(p)} = \frac{G(0)}{H(0)} + \sum_{k=1}^6 \frac{G(p_k) e^{p_k t}}{p_k H'(p_k)} =$$

$$= \sum_{k=1}^6 \frac{b_1 + b_2 p_k + b_3 p_k^2 + b_4 p_k^3 + b_5 p_k^4 + b_6 p_k^5}{p_k \left[\frac{H(p)}{p - p_k} \right]_{p=p_k}} e^{p_k t} = f(t). \quad (10)$$

Здесь, как нетрудно доказать,

$$H'(p_k) = [H'(p)]_{p=p_k} = \left[\frac{H(p)}{p - p_k} \right]_{p=p_k}^* \quad (11)$$

Второй способ. Перейдем к описанию второго способа вычислений постоянных интегрирования, основанного, как было сказано, на непосредственном решении системы алгебраических уравнений. Дифференцируя уравнение (2) 5 раз и применяя его и его производные для $t=0$, получим 6 уравнений с шестью неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} f(0) &= A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6; \\ f^I(0) &= p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3 + p_4 A_4 + \\ &\quad + p_5 A_5 + p_6 A_6; \\ f^{II}(0) &= p_1^2 A_1 + p_2^2 A_2 + p_3^2 A_3 + \\ &\quad + p_4^2 A_4 + p_5^2 A_5 + p_6^2 A_6; \\ f^{III}(0) &= p_1^3 A_1 + p_2^3 A_2 + p_3^3 A_3 + \\ &\quad + p_4^3 A_4 + p_5^3 A_5 + p_6^3 A_6; \\ f^{IV}(0) &= p_1^4 A_1 + p_2^4 A_2 + p_3^4 A_3 + p_4^4 A_4 + \\ &\quad + p_5^4 A_5 + p_6^4 A_6; \\ f^V(0) &= p_1^5 A_1 + p_2^5 A_2 + p_3^5 A_3 + \\ &\quad + p_4^5 A_4 + p_5^5 A_5 + p_6^5 A_6. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Решая эту систему уравнений по так называемой схеме Гаусса, т. е. деля каждое уравнение на коэффициент при первом неизвестном (т. е. при A_1), а затем вычитая из первого уравнения поочередно все остальные, получим систему пяти уравнений с пятью неизвестными. Поступая и далее, можно решить систему (12).

Указанное решение, приведенное ниже отдельно (приложение 1), представится в виде следующей формулы:

$$A_6 = \frac{f(0) \sum_{i=1}^5 p_i p_i p_i p_i - f^I(0) \sum_{i=1}^5 p_i p_i p_i + f^{II}(0) \sum_{i=1}^5 p_i p_i - f^{III}(0) \sum_{i=1}^5 p_i + f^{IV}(0) \sum_{i=1}^5 1 - f^V(0)}{\prod_{k=1}^5 (p_k - p_6)} \quad (1)$$

Здесь, для краткости, приняты следующие обозначения:

$$\sum_{i=1}^5 p = \sum_{k=1}^5 p_k = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5.$$

$$\sum_{i=1}^5 p p = \sum_{\substack{k=1; \\ i=1(k \neq i)}}^5 p_k \cdot p_i = p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 + p_1 p_5 +$$

$$+ p_2 p_3 + p_2 p_4 + p_2 p_5 + p_3 p_4 + p_3 p_5 + p_4 p_5.$$

Число слагаемых в каждой сумме равно числу сочетаний из пяти элементов (т. е. корней характеристического уравнения) по числу множителей под знаком суммы. Так, для строки (14)

$$C_5^1 = \frac{5}{1} = 5,$$

а для строки (15):

$$C_5^2 = \frac{5 \cdot 4}{1 \cdot 2} = 10.$$

Аналогично раскрываются и другие суммы

$$\sum_{i=1}^5 p p p = \sum_{\substack{k=1; \\ j=1; \\ k \neq i+j}}^5 p_k \cdot p_i \cdot p_j = p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 +$$

$$+ p_1 p_2 p_5 + p_1 p_3 p_4 + p_1 p_3 p_5 + p_1 p_4 p_5 + p_2 p_3 p_4 +$$

$$+ p_2 p_3 p_5 + p_2 p_4 p_5 + p_3 p_4 p_5.$$

Число слагаемых

$$C_5^3 = \frac{5 \cdot 4 \cdot 3}{1 \cdot 2 \cdot 3} = 10,$$

$$\sum_{i=1}^5 p p p p = \sum_{\substack{k=1; j=1; \\ i=1; p=1; \\ k \neq i+j \neq p}}^5 p_k \cdot p_i \cdot p_j \cdot p_p.$$

Число слагаемых

$$C_5^4 = C_5^1 = \frac{5}{1} = 5.$$

$$\sum_{i=1}^5 p p p p p = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5.$$

Здесь одно слагаемое [$C_5^5 = 1$].

Знаменатель выражения (13) представляет собой произведение:

$$\prod_{k=1}^5 (p_k - p_6) = (p_1 - p_6)(p_2 - p_6)(p_3 - p_6) \times$$

$$\times (p_4 - p_6)(p_5 - p_6).$$

* Надо сначала подставить k , затем сократить дробь на $p - p_k$ и подставлять p_k вместо p .

Числа $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ — суть корни характеристического уравнения для $f(t)$ [см. уравнение (1)], которые могут иметь и комплексные значения. Поэтому значение A_6 может быть комплексным числом.

Формулу (13) легко распространить на любое число неизвестных. Так, при пяти корнях система уравнений (12) будет иметь пять неизвестных. Роль последнего будет играть A_5 . Применяя к этому случаю формулу (13), можем сразу написать:

$$A_5 = \frac{f(0) \sum_1^4 p p p p - f^I(0) \sum_1^4 p p p + f^{II}(0) \sum_1^4 p p - f^{III}(0) \sum_1^4 p + f^{IV}(0)}{\prod_{k=1}^4 (p_k - p_5)} \quad (22)$$

Так как комплексные корни всегда входят в сопряженных комплексах, то в уравнении (2) в этом случае будут присутствовать два сопряженных комплексных слагаемых, например:

$$A_6 e^{p_6 t} \text{ и } A_5 e^{p_5 t}.$$

Ясно, видно из формулы (10) в связи с (8), объединяя их, получим:

$$A_6 e^{p_6 t} + A_5 e^{p_5 t} = A e^{j\psi} e^{(-\delta + j\omega t)} + A e^{-j\psi} e^{(-\delta - j\omega t)} = e^{-\delta t} [e^{j(\omega t + \psi)} + e^{-j(\omega t + \psi)}] = 2 A e^{-\delta t} \cos(\omega t + \psi). \quad (20)$$

Таким образом, нет надобности вычислять два слагаемых; достаточно, вычислив модуль A и ψ комплексного числа A_6 , применить формулу (20).

Формула (13) дает выражение для последнего неизвестного в системе уравнений (12); так, при пяти неизвестных мы вычисляем по ней A_6 . Затем, чтобы вычислить другие неизвестные A_5, \dots и т. д., поступаем следующим образом. Перепишем систему уравнений (12), переставив слагаемые на конец. Тогда неизвестные будут расположены в такой последовательности: $A_6, A_5, A_4, A_3, A_2, A_1$. Для A_1 , как последнего неизвестного, применим формулу (13). Получим:

$$A_1 = \frac{f(0) \sum_2^6 p p p p p - f^I(0) \sum_2^6 p p p p + f^{II}(0) \sum_2^6 p p p - f^{III}(0) \sum_2^6 p p + f^{IV}(0) \sum_2^6 p - f^V(0)}{\prod_{k=2}^6 (p_k - p_1)} \quad (21)$$

Для A_2 индексы корней будут следовать, очевидно, в таком порядке: 3, 4, 5, 6, 1 и аналогично для A_3, A_4 и A_5 в круговом порядке.

Также легко применить эту формулу при четырех или трех неизвестных.

Приложение 1. Решение системы уравнений (12) и вывод формулы (13).

Делим каждое уравнение системы (12) на свой коэффициент при A_1 . Получим систему:

$$\left. \begin{aligned} A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 &= f(0); \\ A_1 + \frac{p_2}{p_1} A_2 + \frac{p_3}{p_1} A_3 + \frac{p_4}{p_1} A_4 + \frac{p_5}{p_1} A_5 + \frac{p_6}{p_1} A_6 &= \frac{f^I(0)}{p_1}; \\ A_1 + \frac{p_2^2}{p_1^2} A_2 + \frac{p_3^2}{p_1^2} A_3 + \dots + \frac{p_6^2}{p_1^2} A_6 &= \frac{f^{II}(0)}{p_1^2}; \\ A_1 + \frac{p_2^3}{p_1^3} A_2 + \frac{p_3^3}{p_1^3} A_3 + \dots + \frac{p_6^3}{p_1^3} A_6 &= \frac{f^{III}(0)}{p_1^3}; \\ A_1 + \frac{p_2^4}{p_1^4} A_2 + \frac{p_3^4}{p_1^4} A_3 + \dots + \frac{p_6^4}{p_1^4} A_6 &= \frac{f^{IV}(0)}{p_1^4}; \\ A_1 + \frac{p_2^5}{p_1^5} A_2 + \frac{p_3^5}{p_1^5} A_3 + \dots + \frac{p_6^5}{p_1^5} A_6 &= \frac{f^V(0)}{p_1^5}. \end{aligned} \right\} \quad (1a)$$

Вычитая последовательно из первого уравнения все остальные, исключим A_1 и получим систему пяти уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right) A_2 + \left(1 - \frac{p_3}{p_1}\right) A_3 + \dots + \left(1 - \frac{p_6}{p_1}\right) A_6 &= f(0) - \frac{f^I(0)}{p_1}; \\ \left(1 - \frac{p_2^2}{p_1^2}\right) A_2 + \left(1 - \frac{p_3^2}{p_1^2}\right) A_3 + \dots + \left(1 - \frac{p_6^2}{p_1^2}\right) A_6 &= f(0) - \frac{f^{II}(0)}{p_1^2}; \\ \left(1 - \frac{p_2^3}{p_1^3}\right) A_2 + \left(1 - \frac{p_3^3}{p_1^3}\right) A_3 + \dots + \left(1 - \frac{p_6^3}{p_1^3}\right) A_6 &= f(0) - \frac{f^{III}(0)}{p_1^3}; \end{aligned} \right\} \quad (2a)$$

$$\left. \begin{aligned} \left(1 - \frac{p_2^4}{p_1^4}\right) A_2 + \left(1 - \frac{p_3^4}{p_1^4}\right) A_3 + \dots + \left(1 - \frac{p_6^4}{p_1^4}\right) A_6 &= f(0) - \frac{f^{IV}(0)}{p_1^4}; \\ \left(1 - \frac{p_2^5}{p_1^5}\right) A_2 + \left(1 - \frac{p_3^5}{p_1^5}\right) A_3 + \dots + \left(1 - \frac{p_6^5}{p_1^5}\right) A_6 &= f(0) - \frac{f^V(0)}{p_1^5}. \end{aligned} \right\}$$

Снова делим каждое уравнение теперь на коэффициент при A_2 , получим:

$$\left. \begin{aligned} A_2 + \frac{p_1 - p_3}{p_1 - p_2} A_3 + \dots + \frac{p_1 - p_6}{p_1 - p_2} A_6 &= \frac{p_1 f(0) - f^I(0)}{p_1 - p_2}; \\ A_2 + \frac{p_1^2 - p_3^2}{p_1^2 - p_2^2} A_3 + \dots + \frac{p_1^2 - p_6^2}{p_1^2 - p_2^2} A_6 &= \frac{p_1^2 f(0) - f^{II}(0)}{p_1^2 - p_2^2}; \\ A_2 + \frac{p_1^3 - p_3^3}{p_1^3 - p_2^3} A_3 + \dots + \frac{p_1^3 - p_6^3}{p_1^3 - p_2^3} A_6 &= \frac{p_1^3 f(0) - f^{III}(0)}{p_1^3 - p_2^3}; \\ A_2 + \frac{p_1^4 - p_3^4}{p_1^4 - p_2^4} A_3 + \dots + \frac{p_1^4 - p_6^4}{p_1^4 - p_2^4} A_6 &= \frac{p_1^4 f(0) - f^{IV}(0)}{p_1^4 - p_2^4}; \\ A_2 + \frac{p_1^5 - p_3^5}{p_1^5 - p_2^5} A_3 + \dots + \frac{p_1^5 - p_6^5}{p_1^5 - p_2^5} A_6 &= \frac{p_1^5 f(0) - f^V(0)}{p_1^5 - p_2^5}. \end{aligned} \right\}$$

Вычитаем последовательно из первого уравнения все остальные; исключаем, таким образом, A_2 . После алгебраических преобразований получим систему четырех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad \frac{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)}{p_1^2 - p_2^2} A_3 + \dots + \frac{(p_1 - p_6)(p_2 - p_6)}{p_1^2 - p_2^2} A_6 &= \frac{f(0) p_1 p_2 - f^I(0)(p_1 + p_2) + f^{II}(0)}{p_1^2 - p_2^2}; \\ 2) \quad \frac{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)(p_1 + p_2 + p_3)}{p_1^3 - p_2^3} A_3 + \dots + \frac{(p_1 - p_6)(p_2 - p_6)(p_1 + p_2 + p_6)}{p_1^3 - p_2^3} A_6 &= \\ &= \frac{f(0) p_1 p_2 (p_1 + p_2) - f^I(0)(p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2) + f^{III}(0)}{p_1^3 - p_2^3}; \\ 3) \quad \frac{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)[p_1^2 + p_1(p_2 + p_3) + (p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2)]}{p_1^4 - p_2^4} A_3 + \dots &= \\ &= \frac{f(0) p_1 p_2 (p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2) - f^I(0)(p_1 + p_2)(p_1^2 + p_2^2) + f^{IV}(0)}{p_1^4 - p_2^4}; \\ 4) \quad \frac{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)[p_1^3 + p_1^2(p_2 + p_3) + p_1(p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2) + (p_2^3 + p_2^2 p_3 + p_2 p_3^2 + p_3^3)]}{p_1^5 - p_2^5} A_3 + \\ + \dots &= \frac{f(0) p_1 p_2 (p_1^3 + p_1^2 p_2 + p_1 p_2^2 + p_2^3) - f^I(0)(p_1^4 + p_1^3 p_2 + p_1^2 p_2^2 + p_1 p_2^3 + p_2^4) + f^V(0)}{p_1^5 - p_2^5}. \end{aligned} \right\}$$

Снова делим каждое уравнение теперь на коэффициент при A_3 , получим:

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad A_3 + \frac{(p_1 - p_4)(p_2 - p_4)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)} A_4 + \dots &= \frac{f(0) p_1 p_2 - f^I(0)(p_1 + p_2) + f^{II}(0)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)}; \\ 2) \quad A_3 + \frac{(p_1 - p_4)(p_2 - p_4)(p_1 + p_2 + p_4)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)(p_1 + p_2 + p_3)} A_4 + \dots &= \frac{f(0) p_1 p_2 (p_1 + p_2) - f^I(0)(p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2) + f^{III}(0)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)(p_1 + p_2 + p_3)}; \\ 3) \quad A_3 + \frac{(p_1 - p_4)(p_2 - p_4)[p_1^2 + p_1(p_2 + p_4) + (p_2^2 + p_2 p_4 + p_4^2)]}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)[p_1^2 + p_1(p_2 + p_3) + (p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2)]} A_4 + \dots &= \\ &= \frac{f(0) p_1 p_2 (p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2) - f^I(0)(p_1 + p_2)(p_1^2 + p_2^2) + f^{IV}(0)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)[p_1^2 + p_1(p_2 + p_3) + (p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2)]}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} & + \frac{(p_1 - p_4)(p_2 - p_4)[p_1^3 + p_1^2(p_2 + p_4) + p_1(p_2^2 + p_2p_4 + p_4^2) + (p_2^3 + p_2^2p_4 + p_2p_4^2 + p_4^3)]}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)[(p_1^3 + p_1^2(p_2 + p_3) + p_1(p_2^2 + p_2p_3 + p_3^2) + (p_2^3 + p_2^2p_3 + p_2p_3^2 + p_3^3)]} A_4 + \dots = \\ & = \frac{f(0)p_1p_2(p_1^3 + p_1^2p_2 + p_1p_2^2 + p_2^3) - f^I(0)(p_1^4 + p_1^3p_2 + p_1^2p_2^2 + p_1p_2^3 + p_2^4) + f^V(0)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)[p_1^3 + p_1^2(p_2 + p_3) + p_1(p_2^2 + p_2p_3 + p_3^2) + (p_2^3 + p_2^2p_3 + p_2p_3^2 + p_3^3)]} \end{aligned} \right\} \quad (5a)$$

продолжая указанный процесс дальше, можно прийти к одному неизвестному A_6 и получить, таким образом, формулу (13). В целях экономии места можно применить следующее упрощающее рассуждение. Если положить A_5 и A_6 равными нулю, т. е. рассматривать систему четырех уравнений указанного типа, то из двух уравнений не будет, и система уравнений (5a) будет состоять из первых двух уравнений. Вычитая из первого второе, можно найти A_4 . Прделаем это:

$$\begin{aligned} A_4 & \left[\frac{(p_1 - p_4)(p_2 - p_4)(p_1 + p_2 + p_3) - (p_1 - p_4)(p_2 - p_4)(p_1 + p_2 + p_4)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)(p_1 + p_2 + p_3)} \right] = \\ & = \frac{(p_1 + p_2 + p_3)[f(0)p_1p_2 - f^I(0)(p_1 + p_2) + f^{II}(0)] - f(0)p_1p_2(p_1 + p_2) + f^I(0)(p_1^2 + p_1p_2 + p_2^2) - f^{III}(0)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)(p_1 + p_2 + p_3)}. \end{aligned}$$

Умножив знаменатель и деля на множитель при A_4 , после алгебраических преобразований получим оконча-

$$A_4 = \frac{f(0)p_1p_2p_3 - f^I(0)(p_1p_2 + p_2p_3 + p_3p_1) + f^{II}(0)(p_1 + p_2 + p_3) - f^{III}(0)}{(p_1 - p_4)(p_2 - p_4)(p_3 - p_4)}. \quad (6a)$$

то есть выражение для последнего неизвестного в том случае, когда их всех четыре: A_1, A_2, A_3, A_4 .

Если бы мы имели всего 3 неизвестных A_1, A_2, A_3 , то, очевидно, система уравнений (3a) дала бы возможность найти A_4 , так как последних трех уравнений не было бы. Вычитая из первого уравнения второе, получим выражение для A_3 :

$$A_3 \left[\frac{p_1 - p_3}{p_1 - p_2} - \frac{p_1^2 - p_3^2}{p_1^2 - p_2^2} \right] = \frac{p_1f(0) - f^I(0)}{p_1 - p_2} - \frac{p_1^2f(0) - f^{II}(0)}{p_1^2 - p_2^2}.$$

Отсюда после простых алгебраических преобразований получим:

$$A_3 = \frac{(p_1 + p_2)[p_1f(0) - f^I(0)] - p_1^2f(0) + f^{II}(0)}{(p_1 + p_2)(p_1 - p_3) - (p_1^2 - p_3^2)} = \frac{f(0)p_1p_2 - f^I(0)(p_1 + p_2) + f^{II}(0)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)}. \quad (7a)$$

то есть выражение для последнего неизвестного, если их всего три (A_1, A_2, A_3).

Рассматривая найденные выражения для последнего неизвестного при трех и при четырех неизвестных, можно заметить, что по аналогии выражение для A_5 при наличии пяти неизвестных.

Напишем его:

$$\begin{aligned} A_5 & = \frac{f(0)p_1p_2p_3p_4 - f^I(0)(p_1p_2p_3 + p_1p_2p_4 + p_1p_3p_4 + p_2p_3p_4) +}{(p_1 - p_5)(p_2 - p_5)(p_3 - p_5)(p_4 - p_5)} \\ & + \frac{f^{II}(0)(p_1p_2 + p_1p_3 + p_1p_4 + p_2p_3 + p_2p_4 + p_3p_4) - f^{III}(0)(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + f^{IV}(0)}{(p_1 - p_5)(p_2 - p_5)(p_3 - p_5)(p_4 - p_5)}. \end{aligned}$$

Обозначая для краткости записи,

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 + p_3 + p_4 & = \sum_{k=1}^4 p_k = \sum_1^4 p; \\ p_1p_2 + p_1p_3 + p_1p_4 + p_2p_3 + p_2p_4 + p_3p_4 & = \sum_{k=1; i=1; k \neq i}^4 p_k p_i = \sum_1^4 pp; \\ p_1p_2p_3 + p_1p_2p_4 + p_1p_3p_4 + p_2p_3p_4 & = \sum_{k=1; i=1; j=1; k \neq i \neq j}^4 p_k \cdot p_i \cdot p_j = \sum_1^4 ppp; \\ p_1p_2p_3p_4 & = \sum_1^4 pppp; \quad (p_1 - p_5)(p_2 - p_5)(p_3 - p_5)(p_4 - p_5) = \prod_{k=1}^4 (p_k - p_5), \end{aligned}$$

тогда для этих обозначений в формулу, получим:

$$A_5 = \frac{f(0) \sum_1^4 pppp - f^I(0) \sum_1^4 ppp + f^{II}(0) \sum_1^4 pp - f^{III}(0) \sum_1^4 p + f^{IV}(0)}{\prod_{k=1}^4 (p_k - p_5)}. \quad (8a)$$

В случае шести неизвестных для последнего неизвестного A_6 получим по аналогии следующее выражение:

$$A_6 = \frac{f(0) \sum_1^5 ppppp - f^I(0) \sum_1^5 pppp + f^{II}(0) \sum_1^5 ppp - f^{III}(0) \sum_1^5 pp + f^{IV}(0) \sum_1^5 p - f^V(0)}{\sum_{k=1}^5 (p_k - p_6)}$$

Число слагаемых в каждой сумме, очевидно, равно числу сочетаний из всех элементов без последнего по числу множителей под знаком суммы. Так:

$$\text{число слагаемых в } \sum_1^5 pppp = C_5^4 = \frac{5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 5,$$

$$\text{число слагаемых в } \sum_1^5 ppp = C_5^3 = \frac{5 \cdot 4 \cdot 3}{1 \cdot 2 \cdot 3} = 10.$$

Приложение 2. Примеры расчета. В качестве примера рассмотрим уравнение

$$(p^6 + 219,2p^5 + 4491p^4 + 41560p^3 + 159400p^2 + 399800p + 427500)f(t) = 0.$$

Корни характеристического уравнения, найденные упомянутым выше графоаналитическим методом, будут следующие:

$$p_1 = -197,4; p_2 = -1,98; p_{3,4} = -8,5 \pm j6,22 = 10,54 | \pm 143,8^\circ;$$

$$p_{5,6} = -1,37 \pm j2,82 = 3,135 | \pm 115,9^\circ.$$

Начальные значения $f(t)$ и ее производных, найденные из начальных условий, известны:

$$f(0) = -3,28; f^I(0) = -1,6; f^{II}(0) = -0,785;$$

$$f^{III}(0) = -1,497;$$

$$f^{IV}(0) = 221,6; f^V(0) = -44,300.$$

Они находятся из основных уравнений процессов, которых должны быть заданы шесть исходных значений входящих функций.

По формулам (7) вычисляем коэффициенты b :

$$b_6 = f(0) = -3,28;$$

$$b_5 = d_5 f(0) + f^I(0) = 219,2(-3,28) - 1,6 = -721;$$

$$b_4 = d_4 f(0) + d_5 f^I(0) + f^{II}(0) = 4491(-3,28) + 219,2(-1,6) - 0,785 = -15062;$$

$$b_3 = d_3 f(0) + d_4 f^I(0) + d_5 f^{II}(0) + f^{III}(0) = 41560(-3,28) + 4491(-1,6) + 219,2(-0,785) - 1,497 = -143653,5;$$

$$b_2 = d_2 f(0) + d_3 f^I(0) + d_4 f^{II}(0) + d_5 f^{III}(0) + f^{IV}(0) = 159400(-3,28) + 41560(-1,6) + 4491(-0,785) + 219,2(-1,497) + 221,6 = -593126;$$

$$b_1 = d_1 f(0) + d_2 f^I(0) + d_3 f^{II}(0) + d_4 f^{III}(0) + d_5 f^{IV}(0) + f^V(0) = -399800 \cdot 3,28 - 159400 \cdot 1,6 - 41560 \cdot 0,785 - 4491 \cdot 1,497 + 219,2 \cdot 221,6 - 44,30 = -1600180.$$

Подставляя в формулу (10) вычисленные коэффициенты b и известные корни характеристического уравнения, получим искомую функцию в виде

$$f(t) = \sum_{k=1}^6 \frac{(b_1 + b_2 p_k + b_3 p_k^2 + b_4 p_k^3 + b_5 p_k^4 + b_6 p_k^5) e^{p_k t}}{(p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)(p - p_4)(p - p_5)(p - p_6)} \Big|_{p=p_k} =$$

$$= \sum_{k=1}^6 \frac{(-1600180 - 593126 p_k - 143653,5 p_k^2 - 15062 p_k^3 - 721 p_k^4 - 3,28 p_k^5) e^{p_k t}}{(p + 197,4)(p + 1,98)(p + 8,5 - j6,22)(p + 8,5 + j6,22)(p + 1,37 - j2,82)(p + 1,37 + j2,82)} \Big|_{p=p_k}.$$

Покажем технику вычислений второго слагаемого и пары сопряженных, третьего и четвертого слагаемых.

$$\text{Второе слагаемое (} k=2 \text{)} = \frac{(-1600180 + 593126 \cdot 1,98 - 143653,5 \cdot 1,98^2 + 15062 \cdot 1,98^3 - 721 \cdot 1,98^4 + 3,28 \cdot 1,98^5) e^{-1,98t}}{(-1,98 + 197,4)(-1,98 + 8,5 - j6,22)(-1,98 + 8,5 + j6,22)(-1,98 + 1,37 - j2,82)(-1,98 + 1,37 + j2,82)}$$

$$= \frac{-882160 e^{-1,98t}}{195,42 \cdot 81,3 \cdot 8,32} = -6,65 e^{-1,98t}.$$

$$\text{3-е + 4-е слагаемые (} k=3 \text{ и } 4 \text{)} = \sum_{\pm} \frac{-1600180 - 593126(-8,5 \pm j6,22) - 143653,5 \cdot 111,1 | \mp 72,4 - 15062 \cdot 1171 | \pm 71,4^\circ - 721 \cdot 12350 | 180^\circ \pm 35,2^\circ - 3,28 \cdot 130100 | \mp 1^\circ}{\times (-8,5 \pm j6,22 + 1,37 - j2,82)(8,5 \pm j6,22 + 1,37 + j2,82)} \cdot e^{(-8,5 \pm j6,22)t} =$$

$$= \sum_{\pm} \frac{-0,176 | \pm 20,4^\circ | \pm 6,22t}{1,93 | \pm 151,1^\circ} e^{-8,5t} = -0,0911 e^{-8,5t} \sum_{\pm} | \pm 6,22t \mp 130,7^\circ =$$

$$= -0,0911 e^{-8,5t} \cdot 2 \cos(6,22t - 130,7^\circ) = 0,182 e^{-8,5t} \cdot \cos(6,22t + 49,3^\circ).$$

вычисляя аналогичным образом 1-е и 5-е с 6-м слагаемым, получим искомую функцию в окончательном

$$i(t) = 0,0045 e^{-197,4t} - 6,65 e^{-1,98t} + 0,182 e^{-8,5t} \times \\ \times \cos(6,22t + 49,3^\circ) + 4,4 e^{-1,37t} \cdot \cos(2,82t + 41,4^\circ).$$

В качестве примера расчета по формуле (13) вычислим слагаемое $A_2 e^{-1,98t}$. Для вычисления A_2 в формуле (13) надо принять: 4, 5, 6, 1.

Вычисления дают:

$$\sum_{k=4,5,6,1} ppppp = p_3 p_4 p_5 p_6 p_1 = 10,54^2 \cdot 3,135^2 (-197,4) = \\ = -215\,000.$$

Далее, обозначив для данного случая $p_{3,4} = M|\pm \alpha$ и $p_{5,6} = N|\pm \beta$, сначала упростим выражения для сумм в виде, получим:

$$\sum_{k=4,5,6,1} ppp = p_1 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_3 p_4 p_6 + p_1 p_3 p_5 p_6 + \\ + p_1 p_4 p_5 p_6 = p_1 M^2 N |\beta| + p_1 M^2 N |-\beta| + p_1 M |\alpha|^2 N^2 + \\ + \alpha N^2 + M^2 N^2 = p_1 M^2 N 2 \cos \beta + p_1 M N^2 2 \cos \alpha + \\ + M^2 N^2 = 2 p_1 M N (M \cos \beta - N \cos \alpha) + M^2 N^2 =$$

$$A_2 = \frac{3,28 \cdot 215\,000 + 1,6 \cdot 94\,190 + 0,785 \cdot 33\,521 + 1,497 \cdot 4\,067,33 - 221,6 \cdot 217,14 + 4\,430}{-132\,000} = \frac{906\,400}{-132\,000} = -6,85.$$

$$2(-197,4) \cdot 10,54 \cdot 3,135 (10,54 \cdot 0,437 - 3,135 \cdot 0,806) + \\ + 10,54^2 \cdot 3,135^2 = 94\,190.$$

Поступая аналогичным образом, получим:

$$\sum_{k=3 \dots 1} ppp = p_1 (M^2 + N^2 + 4MN \cos \alpha \cos \beta) + \\ + 2MN(M \cos \beta - N \cos \alpha) = (-197,4) (110,95 + 9,825 + \\ + 4 \cdot 10,54 \cdot 3,135 \cdot 0,806 \cdot 0,437) + 2 \cdot 10,54 \cdot 3,135 \times \\ \times (-10,54 \cdot 0,437 - 3,135 \cdot 0,806) = -33\,521.$$

$$\sum_{k=3 \dots 1} pp = 2 p_1 (M \cos \alpha + N \cos \beta) + M^2 + N^2 + \\ + 4MN \cos \alpha \cos \beta = -2 \cdot 197,4 (-10,54 \cdot 0,809 - \\ - 3,135 \cdot 0,437) + 110,95 + 9,825 + 4 \cdot 10,54 \cdot 3,135 \times \\ \times 0,809 \cdot 0,437 = 4\,067,33.$$

$$\sum_{k=3 \dots 1} p = -197,4 - 2 \cdot 8,5 - 2 \cdot 1,37 = -217,14.$$

$$\prod_{k=3 \dots 1} (p_k - p_2) = (p_1 - p_2) (p_3 - p_2) (p_4 - p_2) (p_5 - p_2) \times \\ \times (p_6 - p_2) = (-197,4 + 1,98) \cdot (-8,5 + j6,22 + 1,98) \times \\ \times (-8,5 - j3,22 + 1,98) (-1,37 + j2,82 + 1,98) \times \\ \times (-1,37 - j2,82 + 1,98) = -132\,000.$$

Подставляя все это в формулу (13), используя ее для A_2 получим:

Совпадение очень хорошее. Следует учесть, что подсчеты производились с помощью логарифмической линейки.
[7. 11. 1949]



Упрощенные подсчеты пусковых и максимальных моментов короткозамкнутых электродвигателей питаемых от малоомощной сети

Кандидат техн. наук Н. А. КИКЛЕВИЧ

г. Сталино

Определение действительных значений вращающихся моментов короткозамкнутых электродвигателей в процессе пуска от малоомощной сети, питаемой от трансформатора, без учета электромагнитных переходных режимов, производится по формулам для вращающихся моментов, выведенным для совместной схемы замещения электродвигателя и сети [Л. 1, гл. 8; Л. 2]. Пользование этими формулами возможно при наличии зависимостей сопротивлений обмоток статора и ротора от скольжения, которые в большинстве случаев неизвестны работникам эксплуатации. В статье излагается методика, позволяющая упростить решение поставленной задачи.

1. Введем следующие обозначения: s_m — скольжение при максимальном моменте; P_1, P_{1d} — расчетная и действительная мощности на зажимах электродвигателя, кВт; M, M_d — расчетный и действительный вращающиеся моменты, кгм; z_m, z_c, z_{Σ} — линейные сопротивления одной фазы трансформатора, сети и электродвигателя по эквивалентной схеме замещения (рис. 1), ом; $z_{\Sigma} = z_m + z_c$ — эквивалентное сопротивление сети, ом; $\varphi_m, \varphi_c, \varphi_{\Sigma}, \varphi_{\Sigma c}$ — углы сдвига, соответствующие $z_m, z_c, z_{\Sigma}, z_{\Sigma c}$; $U_{0.1}, U_n$ — линейные значения

напряжения холостого хода трансформатора номинального напряжения электродвигателя, в. $P_1, P_{1d}, M, M_d, z_{\Sigma}, \varphi_{\Sigma}$ зависят от скольжения. Расчетные значения мощности P и вращающегося момента M имеют место при номинальном напряжении на зажимах электродвигателя в процессе пуска, действительные P_d, M_d при пуске от малоомощной сети. Для определения величины скольжения принимается

$$\frac{M_d}{M} = \frac{P_{1d}}{P_1}.$$

Мощность на зажимах потребителя [Л. § 16]

$$P_{1d} = \frac{U_{0.1}^2 \cdot \cos \varphi_{\Sigma} \cdot 10^{-3}}{\frac{z_{\Sigma c}^2}{z_{\Sigma}} + z_{\Sigma} + 2z_{\Sigma c} \cos(\varphi_{\Sigma c} - \varphi_{\Sigma})} \quad [\text{кВт}],$$

$$P_1 = \frac{U_n^2 \cos \varphi_{\Sigma} \cdot 10^{-3}}{z_{\Sigma}} \quad [\text{кВт}].$$

Совместное решение (1), (2) и (3) дает зависимость

$$M_d = M \left(\frac{U_{0.1}}{U_n} \right)^2 \times \left[\frac{1}{\left(\frac{z_{\Sigma c}}{z_{\Sigma}} \right)^2 + 1 + 2 \frac{z_{\Sigma c}}{z_{\Sigma}} \cos(\varphi_{\Sigma c} - \varphi_{\Sigma})} \right],$$

а после деления правой и левой частей на номинальный вращающийся момент M_n

$$\frac{M_d}{M_n} = \frac{M}{M_n} \left(\frac{U_{0.1}}{U_n} \right)^2 \times \left[\frac{1}{\left(\frac{z_{\Sigma c}}{z_{\Sigma}} \right)^2 + 1 + 2 \frac{z_{\Sigma c}}{z_{\Sigma}} \cos(\varphi_{\Sigma c} - \varphi_{\Sigma})} \right].$$

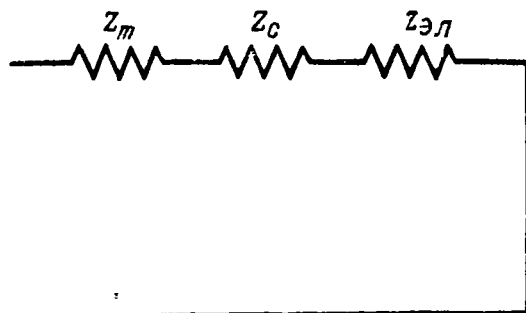


Рис. 1. Схема замещения для простейшей сети

Подставляя в (4) и (4') значения $z_{\partial, \lambda}$ при $s=1$ $=s_{\lambda}$, получим действительные значения начального пускового и максимального вращающих моментов и их кратности по отношению к номинальному вращающему моменту. Для сетей с одним ответвлением (рис. 2) следует принять

$$Z_{\partial, c} = (Z_m + Z_{1c}) \sigma_1 + Z_{2c}, \quad (5)$$

$$\sigma_1 = 1 + \frac{Z_{\partial, \lambda} + Z_{2c}}{Z_3} \approx 1 + \frac{Z_{\partial, \lambda} + Z_{2c}}{Z_3}. \quad (6)$$

Изложенный метод дает следующие преимущества:

а) Для подсчета $M_{\partial} = f(s)$ достаточно знать только полное сопротивление $z_{\partial, \lambda} = f(s)$ без разделения его на сопротивления статорной и роторной обмоток.

б) В тех случаях, когда с целью увеличения при пуске от маломощной сети выбирается электродвигатель той же серии, но большей мощности, или производится уменьшение сопротивления электродвигателя (путем переключения пазов или уменьшения числа витков в статорной обмотке), можно легко определить минимальное $z_{\partial, \lambda}$, при котором получается наивысшее значение M_{∂} . Критерием в данном случае является простое условие максимума мощности потребляемой в сети переменного тока [Л. 3, § 16].

$$z_{\partial, \lambda} = z_{\partial, c}. \quad (7)$$

Дальнейшее упрощение может быть получено заменой в (4) и (4')

$$z_{\partial, \lambda} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I} \quad \text{и} \quad z_{\partial, c} = \frac{\Delta U_n}{\sqrt{3}I_n b}, \quad (8)$$

где I — линейный ток электродвигателя при номинальной нагрузке (мощности на валу) P_{2n} , а; I_n — линейный ток электродвигателя при том напряжении, для которого взято сопротивление z ; b — коэффициент загрузки электродвигателя; ΔU_n — потеря напряжения в сети (на участке z), создаваемая током bI_n , а.

Подставив значения $z_{\partial, \lambda}$ и $z_{\partial, c}$ по (8) в (4') и имея в виду, что для электродвигателей с пазом и двойной беличьей клеткой при $\varphi_{\partial, c} = 30-75^\circ$ $\cos(\varphi_{\partial, c} - \varphi_{\partial, \lambda}) \approx 1$, получим следующую общую формулу:

$$\frac{M_{\partial}}{M_n} = \frac{M}{M_n} \left[\frac{\frac{U_{\partial, \lambda}}{U_n}}{1 + \frac{a}{b} \cdot \frac{I}{I_n}} \right]^2. \quad (9)$$

Имея зависимость $I = f(n)$ и зная величину M , можно, пользуясь формулой (9), построить кривую $M_{\partial} = f(n)$. В большинстве случаев можно ограничиться определением действительных значений кратности начального пускового и максимального вращающих моментов.

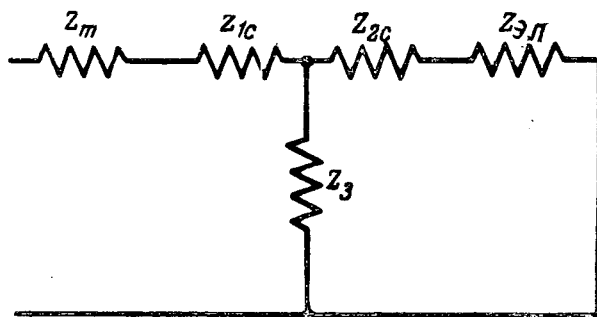


Рис. 2. Схема замещения для сети с ответвлением.

Для получения действительной кратности начального пускового момента $\frac{M_{n, \partial}}{M_n}$ следует в (9) приравнять

$$\frac{M}{M_n} = \frac{M_n}{M_n} \quad \text{и} \quad \frac{I}{I_n} = \frac{I_n}{I_n},$$

где $\frac{M_n}{M_n}$, $\frac{I_n}{I_n}$ принимаются по каталожным данным.

Действительная кратность максимального вращающего момента $\frac{M_{n, \partial}}{M_n}$ определяется путем следующих подстановок:

$$\frac{M}{M_n} = \frac{M_n}{M_n}, \quad \frac{I}{I_n} = \frac{I_n}{I_n} = \frac{I_n}{I_n} \cdot c,$$

где $\frac{M_n}{M_n}$ принимается по каталожным данным,

а коэффициент c , равный отношению токов при $s=s_n$ и $s=1$ и номинальном напряжении на зажимах двигателя, определяется из уравнения:

$$c = \frac{I_n}{I_n} \approx 0,75 \dots 0,17 \frac{M_n}{M_n}, \quad (10)$$

которое выведено на основе экспериментальных данных для большого количества короткозамкнутых электродвигателей.

Для электродвигателей с нормальной беличьей клеткой формула (10) дает $c \approx 0,7$, что совпадает с I_n , определяемым на основе [Л. 1, § 1—9] и мало отличается от величин, получаемых по формуле (5) в [Л. 4].

Условие (7) для получения наивысшего начального пускового момента может быть представлено более наглядно следующим образом:

$$\frac{I_n}{bI_n} = \frac{U_n}{\Delta U_n}. \quad (7')$$

Таким образом, увеличение кратности $\frac{I_n}{I_n}$ ведет к возрастанию действительного начального пускового момента только в том случае, если эта величина не превышает $\frac{U_n}{\Delta U_n}$.

Для учета влияния ответвлений (в том числе — нескольких) следует, с целью упрощения задачи, отнести всю дополнительную нагрузку

ОБ ОБОЗНАЧЕНИЯХ В СИМВОЛИЧЕСКИХ И ОПЕРАЦИОННЫХ РАВЕНСТВАХ

математический и операционный методы пользуются широкой популярностью. Тем не менее до сих пор в этой области нет окончательно вышедшего способа изложения и единой системы обозначений, что иногда приводит к ошибкам, на двух примерах остановимся ниже.

В книге А. Френкеля «Теория переменных токов» (Изд. ГИИЭ, 1933) на стр. 49 мы встречаем два равенства

$$i = Ie^{j\varphi} \text{ и } \frac{dI}{dt} = j\omega I,$$

правильность которых очевидна в силу того, что амплитуда I и фаза φ рассматриваются как постоянные и, следовательно,

$$\frac{dI}{dt} = 0.$$

Ошибка здесь заключается в том, что в первом из этих равенств i обозначает постоянную комплексную амплитуду и представляется, следовательно, неподвижным вектором, а во втором равенстве та же величина является комплексным изображением мгновенного значения тока и представляется, следовательно, вращающимся вектором, причем эти два вектора, ныне по существу, обозначены одинаково.

Известной монографии Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова «Введение в нелинейную механику» (Изд. Академии наук УССР, 1937) на стр. 163 введен символический оператор j в уравнениях

$$\cos(\omega t + \varphi) = -\sin(\omega t + \varphi) = \cos(\omega t + \varphi + \pi/2)$$

$$\sin(\omega t + \varphi) = \cos(\omega t + \varphi) = \sin(\omega t + \varphi + \pi/2),$$

вводя которые в такой форме недопустимо по той причине, что вещественная функция не может быть равна комплексной. Оператор j обозначает поворот фазы вектора, соответствующего символическому изображению вещественной функции, лишь в комплексной плоскости символического изображения, а не в вещественной плоскости функции, где эта операция, естественно, не имеет никакого смысла и ее применение приводит к абсурду.

Из приведенных примеров следует, что во избежание подобного рода недоразумений и достижения необходимой методической четкости при изложении основ символического метода целесообразно, во-первых, ввести разделение обозначения для комплексных изображений вращающихся и неподвижных векторов и, во-вторых, ввести

знак символического равенства. Аналогично тому, как в операционном методе мы вводим знак операционного равенства. Это необходимо для того, чтобы было возможно представить этим условным равенством связь между вещественной функцией и ее символическим изображением. Например, обозначая символическое изображение вещественной синусоидальной функции $e = E \sin(\omega t + \varphi)$

в виде $\vec{E} = Ee^{j(\omega t + \varphi)}$ и вводя знак символического равенства (\equiv), мы можем записать интересующие нас соотношения в следующем виде: $\vec{E} \equiv e$,

$$\text{или } E \sin(\omega t + \varphi) \equiv Ee^{j(\omega t + \varphi)} = \vec{E}e^{j\omega t},$$

где $\vec{E} = Ee^{j\varphi}$ выражает неизменный во времени комплекс, характеризующий комплексную амплитуду колебания.

В этих выражениях вращающийся вектор отмечается стрелкой над буквой, изображающей амплитуду колебания, а неподвижный вектор — точкой над этой буквой, так что,

$$\text{очевидно, имеет место равенство } \frac{d\vec{E}}{dt} = j\omega \vec{E}, \text{ но } \frac{dE}{dt} = 0.$$

При этом вполне допустимо для символического изображения синусоидальных и косинусоидальных величин пользоваться одним и тем же знаком символического равенства, так как условный характер этого равенства гарантирует нас от возможных недоразумений.

Использование символов Re и Im для выделения вещественной или мнимой частей комплекса решения или вынуждающей силы в общем виде вряд ли целесообразно, так как это умаляет ценность символического метода, способного одновременно дать решение для обеих компонент.

Заметим, кстати, что и в области операционного исчисления не все благополучно с обозначениями. Еще до сих пор наблюдается разноречивость в обозначении преобразований Лапласа и операционных изображений, причем часто используемый в настоящее время знак операционного равенства в виде стрелки с двумя точками \rightarrow весьма мало уместен, так как неизвестно, ни куда следует направлять стрелку, ни что должны обозначать эти точки. Двусторонняя стрелка \leftrightarrow пожалуй была бы более уместной, так как означала бы возможность перехода как от оригинала к изображению, так и от изображения к оригиналу.

Кандидат техн. наук, доц. А. А. РИЗКИН

ПО ПОВОДУ СИМВОЛИЧЕСКИХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Вопрос об уточнении и правильном использовании символических обозначений, в связи с возросшим применением математических методов решения математических задач в электротехнике и смежных с ней областях науки и техники, становится все более актуальным. Можно согласиться с А. Ризкиным, что в ряде случаев при применении математических методов отдельные авторы пользуются для символических обозначений такими знаками, которые в соответствии с существующей в математике практикой имеют иной смысл. Использование оператора j в качестве символического обозначения аргумента тригонометрической функции на стр. 163 с этой точки зрения, конечно, недопустимо.

Нельзя согласиться с целесообразностью исключения операторов Re и Im для реальной и мнимой частей комплекса. В связи с тем, что комплекс и его составляющие Re и Im по нашему мнению, не имеют необходимости, тем более такая связь должна быть обозначена и поэтому должны использоваться разные знаки для реальной и мнимой составляющих.

Для комплексных величин в общем случае должны применяться обозначения строчными буквами e, i, z и т. д., рассматривая реальные величины как частные случаи комплексных. Сопряженные величины следует обозначать теми же буквами со звездочкой e^*, i^*, z^* и т. д.

Это будет соответствовать современным обозначениям, принятым в математике. Комплексы с постоянной амплитудой и фазой можно, в соответствии с установившейся в электротехнике практикой, обозначать символами $\hat{e}, \hat{i}, \hat{z}$ и т. д., а сопряженные величины e, i, z и т. д., хотя особой необходимости в обозначении постоянных комплексов помощью специальных значков мы не видим. Применение точки над буквой нежелательно, вследствие широкого применения буквы i для обозначения тока.

Для экспоненциальных функций, повидимому, нужно перейти на обозначение \exp вместо e^x . Таким образом, функция $e^{j(\omega t + \alpha)}$ будет записана в виде $\exp[j(\omega t + \alpha)]$. Если аналогичное обозначение применяется для тригонометрических и других специальных функций, то нет оснований сохранять для одной экспоненциальной функции сложное обозначение, затрудняющее, кстати, типографский набор. Нет при этом смысла связывать экспоненциальную функцию с тригонометрическими функциями каким-либо условным знаком соответствия, поскольку связь $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$ достаточно проста.

Следует условиться об обозначении амплитуд комплексов. Мы считаем целесообразным обозначать амплитуду комплекса той же буквой, что и комплекс с индексом m . Например, амплитуда комплекса e равна e_m . В ряде слу-

чаев аргумент комплекса целесообразно обозначать знаком угла \angle . Например, комплекс $e = e_m e^{j\alpha}$ можно записать в виде $e = e_m | \angle$.

Следует узаконить знак $||$ для параллельного соединения элементов. Например, при параллельном соединении сопротивлений r_1 и $r_2 + r_3$ общее сопротивление r может быть выражено в виде:

$$r = r_1 || (r_2 + r_3) = \frac{r_1(r_2 + r_3)}{r_1 + r_2 + r_3}.$$

Несколько замечаний необходимо сделать по поводу символических обозначений при пользовании операторным методом решения дифференциальных уравнений. Для важнейших операторных изображений следует, в соответствии с установившейся практикой, принять символические обозначения:

$$f|s| = L\{F|t|\} = \int_0^\infty e^{-st} F|t| dt \doteq F|t|$$

и

$$\varphi|p| = X\{F|t|\} = p \int_0^\infty e^{-pt} F|t| dt \doteq F|t|.$$

Знак \doteq может быть заменен знаком \leftrightarrow . Обратные преобразования от операторных изображений к функциям времени следует обозначить символами:

$$F|t| = L\{f|s|\}; \quad F|t| = X^{-1}\{\varphi|p|\}.$$

Как показал многолетний опыт применения, пользование символом p для обозначения операции дифференцирования имеет при решении многих задач техники значительные преимущества. При этом нет необходимости пользоваться громоздким обозначением изображения $X\{\}$, за исключением специальных случаев.

Система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, описывающая электрическую систему, может быть разбита на ряд систем с начальными нулевыми условиями, по принципу наложения. Ток i , вызванный каждой включенной э. д. с. e , может быть представлен в операторном виде:

$$X\{i\} = \frac{1}{z|p|} X\{e\}.$$

где $z|p|$ — операторное сопротивление, учитывающее все взаимосвязанные индукцией или емкостью короткозамкнутые контуры.

Представленное уравнение обычно записывают в виде $i = \frac{e}{z|p|}$. Мы считаем такую запись, несмотря на ее условность, вполне допустимой и целесообразной, поскольку в подавляющем большинстве случаев она не приводит к каким-либо недоразумениям.

Очевидно, что в практике далеко не всегда пользуются разными обозначениями для отличных друг от друга величин, если это не приводит к недоразумениям. Так, например, длины l , выраженные в мм, см, м, км, обозначают одним символом l , оговаривая при этом применяемые единицы.

Если по наличию знака p видно, что уравнение является операторным, то можно условиться, что под знаками i и e в таких уравнениях следует понимать соответствующие операторные изображения. Преимущество такого обозначения велико. Оно позволяет широко использовать для рассмотрения переходных режимов большинство эквивалентных схем и основных правил элементарной электротехники, в том числе использовать обычные законы для последовательного и параллельного соединения операторных сопротивлений и т. д.

В случае, когда в одном и том же выражении встречаются оригиналы и операторные изображения функций, целесообразно обозначать изображение функции тем же символом, что и оригинал функции, но с чертой над символом,

При известной условности записи в ряде случаев в операторном уравнении может оказаться и функция времени, как, например:

$$\varphi|p| e^{at} u|t| = e^{at} \varphi|p + a| u|t|.$$

Мы записали символически теорему смещения операторного исчисления. В строгой записи она будет иметь вид

$$X^{-1}\{\varphi|p| X\{e^{at} u|t|\}\} = e^{at} X^{-1}\{\varphi|p + a| X\{u|t|\}\}.$$

Как видим, запись (2) сложна. Если имеется возможность выполнить запись (1) однозначной, это целесообразно сделать. Если рассматривать уравнение (1) символическое уравнение, в котором действие оператора распространяется только на функцию времени, тогда от него справа, то такая однозначная запись не допустима.

Таким образом, для определения правой части нужно рассматривать $u|t|$ как символическое обозначение изображения $X\{u|t|\}$, $\varphi|p + a| u|t|$ как символическое обозначение операторного изображения $\varphi|p + a| X\{u|t|\}$, а символическое обозначение $e^{at} \varphi|p + a| X\{u|t|\}$ как символическое представление функции времени $e^{at} X^{-1}\{\varphi|p + a| X\{u|t|\}\}$.

Левая часть (1) в операторном виде соответствует выражению $\varphi|p| X\{e^{at} u|t|\}$ и в функции времени изображению $X^{-1}\{\varphi|p| X\{e^{at} u|t|\}\}$.

История математики, физики, электротехники и других областей знания показывает, какую большую роль в облегчении рассмотрения многих задач играет удобная система обозначений. Ряд общепринятых обозначений — таких, например, как a_n^{n-1} , где n — число, а $n-1$ — степень, в которую нужно возвести a_n , — не более оправдан, чем те символические обозначения, о которых идет речь. Многолетний опыт широкого пользования представленными обозначениями в тех областях, где они применяются, показал их огромные преимущества.

Указанную символическую запись можно применить не только для линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, но и для нелинейных дифференциальных уравнений и для линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. В этом случае символическая запись, не обладающая в общем случае решения, имеет часто преимущество краткости и дает в ряде случаев возможность сравнения простого решения уравнений, хотя бы на основании соответствующих таблиц изображений. Непосредственный учет начальных условий при символической записи, как известно, также не представляет затруднений. Конечно, значительны преимущества символической записи для линейных уравнений с переменными коэффициентами. Такая запись позволяет использовать для большинства практически встречающихся уравнений теорему смещения, при которой можно обойтись без переменных коэффициентов. Кроме того, символическая запись облегчает преобразование заданного дифференциального уравнения к новому дифференциальному уравнению для операторного изображения функции.

Следует отметить, что для четкости записи целесообразно аргумент функции заключать в скобки, отличные по форме от скобок для умножения. Это весьма важно при сложном аргументе, часто встречающемся при использовании операторным методом. Например, выражение $z_d | js + a |$ обозначает функцию z_d от аргумента $js + a$ в то время как выражение $z_d (js + a)$ означает произведение множителей z_d и $(js + a)$.

Существенным является вопрос об обозначении величин, выраженных в относительных единицах. Мы можем согласиться с необходимостью специальных значений для величин, выраженных в относительных единицах. Так же, как и при применении любых единиц в статьях, описанных в других работах, должны быть заранее оговорены применяемые единицы.

Кандидат техн. наук Е. Я. КАЗОВСКИЙ

Завод «Электроника»

ПЕРЕДВИЖНЫЕ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОТЛЫ

Передвижные теплофикационные котлы, предложенные А. Т. Шмаревым и В. П. Рябовым, были применены в легкой промышленности для обогрева буровых, рабочих на электроприводе, а также для приготовления жидкого глинистого раствора на некоторых буровых в режиме циркуляции.

Котел состоит из двух трехфазных батарей, которые могут работать раздельно или вместе на общую паровую или раздельно на водяную и паровую сети потребителя.

Парообразование в батареях осуществляется путем нагрева электрического тока от внутренних электродов корпуса батарей. Питание котла водой производится в водяной емкости с помощью центробежного насоса непосредственно от водопроводной сети при давлении в трубопроводе 3 ат. Электропитание котла осуществляется от 6 кв при помощи силового трансформатора с мощностью 320 ква.

Водяная емкость котла 2,3 м³. Средняя паропроизводительность одной батареи 200 кг/час при электродах 120 × 600 мм, длиной 600 мм. Рабочее давление 3 ат. Подача пара или воды осуществляется через 30 мин, после окончания котла к водопроводной и электрической сети. Коэффициент полезного действия 0,97. Средняя мощность одной батареи при электродах 200 × 600 мм — 150 квт, а при электродах 120 × 600 — 90 квт. Максимальный ток одной батареи 250 а.

Для удаления солей необходимо через каждые 12 час производить полную замену воды в батарее. Упуск воды из батарей во время работы котла не опасен.

Котел монтируется на металлических санях в каркасном помещении. Наружные габариты передвижного теплофикационного электрического котла: полная высота 4,5 м, ширина 3,5 м, высота от грунта до конька сани 3,5 м. Вес без воды 6,5 т.

(Энергетический бюллетень МНП, № 11, 1950. В. П. Рябов)

ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОДА ДВИГАТЕЛЯ НИЧНОГО РУЧНОГО ЭЛЕКТРОСВЕРЛА НА ТОК ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

В настоящее время ставится задача облегчения веса ручного промышленного электроинструмента при одновременном повышении его мощности. Радикальное

решение дает повышение частоты тока и применение новых теплостойких материалов.

В журнале «Электричество», № 7, 1950 г. были описаны электропилы на частоту 200 гц (П. Э. Павлов и А. И. Новиков «Электропилы трехфазного тока для лесозаготовок»). В реферируемой работе исследовался экономический предел повышения частоты тока питания электросверла в случае применения различных по теплостойкости электроизоляционных материалов и в зависимости от степени интенсивности охлаждения.

Опыты производились с электросверлами ЭБР-6 и ЭБР-7. Например, опыты с электросверлом ЭБР-7 дали следующие результаты.

Частота, гц	Перегрев, °C	Интенсивность вентиляции (мощность вентилятора, вт)	Мощность сверла, вт
50	70	19	430
146	70	19	950
50	140	53	745
146	140	53	1910

Из таблицы видно, что повышение частоты дает большой эффект (мощность до 1910 вт) только при одновременном увеличении нагрева (140°C).

Автор приходит к следующему заключению относительно оптимального значения частоты.

Условия теплового режима	Оптимальное значение частоты тока, гц
Электросверло без наружного обдува, при хлопчатобумажной изоляции класса А	100
Электросверло с наружным обдувом, употребительной в настоящее время интенсивности (мощность охлаждающего вентилятора 16—19 вт, расход воздуха до 1,5 м ³ /мин) с изоляцией, близкой по теплостойкости к хлопчатобумажной	150
Электросверло с интенсивным наружным обдувом и с теплостойкой изоляцией	200

В статье рассматривается электросверло со специальной конструкцией кожуха, исключающей высокий нагрев кожуха при повышенном нагреве обмоток двигателя.

(Уголь, № 1, 1951. И. П. Филь)

УБЕЖОМ

УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Вопрос об уменьшении погрешностей трансформаторов продолжает сохранять свою актуальность, несмотря на то, что ему всегда уделялось много внимания. Об этом свидетельствуют работы советских ученых и инженеров последних лет, предложивших оригинальные пути снижения погрешностей, например, путем использования для уменьшения магнитных потоков рассеяния [Л. 1].

Работа трансформаторов в условиях, отличных от нормальных, выдвигает ряд новых моментов, которые необходимо учитывать при создании особо точных аппаратов. Например, характеристики многовитковых трансформаторов, работающих в цепях с частотой 50 гц, и номинальный ток которых составляет не менее 5 а,

практически не зависят от собственных емкостей обмоток и от емкости между обмотками. Но в последние годы возникла потребность в трансформаторах тока, предназначенных для работы либо при частотах выше 50 гц, либо с вторичным номинальным током ниже 5 а [Л. 2]. В этих случаях приходится учитывать влияние емкостных связей как между отдельными витками данной обмотки, так и между первичной и вторичной обмотками. Исходя из схемы замещения трансформатора, в которой емкостные связи представлены в виде сосредоточенных емкостных проводимостей, можно получить аналитическое выражение для отношения между первичным и вторичным токами с учетом полных сопротивлений обмоток, полезной нагрузки и

Напряже- ние, кВ	Номинальный коэффициент трансформа- ции, а	Число витков вторичной обмотки	Размеры каждого из двух сердеч- ников, мм	Нагрузка, ВА	Вторичный ток, А	Погрешности					
						I		II		III	
						ток %	угол, мин	ток %	угол, мин	ток %	угол, мин
161	150/5	30	$\varnothing 629/508 \times 51$	2,5, $\cos \varphi = 0,9$	0,5	1,74	103	0,22	3	—	—
				15, $\cos \varphi = 0,9$	5	1,19	43	0,33	5	—	—
				50, $\cos \varphi = 1$	0,5	6,65	262	1,49	12	0,56	—
				15, $\cos \varphi = 0,9$	5	4,00	72	1,58	13	0,43	—
69	100/5	20	$\varnothing 321/270 \times 133$	50, $\cos \varphi = 1$	0,5	>10	$>10^\circ$	4,43	125	0,2	—
				15, $\cos \varphi = 0,9$	5	7,7	250	4,42	100	0,19	—
				15, $\cos \varphi = 0,9$	0,5	>10	$>10^\circ$	2,15	+25	0,05	—
				15, $\cos \varphi = 0,9$	5	6,8	156	2,12	+16	0,04	—

Примечание.

I — трансформатор тока без возбуждения повышенной частоты;

II — трансформатор тока с возбуждением тройной частоты;

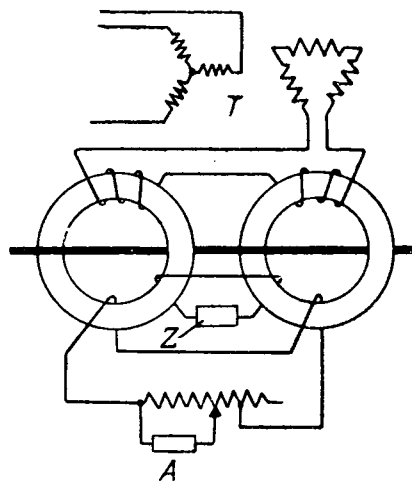
III — трансформатор тока с дополнительным возбуждением тройной частоты, вспомогательной нагрузкой для уменьшения угловой погрешности и автотрансформатором для уменьшения погрешности в токе.

соответствующих емкостных проводимостей. Анализ этого достаточно громоздкого выражения показывает, что существенную роль играет не только абсолютная величина собственных и междуобмоточных емкостей, но и характер распределения емкости между обмотками. При нормальном способе намотки обмоток по слоям емкость между обмотками оказывается сосредоточенной между витками наружного слоя внутренней обмотки и витками внутреннего слоя наружной обмотки. Такое распределение емкостей является неблагоприятным, и характеристики трансформатора тока могут быть улучшены в случае симметричной емкости между обмотками и в случае ее равномерного распределения по всей обмотке. Удовлетворительного распределения емкости между обмотками и низких собственных емкостей обмоток можно добиться путем применения специального способа намотки обмоток, при котором одинаковые по порядку витки каждой из обмоток расположены возможно ближе друг к другу. Дальнейшего улучшения характеристик можно добиться путем увеличения толщины изоляции между обмотками и применения изоляционных материалов с низкой диэлектрической проницаемостью [Л. 3, 4].

Среди различных конструкций трансформаторов тока, применяемых в высоковольтных электроустановках, особый интерес представляют трансформаторы тока, встраиваемые в проходные изоляторы силовых трансформаторов и выключателей. Это объясняется простотой конструкции, удобством эксплуатации и надежностью таких трансформаторов тока, а также возможностью использовать их вплоть до самых высоких напряжений как применяемых в настоящее время, так и предполагаемых к применению в будущем. Однако при линейных токах ниже 1000 А погрешности трансформаторов тока этого типа начинают заметно возрастать, что ограничивает возможность их применения для измерительных целей. За несколько десятков лет развития электропрмышленности было сделано множество попыток снизить погрешности трансформаторов тока, встраиваемых в проходные изоляторы [Л. 5, библиография 160 названий]. Эти попытки шли по следующим основным путям: 1) непосредственное уменьшение тока холостого хода (путем подмагничивания магнитопровода тем или иным способом); 2) двухступенчатая трансформация, при которой без изменения тока холостого хода воздействуют на вторичный ток и изменяют его на величину, соответствующую току холостого хода; 3) поворачивание вектора тока возбуждения; 4) выпрямление кривой тока холостого хода; 5) выпрямление кривой тока холостого хода при одновременном уменьшении его величины.

Последний из названных способов может быть осуществлен путем одновременного возбуждения ферромагнитного материала токами различных частот. Подавляющая часть затрачиваемой активной и реактивной мощности будет при этом отдаваться источником тока более высокой частоты. Таким образом, мощность, отдаваемая источником тока более низкой частоты, уменьшается, хотя суммарная потребляемая магнитопроводом мощность может

при этом и значительно возрасти. Иными словами, с зрения источника тока низкой частоты материал магпровода как бы приобретает улучшенные свойства: возбуждения уменьшается при известных условиях более чем в 2 раза. Кроме того, что еще важнее, дополнительное возбуждение повышенной частоты влечет за собой пропорциональность между низкочастотным током возбуждения и суммарным первичным током низкой частоты



А — нагрузка; Z — вспомогательная нагрузка для уменьшения угловой погрешности; Т — утритель частоты.

Применительно к трансформаторам тока, устанавливаемым в проходных изоляторах, дополнительное возбуждение осуществляется при помощи отдельной обмотки таеомой утрителем частоты обычного типа (три одних трансформатора с первичными обмотками, соединенными в звезду, и вторичными обмотками, соединенными в открытый треугольник). При этом погрешность в можно уменьшить более чем в 10 раз, а угловую погрешность — более чем в 60 раз. В этой конструкции погрешности не зависят от нагрузки (ток возбуждения оста частоты пропорционален первичному току), и можно нять дополнительные меры для уменьшения их абсолютных величин: угловая погрешность компенсируется вспомогательным сопротивлением Z, а погрешность в токе — трансформатором с ответвлениями, включаемым во вторичный зажим трансформатора тока и нагрузки (рисунк).

В таблице приведены применительно к двум трансформаторам тока, встроенным в проходной изолятор напряжений 161 и 69 кВ погрешности для различных

зок: при отсутствии возбуждения повышенной частоты, при наличии и при наличии вспомогательного возбуждения, вспомогательной нагрузки Z и автотрансформатора

Литература

1. Г. Н. Петров, С. С. Окунь. Электричество, стр. 46, 1946.
2. E. Eng., Tr., стр. 649, № 10, 1946. Реферат.
3. Proc. I. E. E., т. 97, ч. II, стр. 727, № 60, 1950. I. M. Arnold.
4. Proc. I. E. E., т. 97, ч. II, стр. 797, № 60, 1950. I. M. Arnold.
5. Trans. A. I. E. E. т. 69, ч. I, стр. 429, 1950. G. Ca-
6. Trans. A. I. E. E., т. 69, ч. I, стр. 424, 1950. J. W. Farr.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

ГИРОБУС

В Швейцарии проводятся эксплуатационные испытания нового образца нового типа экипажа, названного «гиробус». Отличительной его особенностью является энергетическая схема. Гиروبус подобно троллейбусу получает энергию от электродвигателей, вращающих колеса на контактах, но энергия для двигателей поступает не из контактной сети или от аккумуляторов, а запасается в маховике (гироскопе), установленном непосредственно на гиробусе.

Этот маховик, весом 1,5 т и диаметром 1500 мм, раскручивается до 3000 об/мин установленным на нем короткозамкнутым электродвигателем, получающим электроэнергию от сети 380 в 50 гц на специальных питательных линиях. После того как маховик раскручен, двигатель переводится от сети и переводится на режим генератора конденсаторным возбуждением, вращаемого маховиком. Таким образом, запасенная механическая энергия вновь преобразуется в электрическую, которая и поступает по контактам в тяговые электродвигатели. По мере расхода запасенной энергии вращение маховика замедляется. Максимальная мощность, потребляемая гиробусом при зарядке, достигает 240 квт. Повторная подзарядка должна быть произведена через 5... 6 км горизонтального пути.

Питательные пункты в виде специальных мачт устраиваются на ряде промежуточных и на конечных остановках. Время, необходимое для зарядки маховика, составляет 1... 3 минуты.

Процесс зарядки весьма прост: при подходе к питательной мачте водитель, не покидая своего места, переводит выходящие на крыше три штанги в вертикальное положение и, как только они войдут в соприкосновение с опциональным кронштейном мачты, окончательно останавливает гиробус (рисунок). Кронштейн имеет три контактные секции, через которые трехфазный ток поступает на штанги к двигателю маховика. Через 1... 3 мин зарядка заканчивается, и движение может продолжаться.

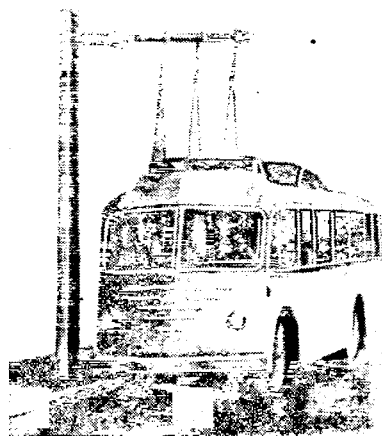
Максимальная скорость движения гиробуса доходит до 50 км/час.

Регулирование скорости водитель производит переключением полюсов двигателей и включением конденсаторов. Торможение производится по рекуперативной схеме, а потребляемая при торможении электроэнергия используется для увеличения скорости вращения маховика.

В целях снижения потерь на трение и улучшения условий охлаждения маховик помещен в кожух, наполненный маслом. Это дает возможность вращаться маховику без нагрузки 12... 14 час.

Маховик укреплен в корпусе экипажа на эластичной опоре, поэтому гироскопический эффект не сказывается на движении заметным образом.

Для конструкторов опытного образца гиробуса неясен вопрос о поведении маховика при крупной аварии, например, при столкновении с другим экипажем.



По отношению к другим видам уличного транспорта гиробус имеет ряд преимуществ, а именно: обладая маневренностью автобуса, он не отравляет воздух и может питаться дешевой энергией мощных электростанций; не нуждается в специальной контактной сети и в выпрямительных установках, как этого требует троллейбус, превосходя его по маневренности; по сравнению с аккумуляторными автобусами его главное преимущество состоит в очень коротком времени зарядки, а также в большей долговечности — аккумуляторная батарея требует замены после 300 зарядок, тогда как гарантийный срок для шариковых подшипников не менее трех лет; кроме того, аккумуляторная батарея равновеликой мощности была бы в 30 раз тяжелее. Наконец, зарядка гиробуса производится непосредственно от сети трехфазного тока, тогда как для аккумуляторной батареи требуется выпрямительная установка.

(Bull. ASE, № 4, стр. 113, 1951)

Инж. Б. А. ПРОТОПОВ

ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ, ПРИСОЕДИНЕННОГО К ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ ЧЕРЕЗ КАБЕЛЬНЫЕ ВСТАВКИ

Вопрос о надлежащей защите электрооборудования, соединенного с воздушными линиями через кабельные вставки, не является новым. Однако за последние годы он приобретает все большую важность в связи с внедрением комплектных трансформаторных подстанций, часто питаемых через воздушные линии с кабельными подходами.

Исследование этого вопроса проводилось для случая одиночной воздушной линии, соединенной через кабель с масляным выключателем или трансформатором. На линейной кабельной концевой муфте установлен вентильный разрядник, заземляющий зажим которого соединен с обо-

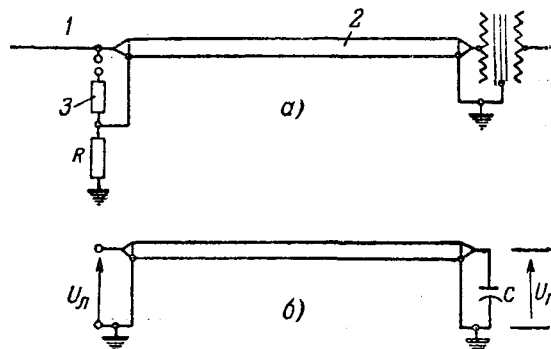


Рис. 1. Схема установки.

1 — воздушная линия; 2 — кабель; 3 — вентильный разрядник.

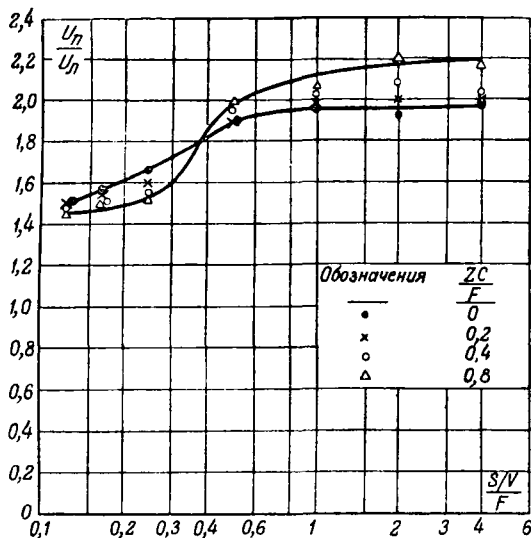


Рис. 2. Зависимость напряжения на приемном конце от параметров схемы.

U_n — максимальное напряжение на приемном конце;
 $U_л$ — максимальное напряжение на линейном конце.

лочкой кабеля. Последняя соединена также с баком трансформатора или масляного выключателя (рис. 1,а). Непосредственные опыты проводились с упрощенной схемой, в которой подлежащей защите объект представлялся емкостью соответствующего значения (рис. 1,б). Принималось, что на линейном конце кабеля напряжение равномерно возрастает до некоторого максимального значения, определяемого характеристиками разрядника, и затем остается неизменным в течение времени, соответствующего, по крайней мере, двойному времени пробега волны вдоль кабеля. Длина фронта получающейся волны с косоугольным фронтом определялась путем деления максимального напряжения на линейном конце кабеля на крутизну фронта (большинство исследований проведено с фронтом 0,4 мксек). В тех случаях, когда фронт волны напряжения на стыке линии с кабелем изменялся в результате отражений от защищаемого объекта до достижения максимального напряжения, длина фронта определялась путем деления максимального напряжения на первоначальную крутизну фронта.

Основная часть исследований была проведена на схеме замещения кабеля, состоящей из последовательных индуктивностей и параллельных емкостей. Предварительно было установлено, что получаемые таким образом результаты хорошо совпадают с результатами, полученными при испытаниях с реальным кабелем соответствующей длины.

Если s — длина кабеля в метрах и v — скорость движения волны в кабеле в м/мксек (обычно порядка 150 м/мксек), то s/v — время пробега волны вдоль кабеля в мксек. Если Z — волновое сопротивление кабеля в ом и C — емкость оборудования, присоединенного к кабелю, в мкмкф, то $Z \cdot C$ — постоянная времени в мксек цепи, состоящей из кабеля и присоединенного оборудования. Время пробега и постоянную времени можно выразить в относительных единицах, поделив их на длину фронта F в мксек. На рис. 2 приведены основные кривые, показывающие зависимость отношения «максимальное напряжение на приемном конце кабеля к максимальному напряжению на линейном конце» от двух переменных $\frac{s}{v} \cdot F$ и $\frac{Z \cdot C}{F}$.

и $\frac{s}{v} \cdot F$.

Величина $\frac{Z \cdot C}{F}$ в практических случаях колеблется от значений, близких к нулю, до значений порядка 0,4 (последняя цифра получается для кабеля с волновым сопротивлением 50 ом, емкостью в 3 200 мкмкф при длине фронта 0,4 мксек). Из рассмотрения рис. 2 следует, что

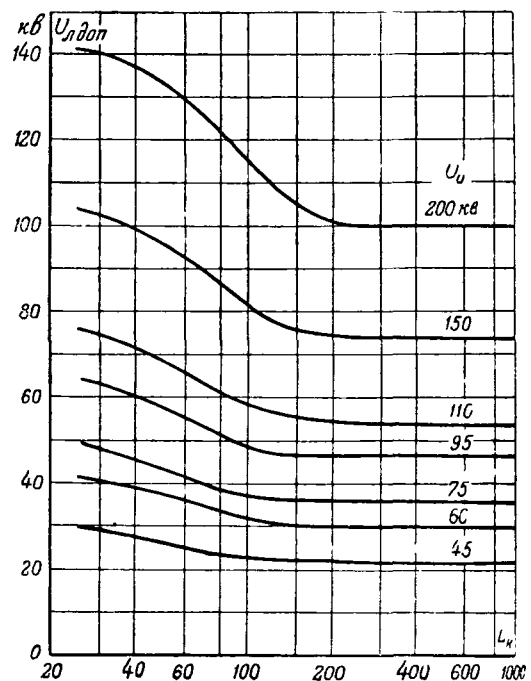


Рис. 3. Допустимое напряжение для оборудования класса 1.

$U_{л, доп}$ — допустимое напряжение на линейном конце кабеля;
 $L_к$ — длина кабеля в футах; U_0 — основной уровень импульсной прочности, кВ.

при изменении $\frac{ZC}{F}$ от 0 до 0,4 импульсное напряжение на оборудовании изменяется не более чем на $\pm 0,1$. Отсюда следует, что для пользования кривыми достаточно знать приближенное значение емкости присоединенного оборудования. Ориентировочно емкость колеблется от нескольких сот мкмкф для масляных выключателей до 1 000—3 000 мкмкф для трансформаторов. Следует отметить, что при значениях $\frac{s}{v} \cdot F < 0,5$ увеличение емкости на приемном конце кабеля вызывает уменьшение напряжения на оборудовании, а при значениях $\frac{s}{v} \cdot F > 0,5$ — увеличение. В некоторых случаях кратность напряжения на приемном конце кабеля превышает 2, однако это имеет место лишь для значений $\frac{s}{v} \cdot F > 0,5$, в то время как при

технически эта величина не превышает значений порядка 1. Для того чтобы, исходя из основных кривых рис. 2, определить максимально допустимое импульсное напряжение на стыке кабеля с воздушной линией, целесообразно разделить электрооборудование на 2 класса:

класс 1 — оборудование, для которого установлены импульсные испытательные напряжения как при полноволновой, так и при срезанной волне; сюда относятся масляные, лавовые, распределительные и измерительные трансформаторы, а также измерительные трансформаторы сухие и полные композиты;

класс 2 — оборудование, для которого установлены испытательные напряжения лишь при полной волне; сюда относятся распределительные устройства и сухие распределительные и силовые трансформаторы.

Если исходить: а) из уровня импульсной прочности при срезанной волне для оборудования класса 1 и уровня при полной волне для оборудования класса 2; б) из емкости присоединенного к кабелю оборудования (в пределах от 0 до 3 200 мкмкф (в зависимости от типа оборудования); в) из определенных волновых сопротивлений кабеля и определенной крутизны фронта волны; г) из напряжения на стыке кабеля с воздушной линией (таблица 1), можно построить кривые максимально допустимого

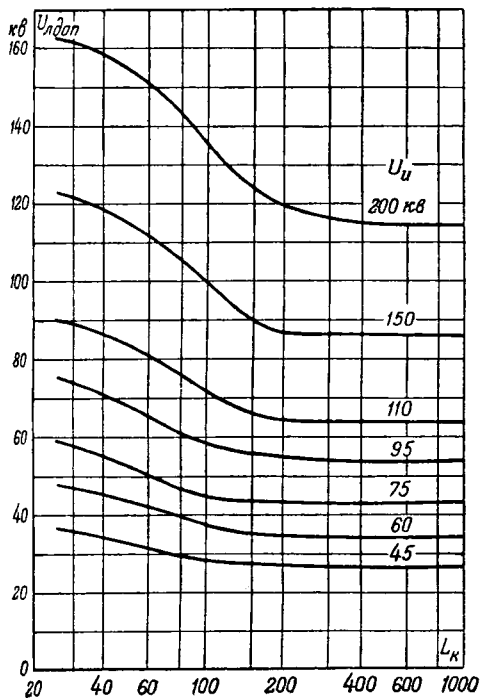


Рис. 4. Допустимое напряжение для оборудования класса 2.

$U_{\text{и, доп}}$ — допустимое напряжение на линейном конце кабеля; $L_{\text{к}}$ — длина кабеля в футах; $U_{\text{и}}$ — основной уровень импульсной прочности, кВ.

Расчетная крутизна фронта на стыке кабеля с воздушной линией

изоляция ка- беля, кВ	Волновое сопротивление кабеля, Ом	Крутизна фронта, кВ/мксек
4—5	19,2	77
7—8	26,1	104
14—15	34,1	136
22—23	40,6	163
34—35	43,7	175

напряжения на линейном конце кабеля в зависимости от длины последнего и в зависимости от основного уровня импульсной прочности присоединенного оборудования класса 1 и класса 2 (рис. 3 и 4). Зная длину кабеля, по этим кривым определить, в состоянии ли разрыв, установленный на линейном конце кабеля, ограничить импульсное напряжение до соответствующего уровня и же необходима установка дополнительного комплекта индукторов на приемном конце кабеля.

(Trans. AIEE, т. 69, ч. 1, стр. 527, 1950. R. L. Witzke, I. Bliss.)

Инж. А. Г. КРАЙЗ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ ТИКСОТРОПИЯ

Тиксотропией называется способность коллоидных растворов (золь) изменять свое состояние, изотермически переходя из жидкого или полужидкого состояния в состояние геля и обратно. Этот переход может происходить под воздействием различных химических или физических факторов, например, встряхивания, добавления индукторов, под действием магнитного и электрического и т. п. В статье разбираются случаи магнитной и электрической тиксотропии.

За последнее время изменение консистенции или вязкости коллоидов под действием магнитного или электрического поля нашло практическое применение. Представим

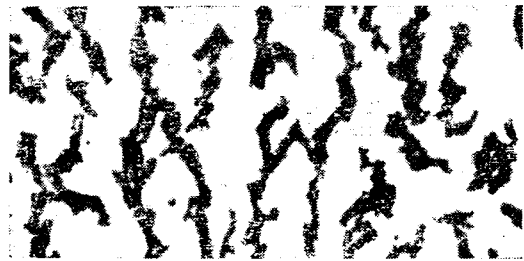


Рис. 1



Рис. 2

себе смесь тонкого железного порошка с высокой магнитной проницаемостью и масла. Эта смесь обладает свойствами коллоида. При воздействии на нее магнитного поля железные частицы притягиваются одна к другой и образуют цепочки, расположенные по магнитным силовым линиям. Микрофотография разреза такой смеси, находящейся под действием равномерного магнитного поля, дана на рис. 1. На ней ясно видны цепочки, тянущиеся от одного полюса к другому.

Если в сосуд, содержащий магнитную смесь, опустить постоянный магнит и затем вынуть его, то между полюсами магнита образуется своего рода мостик (рис. 2) из перешедшей в состояние геля магнитной смеси.

На указанном принципе разработано большое количество магнитных муфт для связи вращающихся валов друг с другом. Подобного рода муфты уже были описаны ранее (Электричество, № 6, 1950), вследствие чего их описание здесь не приводится.

Кроме муфт, магнитные смеси имеют много других применений. Так, например, возможно осуществить управление движением жидкости по трубе, если надеть на трубу катушку, создающую магнитное поле. Магнитное поле повышает вязкость проходящей жидкости и, как следствие этого, уменьшается ее количество, проходящее через сечение трубы. Таким образом, получается устройство, схожее с дроссельным клапаном. В частности, отмечена возможность построения на этом принципе системы управления воздушными и жидкостными тормозами. Как оригинальное применение магнитной смеси, следует отметить изготовление из нее литейных форм. В сильном магнитном поле смесь настолько затвердевает, что в сделанную из нее форму можно с некоторой осторожностью произвести отливку. Понятно, что такие формы пригодны лишь для отливки из гипса или органического стекла, т. е. из материалов, не требующих нагрева для изменения своего состояния.

Магнитная смесь также может быть применена и в реле. В этом случае два электрода погружаются в жидкость. При появлении магнитного поля проводимость между ними резко возрастает вследствие образования между этими электродами цепочек, и цепь замыкается. Понятно, что такое реле (подобно когереру) не может быть разомкнуто простым снятием поля и для размыкания его необходимо сотрясение или переворачивание.

Аналогично магнитным смесям могут быть построены электромагнитные реле. В этом случае ферромагнитные ча-

стицы заменяются частицами диэлектрика, например, порошком ликоподия (споры плауна). Мелкий порошок смешивается с керосином, трансформаторным или парафиновым маслом. Хорошие результаты дает порошок окиси магния в кремнийорганическом масле.

Аналогично с опытом по рис. 2 между зажимами заряженного конденсатора образуется мостик, состоящий из перешедшей в студнеобразное состояние электростатической смеси. При разряде конденсатора силы сцепления исчезают, и мостик распадается.

При воздействии на организм токов высокой частоты частицы крови поляризуются и образуют «шарики цепочки» аналогично со спорами плауна. Эти цепочки так же, как и железные цепочки в магнитном поле, повышают поперечную вязкость крови.

Так же, как и магнитные муфты, могут быть созданы и муфты электростатические. Для этого муфта напыляется электростатической смесью, и к двум изолированным друг от друга половинкам ее прикладывается постоянное или переменное напряжение, вызывающее образование электростатических цепочек аналогично с образованием магнитных в магнитном поле.

Область применения этих двух типов муфт разная. В то время как муфты с магнитной смесью могут использоваться в силовых передачах, электростатические муфты, весьма вероятно, найдут применение в устройствах управления, не требующих передачи больших моментов.

(Die Technik, № 4, стр. 173, 1950. Н. Нелл)

Инж. Ю. И. АНО



Хроника

Совещание энергетиков нефтяной промышленности

В апреле с. г. в Москве состоялось совещание энергетиков нефтяной промышленности. В нем участвовало около 280 человек, в том числе 176 энергетиков промыслов, заводов трестов и объединений нефтяной промышленности.

Перед совещанием были поставлены следующие задачи: установление наиболее рациональных способов нормирования и экономии электроэнергии и топлива, обобщение опыта эксплуатации электропривода, разработка дальнейшей автоматизации производственных процессов (магистральный самозапуск, повторное включение и др.) и мероприятий по обеспечению электроснабжения морских и других нефтепромыслов, удаленных от энергосистем районов.

По электротехническим вопросам совещание заслушало 35 докладов. Главный инженер Главэнергонефти Д. А. Тарасов выступил по поручению Министерства нефтяной промышленности СССР с докладом «Основные мероприятия по экономии электроэнергии, проводящиеся на предприятиях нефтяной промышленности, и пути дальнейшей экономии и рационализации расхода электроэнергии». Отметив успехи, достигнутые энергетиками нефтяной промышленности в повышении энерговооруженности промыслов и обеспечении бесперебойной работы установок и механизмов, докладчик указал на неликвидированный еще недостаток — низкий косинус ϕ электропривода в нефтедобывающей промышленности. Перечислив основные задачи энергетиков нефтяной промышленности, Д. А. Тарасов подчеркнул значение синхронизации асинхронных двигателей по схеме ДАГ, применение которой в ряде нефтяных районов позволило снизить расход электроэнергии и освободило от необходимости постройки нескольких высоковольтных линий. В области электропривода особое внимание должно быть уделено более широкой автоматизации станков-качалок и других установок.

Инж. Л. Н. Афанасьев (Министерство угольной промышленности) в докладе «Применение синхронизационных агрегатов по схеме ДАГ, как метод повышения коэффициента мощности на предприятиях нефтяной промышленности» указал, что применение этой схемы устраняет основные недостатки синхронизации асинхронных двигателей, препятствующие широкому распространению синхронизации: отсутствие удобного источника тока возбуждения и неустойчивую работу двигателя в синхронном режиме при перегрузках или большом падении напряжения в сети. По схеме ДАГ обеспечивается автоматический плавный пуск двигателя: а) из асинхронного режима в синхронный при пуске; б) из синхронного режима в асинхронный при перегрузке и снижении напряжения в сети (когда двигатель выпадает из синхронизма); в) из асинхронного режима в синхронный при снижении нагрузки или восстановлении нормального режима в сети. В качестве источника тока возбуждения по схеме ДАГ используется селеновый синхронизационный агрегат, успешно работающий на переменном токе.

ших токах (несколько сот ампер) и напряжении в несколько вольт (до 20 в).

Инж. О. П. Шишкин (Грознефть) в докладе «Технико-экономическое сравнение методов компенсации реактивной мощности на нефтепромыслах» осветил вопрос оптимальной загрузки двигателя с учетом затрат активной мощности на компенсацию реактивной энергии и указал, что анализ характеристик к. п. д. и косинуса ϕ асинхронных двигателей подтверждает, что увеличение косинуса ϕ путем увеличения загрузки двигателя выгодно только до определенного предела, после которого потери активной мощности столь быстро растут, что экономия реактивной энергии, достигаемая повышением загрузки, оказывается не годной.

Кандидат техн. наук Б. М. Плющ (Азербайджанский индустриальный институт им. Азизбекова) в докладе «Глубоководный самозапуск электродвигателей глубоководных установок» изложил основные принципы магистрального самозапуска. Исследования, проведенные при переводе на самозапуск целого ряда установок, и опыт эксплуатации последних показали, что максимальные пики тока при самозапуске невелики и не превышают двойного номинального тока трансформатора при трех магистральных (при большем числе магистралей кратность тока еще ниже).

Инж. М. М. Фархад-Заде (Азнефть) в докладе «Защитное устройство с самозапуском для электродвигателей станков-качалок» сообщил, что получившее широкое распространение в промыслах Азнефти для индивидуального самозапуска защитное устройство состоит из трехполюсного выключателя с предохранителями, магнитного пускателя с коковой защитой и трансформатора 20 в с нагревательным элементом.

Затем на совещании выступили с докладами: А. А. Хачатуров (Азнефть) о применении автоматического повторного включения на нефтепромыслах объединения Азнефть; кандидат техн. наук Д. И. Марьяновский (ВНИИ Миннефти) о рациональных принципах устройства автоматической подачи бурового инструмента; инж. Н. Г. Григорьян (СКБ Миннефти) о результатах промышленных испытаний электробуров и буровых автоматических регуляторов конструкции СКБ; кандидат техн. наук Л. И. Штурман (ВНИИ Миннефти) об электрическом торможении буровых лебедок; инж. Н. З. Рустамов (Азморнефть) об электроснабжении морских промыслов; инж. Г. М. Степанов (Оргэнергонефть) о нормировании расхода электроэнергии в глубоководной добыче нефти и др.

Кандидат техн. наук И. А. Сыромятников (МЭС) в работе «Повышение надежности электрооборудования потребителей и новые методы эксплуатации электрооборудования» указал, что значительное повышение надежности электроснабжения достигается в результате внедрения устройств автоматики и релейной защиты и регулярного проведения предупредительных ремонтов и профилактических работ. Докладчик рекомендовал: а) оборудовать автоточечным повторным включением все воздушные линии; б) включать синхронные машины на мелкую работу методом самосинхронизации и оборудовать синхронные машины устройствами форсированного возбуждения; в) широко применять прямой пуск синхронных и асинхронных двигателей, избегая схем с автотрансформаторным пуском, а в тех случаях, когда прямой пуск невозможен, применять реакторный пуск; г) проводить глубокое секционирование схемы питания собственных расходов, автоматический ввод резерва на каждой линии и самозапуск ответственных двигателей.

Доклад кандидата техн. наук А. А. Эфенди-Заде (Институт им. Есманова Азербайджанской Академии наук) был посвящен описанию асинхронного электропривода, регулируемого частотой от коллекторного генератора, и выводу возможности применения его в промышленности. Докладчик привел зависимость между моментом двигателя и частотой и определил предел статической устойчивости при различном пере нагрузке на валу, а также характер изменения скорости двигателя при динамических изменениях момента на двигателе.

В ряде докладов были рассмотрены вопросы эксплуатации тепловых устройств электростанций.

Слушавшие на совещании доклады вызвали широкий обмен мнениями (в прениях выступило более 70 человек). По вопросам: повышения косинуса фи, автоматизации самозапуска двигателей и нормирования электропотребления. Критическому разбору была подвергнута действующая система оплаты электроэнергии. Много внимания уделено электроснабжению удаленных от энергоснабжающих районов, а также электроснабжению морских промыслов; указывалось, между прочим, на необходимость бурения с дизельного привода на электрический,

а в районах, где отсутствуют достаточно мощные электростанции, — на дизельэлектрический привод.

В ряде выступлений обращалось внимание на совершенно недостаточную техническую информацию и высказывались пожелания об усилении работы по обмену опытом в области проектирования и монтажа электроснабжающих устройств.

Выступая в прениях, инж. А. Г. Чернышов (Молотовнефть) высоко оценил метод форсированного пуска электродвигателей, дающего особенный эффект на скважинах с тяжелым пуском (наклонные); этот метод позволяет снизить установленную мощность в 2—2,5 раза. Инж. Н. З. Рустамов (Азморнефть) сообщил о проделанной работе по переводу напряжения в высоковольтных сетях с 2 на 6 кв. Остановившись на Правилах электротехнических устройств, Н. З. Рустамов отметил, что буровые неправильно отнесены к нагрузкам второй категории, вследствие чего допускается построика только одной линии. Это ограничивает работу и особенно отражается на морском бурении. Инж. Г. А. Гусин (Краснодарнефть) указал на плохой учет реактивной энергии и низкое качество статических конденсаторов на 6 кв. Инж. А. А. Мессир-Заде (Азизбековнефть) указал, что массовый перевод двигателей станков-качалок на самозапуск, резко сократил простой скважин.

Совещание приняло развернутое решение, в котором содержится ряд рекомендаций для энергетиков нефтяной промышленности: о широком применении всех доступных методов повышения косинуса фи (в частности, по схеме ДАГ), об ускорении темпов внедрения автоматизированного электропривода и пр.

Совещание нашло необходимым обратить внимание МЭП на важность увеличения выпуска синхронных двигателей и электродвигателей с характеристиками, подходящими для режима электропривода станков-качалок.

Совещанием принято обращение ко всем рабочим инженерам, техникам и служащим энергохозяйства нефтяной промышленности, посвященное выполнению обязательств, взятых на себя нефтяниками в письмах на имя товарища Сталина.

Инж. Н. З. ПОКОНОВ
Техотдел Главэнергофти



Библиография

Ю. В. КОРИЦКИЙ. ПРОИЗВОДСТВО СЛЮДЯНЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.
115 стр., ц. 4 руб. 55 коп. Госэнергоиздат, 1951.

Слюдяные электроизоляционные материалы весьма важны для электропромышленности вообще и электромашиностроения в особенности.

При крайне ограниченном наличии специальной литературы, посвященной этому виду электрической изоляции, в свет новой книги, рассматривающей вопросы производства слюдяных электроизоляционных материалов, широко встречается читателями-специалистами данной области с определенным интересом.

Рассматриваемая книга входит в серию изданий, посвященных различным вопросам электроизоляционной техники, выпускаемых по инициативе Всесоюзного бюро электрической изоляции. По замыслу автора, книга рассчитана на широкий круг читателей — квалифицированных рабочих, инженеров — и должна служить «пособием для повышения производительности труда работников по производству слюдяной изоляции», будучи также полезна и «тем работникам, которым приходится иметь дело с применением этих материалов при производстве и эксплуатации электрических машин».

Всесоюзное бюро электрической изоляции и Комиссия экспертов при Академии наук СССР, которая тактично утверждает издание серии книг по вопросам электроизоляционной техники, правильно стремятся пополнить литературу данного профиля, учитывая то значение,

которое приобретают вопросы электрической изоляции на данном уровне развития электротехники.

Книга Ю. В. Корицкого содержит: общий обзор слюдяных электроизоляционных материалов, выпускаемых промышленностью; технические данные, характеризующие эти материалы по действующим государственным стандартам; основные данные о сырье и полуфабрикатах, используемых в производстве миканитов (слюда, склеивающие материалы, подложки) с освещением их важнейших параметров, предусмотренных соответствующими ГОСТ и ведомственными техническими условиями; данные производственно-технологического порядка по изготовлению миканитов с кратким описанием потребного оборудования и вопросов промсанитарии и техники безопасности.

Приводя описание характеристик и свойств слюдяных электроизоляционных материалов, обусловленных действующими стандартами, автор правильно отмечает некоторые недочеты действующих ГОСТ: единая норма на расклевываемость прокладочного миканита для толщин от 0,5 до 3 мм; недостаточность разработки метода определения формоустойчивости формовочного миканита; унификация требований по водопоглощаемости и удельному объемному сжативанию после увлажнения к гибким миканитам, не подверженным огневому воздействию с двух сторон бумаги; ряд суще-

ственных недочетов в ГОСТ на слюду и др. Нужно пожелать, чтобы указанные недочеты стандартов были срочно исправлены. В особенности настоятельна необходимость в неотложном пересмотре ГОСТ на слюду, так как этот стандарт, составленный во время войны, в настоящий момент совершенно не является удовлетворительным и не соответствует значению миканитовой изоляции в производстве современных крупнейших электрических машин.

К положительным сторонам книги следует отнести также наличие в ней рекомендаций по расчетам потребности сырья и полуфабрикатов (слюда, лаки) на единицу выпускаемой продукции с приведением формул и примерных расчетных таблиц.

Следует, однако, отметить отсутствие в книге некоторых данных, могущих быть весьма полезными для читателей (особенно учитывая назначение книги как пособия для обучения производственных рабочих техникуму), а также наличие в ней ряда неточностей.

В книге приведено весьма мало материалов по техническому обоснованию тех или иных производственных процессов и режимов, по объяснению сущности технологических процессов. Например, при описании производства коллекторного миканита дается перечень технологических операций, но не указывается, чем вызывается и обосновывается определенная их последовательность, в частности, например, введение повторного прессования; не указано, как собираются пакеты коллекторного миканита для второго прессования.

Определенные затруднения для усвоения приведенных в книге данных вызывает не совсем понятная система расположения материала. Например, о свойствах различных видов слюдяной изоляции даются довольно подробные сведения как в первой, так и в четвертой главах.

Перечень рассматриваемых в книге видов слюдяной изоляции неполон. Отсутствуют данные о микашелке, микаполотне и стеклолакомикаленте.

Говоря о режимах обработки миканитов резанием, автор указывает лишь, что режимы эти и применяющийся для этой цели инструмент «имеют некоторые особенности», а какие именно, не говорит.

В качестве объяснения причины применения ручной клейки гибких миканитов сказано, что «на сегодняшний день неизвестны такие склеивающие вещества, которые

хорошо размалывались бы в порошок, и после расклевывания давали бы эластичную пленку, обеспечивающую вольно высокие требования, предъявляемые к гибкому миканиту» (стр. 103). Объяснение это не является полным, так как выше (стр. 66—72) говорится о возможности применения машинной клейки миканитов при мощи лаковых растворов.

Отсутствуют указания на образование статического электричества при производстве многослойных миканитов сухим «башенным» способом. Непринятие необходимости по предотвращению образования или снятию статических зарядов может вызвать в цехе серьезные происшествия вплоть до пожара. Описание явления электризации и мер борьбы с ним могло бы быть дано в «Промсанитарии и техники безопасности».

Ряд приведенных в книге ссылок на работы в области миканитовой изоляции, проведенные в 1930—1935 гг., мог бы быть заменен более поздними данными. Например, сведения о зависимости производительности ручной клеевой миканитовой изоляции от номера слюды, относящиеся к 1934—1935 гг. (стр. 66), сейчас устарели; в настоящее время приведенные в книге нормы перекрываются нашими передовыми стахановскими.

В производстве коллекторного миканита рекомендуется (стр. 49) применение неплавкой смолы — «козла». Следует было оговорить, что такая смола является «неплавкой» лишь в обычных условиях, т. е. при нормальном давлении; иначе она, очевидно, и не могла бы склеивать слюду.

При описании свойств глифталевой смолы для клеевой формовочной миканитовой изоляции указано (стр. 49), что кислотное число должно быть не выше 120 мг КОН/г. Действительные технические условия на глифталевую смолу для указанных целей предусматривают кислотное число не выше 135 мг КОН/г.

Слюда биотит (стр. 29) в производстве миканитовой электроизоляции практически не применяется.

Нужно указать также на наличие в книге некоторых чисто стилистических погрешностей.

Следует пожелать, чтобы отмеченные недочеты были устранены в случае повторного издания книги.

В. С. КВАШИН

Главный инженер завода №

М. О. КАМЕНЕЦКИЙ. ПЕРВЫЕ РУССКИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ. 132 стр., ц. 4 руб. 65 коп. Госэнегронгиздат, 1951.

Выход в свет этой книги можно рассматривать как начало составления истории отечественных электростанций, ограничивающейся в данной книге главным образом периодом 1880—1896 гг.

После небольших вступительных замечаний, касающихся преимущественно достижений П. Н. Яблочкова и А. Н. Лодыгина в области распределения электрической энергии, в книге обстоятельно рассмотрена классическая статья профессора Петербургского лесного института Д. А. Лачинова «Электромеханическая работа», помещенная в первых номерах начавшего в то время (1880 г.) выходить журнала «Электричество». Для облегчения понимания математического аппарата цитируемой статьи Д. А. Лачинова М. О. Каменецкий сопровождает формулы из этой статьи современными обозначениями; автор выясняет значение открытого Д. А. Лачиновым «закона повышения напряжения»¹ (как «основного закона электропередачи») с точки зрения последующего развития электротехники и подчеркивает не только приоритет, но и принципиально превосходство положений Д. А. Лачинова по сравнению с работами в этой области М. Депре. Последующие главы рисуют картину возникновения первых русских электростанций (глава 2), развития городских кабельных сетей, появления воздушных сетей, внедрения одних из первых электродвигателей (глава 3) и, наконец, освещают технический сдвиг в результате перехода к си-

стеме трехфазного тока при постройке электростанции Охтенского порохового завода в Петербурге (глава 4).

Автор сообщает о ряде полузабытых, но интересных фактов; например о том, что первые электростанции строились на воде (на железных баржах), а построены на суше часто снабжались водой из артезианских колодезь, что из-за недостаточности водоснабжения паровые машины работали без конденсации (навахлоп), т. е. с низкими коэффициентами использования и полезными действиями, что первичными двигателями вначале служили паровые котлы, что клубы горячего (мятого) пара, выходящие из станций, работавших без конденсации, вызвали жалобы соседей, что первые электростанции работали на питательной воде, что первый анализ питательной воды был произведен в 1890 г. Старо-Никольской станцией В. К. Феррейна в Москве и т. д. Автор неоднократно отмечает попытки борьбы передовых русских инженеров с засильем иностранных капиталов в электротехнике России XIX в. Значительный интерес представляют отмечаемые автором факты, характеризующие достижения русских заводов, именно, что на первых Московской и Петербургских станциях «Общества электрического освещения 1886 г.» были установлены паровые машины и котлы русских заводов, что в 1894 г. на Московской (Григорьевской) станции появились котлы конструкции русского инженера-изобретателя В. Г. Шухова и пр. Автор специально отмечает приоритет русских электротехников в области «дробления электрического света» (П. Н. Яблочков), «изобретения трансформаторов» (П. Н. Яблочков), «изобретения трансформаторов» (П. Н. Яблочков).

¹ См. статью автора книги на эту тему — «Электричество», № 1, 1951, стр. 65.

И. Ф. Усагин), теоретической разработки вопроса передачи электрической энергии (Ф. А. Пирокский, Лачинов), использования железнодорожных рельсов в качестве электрических проводов (Ф. А. Пирокский), промышленного применения трехфазного тока (М. О. Доливо-Добровольский) и пр.

Автор не ограничивается чисто описательной стороной: главы книги сопровождаются вступительными и заключительными замечаниями, характеризующими технико-экономические предпосылки развития применений электрической энергии, достигнутые результаты и их принципиальное практическое значение (особенно удачно это выполнено в отношении к Охтенской электростанции). Изложение сопровождается рядом иллюстраций, интересно подобранных, но не всегда удовлетворительных по выполнению (они являются большинством фоторепродукций). К основному тексту приложены «Хронологический указатель», «Именной» (с краткими биографическими сведениями) и библиографический указатель.

При составлении рассматриваемой книги автору предлежало разрешить методологический вопрос: как охарактеризовать в небольшом объеме историю многочисленных электростанций XIX в. Он разрешает этот вопрос в ограничении изложения преимущественно центральными электростанциями, т. е. станциями, обслуживавшими потребителей в разных местах города из одного центра, выделяя при этом наиболее значительные станции, имеющие большее значение в истории электроснабжения (в том числе московские и петербургские). Таким образом автор получил возможность создать у читателей отрывочное представление о первых русских электростанциях, о технических параметрах и силовом хозяйстве. Однако недостатком такого методологического приема является то, что читатели не получают представления об объеме развития электростроительства в России и об объеме русских электростанций в целом. Очевидно, было бы необходимо пополнить изложение статистическими данными о центральных электростанциях, число которых к концу XIX в. выражалось десятками, и, помимо того, отметить необычайный рост мелких электростанций (несколько из них насчитывалось еще в 90-х гг. прошлого столетия). С другой стороны, надо было охарактеризовать роль разных ведомств в электростроительстве, в частности железнодорожного ведомства (путей сообщения). Необходимо было также описать ряд таких электростанций, которые гораздо большее значение с точки зрения развития в России электростроительства, а также с точки зрения приоритета, чем, например, описанная на стр. 65 Казанская станция, которой сам автор счел целесообразным уделить только 7 строк. Используемые автором некоторые архивные материалы не внесли в понимание особенно существенных сведений исторического характера. В то же время вызывает сожаление недостаточное внимание автора к одному из основных источников сведений о прошлом русской электротехники, а именно к материалам журнала «Электричество». В результате мы находим довольно значительные пробелы в изложении ряда вопросов. На них мы вкратце остановимся.

Напрасно предана забвению положительная в этой области деятельность железнодорожного ведомства, которое в 1882 г. построило установку постоянного тока на линии Казань-Арбат Закаспийской железной дороги, в 1883 г. — установку однофазного тока в Москве и в январе 1901 г. довело число установок до 160 (включаясь в постройку или в процессе переустройства, причем мощность генераторов трехфазного тока составляла около половины общей установленной мощности электричества, 1905, приложение).

Совершенно неправильно автор пишет, что к моменту бурдования Охтенской станции «установки трехфазного тока еще не получили применения и были известны лишь по первой знаменательной демонстрации в Франкфуртской выставке» (стр. 106). В действительности еще в 1890 г. трехфазный ток был применен при движении крупного элеватора станции Новороссийск Кавказской железной дороги, что дало возможность в том же году железнодорожному ведомству сделать следующее замечание: «Таким образом, год рождения трехфазного тока в его практическом применении относимый

в Германии к электротехнической выставке во Франкфурте на Майне, т. е. к 1891 г., является запоздавшим для России, где трехфазный ток получил практическое применение годом раньше» (Электричество, 1905, приложение). Как отмечал М. А. Шателен еще в 1895 г., «распределение производится здесь с одной центральной станции», а число обслуживаемых двигателей, размещенных в разных зданиях, «очень велико и размеры очень разнообразны (есть в 5, 10, 9, 20 и т. д. сил)»; (Электричество, № 19—20, 1895). Кроме того, до постройки станции трехфазного тока на Охтенском заводе существовали уже смешанные станции постоянного и трехфазного тока на Коломенском машиностроительном заводе, на Московском элеваторе Московско-Казанской железной дороги и др. (Электричество, № 3, 1895).

В 1895 г. на пражекрасильной фабрике Франца Рабенка близ Москвы была сооружена электростанция постоянного и трехфазного тока, являвшаяся, по замечанию редакции журнала «Электричество», повидимому, «первой установкой электрического распределения силы на красивой фабрике не только в России, но и за границей» (Электричество, № 3, 1895).

Можно полагать, что автору осталось неизвестным не только устройство упомянутой выше электростанции в Новороссийске, но и сооружение в 1896 г. гидроэлектростанции трехфазного тока на Ленских золотых приисках, которая превосходила Охтенскую станцию (и другие упоминаемые автором) в том отношении, что «именно здесь впервые в России было применено устройство далеких линий высокого напряжения: уже в 1897 г. функционировала линия в 10 000 в на расстоянии 20 верст» с использованием повысительных трансформаторов (повидимому, впервые в России), причем в 1898 г. здесь же была построена вторая станция трехфазного тока, а в 1911 г. функционировали уже 5 электростанций (Электричество, № 1, 1912).

Ошибочным является заявление, будто электрическая энергия «начала применяться для осуществления химических процессов» только после сооружения станции «Электростанция» близ Богородска (стр. 121); в действительности еще в XIX в. электричество успешно применялось для целей гальванопластики (с середины столетия), электролиза, очистки спирта, уксусной кислоты и пр. (Электричество, № 19 и 20, 1892; № 5 и 6, 1893; № 19, 1894; № 7, 1895 и т. д.).

Упомянув об установке в Петербурге в 1892 г. паровой турбины Парсонса (стр. 62), автор не сообщает об интересном факте использования на электростанциях высокоскоростных турбин Лавалья (Электричество, № 23—24, 1896).

Автор не останавливается на том, что в 90-х гг. отдельные электростанции имелись не только на фабриках, заводах, железнодорожных станциях, но даже в магазинах, аптеках, банях и в некоторых частных домах, в то время как это обстоятельство было в свое время отчетливо обрисовано (например, по отношению к Москве в № 4 журнала «Электричество» за 1896 г.).

Из других мест книги, требующих пополнения или уточнения, отметим следующие.

Неоднократно упоминаемый в книге 1880 г. недостаточно обрисован с точки зрения истории развития русской электротехники. Необходимо было указать, что этот год ознаменовался началом работы VI (Электротехнического) отдела Русского технического общества, организацией старейшего русского электротехнического журнала «Электричество» и первой в мире электротехнической выставки в Петербурге. Кроме того, мы полагаем, что в начале книги следовало бы упомянуть работы русских исследователей первой половины XIX в., пролагавшие путь к установлению закона сохранения и превращения энергии и к конструированию электродвигателей в их современной форме (закон Ленца, двигатель Якоби — первый электродвигатель с вращательным движением, работы комиссии адмирала И. Ф. Крузенштерна и др.).

Автор характеризует М. О. Доливо-Добровольского только как изобретателя трехфазного трансформатора и трехфазного двигателя (стр. 107 и 125). Не говоря уже о некоторой неточности (здесь должны быть добавлены слова «практически применимых» и слово «асинхронного»), следует указать, что автор умалчивает о других крупнейших достижениях М. О. Доливо-Добровольского (генератор

трехфазного тока, автотрансформатор, трехпроводная система постоянного тока). Кроме того, отметим, что вопреки утверждению автора на стр. 114 книги, именно М. О. Доливо-Добровольский еще в 1891—1892 гг., а не Р. Э. Классон (в 1896 г.), подметил и описал свойство синхронных машин генерировать реактивный ток и «впервые в мире ввел в производственную практику пользование компенсирующим свойством синхронных машин».

В «Указателе имен» (стр. 125—127) автор, упоминая, что Д. А. Лачинов был «автором ряда конструкций электрических машин», не отмечает многочисленных оригинальных конструкций электромашин, гальванических элементов («электрохимических генераторов») и аккумуляторов П. Н. Яблочкова. Характеристика А. Г. Столетова как «инициатора введения однообразных международных единиц для электрических и магнитных измерений» является не вполне точной, — в действительности он был инициатором главным образом сохранения обеих систем единиц: электромагнитной и электростатической.

Говоря о правильных предсказаниях В. Н. Чиколева относительно грядущих форм использования электрической энергии (стр. 10), автор должен был бы упомянуть о замечательной книге этого выдающегося пионера русской электротехнической пропаганды — «Не было, но и не выдумка».

Автор, используя для оживления текста карикатуры 1890-х гг. (стр. 119), не привлек для той же цели весьма интересные высказывания современников, отражающие их восхищение перед успехами в применении электричества, опережавшими «самую богатую фантазию» (см. например, *Электричество*, № 24, 1895; № 21—22, 1896).

Из прочих мелких недочетов следует отметить использование термина «безваттный ток», давно уже замененного термином «реактивный ток», ошибочную дату на стр. 44 и 45 (1877 г. вместо 1887 г.) и неверно написан-

ные инициалы выдающегося русского инженера В. градского (И. В. вместо И. А.) на стр. 102.

Библиографический указатель явно недостаточен. В списке отсутствует ряд изданий: М. О. Доливо-Добровольский «Избранные труды» (1948 г.), В. Н. Чиколев «Не было, но и не выдумка» (1895) и др. Из документов помещенных в «Трудах» I Всероссийского электротехнического съезда, упомянут только доклад Ч. К. Скржинского, но не отмечены доклады М. О. Доливо-Добровольского, Р. Э. Классона, М. А. Шателена и др. Из статей помещенных в журнале «Электричество», не упомянуты статьи В. Н. Чиколева «О распределении тока от источника электровозбудителя на неопределенное число независимых потребителей произвольной силы каждая» (№ 15, 1937), Е. П. Тверитинова «Электрическая иллюминация» (№ 6—7, 1884), Б. И. Угрюмов «50 лет трехфазного тока» (№ 1, 1940), Б. Г. Кузнецов «Два века русской электротехнической мысли» (№ 1, 1937) и многие другие.

Сделанные замечания имели целью облегчить работу над возможным вторым изданием этой книги, которая в своем настоящем виде представляет, по существу, только очерки из истории первых русских электростанций. Впрочем, очерки эти очень удачно охватывают основные, узловые этапы темы и дают отчетливое представление о некоторых первых электростанциях, о формах развития русского электростроительства; очерки нужно претворить в систематическое обозрение истории первых русских электростанций. Книгу М. О. Классона можно рекомендовать вниманию читателей журнала «Электричество» и всех лиц, интересующихся историей электротехники в России.

Инж. Н. А. ШОСТАКОВ

Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(издания 1951 г.)

АДИРОВИЧ Э. И. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. 52 стр., ц. 60 коп. Татгосиздат (на татарском языке).

АЛЕКСЕЕВ С., БАУМШТЕЙН И. и др. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК. Под ред. М. В. Хомякова. 495 стр., ц. 21 руб. 10 коп. Эстгосиздат (на эстонском языке).

БАШАРИН А. В., МИЛЛЕР Е. В. РУКОВОДСТВО И ЛАБОРАТОРИИ ПО КУРСУ «ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА». Под ред. С. А. Ринкевича. 112 стр., цена не указана. Госэнергоиздат.

БОРИСОВ В. Т. ЮНЫЙ РАДИОЛЮБИТЕЛЬ (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Вып. 100), 352 стр., ц. 12 руб. Госэнергоиздат.

ГОСТ 533-51. ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРОТУРБИННЫЕ ДВУХПОЛЮСНЫЕ (турбогенераторы). Технические условия. Взамен ГОСТ 533-41. Срок введения 1/X 1951 г., 8 стр., ц. 70 коп., Гостехника.

ЗАЙЦЕВ В. Ф. ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ РАДИОПРИЕМНИК КВН-49. 79 стр., ц. 2 руб. 35 коп. Связьиздат.

КАРАУЛОВ Н. А., РОССИЕВСКИЙ Г. И. КАК УСТРОЕНА СЕЛЬСКАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ (Всесоюзное общество по распро-

странению политических и научных знаний. Колхозная библиотека. 40 стр., ц. 50 коп. Изд-во «Правда».

КОГАН С. С. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ. 12 стр., ц. 10 руб. Связьиздат, 1950 г.

Электрические фильтры находят все большее применение для целей многоканальной связи, так и в автоматике, релейной и в других устройствах, использующих электронную технику. Для правильного проектирования их имеет большое значение. В приводится метод расчета фильтров, основанный на нахождении малых параметров схем фильтра по заданным частотным характеристикам рабочего затухания и характеристического сопротивления. Книга рассчитана на инженеров и аспирантов, но может быть использована также инженерно-техническими работниками эксплоатации.

КРАТКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИИ. Под ред. А. Я. Барта. 135 стр., ц. 5 руб. 50 коп. Изд-во «Советское радио».

КУБЕЦКИЙ Л. А. ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИЕМНИКИ (Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний). 32 стр., ц. 60 коп. Изд-во «Правда».

Формула: $S = 0,12 J_z \sqrt{\rho t}$,

J_z

где: S — поверхность заземлителя, соприкасающаяся с грунтом, см^2 ;

J_z — расчетный ток замыкания на землю, а ;

ρ — удельное сопротивление грунта в наиболее сухой период лета, ом см ;

t — длительность замыкания на землю, сек .

15000

10000

9000

8000

7000

6000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000

2000

1500

1000

5000

4000

3000