

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Бологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

3

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

3
1950
МАРТ

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

СОДЕРЖАНИЕ

Ю. В. Буткевич—Гашение открытой дуги переменного тока в установках высокого напряжения	3
А. В. Нетушил—Электрические поля в анизотропных средах	9
Ю. С. Чечет—Влияние третьей пространственной гармоники магнитного потока на пусковые свойства трехфазного асинхронного двигателя, работающего от сети однофазного тока	19
И. В. Шехтман—Расчет рассеяния лобовых частей обмоток	24
Б. И. Архангельский—Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин	30
О. Б. Певзнер—Асинхронные моменты высших гармоник асинхронного электродвигателя	33
В. М. Матюхин—Основная классификация электрических машин	38
В. П. Бычков—Переходные режимы двигателя независимого возбуждения при переменных потоке и напряжении	44
А. С. Зингерман—Определение пробивного напряжения по испытаниям образцов	47
Д. И. Марьяновский—Исследование устойчивости системы регулирования при введении внутренних связей	51
В. Е. Боголюбов—Переходные процессы в дросселях насыщения, вызванные изменением напряжения	56
М. П. Покрасс—Решение операционным методом телеграфных уравнений при ненулевых начальных и граничных условиях	60

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

А. М. Вайнберг—Электромашинные автоматические регуляторы дуговых сталеплавильных электропечей	65
Я. С. Щедровицкий—Электронагрев при получении кремнистых ферросплавов	70

ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ

ДИСКУССИИ

К статье В. А. Привезенцева „Основные вопросы изоляции обмоточных проводов“	84
К статье В. Е. Боголюбова „Квазирелаксационные колебания в феррорезонансных цепях с подмагничиванием“	89
Правила устройства электротехнических установок	91

ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА

ХРОНИКА

Совещание по защите подземных трубопроводов и кабелей от электрической коррозии	94
Профессор М. Ф. Поярков	95

БИБЛИОГРАФИЯ

С. П. Иноземцев—Книга В. Д. Голоперова „Ремонт электрического оборудования“	95
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96

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. Глазунов**,
член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик **В. Ф. Миткевич**,
канд. 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

Бологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

Гашение открытой дуги переменного тока в установках высокого напряжения

Доктор техн. наук, проф. Ю. В. БУТКЕВИЧ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Введение. Открытые дуги на линиях передачи возникают вследствие различных причин, как-то: пробоя воздушного изоляционного промежутка при перенапряжениях, появления набросов на проводах, повреждения изоляторов и т. д. Мы не будем в данной статье заниматься анализом причин, вызывающих появления открытой дуги промышленной частоты в электрических установках высокого напряжения. Отметим лишь, что с точки зрения анализа условий угасания дуги промышленной частоты особое значение имеют такие причины их возникновения, которые не связаны с разрушением или пробоем изоляторов и нарушением изоляционных промежутков (недопустимое сближение проводов между собой, прикосновение их к земле и т. п.).

Как известно, в большинстве случаев образование дуг промышленной частоты в эксплуатации не связано с органическим нарушением изоляции, а является следствием пробоя воздушных промежутков при перенапряжениях. Быстрое гашение возникающей дуги приводит, как правило, к полному восстановлению временно потерянной электрической прочности воздушного промежутка и нормальная работа установки после этого может быть продолжена. Возможны при этом следующие пути гашения дуги в действующей системе:

1. Самопроизвольное гашение, т. е. угасание дуги без снятия с нее напряжения за счет увеличения ее длины и нарушения условий стабильного горения.

Такой процесс угасания возможен, когда условия растяжения дуги благоприятны, начальная длина дуги достаточно велика и когда ток в дуге не слишком велик.

2. Трехфазное отключение поврежденного участка с последующим обратным включением, спустя отрезок времени, необходимый для деионизации промежутка (0,05—0,3 сек.). В данном случае напряжение с промежутка снимается полностью и всякий подвод энергии к дуговому промежутку прекращается.

Рассматриваются процессы гашения открытой дуги в установках высокого напряжения как при «самоугасании», т. е. без снятия напряжения с промежутка, так и при снятии напряжения (АПВ). Рассматриваются также условия угасания дуги в установках при однофазном замыкании на землю с однофазным отключением поврежденного участка. Даны формулы, позволяющие оценить время деионизации и угасания открытой дуги.

3. Однофазное отключение поврежденного участка при дуговом замыкании одной из фаз на землю. В данном случае дуговой промежуток может получать подпитку через емкостные связи,

имеющиеся между отключенным фазовым проводом и двумя другими, находящимися под напряжением. Величина токов подпитки зависит от длины линии и рабочего напряжения системы.

Рассмотрим эти условия угасания дуги в отдельности и попытаемся подвести некоторый обобщающий теоретический базис под эти явления.

Открытая дуга сравнительно слабо изучена и материалов, позволяющих делать более или менее широкие обобщения, нет.

Интересная статья В. В. Бургсдорфа [Л. 1] существенно восполняет пробел в отношении экспериментальных данных по условиям самоугасания открытой дуги, возникающей на деревянных опорах 35 и 110 кВ между проводом и землей и между фазовыми проводами. Эта работа не ставила перед собой задачи более широкого обобщения явлений, хотя в ней дается правильная трактовка отдельных сторон механизма развития и угасания открытой дуги высокого напряжения.

Самоугасание открытой дуги переменного тока. Предположим, что между двумя проводами вследствие пробоя воздушного промежутка возникла дуга (рис. 1). Под влиянием восходящих тепловых потоков и электродинамических сил ствол дуги растягивается. При определенной длине дуги, которую в дальнейшем назовем «критической», градиент напряжения оказывается недостаточным, чтобы поддерживать ионизацию, и начинается процесс угасания. В последующие полупериоды ток, текущий через ионизированный столб, уменьшается со все возрастаю-

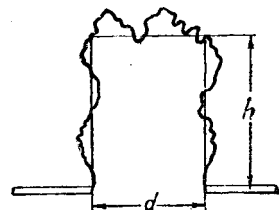


Рис. 1.

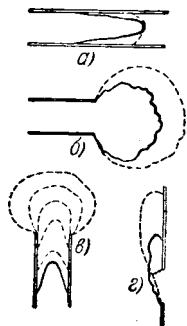


Рис. 2.

щей скоростью. Это объясняется тем, что с уменьшением тока для поддержания дуги требуется возрастающий градиент, а в нашем случае градиент напряжения на дуге, после чего как длина дуги достигает критической длины, градиент не только не возрастает но начинает даже падать.

Условия растяжения дуги в значительной степени зависят от расположения и конфигурации проводов — электродов,

между которыми возникает дуга. На рис. 2 показаны различные случаи расположения электродов. На рис. 2,а дуга показана горящей на параллельных горизонтальных проводах, где она под влиянием электродинамических сил способна вытягиваться вправо, но вытягивание дуги приводит к зажиганию ее по более короткому пути и общие условия растяжения получаются неблагоприятными. Иначе обстоит дело, когда дуга возникает на концах проводов (рис. 2,б). Здесь ствол дуги вытягивается при неподвижных опорных точках дуги и может достигнуть существенно большей длины.

Однако, при небольших токах, когда роль электродинамических сил становится незначительной, поведение дуги в случаях а, б (рис. 2) остается практически одинаковым, так как и в том и в другом случае растяжение дуги будет идти за счет тепловых восходящих потоков, которые будут увлекать дугу вверх (а не в бок), горит ли она на параллельных проводах или на концах проводов.

Если параллельные провода расположены вертикально (рис. 2,в), то в данном случае гашение дуги наблюдается только тогда, когда она достигает концов проводов, иначе говоря, когда становится возможным ее растяжение. Это относится и к большим и малым токам.

На вертикальных электродах (рис. 2,г), лежащих на одной линии, условия растягивания дуги существенно хуже, чем при горизонтальных электродах (рис. 1). Это совершенно очевидно, так как растяжение дуги при вертикальных электродах связано со скольжением верхней опорной точки вдоль провода и приводит в конце концов к перекрытию между стволом дуги и концом верхнего провода, как показано на рисунке стрелкой.

Экспериментальные наблюдения показывают, что если при вертикальном расположении электродов полная длина дуги способна достигать около пятикратной величины от расстояния между электродами, то при горизонтальном расположении это соотношение составляет 20. Иначе говоря, при горизонтально расположенных электродах длина дуги способна достигать в 4 раза большей величины, чем при вертикальном их расположении.

Можно получить очень простые соотношения, характеризующие условия самоугасания дуги переменного тока в цепи, содержащей как чисто активное, так и реактивное сопротивление после-

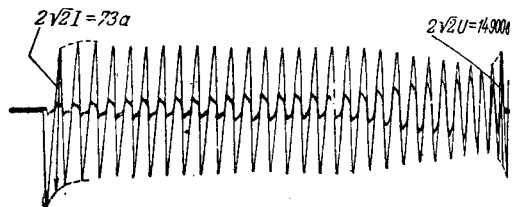


Рис. 3.

довательно с дугой, если распространить на дугу переменного тока критерий устойчивости горения дуги постоянного тока.

Для того чтобы это можно было бы сделать необходимо ввести следующие допущения.

1. Между градиентом напряжения горения дуги E_m при амплитудном значении тока и сам амплитудным значением тока I_m существует связь, известная для дуги постоянного тока:

$$E_m = CI_m^n,$$

где C и n — постоянные.

2. За один период горения открытой дуги переменного тока вследствие большой тепловой инерции газового столба [Л. 2] сопротивление дуги меняется незначительно. Отсюда следует, что при синусоидальном изменении тока в дуге напряжение на дуге также меняется синусоидально. Это допущение тем лучше оправдывается, чем больше длина дуги приближается к «критической». На рис. 3 показана типичная осциллограмма напряжения на дуге и тока в цепи в процессе угасания дуги.

Из этих основных допущений вытекает следующее основное положение для открытой дуги переменного тока: критическое состояние дуги переменного тока (состояние нарушения равновесия) наступает тогда, когда напряжение сети оказывается не способным покрыть падение в сети и падение напряжения на дуге в момент максимума тока.

Для амплитудного напряжения на дуге ищем, следовательно, для чисто активной и реактивной цепи следующие равенства:

$$U_{Bm} = U_m - I_m R,$$

$$U_{Bm}^2 = U_m^2 - (I_m x)^2,$$

где I_m — амплитудное значение тока;

U_m — амплитуда действующего в цепи напряжения;

U_{Bm} — амплитуда падения напряжения на дуге.

Пользуясь соотношением (1), можно написать

$$U_{Bm} = E_m l = CI_m^n l.$$

Если подставить (4) в (2) и (3), можно получить значение от l для активной и реактивной цепи:

$$\left. \begin{aligned} l_R &= \frac{I_m^n U_m}{C} \left(1 - \frac{I_m}{I_a} \right), \\ l_x &= \frac{I_m^n U_m}{C} \sqrt{1 - \frac{I_m^2}{I_a^2}}, \end{aligned} \right\}$$

где I_a — амплитуда тока металлического замыкания (сопротивление дуги равно нулю).

Нетрудно видеть, что критическое значение тока в цепи, при котором дуга становится неустойчивой, может быть определено из условий максимума функции $l = f(I_m)$, а именно из

уравнений $\frac{\partial I_R}{\partial I_m} = 0$ и соответственно $\frac{\partial l_x}{\partial I_m} = 0$.

Из этих соотношений получаем (приложение 1) выражения для критического тока и критической длины дуги:

$$\left. \begin{aligned} I_{Rkp} &= I_a \frac{n}{n+1}, \\ I_{xkp} &= I_a \sqrt{\frac{n}{n+1}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} l_{Rkp} &= \frac{I_a^n U_m}{C} \frac{n^n}{(n+1)^{n+1}}, \\ l_{xkp} &= \frac{I_a^n U_m}{C} \sqrt{\frac{n^n}{(n+1)^{n+1}}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Если положить $n=0,25$, то тогда критический ток в цепи может колебаться в пределах

$$I_{kp} = (0,2 \div 0,45) I_a [a], \quad (8)$$

где коэффициент 0,2 относится к цепи, содержащей только активное сопротивление, а 0,45 для цепи, содержащей чисто реактивное сопротивление. Эти соотношения между критическим током в дуге и током металлического замыкания оправдываются на опыте.

Соответственно для критической длины дуги получаем выражение в границах для $C=100$:

$$l_{kp} = (0,54 \div 0,73) I_a^{0,5} U_m 10^{-4} [м], \quad (9)$$

где коэффициент 0,54 относится к случаю чисто активного сопротивления, а 0,73 — реактивного сопротивления цепи.

Таким образом, получены довольно простые соотношения между критическими значениями тока и длины дуги и напряжением сети и током металлического короткого замыкания в цепи (I_a и U_m). Эти соотношения позволяют предопределить условия самоугасания дуги, зная параметры цепи.

Имеется возможность оценить время угасания дуги, если известна скорость ее растяжения. При небольших токах в дуге (до 200—300 а) растяжение дуги происходит, главным образом, за счет тепловых восходящих потоков. Скорость подъема дуги связана со скоростью конвекционных потоков. По исследованиям Сюитс (Suits) [Л. 3] скорость подъема нагретых частиц газа на дуге составляет около 1,2—1,5 м/сек.

На краях дугового столба эта скорость несколько ниже. Можно предположить, что скорость подъема дуги составляет в среднем 1 м/сек, что подтверждается опытами [Л. 3]. Руководствуясь рис. 1, можно написать, что кажущаяся длина дуги [Л. 4]

$$L = 2h + a.$$

Действительная длина дуги, по крайней мере как показывают эксперименты, в два раза больше кажущейся дуги. Имея в виду, что высота подъема определяется скоростью подъема дуги v и временем горения дуги t , получаем:

$$l = 2L = 2(2h + d) = 2(2vt + d).$$

Отсюда

$$t = \frac{l - 2d}{4v}$$

или, полагая $v = 1$ м/сек и $l = l_{kp}$, можно получить выражение для времени гашения дуги:

$$t_m = \frac{l_{kp} - 2d}{4}.$$

Условия деионизации дугового канала при трехфазном отключении поврежденного участка. Этот вопрос возникает в связи с автоматическим повторным включением линии. Удачное повторное включение будет иметь место только в том случае, если обратное включение произойдет спустя такой промежуток времени, по истечении которого остаточный канал дуги успевает деионизироваться настолько, чтобы быть способным выдерживать приложенное рабочее напряжение. Чрезмерное увеличение длительности паузы, однако, нежелательно, как известно, по условиям устойчивости работы системы и сохранения бесперебойной работы потребителя.

Сделаем попытку предопределить пробивное напряжение или градиент пробивного напряжения в зависимости от длительности паузы и тока, протекавшего через дуговой канал до его отключения.

Допустим, что температура газа в остаточном дуговом канале спадает ниже 4000°K , прежде, чем наступает повторное включение, иначе говоря, она достигает такой границы, при которой термическая ионизация практически отсутствует. Можно полагать, что прочность промежутка находится в обратном отношении к температуре газа.

Для электродов острие — острие прочность промежутка для нормальной температуры воздуха по данным А. В. Панова (ВЭИ) составляет (эффективное значение)

$$U_{np} = 5 + 3,75l [кв],$$

где l — длина промежутка в сантиметрах или в нашем случае длина канала дуги¹.

Тогда, следовательно,

$$U_{npT} = U_{np} \frac{300}{T} \approx \frac{1000l}{T} [кв]. \quad (10)$$

Отключенный дуговой промежуток представлен сам себе — энергия к нему не подводится. Отдающаяся в окружающее пространство энергия потребляется за счет запаса тепла, имеющегося в дуговом столбе.

¹ Эквивалентность того и другого можно принять как некоторое допущение.

Тепловое состояние без подвода энергии характеризуется уравнением

$$\zeta dT + P dt = 0. \quad (11)$$

В этом уравнении

q — теплоемкость 1 см длины остаточного столба;

P — мощность, рассеиваемая 1 см остаточного канала;

t — время, прошедшее с момента отключения.

Вычисление q и P дано в приложении 2.

После подстановки значений q и P в уравнение (11) получаем для скорости изменения температуры остаточного столба следующее простое выражение:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{P}{q} = -k \frac{v}{r} T, \quad (12)$$

где r — радиус канала;

v — скорость относительного смещения окружающей среды и дугового канала;

k — постоянная, характеризующая условия проникновения окружающего газа в зону остаточного канала.

После интегрирования получаем [выражение для T в функции времени в виде:

$$T = T_1 e^{-\frac{kv}{r} t}, \quad (13)$$

где T_1 — начальная температура, т. е. температура газа дуги в момент отключения.

Подставляя в (13) значение T из уравнения (10), получаем:

$$U_{npT} = 1000 \frac{l}{T_1} e^{\frac{kv}{r} t}. \quad (14)$$

Можно радиус дугового канала выразить через величину тока в дуге. Эта связь может быть охарактеризована равенством:

$$r = 0,03 \sqrt{I}.$$

Допустим, что радиус столба r и скорость относительного смещения воздуха и дугового столба v остаются во время паузы отключения постоянными. Допускаем также, что начальная температура независимо от величины отключаемого тока остается постоянной и равной 6000°K .

Тогда, опираясь на опытные данные, вычисляем постоянные, входящие в уравнение (14), и получаем окончательно:

$$U_{npT} = 0,16 l e^{\frac{100}{\sqrt{I}} t} [\text{кВ}], \quad (15)$$

где l — длина канала в см;

t — время паузы в сек.;

I — ток в дуге до отключения в а (эффективное значение).

На рис. 4 представлена зависимость $\frac{U_{npT}}{l}$ величины пробивного градиента (кВ/м) от t для различных отключаемых токов.

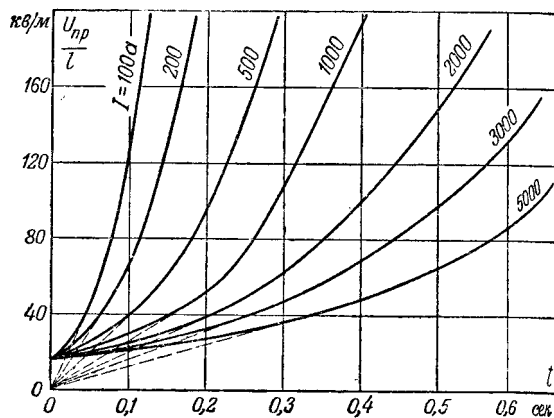


Рис. 4.

Уравнение (15), очевидно, дает несколько ошибочные результаты в начале процесса восстановления прочности. Ранее было указано, что в области высоких температур (выше 4000°K) определение электрической прочности воздуха как величины, обратно пропорциональной температуре, недопустимо ввиду наличия высокой степени ионизации газа. Ближе к истине было бы полагать, что прочность газа при $t=0$ равна напряжению горения дуги, т. е. близка к нулю, а не 16 кВ/м, как это вытекает из уравнения (15). На рис. 4 показаны пунктиром поправки к кривым $U_{np} = f(t)$ в начале процесса.

Кривые рис. 4 правильно отражают физическую сущность процесса. Действительно, прочность остаточного столба с величиной отключаемого тока падает. Если зачастую общее пробное напряжение на весь промежуток с возрастанием тока в дуге снижается слабо, то только потому, что с возрастанием тока в дуге существенно увеличивается эффект электродинамических сил, которые растягивают дугу, пока она еще не успела отключиться защитой. Вследствие этого снижается средний градиент приложенного напряжения при повторном включении. Если дуга может только ограниченно развиваться по своей длине, например при быстродействующем отключении или особой конфигурации токоведущих частей, то время деионизации с возрастанием тока должно увеличиваться при том же напряжении. Очевидно, время деионизации будет возрастать с увеличением рабочего напряжения при одной и той же величине отключаемого тока текущего через дугу.

Необходимо иметь в виду, что кривые рис. 4 $\frac{U_{np}}{l} = f(t)$ только приблизительно отражают абсолютные значения величин пробивных градиентов, так как учесть всю совокупность явлений, имеющих место в открытой нестабилизированной дуге невозможно.

Условия угасания дуги замыкания на землю при однофазном отключении поврежденного участка. Однофазные замыкания на землю являются наиболее частым видом перекрытий с дугами в действующих сетях. Поэтому возник вопрос относительно применения в системах так называемого однофазного автоматического повторного

исключения. Таким образом, выключатель должен иметь для осуществления однофазного АПВ пофазное управление. При однофазном отключении две другие фазы остаются включенными и продолжают осуществлять связь. Наличие связи на двух фазах способствует поддержанию снабжения потребителя и сохранению устойчивости системы. Поэтому, как показывает опыт, однофазные отключения допускают более длительные паузы между отключением и последующим обратным включением поврежденной фазы без нарушения устойчивости системы и выпадения потребителя.

На рис. 5 показана принципиальная схема однофазного отключения линии передачи при замыкании через дугу. Как нетрудно видеть из рис. 5, после отключения фазы 1 дуга замыкания на землю продолжает подпитываться через емкости, образуемые отключенным проводом по отношению к двум другим фазам 2 и 3, т. е. через емкости C_{12} и C_{13} . Нейтраль системы предполагается, конечно, заземленной.

В начальный момент после отключения сопротивлением дуги пренебрегаем по сравнению с емкостными сопротивлениями, и поэтому можно полагать, что ток подпитки дуги на землю равен сумме токов, текущих через емкости C_{12} и C_{13} под воздействием фазовых напряжений. Учитывая, что при $C_{12} = C_{13}$ эти токи находятся под углом 120° по отношению друг к другу и равны по величине, будем иметь ток подпитки через дугу:

$$I_B = I_{12} = I_{13} = U_\phi \omega C_{12}.$$

Если считать, что C_{12} емкость на 1 км длины линии и U_ϕ выразить через линейное напряжение, то удельное эффективное значение тока подпитки (на 1 км и на 1 кВ) составит:

$$I'_B = \frac{\omega C_{12} \cdot 1000}{\sqrt{3}}. \quad (16)$$

Если положить частичную емкость между двумя фазовыми проводами равной $0,0035 \cdot 10^{-6} \text{ ф/км}$, то удельное эффективное значение тока составит около

$$I'_B = 0,0006 \text{ а/км} \cdot \text{кв}. \quad (17)$$

Таким образом, можно ожидать на 100 км длины ток подпитки дуги на землю через емкостные связи для различных напряжений составит: при 110 кВ $I_{B100} = 0,0006 \cdot 100 \cdot 110 = 6,6 \text{ а}$; 220 кВ $I_{B200} = 13,2 \text{ а}$; 440 кВ, $I_{B400} = 26,4 \text{ а}$.

Как показывают эти данные, ток подпитки составляет значительную величину и с ним необходимо считаться при оценке условий угасания дуги при однофазном отключении.

Фактически здесь приходится анализировать условия деионизации остаточного столба, как в случае трехфазного отключения, а условия самоугасания дуги с током равным току подпитки через емкостные связи I_B .

Для суждения об условиях самоугасания дуги остаточным током необходимо знать еще, какое

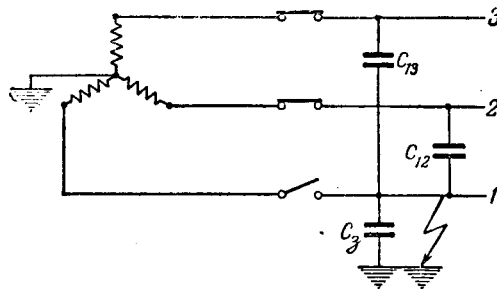


Рис. 5.

напряжение будет восстанавливаться на отключенном проводе по отношению к земле U_x .

Анализ показывает (приложение 3), что восстанавливающееся напряжение на дуге составляет очень небольшую величину — не более 20% от фазового напряжения, точнее

$$U_x = 0,19 U_\phi. \quad (18)$$

Посмотрим, какова должна быть критическая длина дуги, если она подпитывается током через емкостные связи и поддерживается восстанавливающимся напряжением, определяемым из уравнения (18). Лучше всего проследить возможную критическую длину дуги на конкретном примере.

Возьмем линию длиной 100 км при напряжении 110 кВ. Ток подпитки при условии, когда сопротивлением дуги пренебрегается, составляет согласно ранее проведенным расчетам 6,6 а. Обращаемся теперь к уравнению (9):

$$l_{кр} \approx 0,7 \cdot I_a^{0,5} U_m^{10^{-4}} [\text{м}].$$

В данном случае

$$I_a = \sqrt{2} \cdot 6,6 = 9,3 \text{ а}.$$

Амплитудное напряжение определяем из уравнения (18):

$$U_m = \sqrt{2} U_x = \sqrt{2} \cdot 0,19 U_\phi = \sqrt{2} \cdot 0,19 \frac{110 \cdot 1000}{\sqrt{3}} = 17 \cdot 1000 \text{ в}.$$

Таким образом,

$$l_{кр} = 0,7 \cdot 9,3^{0,5} \cdot 17 \cdot 1000 \cdot 10^{-4} = 2 \text{ м}.$$

Мы видим, что такой длины дуга достигает легко и в случае металлических опор, где начальная длина дуги определяется длиной гирлянды. Однако, достаточно дуге образовать изгибы и петли только местного характера (без общего растяжения дуги), как она уже становится способной самоугасать при токах подпитки, обусловленных емкостными связями.

Заключение. Приведенное исследование показывает, что отдельные стороны открытой дуги могут быть подвергнуты качественной и даже количественной оценке.

Результаты теоретического рассмотрения открытой дуги переменного тока, приведенные в настоящей работе, показывают, что многие факторы открытой дуги являются мало изученными, экспериментальные данные также весьма скудны. Следует провести такого рода исследова-

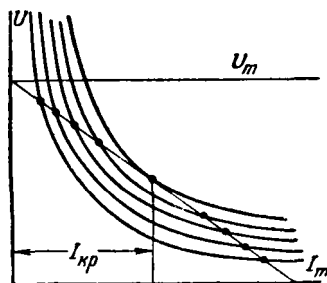


Рис. 6.

ния на более расширенной физической основе.

После этого могут быть сделаны дальнейшие шаги по исследованию открытой дуги.

Нужно, однако, с удовлетворением отметить, что полученные результаты в значительной степени находят свое подтверждение в опытных наблюдениях.

Автор считает своим долгом отметить, что проф. Л. И. Сиротинский, проявивший к этой работе интерес, дал автору ряд ценных советов.

Приложение 1. При наличии в цепи только активного сопротивления и в предположении, что сопротивление дугового канала за полупериод не меняется, можно для дуги переменного тока принять тот же критерий устойчивости, что и для дуги постоянного тока, оперируя при переменном токе только амплитудными величинами.

Как нетрудно видеть из рис. 6, критическая характеристика дуги соответствует наибольшей длине дуги. Всякая другая характеристика, которой соответствует равенство

$$U_{Bm} = U_m - I_m R, \quad (A)$$

как для $I_m > I_{кр}$, так и для $I_m < I_{кр}$, очевидно, лежит ниже и соответствует меньшей длине дуги.

Таким образом, критическое значение тока определяется из условий максимума, т. е. из равенства $\frac{\partial I_R}{\partial I_m} = 0$.

На основании уравнения (5) получаем:

$$\frac{\partial I_R}{\partial I_m} = \frac{n I_m^{n-1} U_m}{C} - \frac{(n+1) I_m^n U_m}{C I_a} = 0,$$

откуда критическое значение тока

$$I_m = I_{Rкр} = \frac{n}{n+1} I_a.$$

Подставляя это значение тока в выражение длины дуги I_R , получим $I_{Rкр}$.

Очевидно, что аналогичным образом решается задача и для цепи, содержащей чисто индуктивное сопротивление. В данном случае алгебраически складываются квадраты амплитудных напряжений:

$$U_{Bm}^2 = U_m^2 - (I_m x)^2. \quad (B)$$

Таким образом, можно построить такую же диаграмму, что и ранее, но только по оси ординат откладывать квадраты величины (рис. 7). Точка касания кривых $U_{Bm}^2 = f(I_m)$ и $U_m^2 - (I_m x)^2 = \varphi(I_m)$ определяет критическое состояние. В этой точке соблюдается равенство (Б). Для всех других токов, превосходящих или меньших $I_{xкр}$, для которых соблюдается равенство (Б), характеристика дуги должна лежать ниже, а следовательно, соответствовать меньшей длине дуги.

Таким образом, и в этом случае $\frac{\partial I_x}{\partial I_m} = 0$ может дать выражение для критического значения тока:

$$\frac{\partial I_x}{\partial I_m} = n I_m^{n-1} \sqrt{1 - \left(\frac{I_m}{I_a}\right)^2} - \frac{I_m^{n+1}}{I_a^2 \sqrt{1 - \left(\frac{I_m}{I_a}\right)^2}} = 0,$$

откуда

$$I_m = I_{xкр} = I_a \sqrt{\frac{n}{n+1}}.$$

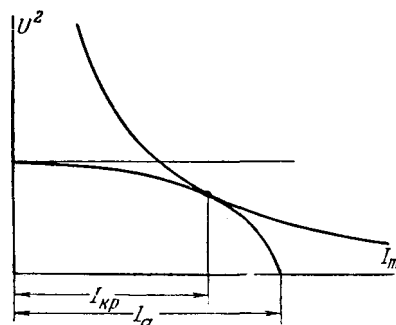


Рис. 7.

Подставляя полученное значение критического тока в выражение для I_x можно получить значение $I_{xкр}$.

Приложение 2. Тепловое содержание одного сантиметра дугового столба может характеризоваться его теплоемкостью q . Теплоемкость может быть представлена через радиус столба r и удельную теплоемкость газа при постоянном давлении c_p на 1 см³:

$$q = \pi r^2 c_p = f(T).$$

Удельная теплоемкость c_p может быть выражена через молекулярную теплоемкость C_p , которая по Холм [Л. 5] для двухатомных газов составляет:

$$C_p = \frac{7}{2} R \sqrt{\frac{T}{273}},$$

где R — газовая постоянная в дж/град. г.

Связь между теплоемкостью на 1 г/см³ и 1 моль при температуре T представляется так:

$$c_p = \frac{C_p}{22400 T} \text{ или } c_p = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{T}}.$$

Подставляя (Б) в (А), получим:

$$q = \pi r^2 \frac{2 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{T}} = 6,28 \cdot 10^{-2} \frac{r^2}{\sqrt{T}}$$

Теперь попытаемся найти величину мощности, рассеиваемой в окружающее пространство с 1 см длины столба.

Опираясь на некоторые данные по исследованию рассеивания энергии дуговым столбом, можно полагать, что основная отдача тепла в открытой дуге идет за счет конвекции. Тепловая мощность, рассеиваемая с единицы длины дугового столба, может быть представлена следующим образом:

$$P = 2\pi r v \int_{T_0}^T c_p dT \text{ [вт/см]}.$$

Здесь обозначают: r — радиус остаточного столба в см; v — скорость относительного смещения (дуги столба по отношению к окружающему газу) в см/сек; коэффициент, учитывающий глубину проникновения тока газа окружающей среды в зону дугового столба.

Расход газа, проникающего в дуговой столб, составляет $2\pi r v$ см³/сек. Он нагревается от T_0 до T . Уносимое количество в единицу времени тепло определяется умножением секундного расхода на величину

$$\int_{T_0}^T c_p dt = 2 \cdot 10^{-2} \int_{T_0}^T \frac{dT}{\sqrt{T}} = 4 \cdot 10^{-2} (\sqrt{T} - \sqrt{T_0})$$

или, подставляя (Д) в (Г), получаем:

$$P = 8 \cdot 10^{-2} \pi r v a (\sqrt{T} - \sqrt{T_0}).$$

Если пренебречь $\sqrt{T_0}$ по сравнению с \sqrt{T} , тогда

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{P}{q} = -1,2a \frac{v}{r} T.$$

Положим $1,2a = k$. Этот коэффициент может быть определен только на основании опытных данных.

Приложение 3. Напряжение, восстанавливающееся на отключенном проводе за счет емкостных связей, определяется следующим образом.

При условии, что сопротивление дуги становится равным бесконечности (дуга угасает), можно написать для дуг других фаз, остающихся включенными:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\phi 2} &= \dot{U}_{12} + \dot{U}_x, \\ \dot{U}_{\phi 3} &= \dot{U}_{13} + \dot{U}_x,\end{aligned}\quad (A)$$

где означают $\dot{U}_{\phi 2}$ и $\dot{U}_{\phi 3}$ — фазовые напряжения;

\dot{U}_{12} и \dot{U}_{13} — падение напряжения на емкостях C_{12} и C_{13} . Падения напряжения \dot{U}_{12} и \dot{U}_{13} могут быть выражены через токи, текущие через емкости C_{12} и C_{13} :

$$\dot{U}_{12} = \frac{\dot{I}_{12}}{j\omega C_{12}}; \quad \dot{U}_{13} = \frac{\dot{I}_{13}}{j\omega C_{13}}.$$

U_x — искомое восстанавливающееся напряжение на отключенном проводе, т. е. на емкости C_a :

$$U_x = \frac{\dot{I}_a}{j\omega C_a}.$$

Учитывая, что $\dot{I}_{12} + \dot{I}_{13} = \dot{I}_a$ и полагая $C_{12} = C_{13}$, получим, складывая равенства (A):

$$\dot{U}_{\phi 2} + \dot{U}_{\phi 3} = \frac{\dot{I}_a}{j\omega C_{12}} + 2\dot{U}_x = \dot{U}_x \frac{C_a}{C_{12}} + 2U_x = U_x \left(\frac{C_a}{C_{12}} + 2 \right),$$

откуда полагая, что фазовые напряжения находятся под углом 120° друг по отношению к другу:

$$U_x = \frac{\dot{U}_{\phi 2} + \dot{U}_{\phi 3}}{\frac{C_a}{C_{12}} + 2} = \dot{U}_\phi \frac{C_{12}}{C_a + 2C_{12}}.$$

Если представить U_x , как функцию отношения емкостей C_a и C_{12} , т. е. емкости провода на землю и частичных емкостей между фазами, то получим:

$$U_x = U_\phi \frac{\frac{C_{12}}{C_a}}{1 + 2 \frac{C_{12}}{C_a}}.$$

Полагая, что $\frac{C_{12}}{C_a} \approx 0,3$, получаем $U_x \approx 0,19 U_\phi$.

Литература

1. В. В. Бургсдорф. Открытые электрические дуги большой мощности. Электричество, № 10, 1948.
2. Р. И. Каряев. Теория открытой электрической дуги большой мощности. Электричество, № 10, 1949.
3. C. G. Suits, Convection Currents i Arcs in Air, Phys. Rev., т. 55, № 2, 1939.
4. В. В. Каплан и Кондор. Открытые дуги в установках высокого напряжения. Отчет ЛЭТИ за 1934.
5. Holm, Kirschstein, Koppelman, Überblick über Physik der Starkstromlichtbogens mit besonderer Berücksichtigung der Löschung in Hochleistungswechselstromschaltern. Wiss. Veröff. Siemens, т. 13, № 2, 1934.

[12. 12. 1949].



Электрические поля в анизотропных средах

Кандидат техн. наук, доц. А. В. НЕТУШИЛ

Московский энергетический институт им. Молотова

При определении электрических полей в диэлектриках и полупроводниках часто приходится встречаться с необходимостью расчета полей в анизотропном материале. Такие задачи встречаются при рассмотрении полей в слоистой изоляции, в грунте, в сегнетоэлектриках, в материалах с волокнистым строением, в ледяных образованиях (сформировавшихся в электрическом поле) и в ряде других материалов.

В зависимости от структуры материалов их можно подразделить на материалы с прямолинейной и криволинейной анизотропией. В материалах первой группы оси анизотропии прямолинейны и могут совпадать с направлением трех основных векторов координатной системы; в материалах второй группы оси анизотропии криволинейны, и тройка векторов, определяющих направления осей анизотропии, поворачивается при переходе от одной точки к другой. Большинство анизотропных материалов

Рассматриваются уравнения электрического поля в средах с прямолинейной и аксиально-цилиндрической анизотропией. Выводится условие точечного преобразования координат, при котором определение поля в анизотропной среде может быть сведено к решению соответствующей изотропной задачи. Рассматривается ряд примеров определения плоскопараллельных полей в анизотропных средах, иллюстрирующих общие теоретические положения работы. Статья содержит основные положения доклада автора на заседаниях НТО МЭИ и Всесоюзного бюро электрической изоляции в 1949 г.

лов обладает ортогональной анизотропией, т. е. оси анизотропии взаимно перпендикулярны.

В настоящей работе рассматриваются два случая ортогональной анизотропии: *прямолинейная*, при которой оси анизотропии совпадают с прямолинейной (декартовой)

системой координат, и *аксиальная* (или цилиндрическая [Л. 1]), при которой направление осей анизотропии соответствует ортам цилиндрической системы координат.

Прямолинейной анизотропией обладают листы слюды и других слоистых изоляционных материалов, различные анизотропные текстуры и кристаллические материалы, имеющие различные свойства в направлениях трех координатных осей X , Y и Z [Л. 2, 3, 14].

Примером диэлектриков с аксиальной анизотропией могут явиться изоляция кабелей, древесина, бакелитовые цилиндры и ряд других материалов, обладающих различными свойствами

в радиальном, тангенциальном и аксиальном направлениях [Л. 1, 4, 12].

При рассмотрении электрических полей предполагается отсутствие пространственных зарядов.

Метод расчета. Среды с прямолинейной анизотропией. Пусть в анизотропном диэлектрике с диэлектрической проницаемостью, выражаемой в виде тензора второго ранга

$$\bar{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{vmatrix}$$

создается электрическое поле; $\varphi(x, y, z)$ — потенциал точки с координатами x, y, z . Уравнение поля для этого диэлектрика будет иметь следующий вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \operatorname{div} \bar{\epsilon} \operatorname{grad} \varphi = 0.$$

Переходя к дифференциальному оператору ∇ , получаем:

$$\nabla \bar{\epsilon} \nabla \varphi = 0. \quad (1)$$

Таким образом, для анизотропных сред уравнение поля приобретает несколько необычный вид (1), где $\nabla \bar{\epsilon} \nabla$ — дифференциальный оператор, отличный от лапласиана:

$$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2};$$

$$\nabla \bar{\epsilon} \nabla = \epsilon_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \epsilon_z \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (2)$$

Представляет интерес нахождение такой деформации (точечного преобразования пространства), чтобы каждой точке (с координатами x, y, z) рассматриваемого пространства A с анизотропными свойствами ($\bar{\epsilon}$) соответствовала точка (с координатами x_1, y_1, z_1) деформированного пространства A_1 с изотропными свойствами (ϵ_1) и при этом

$$\varphi(x, y, z) = \varphi_1(x_1, y_1, z_1), \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon} \operatorname{grad} \varphi \cdot d\mathbf{s} = \epsilon_1 \operatorname{grad} \varphi_1 d\mathbf{s}_1, \quad (4)$$

если эти выражения определяются для соответствующих точек и элементов поверхности (каждая точка пространства A отобразится в пространстве A_1 соответствующей точкой, а каждая эквипотенциальная поверхность — соответствующей поверхностью). Такое точечное преобразование пространства мы будем называть изотропизирующей деформацией.

Легко показать, что если выполнены условия (3) и (4), то емкости между соответствующими парами поверхностей пространств A и A_1 будут одинаковы. Действительно: возьмем две поверхности s_a и s_b в пространстве A и зададим им потенциалы φ_a и φ_b . Тогда в пространстве A_1 существуют также две поверхности s_{a1} и s_{b1} , потенциалы которых в соответствии с (3) также равны φ_a и φ_b . Если теперь определить количество электричества внутри каждой из этих поверхностей

$$\oint \mathbf{D} d\mathbf{s},$$

то, как следует из условия (4), количества электричества на поверхностях s_a и s_{a1} и на s_b и s_{b1} между собой равны, а следовательно, равны емкости между двумя телами, ограниченными этими поверхностями.

Найдем связь между точками пространств A и A_1 и свойства (в данном случае ϵ_1) пространства A_1 (рис. 1).

Для пространства A уравнение поля имеет вид:

$$\epsilon_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \epsilon_z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0,$$

а для пространства A_1

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z_1^2} = 0.$$

Для выполнения условия (3) необходимо

$$x_1 = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_x}} x; \quad y_1 = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_y}} y; \quad z_1 = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_z}} z, \quad (5)$$

где C — произвольная постоянная.

Действительно, подставляя (7) в уравнение (1) получим:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z_1^2} = 0.$$

Сравнивая это уравнение с (6), легко видеть, что при преобразовании (7) условие (3) выполнено.

Для определения ϵ_1 воспользуемся условием (4), выбрав $d\mathbf{s} = k dx dy$, а $d\mathbf{s}_1 = k dx_1 dy_1$, k — орт оси Z . Тогда

$$\bar{\epsilon} \operatorname{grad} \varphi \cdot d\mathbf{s} = \epsilon_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} dx dy,$$

$$\epsilon_1 \operatorname{grad} \varphi_1 d\mathbf{s}_1 = \epsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial z_1} dx_1 dy_1 =$$

$$= \epsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \frac{V_{\epsilon_z}}{C} dx dy \frac{C^2}{V_{\epsilon_x \epsilon_y}}.$$

Полагая, что

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial z},$$

из условия (4) получаем:

$$\epsilon_1 = \frac{V_{\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z}}{C}.$$

Таким образом, для того, чтобы определить поле в среде с прямолинейной анизотропией, достаточно произвести изотропизирующую деформацию пространства путем растяжения его вдоль каждой из осей координат в отношении, обратно пропорциональном корню квадратному из значения диэлектрической проницаемости в направлении данной оси. Полученное таким образом изотропное пространство с диэлектрической проницаемостью, определяемой по формуле (8), можно рассчитать обычным путем после чего, произведя деформацию, обратную первоначальной, легко найти потенциал любой точки анизотропного материала.

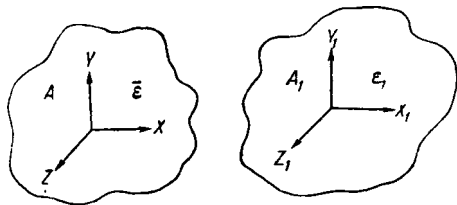


Рис. 1.

В том случае, когда поле плоскопараллельно решению задачи производится в плоскости X , растяжение вдоль оси Z должно отсутствовать и следовательно,

$$C = \sqrt{\epsilon_z}$$

$$\epsilon_1 = \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}. \quad (9)$$

Так как решение этой задачи не зависит от значения ϵ_z , то последнее может быть любым и следовательно, деформация вдоль осей X и Y может производиться в любом масштабе при условии неизменности отношения коэффициентов растяжения вдоль осей X и Y

$$x_1 = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_x}} x; \quad y_1 = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_y}} y. \quad (10)$$

Таким образом, для определения плоскопараллельного поля в среде с прямолинейной анизотропией следует, деформировав в соответствующем отношении плоскость, определить поле в изотропной среде с диэлектрической проницаемостью, равной среднему геометрическому значению составляющих проницаемости анизотропной среды в направлениях осей анизотропии.

Среды с аксиальной анизотропией. При рассмотрении полей в материалах с аксиальной анизотропией изотропизирующая деформация пространства может быть найдена подобно тому, как это имело место при рассмотрении сред с прямолинейной анизотропией.

Условие непрерывности линии индукции так же, как и в рассмотренном ранее случае, определяется уравнением (1). Однако, для диэлектриков с аксиальной изотропией при совпадении с цилиндрическими осями координат дифференциальный оператор

$$\nabla^2 \nabla = \epsilon_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\epsilon_x}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \epsilon_z \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (11)$$

диэлектрическая проницаемость $\bar{\epsilon}$ представляет собой тензор с диагональной матрицей, описанной в цилиндрических координатах:

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_r & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix}. \quad (12)$$

По аналогии с решением задачи в среде с прямолинейной анизотропией произведем такое пре-

образование координат, чтобы потенциал φ_1 в новой системе координат (r_1, α_1, z_1) удовлетворял условиям

$$\nabla^2 \varphi_1 = \frac{1}{r_1} \frac{1}{\partial r_1} \left(r_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial r_1} \right) + \frac{1}{r_1^2} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \alpha_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z_1^2} = 0 \quad (13)$$

и

$$\bar{\epsilon} \text{grad } \varphi \cdot ds = \epsilon_1 \text{grad } \varphi_1 ds_1 \quad (14)$$

при

$$\varphi_1(r_1, \alpha_1, z_1) = \varphi(r, \alpha, z). \quad (15)$$

Ограничимся рассмотрением только плоскопараллельных полей, для которых

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (16)$$

и допустим, что изотропизирующая деформация может быть выражена следующим образом:

$$r_1 = k_r(r) r \text{ и } \alpha_1 = \alpha. \quad (17)$$

Тогда уравнения

$$r_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \left(\frac{\partial r}{\partial r_1} + r_1 \frac{\partial^2 r}{\partial r_1^2} \right) + r_1^2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r_1^2} \left(\frac{\partial r}{\partial r_1} \right)^2 + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \alpha^2} = 0. \quad (18)$$

и

$$\frac{\epsilon_r}{\epsilon_\alpha} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} = 0 \quad (19)$$

должны быть тождественны.

Приравнявая коэффициенты при соответствующих производных, получаем:

$$r_1 \frac{\partial r}{\partial r_1} + \frac{\partial^2 r}{\partial r_1^2} r_1^2 = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_\alpha} r; \quad (20)$$

$$\left(r_1 \frac{\partial r}{\partial r_1} \right)^2 = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_\alpha} r^2. \quad (21)$$

Решая уравнение (21) относительно r_1 , получаем:

$$r_1 = Cr \sqrt{\frac{\epsilon_\alpha}{\epsilon_r}} = k_r r = Cr^\beta. \quad (22)$$

Подстановка r_1 из (22) в (20) дает тождество.

Таким образом, деформация, выражаемая уравнением (22), приводит к замене анизотропной среды изотропной. Величина диэлектрической проницаемости ϵ_1 получаемой при этом изотропной среды определяется из уравнения (14).

Если принять, что

$$\left. \begin{aligned} ds &= r d\alpha; \quad ds_1 = r_1 d\alpha = Cr^\beta d\alpha, \\ \text{grad } \varphi &= \frac{\partial \varphi}{\partial r}; \quad \text{grad } \varphi_1 = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \frac{1}{C\beta r^{\beta-1}}, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

то, решая уравнение (14), легко получить вели-

Диэлектрическая проницаемость эквивалентной изотропной среды

$$\epsilon_1 = \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y} \quad (24)$$

не зависит от радиуса и равна среднему геометрическому значению составляющих в радиальном и тангенциальном направлениях.

Наибольший интерес представляют плоскопараллельные поля, в которых наряду с анизотропными материалами (с прямолинейной или аксиальной анизотропией) содержатся изотропные вещества. При решении подобных задач может быть также успешно применена изотропизирующая деформация пространства.

Рассмотрим некоторые примеры применения такого преобразования пространства к решению практических задач.

Примеры расчета полей. Поле двух заряженных проводов. Два цилиндрических проводника с потенциалами $+\varphi_0$ и $-\varphi_0$ находятся в анизотропной среде с диэлектрической проницаемостью

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_x & 0 \\ 0 & \epsilon_y \end{pmatrix};$$

общая ось симметрии сечений двух проводов совпадает с осью X (рис. 2, А).

Для определения электрического поля произведем деформацию плоскости x, y в соответствии с условием (10). Величину C можно выбрать так, чтобы деформация производилась только вдоль одной из осей. Если $C = \sqrt{\epsilon_y}$, то $y_1 = y$ и деформация происходит только в направлении оси X (рис. 2, плоскость A_1); если $C = \sqrt{\epsilon_x}$, наоборот, $x = x_1$ и деформация происходит только в направлении оси Y (рис. 2, плоскость A'_1). В том случае, когда $\epsilon_y > \epsilon_x$ вдоль оси X происходит растяжение, а вдоль оси Y — сжатие; если же $\epsilon_x > \epsilon_y$ — наоборот.

Допустим, что деформация происходит только в направлении оси X , тогда $C = \sqrt{\epsilon_y}$ и

$$x_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}} x, \quad (25)$$

а коэффициент растяжения вдоль оси X

$$k_x = \sqrt{\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}}. \quad (26)$$

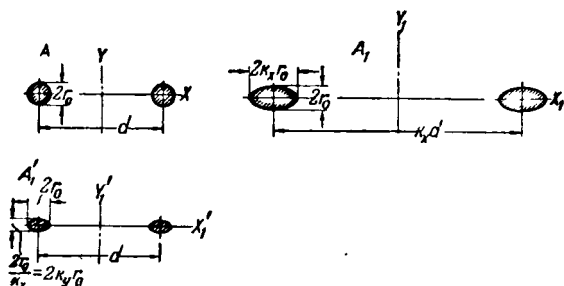


Рис. 2

После деформации расстояние между осями проводов увеличивается в k_x раз, а круглое сечение провода становится эллипсом с полуосями $k_x r_0$ и r_0 .

Таким образом, для решения поставленной задачи достаточно определить поле двух эллиптических цилиндров с расстоянием между осями $k_x d$, находящихся в среде с $\epsilon_1 = \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}$.

Можно показать (см. приложение), что в том случае, когда расстояние между осями цилиндров много больше их поперечных размеров, эллиптические цилиндры могут быть заменены равноценными круговыми цилиндрами с эквивалентным радиусом, равным среднему арифметическому значению полуосей a и b эллипса (рис. 3):

$$r_s = \frac{a+b}{2}. \quad (27)$$

Частным случаем введения эквивалентного радиуса для случая, когда $b=0$, широко пользуется Оллендорф [Л. 5] при расчете ленточных заземлителей. При такой замене электрическое поле на расстоянии от поверхности провода больше, чем его диаметр, практически оказывается одинаковым в обоих случаях, и расчет поля можно производить так же, как и для двух заряженных осей [Л. 6, 7].

Картина поля для изотропной среды представлена на рис. 4. В области, непосредственно примыкающей к поверхности электродов, за счет того, что эллипсы заменены эквивалентными окружностями, поле несколько отличается от поля заряженных осей; однако в остальной части плоскости поля совпадают достаточной степенью точности.

Если теперь совершить обратный переход изотропной среды к анизотропной, то деформация носит обратный характер и происходит сжатие k_x раз вдоль оси X . При такой деформации плоскости эквипотенциальные и силовые линии приобретают вид, изображенный на рис. 5, и это соответствует полю, реально существующему в рассматриваемом анизотропном диэлектрике. Видно из графика, в этом случае линии электрического смещения могут составлять с эквипотенциальными угол, значительно отличающийся от 90° . Это естественно, так как вектор смещения может не совпадать по направлению с напряженностью электрического поля $E = -\text{grad } \varphi$.

Так как емкость между проводами при преобразовании пространства не меняется, то легко подсчитать емкость, приходящуюся на единицу длины провода:

$$C_0 = -\frac{\pi \epsilon_1 \epsilon_0}{\ln \frac{2k_x d}{r_0(1+k_x)}}$$

(предполагается, что расстояние между проводами много больше их диаметра).

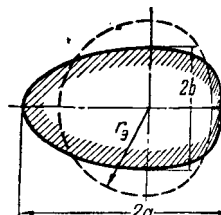


Рис. 3

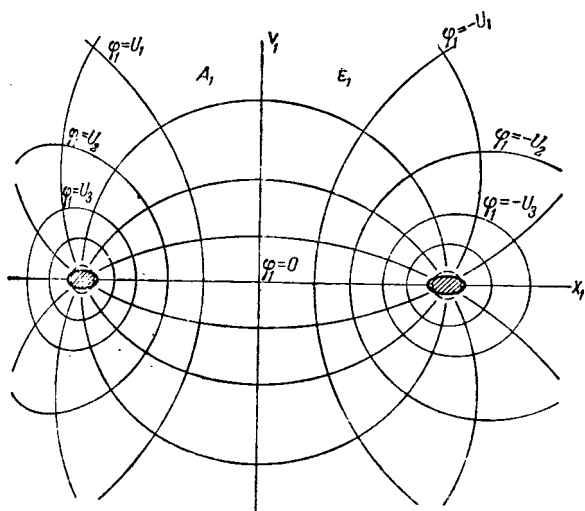


Рис. 4.

Выразив k_x и ϵ_1 через параметры анизотропного диэлектрика, получаем:

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0 V \epsilon_x \epsilon_y}{\ln \frac{2d V \epsilon_y}{r_0 (V \epsilon_x + V \epsilon_y)}}. \quad (28)$$

В том случае, когда оси анизотропии материала не совпадают с осями симметрии пары проводов, деформация носит характер, представленный на рис. 6. При деформации вдоль оси X расстояние между осями проводов принимает следующее значение:

$$d_1 = d \sqrt{1 + \frac{\epsilon_y - \epsilon_x}{\epsilon_x} \cos^2 \alpha},$$

где α — угол между совместной осью двух проводов и осью деформации.

Емкость единицы длины пары проводов в этом случае

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0 V \epsilon_x \epsilon_y}{\ln \frac{2d}{r_0} \frac{V \epsilon_x \sin^2 \alpha + \epsilon_y \cos^2 \alpha}{V \epsilon_x + V \epsilon_y}}. \quad (29)$$

Сопротивление плоской анизотропной полупроводящей пластины. Если электрическое поле плоской полупроводящей пластине создается одной или несколькими парами электродов, а реальная проводимость этой пластины выражается тензором

$$\bar{\gamma} = \begin{pmatrix} \gamma_x & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_y & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_z \end{pmatrix},$$

эта задача решается точно так же, как и для диэлектрика. Разница заключается только в том, что роль тензора диэлектрической проницаемости ϵ_0 играет тензор удельной проводимости γ_0 , а вместо электрического смещения D и количества электричества Q фигурируют плотность тока j и ток I [Л. 4, 6].

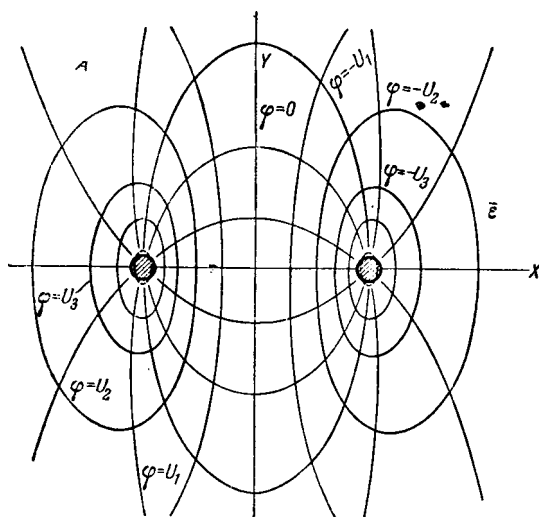


Рис. 5.

В зависимости от расположения электродов и проводимости сред, граничащих с пластиной, может быть сформулирован ряд задач, некоторые из которых представлены на рис. 7. Длина плоских электродов A и B предполагается равной длине пластины в направлении оси Z , а с граней, параллельных плоскости чертежа, пластина ограничена непроводящей средой.

Определение сопротивления между парой электродов A и B для всех пяти задач может быть произведено после растяжения пластины в направлении оси Y с коэффициентом растяжения

$$k_y = \sqrt{\frac{\gamma_x}{\gamma_y}}.$$

Тогда в деформированном пространстве толщина пластин будет:

$$b_1 = k_y b = b \sqrt{\frac{\gamma_x}{\gamma_y}}, \quad (30)$$

а проводимость

$$\gamma_1 = \sqrt{\gamma_x \gamma_y}. \quad (31)$$

Применяя метод зеркальных изображений [Л. 5-9] и заменяя пластинчатые электроды эквивалентными круговыми цилиндрами радиуса

$$r_0 = \frac{a}{2},$$

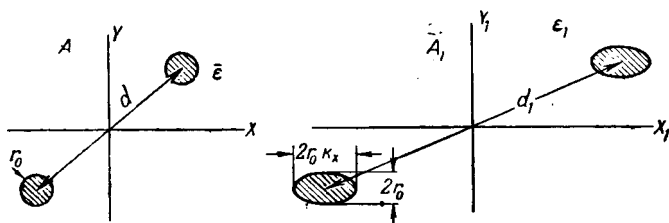


Рис. 6.

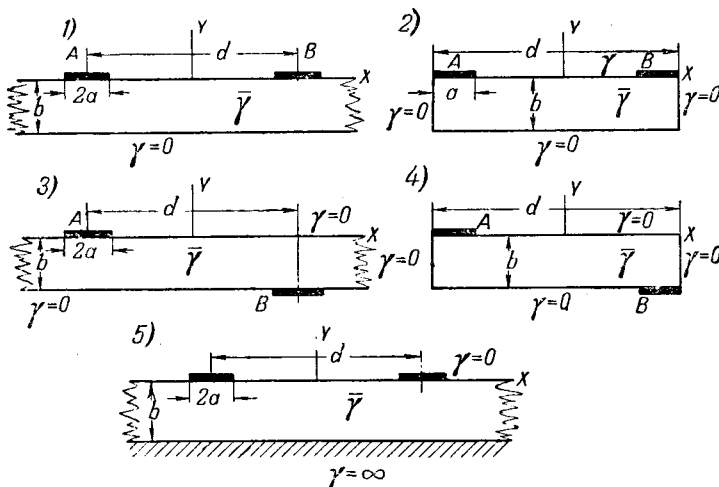


Рис. 7.

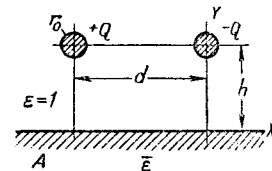


Рис. 8.

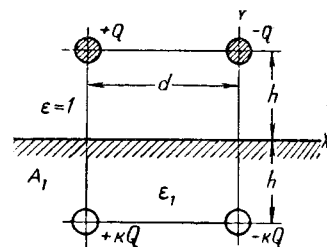


Рис. 9.

легко подсчитать сопротивление между парой электродов для всех пяти случаев:

$$R_1 = \frac{2}{\pi \gamma_1 l} \ln \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi d}{2b_1}}{\frac{\pi a}{4b_1}}, \quad (32)$$

$$R_2 = \frac{4}{\pi \gamma_1 l} \left(\ln \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi d}{2b_1}}{\frac{\pi a}{4b_1}} - \frac{\pi d}{4b_1} \right), \quad (33)$$

$$R_3 = \frac{2}{\pi \gamma_1 l} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2b_1}}{\frac{\pi a}{4b_1}}, \quad (34)$$

$$R_4 = \frac{4}{\pi \gamma_1 l} \left(\ln \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2b_1}}{\frac{\pi a}{4b_1}} - \frac{\pi d}{4b_1} \right), \quad (35)$$

$$R_5 = \frac{2}{\pi \gamma_1 l} \ln \frac{\operatorname{th} \frac{\pi d}{4b_1}}{\frac{\pi a}{8b_1}}, \quad (36)$$

где индекс в обозначении сопротивления соответствует номеру эскиза на рис. 7, а величины γ_1 и b_1 определяются по формулам (30) и (31). Предполагается, что $a < b_1 < d$.

Емкость двухпроводной линии вблизи анизотропного диэлектрика. В том случае, когда в электрическом поле находятся два диэлектрика — изотропный и анизотропный, задача решается такой деформацией анизотропного пространства, при которой граница раздела двух сред не деформируется.

Пусть, например, двухпроводная линия находится над поверхностью анизотропного диэлектрика так, как показано на рис. 8. Если часть плоскости, лежащую ниже оси X, деформировать в направлении оси Y с коэффициентом растяжения

$$k_y = \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}},$$

то поверхность раздела двух диэлектриков остается без изменения, и все пространство можно рассматривать, как изотропное, с диэлектрическими коэффициентами $\epsilon = 1$ и $\epsilon_1 = \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}$ (рис.

Применяя метод неполного зеркального отражения, аналогично тому, как это делается при расчете магнитных полей [Л. 5], легко найти поле как в воздухе, так и в диэлектрике с электрической проницаемостью ϵ_1 .

Емкость между двумя проводами в этом случае

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{d}{r_0} + \frac{k}{2} \ln \frac{4h^2 + d^2}{4h^2}},$$

где коэффициент отражения

$$k = \frac{1 - \epsilon_1}{1 + \epsilon_1}.$$

Подставляя значения k и ϵ_1 , получаем:

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{d}{r_0} + \frac{1 - \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}}{1 + \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}} \ln \frac{4h^2 + d^2}{4h^2}}.$$

Формулы (37) и (39) справедливы при $d \gg r_0$, когда можно пренебречь радиусом проводов в сравнении с расстоянием между проводами. При невыполнении этого условия необходимо формулы (37) и (39) вместо d и $2h$ соответственно поставить $(d - r_0)$ и $(2h - r_0)$ и внести поправку, учитывающую смещение электрических осей по отношению к геометрическим.

Как видно из (39), при повороте осей анизотропии на 90° емкость между проводами не меняется. Таким образом, расположение и большая диэлектрической проницаемости поверхности диэлектрика и нормально к ней дает одно и тоже значение емкости между проводами.

Более того, можно показать, что выражение (39) справедливо при произвольном расположении осей анизотропии и, следовательно, емкость между проводами, лежащими вне диэлектрика, не зависит от расположения осей анизотропии.

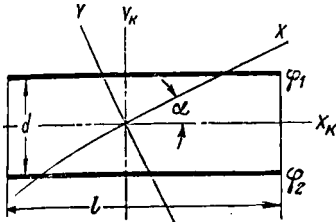


Рис. 10.

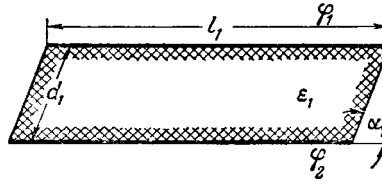


Рис. 11.

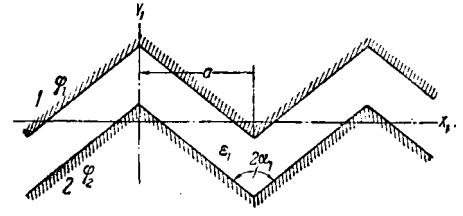


Рис. 12.

Поле плоского конденсатора, заполненного диэлектриком с прямолинейной анизотропией. Если между пластинами плоского конденсатора (с потенциалами φ_1 и φ_2) помещен диэлектрик с прямолинейной анизотропией (рис. 10), так что его оси анизотропии X и Y образуют с осями симметрии конденсатора X_k и Y_k , произвольный угол α (оси Z и Z_k предполагаются совпадающими), то изотропизирующая деформация преобразует плоский прямоугольный конденсатор в косоугольный (рис. 11).

Размеры косоугольного конденсатора зависят от расположения осей анизотропии и, следовательно, от угла α :

$$l_1 = l \sqrt{(k_x^2 - 1) \sin^2 \alpha + 1},$$

$$d_1 = d \sqrt{(k_x^2 - 1) \cos^2 \alpha + 1},$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{k_x (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha)}{k_x^2 - 1},$$

где $k_x = \sqrt{\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}}$ — коэффициент растяжения вдоль оси X .

Диэлектрическая проницаемость преобразованного конденсатора

$$\epsilon_1 = \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}.$$

Если $\epsilon_1 \gg 1$, то напряженность поля на боковых сторонах диэлектрика можно считать направленной по касательной к поверхности диэлектрика и для определения поля в конденсаторе применить метод зеркального отображения. После многократного отображения от двух боковых сторон параллелограмма (рис. 11) задача сводится к определению поля между двумя ломаными линиями с потенциалами φ_1 и φ_2 (рис. 12).

Как известно [например, Л. 10], решение уравнения Лапласа может быть представлено в виде:

$$\varphi = f_1(x_1 - jy_1) + f_2(x_1 + jy_1). \quad (40)$$

Так как потенциал в рассматриваемом случае представляет собой периодическую функцию с периодом $2a$ вдоль оси X_1 , то, разлагая f_1 и f_2 в ряд Фурье, можно получить следующее решение:

$$\varphi = \varphi_0 + A_0 y_1 + \sum_{i=1}^n \left(K_i \sin \frac{i\pi x_1}{a} + B_i \cos \frac{i\pi x_1}{a} \right) \times \\ \times \left(C_i \operatorname{sh} \frac{i\pi y_1}{a} + D_i \operatorname{ch} \frac{i\pi y_1}{a} \right).$$

Полагая $\varphi_1 = -\varphi_2$, и из условий симметрии,

$$\varphi(x_1) = \varphi(-x_1),$$

и

$$\varphi(x_1, y_1) = -\varphi(a - x_1, -y_1),$$

получаем $\varphi_0 = 0$, $K_i = 0$ и $C_i = 0$, и, следовательно,

$$\varphi = A_0 y_1 + \sum_{i=1}^n A_i \cos \frac{i\pi x_1}{a} \begin{cases} \operatorname{ch} \frac{i\pi y_1}{a}, & (i \text{ — нечетное}) \\ \operatorname{sh} \frac{i\pi y_1}{a}, & (i \text{ — четное}), \end{cases} \quad (41)$$

где коэффициенты A_i определяются из условия $\varphi = \varphi_1$ на поверхности 1 и $\varphi = \varphi_2$ на поверхности 2.

Ограничиваясь k первыми членами ряда, не представляет труда получить приближенное решение задачи и, решая систему $(k+1)$ линейных уравнений, определить значения коэффициента A_i для $0 < i < k$.

Обратный переход от поля в изотропной среде к полю в анизотропной среде осуществляется путем деформации, обратной первоначальной, т. е. сжатием вдоль оси X в k_x раз.

Поле плоского конденсатора, заполненного диэлектриком с аксиальной анизотропией. Пусть между пластинами плоского конденсатора помещен диэлектрик с аксиальной анизотропией (например, древесина) так, что ось анизотропии совпадает с осью симметрии конденсатора (рис. 13).

В этом случае электрическое поле конденсатора может быть определено путем радиальной изотропизирующей деформации (уравнение 22). Величина C при этом может быть выбрана произвольно.

Выберем C таким, чтобы окружность радиуса $\frac{d}{2}$ не деформировалась. Тогда

$$\frac{d}{2} = C \left(\frac{d}{2} \right) \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r}}$$

и, следовательно,

$$C = \left(\frac{2}{d} \right) \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r} - 1}. \quad (42)$$

Если $\epsilon_r > \epsilon_a$, то при такой деформации все окружности радиуса $r > \frac{d}{2}$ уменьшаются, а радиуса $r < \frac{d}{2}$ увеличиваются. Таким образом, после деформации электроды принимают вид, показанный на рис. 14.

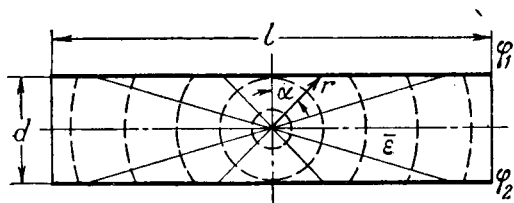


Рис. 13.

Обозначая как и ранее $\sqrt{\frac{\epsilon_\alpha}{\epsilon_r}} = \beta$, уравнение деформированных электродов в полярных координатах запишем следующим образом:

$$\cos \alpha = \pm \left(\frac{d}{2r_1} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (43)$$

Диэлектрическая проницаемость преобразованного пространства

$$\epsilon_1 = \sqrt{\epsilon_r \epsilon_\alpha}.$$

Полагая потенциал в центре симметрии равным нулю, можно потенциал преобразованного поля записать в виде ряда

$$\varphi_1 = A_1 r_1 \cos \alpha + A_3 r_1^3 \cos 3\alpha + \dots A_i r_1^i \cos i\alpha + \dots,$$

где коэффициенты A_1, A_3, \dots, A_i и т. д. определяются из граничного условия:

$$\varphi = \pm \varphi_1 = \mp \varphi_2$$

при

$$r_1 = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\cos \alpha} \right)^\beta.$$

Переход от полученного таким образом поля к полю в анизотропной среде производится путем обратной деформации

$$r = \frac{d}{2} \left(\frac{2r_1}{d} \right)^{\frac{1}{\beta}};$$

следовательно, в анизотропной среде

$$\varphi = B_1 r^\beta \cos \alpha + B_3 r^{3\beta} \cos 3\alpha + B_5 r^{5\beta} \cos 5\alpha + \dots B_i r^{i\beta} \cos i\alpha + \dots \quad (44)$$

Коэффициенты B_1, B_2, \dots, B_i и т. д. определяются из условия: $\varphi = \pm \varphi_1 = \mp \varphi_2$ при

$$r = \frac{d}{2 \cos \alpha},$$

причем

$$B_i = A_i \left(\frac{d}{2} \right)^{(1-\beta)i}.$$

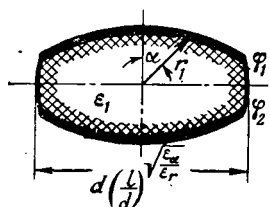


Рис. 14.

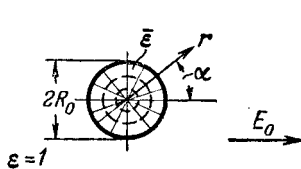


Рис. 15.

Анизотропный цилиндр в однородном поле
В электрическое поле напряженностью E_0 внесен изображенный на рис. 15 цилиндр радиуса R_0 из диэлектрика с аксиальной анизотропией:

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_r & 0 \\ 0 & \epsilon_\alpha \end{pmatrix}$$

Для определения поля в цилиндре и вне его может быть произведена такая изотропизирующая деформация среды, чтобы поверхность раздела двух сред (цилиндр радиуса R_0) не деформировалась.

Этому условию удовлетворяет преобразование

$$r_1 = R_0 \left(\frac{r}{R_0} \right)^{\sqrt{\frac{\epsilon_\alpha}{\epsilon_r}}}. \quad (45)$$

В таком случае задача может быть сведена к рассмотрению изотропного диэлектрического цилиндра радиуса R_0 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = \sqrt{\epsilon_r \epsilon_\alpha}$ во внешнем поле напряженностью E_0 .

Эта известная задача решена во многих случаях; поле внутри диэлектрика однородно (рис. 16) и имеет напряженность

$$E_{1s} = \frac{2}{\epsilon_1 + 1} E_0. \quad (46)$$

Если принять потенциал центра цилиндра равным нулю, то для потенциала внутри диэлектрика, и снаружи его φ_{1s} могут быть написаны следующие выражения:

$$\varphi_{1s} = \frac{2}{\epsilon_1 + 1} E_0 r_1 \cos \alpha; \quad (47)$$

$$\varphi_{1n} = \left(r_1 - \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 1} \frac{R_0^2}{r_1} \right) E_0 \cos \alpha. \quad (48)$$

Диэлектрическая проницаемость внешней среды принята равной единице.

При обратной деформации и переходе от изотропной среды к анизотропной распределение потенциала вне диэлектрика не меняется;

$$\varphi_n = \varphi_{1n}, \quad (49)$$

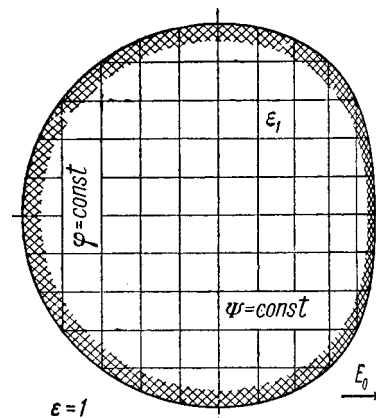


Рис. 16.

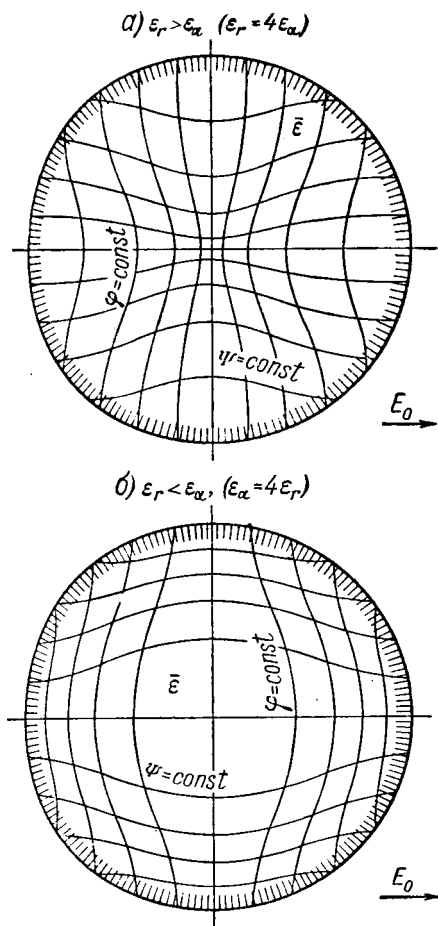


Рис. 17.

внутри приобретает вид:

$$\varphi = \frac{2R_0}{\epsilon_1 + 1} E_0 \left(\frac{r}{R_0} \right) \sqrt{\frac{\epsilon_\alpha}{\epsilon_r}} \cos \alpha. \quad (50)$$

Распределение напряженности поля вдоль симметрии ($\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$) характеризуется следующим уравнением:

$$E_\alpha = \frac{2}{\epsilon_1 + 1} E_0 \left(\frac{r}{R_0} \right) \sqrt{\frac{\epsilon_\alpha}{\epsilon_r} - 1}. \quad (51)$$

Если $\epsilon_r > \epsilon_\alpha$, то к центру диэлектрика напряженность поля возрастает, если же, наоборот, $\epsilon_r < \epsilon_\alpha$, то напряженность в центре материала меньше, чем у его краев (рис. 17).

Система цилиндрических электродов, окруженных коаксиальными слоями изотропных и анизотропных диэлектриков. В случае более сложных систем, состоящих из анизотропных и изотропных диэлектриков, если границы раздела диэлектриков совпадают с поверхностями анизотропии, решение может быть сведено к рассмотрению чисто изотропной задачи.

Пусть, например, система трех цилиндрических электродов радиусов R_0 с потенциалами φ_1 и φ_3 находится в среде, состоящей из

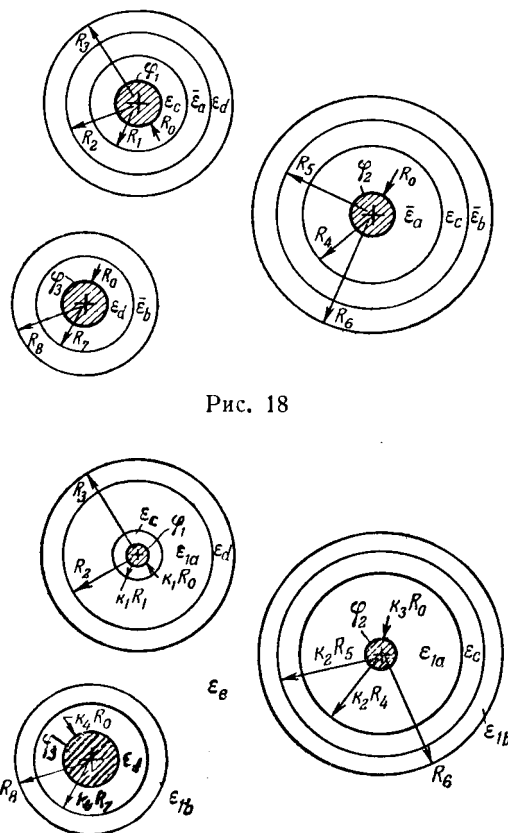


Рис. 18

Рис. 19.

анизотропных ($\bar{\epsilon}_a$, $\bar{\epsilon}_b$) и изотропных (ϵ_c , ϵ_d , ϵ_e) диэлектриков, расположенных согласно рис. 18. Тогда, произведя деформацию каждой из сред относительно ее оси симметрии, выбираем коэффициент C в уравнении (22) так, чтобы выполнялась непрерывность деформации на границах раздела двух сред.

Для изотропных сред $\epsilon_r = \epsilon_\alpha$ и $r_1 = Cr$.

Следовательно, изотропные среды также могут деформироваться, но для плоскопараллельных полей с коэффициентом деформации, не зависящим от радиуса. Это соответствует изменению масштаба в C раз, не оказывающему влияния на геометрические соотношения плоскопараллельных полей.

Выбирая коэффициенты деформации так, чтобы внешний радиус каждой из систем коаксиальных цилиндров не менялся и соблюдая условие непрерывности деформации на всех границах, получаем систему изотропных цилиндров, окружающих три электрода радиусов $k_1 R_0$, $k_3 R_0$ и $k_4 R_0$ (рис. 19). Радиусы границ раздела различных диэлектриков при этом изменяются с коэффициентами растяжения k_1 , k_2 , k_3 и k_4 , зависящими от геометрических размеров и свойств анизотропных диэлектриков:

$$k_1 = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\beta_a - 1}, \quad (52)$$

$$k_2 = \left(\frac{R_5}{R_6} \right)^{\beta_b - 1}, \quad (53)$$

$$k_3 = k_2 \left(\frac{R_0}{R_4} \right)^{\beta_a - 1}, \quad (54)$$

$$k_4 = \left(\frac{R_7}{R_8} \right)^{\beta_b - 1}, \quad (55)$$

где

$$\beta_a = \left(\sqrt{\frac{\epsilon_a}{\epsilon_r}} \right)_a \text{ и } \beta_b = \left(\sqrt{\frac{\epsilon_a}{\epsilon_r}} \right)_b.$$

Диэлектрическая проницаемость преобразованных сред:

$$\epsilon_{1a} = \left(\sqrt{\epsilon_a \epsilon_r} \right)_a \text{ и } \epsilon_{1b} = \left(\sqrt{\epsilon_a \epsilon_r} \right)_b.$$

Таким образом, анизотропная задача сводится к изотропной, решение которой может производиться одним из методов, применяемых при исследовании полей в неоднородных изотропных средах [Л. 5, 6, 11, 13].

При наличии в поле кроме диэлектриков с аксиальной анизотропией также и диэлектриков с прямолинейной ортогональной анизотропией, последние можно рассматривать, как диэлектрики с аксиальной анизотропией, ось которой устремляется в бесконечность. В этом случае деформация носит линейный характер.

Потери в анизотропном материале в поле токов высокой частоты. Рассмотренные выше примеры позволяют без большого труда рассчитать активную и реактивную составляющие сопротивления между электродами при высокочастотном нагреве диэлектрика или полупроводника. В том случае, когда размеры материала много меньше, чем длина волны токов высокой частоты в этом материале, при расчете сопротивления между электродами можно пользоваться формулами, полученными для статических задач и комплексной проводимостью или комплексной диэлектрической проницаемостью.

Если в формулы (32) — (38) подставить вместо составляющих тензоров $\bar{\gamma}$ и $\bar{\epsilon}$ комплексные составляющие тензоров [Л. 12]

$$\bar{\gamma} = \begin{vmatrix} \gamma_x & 0 \\ 0 & \gamma_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \gamma_r & 0 \\ 0 & \gamma_y \end{vmatrix} + j\omega\epsilon_0 \begin{vmatrix} \epsilon_x & 0 \\ 0 & \epsilon_y \end{vmatrix}$$

и

$$\bar{\epsilon}^* = \begin{vmatrix} \epsilon_x^* & 0 \\ 0 & \epsilon_y^* \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \epsilon_x & 0 \\ 0 & \epsilon_y \end{vmatrix} - j \begin{vmatrix} \epsilon''_x & 0 \\ 0 & \epsilon''_y \end{vmatrix},$$

то полученные формулы дают непосредственное значение активной и реактивной составляющих сопротивления или проводимости между электродами.

Так, например, если комплексное удельное сопротивление материала

$$\bar{\zeta} = \begin{vmatrix} \rho_x & 0 \\ 0 & \rho_y \end{vmatrix} - j \begin{vmatrix} \xi_x & 0 \\ 0 & \xi_y \end{vmatrix} = \frac{1}{\sigma},$$

то сопротивление между электродами, изображенными на третьем эскизе рис. 7, может быть подсчитано по формуле (34) таким образом:

$$Z = R - jX = \frac{2V(\rho_x - j\xi_x)(\rho_y - j\xi_y)}{\pi d} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2b} \sqrt{\frac{\rho_x - j\xi_x}{\rho_y - j\xi_y}}}{\frac{\pi a}{4b} \sqrt{\frac{\rho_x - j\xi_x}{\rho_y - j\xi_y}}}.$$

Сопротивление между цилиндрическими электродами, расположенными над массивным анизотропным диэлектриком (рис. 8), выразится согласно формуле (39) так:

$$Z = R - jX = \frac{-j}{\pi d \omega \epsilon_0} \left[\ln \frac{d}{r_0} + \frac{1 - V(\epsilon_x - j\xi''_x)(\epsilon_y - j\xi''_y)}{1 + V(\epsilon_x - j\xi''_x)(\epsilon_y - j\xi''_y)} \ln \left(1 + \frac{d^2}{4h^2} \right) \right].$$

Полученные таким образом формулы позволяют рассчитать сопротивление нагрузки при высокочастотном нагреве диэлектриков для различных случаев расположения электродов.

Приложение. Рассмотрим поля, определяемые аналитическими функциями

$$w_1 = u_1 + jv_1 = A_1 \ln \frac{z}{c_1}$$

и

$$w_2 = u_2 + jv_2 = A_2 \operatorname{Arch} \frac{z}{c_2}.$$

Первая функция определяет семейство эквипотенциальных линий, являющихся концентрическими окружностями, а второе — семейство фокальных эллипсов с фокусным расстоянием $2c_2$ [Л. 6].

Для того чтобы на достаточно большом расстоянии от центра симметрии оба поля совпадали, необходимо чтобы

$$\lim_{|z| \rightarrow \infty} w_1 = \lim_{|z| \rightarrow \infty} w_2.$$

Представив Arch для $|z| \gg c_2$ в виде логарифма, получаем:

$$w_2 = A_2 \ln \left(\frac{z}{c_2} + \sqrt{\left(\frac{z}{c_2} \right)^2 - 1} \right) \rightarrow A_2 \ln \frac{2z}{c_2}.$$

Таким образом, для выполнения условия (П.3) необходимо

$$A_1 = A_2 \text{ и } c_2 = 2c_1.$$

Для того чтобы потенциалы окружности с радиусом r_s в первом случае и эллипса с полуосями a и b во втором случае совпадали, необходимо соблюдение равенства

$$A_1 \ln \frac{r_s}{c_1} = A_2 \operatorname{Arch} \frac{a}{c_2}.$$

Решая совместно уравнения (П.4) и (П.5) и учитывая что $a^2 = b^2 + c_2^2$, получаем:

$$r_s = \frac{a + b}{2}.$$

Таким образом, при расчете поля эллиптического цилиндра с вполне допустимой для дальней зоны точностью можно его заменить эквивалентным круговым цилиндром радиусом, равным среднему арифметическому значению его полуосей.

Литература

1. С. Г. Лехницкий. Анизотропные пластинки. Гостехиздат, 1947.
2. А. В. Шубников. Пьезоэлектрические текстуры. Изд-во Академии наук СССР, 1945.
3. К. М. Поливанов. Электростатика. Изд. МЭИ, 1946.
4. Б. М. Тареев. Стеклопластиковая изоляция и ее применение в электротехнике. Труды научно-технической сессии энергетической изоляции, ВНИТОЭ, стр. 91—107, 1949.
5. Ф. Оллендорф. Токи в земле. ГНТИ, 1932.
6. К. А. Круг. Основы электротехники, т. I, Госэнергоиздат, 1946.

7. Л. Р. Нейман и П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники, т. III, Госэнергоиздат, 1949.
8. А. В. Нетушил. Вестник инженеров и техников, № 6, 1947.
9. А. В. Нетушил, К. Б. Исаев и С. К. Федоров. Электричество, № 6, 1949.
10. Задачник по теоретическим основам электротехники. Под редакцией К. А. Круга, В. Ю. Ломоносова, М. А. Перекалина и К. М. Поливанова. Госэнергоиздат, 1948.
11. Г. А. Гриппберг. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных полей. Изд-во Академии наук СССР, 1948.
12. А. В. Нетушил и Б. А. Гольдблатт. Электричество, № 4, 1948.
13. Дж. А. Стрэттон. Теория электромагнитизма. Гостехиздат, 1948.
14. А. И. Заборовский. Электроразведка. Гостоптехиздат, 1943.

[9. 11. 1949]



Влияние третьей пространственной гармоники магнитного потока на пусковые свойства трехфазного асинхронного двигателя, работающего от сети однофазного тока

Доктор техн. наук, проф. Ю. С. ЧЕЧЕТ

Московский энергетический институт им. Молотова

При исследовании асинхронных двигателей обычно пренебрегают влиянием высших гармонических в кривой намагничивающей силы. Такое допущение может быть принято

для большинства трехфазных машин, где при трехфазном питании третья гармоника в кривой намагничивающей силы отсутствует, а влияние пятой и особенно седьмой гармоник при правильном расчете мало. Но оно не может быть оправдано, как будет показано ниже, при работе трехфазного двигателя от однофазной сети. Особое значение приобретает учет влияния высших гармоник для двигателей малой мощности, имеющих весьма часто обмотку статора с неукороченным шагом.

Однофазное питание представляет собой частный случай несимметричного трехфазного питания. Приведенное выше положение может быть поэтому вообще распространено на все те случаи несимметричной трехфазной работы, при которых возникают токи нулевой последовательности. Действительно, если разложить систему токов статора на три составляющие: прямой, обратной и нулевой последовательностей, то очевидно, что система токов прямой последовательности, будучи симметричной трехфазной системой, не создает гармоник результирующей намагничивающей силы, кратных трем. То же относится и к системе токов обратной последовательности. Токи нулевой последовательности совпадают по фазе. При протекании их в системе

Рассмотрено возникновение при однофазном питании двигателя третьей пространственной гармоники потока и ее влияние на образование провала в кривой «момент — скольжение». Дан расчетный метод определения величины момента и приведены результаты опытных исследований. Указаны меры борьбы с рассмотренным явлением.

трех обмоток, сдвинутых в пространстве на 120 электрических градусов, эти токи могут образовать результирующие гармоники намагничивающей силы только кратные

трем. Действительно, если три одинаковых по длине вектора $\dot{\Theta}_{AO}$, $\dot{\Theta}_{BO}$, $\dot{\Theta}_{CO}$ (рис. 1) сдвинуты в пространстве на углы $\frac{2\pi}{3}$, то результирующая намагничивающая сила

$$\dot{\Theta}_O = \dot{\Theta}_{AO} + \dot{\Theta}_{BO} + \dot{\Theta}_{CO}$$

или

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}_O &= \dot{\Theta}_{BO} - \dot{\Theta}_{AO} \cos \frac{2\pi}{3} - \dot{\Theta}_{CO} \cos \frac{2\pi}{3} = \\ &= \dot{\Theta}_{BO} \left(1 - 2 \cos \frac{\pi}{3} \right). \end{aligned}$$

Тогда для

$$\begin{array}{ccccccccc} \nu & = & 1 & & 3 & 5 & 7 & & 9 \\ 2 \cos \frac{\nu\pi}{3} & = & 1 & - & 2 & 1 & 1 & - & 2 \end{array}$$

$$\dot{\Theta}_O = 0 \quad 3\dot{\Theta}_{BO} \quad 0 \quad 0 \quad 3\dot{\Theta}_{BO}.$$

Таким образом, система токов нулевой последовательности является источником третьей пространственной гармоники намагничивающей силы, а следовательно, и третьей пространственной гармоники магнитного потока в воздушном зазоре машины. Эта гармоника представляет собой неподвижную в пространстве волну,

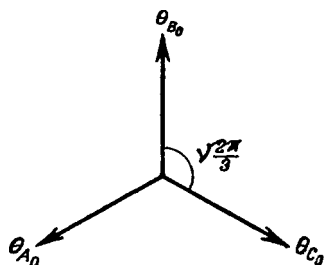


Рис. 1.

пульсирующую с частотой сети и имеющую полюсное деление

$$\tau_3 = \frac{1}{3} \tau$$

или, что то же, число полюсов

$$(2p)_3 = 3(2p).$$

Пульсирующая волна может быть, как известно, разложена на две вращающиеся в противоположные стороны волны половинной амплитуды. Скорость вращения их

$$n_3 = \frac{60f}{p_3} = \frac{60f}{3p} = \frac{1}{3} n_1.$$

Пересекая проводники вращающегося ротора, эти поля будут наводить э. д. с. и токи, частота и величина которых зависят от скольжения s_3 , равного по отношению к прямому полю

$$s_3 = \frac{n_3 - n}{n_3} = \frac{\frac{1}{3} n_1 - n}{\frac{1}{3} n_1} = 1 - 3(1 - s),$$

а по отношению к обратному полю

$$2 - s_3 = 1 + 3(1 - s).$$

При неподвижном роторе ($s = 1$)

$$s_{3\kappa} = 1 \mp 3(1 - 1) = 1.$$

Следовательно, на пусковой момент двигателя третья гармоника поля влияния не оказывает, так как созданные ею моменты вращения прямой и обратной последовательности M_{31} и M_{32} равны по величине, но противоположны по направлению.

При $s_3 = 0$, т. е. при $s = \frac{2}{3}$, момент M_{31} от прямого поля равен нулю, а момент M_{32} от обратного поля соответствует режиму тормоза. При $s_3 = 0 \dots -2$, что соответствует $s = \frac{2}{3} \dots 0$, момент M_{31} становится генераторным

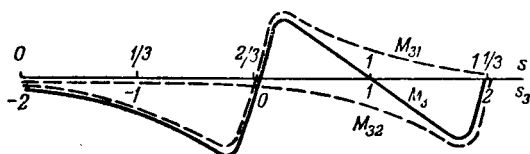


Рис. 2.

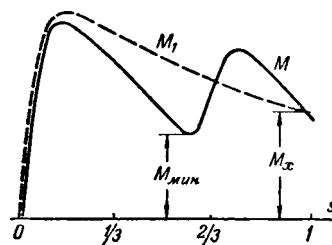


Рис. 3.

а M_{32} попрежнему остается тормозным. Сказанное иллюстрируется рис. 2, на котором показаны составляющие моменты (M_{31} и M_{32}) и результирующий момент M_3 . На рис. 3 показан момент от первой гармоники поля, созданный током прямой последовательности, и результирующий момент

$$M = M_1 + M_3.$$

Таким образом, при скорости около $\frac{1}{3}$ номинальной в кривой момента возникает провал. Если момент сопротивления привода меньше пускового момента $M_{\text{к}}$, но больше минимального момента $M_{\text{мин}}$ ротор застрянет на скорости около $\frac{1}{3} n_1$.

При наличии еще и токов обратной последовательности возникнет, как известно, тормозящий момент от основной и пятой гармоник поля (влиянием более высоких гармоник пренебрегаем). В этом случае ординаты кривой M на рис. несколько уменьшатся (это уменьшение практически весьма невелико), но общий характер влияния момента M_3 , т. е. провал вблизи скорости $\frac{1}{3} n_1$, сохранится.

При исследовании этого явления в применении к трехфазному двигателю, питаемому от однофазной сети, удобнее пользоваться методом симметричных составляющих двухфазной системы, как это было показано в предыдущих работах автора [Л. 1—3].

На рис. 4 слева показана схема трехфазного двигателя, пускаемого при помощи конденсатора от однофазной сети. Число витков одной фазы составляет w_s . Показанная на этом же рисунке справа схема двухфазного двигателя эквивалентна предыдущей, если фаза A содержит $\sqrt{3} w_s$ витков, а фаза B w_s витков. Необходимо, однако, учесть, что обмоточные коэффициенты фаз A и B здесь неодинаковы. Для фазы B обмоточный коэффициент статорной обмотки для ν -той гармоники равен произведению коэффициента расщепления на коэффициент укорочения

$$k_{SB\nu} = \frac{\sin \frac{\nu\pi}{6}}{q \sin \frac{\nu\pi}{6q}} \cdot \sin \nu \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2}.$$

Здесь число пазов на полюс и фазу q берется как для исходной трехфазной машины.

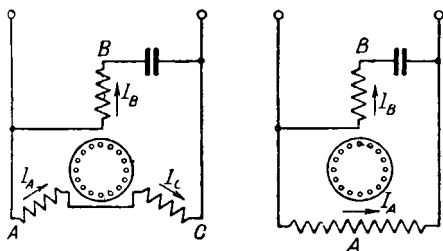


Рис. 4.

Для фазы A обмоточный коэффициент должен еще учитывать пространственное смещение исходных фаз на угол $\gamma \frac{2\pi}{3}$ (рис. 1). Тогда

$$k_{SA\gamma} = k_{SB\gamma} \cdot \sin \frac{\gamma\pi}{3}.$$

Очевидно, что для $\gamma = 3, 9, 15 \dots$ значение $\sin \frac{\gamma\pi}{3} = 0$, т. е. фаза A не создает гармоник намагничивающей силы, кратных трем.

Таким образом, источником третьей пространственной гармоники магнитного потока является только фаза B . Разлагая пульсирующее поле фазы B на два вращающихся, мы снова получим те же явления, которые были рассмотрены выше.

Как уже указывалось, возникновение провала в кривой $M = f(s)$ может при достаточной величине M_3 нарушить удовлетворительную работу двигателя. Поэтому представляется весьма желательным найти метод расчетного определения максимального значения M_3 , являющегося мерой величины провала в кривой результирующего момента. Пользуясь методом симметричных составляющих для двухфазной системы можно для однофазного двигателя с одной обмоткой на статоре написать следующее уравнение вращающего момента [Л. 1]:

$$M_{\gamma} = \frac{97,4}{n_{\gamma}} \cdot \frac{1}{2} I^2 (R'_{R13} - R'_{R23}) [\text{см} \cdot \text{кг}].$$

В данном случае, если рассматривать только момент M_3 от третьей пространственной гармоники поля, нужно учитывать наличие на статоре только одной обмотки B . Так как $n_3 = \frac{n_1}{3}$, то

$$M_3 = \frac{97,4}{\frac{n_1}{3}} \cdot \frac{1}{2} I_B^2 (R'_{R13} - R'_{R23}) =$$

$$= \frac{144}{n_1} I_B^2 (R'_{R13} - R'_{R23}) [\text{см} \cdot \text{кг}].$$

Здесь

$$R'_{R13} = \frac{\frac{R_{R3}}{s_3} X_{m3}^2}{\left(\frac{R_{R3}}{s_3}\right)^2 + (X_{m3} + X_{R3})^2} =$$

$$= \frac{s_3 R_{R3} X_{m3}^2}{R_{R3}^2 + s_3^2 (X_{m3} + X_{R3})^2},$$

$$R'_{R23} = \frac{\frac{R_{R3}}{2-s_3} X_{m3}^2}{\left(\frac{R_{R3}}{2-s_3}\right)^2 + (X_{m3} + X_{R3})^2} =$$

$$= \frac{(2-s_3) R_{R3} X_{m3}^2}{R_{R3}^2 + (2-s_3)^2 (X_{m3} + X_{R3})^2}.$$

В этих уравнениях:

X_{m3} — реактивное сопротивление взаимной индукции статорной обмотки применительно к полюсному делению τ_3 и числу полюсов $(2p)_3$;

R_{R3} , X_{R3} — приведенные к числу витков w_s и фаз $m_s = 2$ обмотки B активное и реактивное (от рассеяния) сопротивление роторной обмотки, применительно к $\gamma = 3$.

Определение X_{m3} , R_{R3} и X_{R3} может быть произведено по следующим, общеизвестным для $\gamma = 1$ уравнениям, измененным применительно к $\gamma = 3$ (предполагая, что обмотка ротора выполнена короткозамкнутой):

$$X_{m3} = 1,6 m_s f w_s^2 k_{s3}^2 \frac{\frac{\tau}{3} \cdot l}{3 p \delta' k_n} 10^{-8} =$$

$$= 0,356 f w_s^2 k_{s3}^2 \frac{\tau l}{p \delta' k_n} 10^{-8} [\text{ом}],$$

$$R_{R3} = \beta_3 \left(\frac{\tau l}{100 Q_c} + \frac{p \frac{\pi D_k}{Z_R}}{100 Q_k 2 \sin^2 \frac{3p\pi}{Z_R}} \right) [\text{ом}],$$

$$X_{R3} = \beta_3 \cdot 7,9 f l (\lambda_{Rn} + \lambda_{R13} + \lambda_{R\delta 3}) [\text{ом}]$$

(Q_c и Q_k — сечения стержня и кольца ротора в мм^2 ; D_k — средний диаметр кольца в см ; Z_R — число пазов ротора).

Обмоточный коэффициент статорной обмотки для $\gamma = 3$

$$k_{s3} = \frac{\sin \frac{3\pi}{6}}{q \sin \frac{3\pi}{6q}} \sin \frac{\gamma}{\tau} \frac{3\pi}{2} = \frac{1}{q \sin \frac{\pi}{2q}} \sin \frac{\gamma}{\tau} \frac{3\pi}{2}.$$

Теоретический воздушный зазор $\delta' = k_{\delta} \delta$. Коэффициент, учитывающий магнитное сопротивление стали,

$$k_n = \frac{AW_{\delta} + AW_{ZS} + AW_{ZR}}{AW_{\delta}}.$$

Если значения AW_{δ} , AW_{ZS} и AW_{ZR} не известны можно для современных машин приближенно принимать $k_n = 1,4 - 1,6$.

Коэффициент приведения роторных сопротивлений

$$\beta_3 = \frac{m_s w_s^2 k_{s3}^2}{m_R w_R^2 k_{R3}^2}.$$

При $m_s = 2$, $m_R = Z_R$, $w_R = \frac{1}{2}$

$$\beta_3 = \frac{8w_s^2 k_{s3}^2}{Z_R k_{R3}^2},$$

где обмоточный коэффициент роторной обмотки равен коэффициенту скоса пазов

$$k_{R3} = \frac{\sin \frac{3\pi b}{2\tau}}{\frac{3\pi b}{2\tau}};$$

здесь $\frac{b}{\tau}$ — отношение величины скоса к полюсному делению. Если пазы не скошены, $k_{R3} = 1$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния λ_{Rn} определяется по обычным формулам в зависимости от конфигурации паза.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния $\lambda_{R\delta 3}$ и коэффициент магнитного рассеяния в воздушном зазоре $\lambda_{R\delta 3}$ определяются по формулам завода „Электросила“, видоизмененным применительно к $\nu = 3$:

$$\lambda_{R\delta 3} = \frac{0,73 D_K}{Z_R \sin^2 \frac{3\pi p}{Z_R}} \log \frac{4,7 D_K}{2(a+b)},$$

$$\lambda_{R\delta 3} = \frac{t_R k_{R3}^2}{11,9\delta},$$

где a и b — размеры поперечного сечения кольца, а пазовое деление ротора

$$t_R = \frac{\pi(D-2\delta)}{Z_R}.$$

Как уже указывалось выше, наиболее существенным является определение максимального значения момента M_3 , так как именно им определяется провал в кривой M .

Момент $M_{3\max}$ наступает при скольжении s_{3m} , на величину которого мало влияет момент обратной последовательности M_{32} . Поэтому для определения s_{3m} приравняем нулю производную по s_3 только от момента прямого поля M_{31} , что после несложных преобразований дает¹:

$$s_{3m} = \frac{R_{R3}}{X_{m3} + X_{R3}}.$$

Подставляя это значение s_{3m} в уравнение для M_3 , учитывая, что $2 - s_{3m} \approx 2$ и пренебрегая в знаменателе второго члена в скобках величиной K_{R3}^2 по сравнению с $4(X_{m3} + X_{R3})^2$, получим:

$$M_{3\max} = \frac{73}{n_1} I_B^2 \left[\frac{X_{m3}^2}{X_{m3} + X_{R3}} - \frac{X_{m3}^2 R_{R3}}{(X_{m3} + X_{R3})^2} \right] [\text{см} \cdot \text{кг}].$$

Таким образом, подсчитав значения X_{m3} , R_{R3} и X_{R3} и зная ток фазы B при скольжении

¹ Изменение тока I_B в диапазоне скольжений $s_3 = 0 \dots s_{3m}$ ничтожно мало и им можно пренебречь, т. е. считать $I_B = \text{const}$.

$s = \frac{2}{3}$ (его можно определить по методу, изложенному в [Л.1]), находим $M_{3\max}$, определяющий провал на кривой $M = f(s)$.

Для проверки всего изложенного значения моментов $M_{3\max}$ были найдены расчетным путем для трех трехфазных микродвигателей и одного однофазного. У последней машины рабочая обмотка занимает $\frac{2}{3}$, а пусковая $\frac{1}{3}$ пазов статора и поэтому для нее применимы все найденные выше соотношения.

Полученные величины были сравнены с опытными значениями моментов, найденными тем же методом, разработанному в электромашинной лаборатории МЭИ под руководством автора. При опытах трехфазные двигатели включались по схеме рис. 4. Пуск осуществлялся как посредством конденсатора, так и при помощи активного сопротивления в пусковой обмотке (фаза B). Результаты расчетов и опытов приведены в следующих табл. 1, 2, 3.

Таблица 1

Данные исследованных двигателей

Двигатель	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4 (однофазный)
Мощность, <i>вт</i>	120	200	260	120
n_1 , <i>об/мин</i>	1 500	1 500	3 000	3 000
D , <i>см</i>	6	6	6	6
τ , <i>см</i>	4,71	4,71	9,42	9,42
l , <i>см</i>	4,8	6	6	6
q	2	2	4	4
w_s	1 128	896	608	312
Z_R	20	20	18	18
δ , <i>мм</i>	0,25	0,25	0,3	0,35
Q_c	36,3	36,3	36,3	36,3
$\frac{Q_c}{K_K}$, <i>мм</i> ³	8×16	8×16	8×16	8×16
D_K , <i>см</i>	4,26	4,26	4,25	4,25

Таблица 2

Результаты расчета

Двигатель	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
k_K	1,4	1,43	1,63	1,4
k_{S3}	0,707	0,707	0,654	0,654
k_{R3}	0,87	0,87	0,937	0,967
X_{m3} , <i>ом</i>	29,5	22,7	26,5	7,28
β_3 , $10^4 \times$	33,6	21,2	7,52	1,98
λ_{Rn}	1,8	1,8	1,74	1,74
$\lambda_{R\delta 3}$	0,033	0,027	0,07	0,07
$\lambda_{R\delta 3}$	1,92	1,92	2,27	1,99
X_{R3} , <i>ом</i>	23,9	18,8	7,27	1,79
R_{R3} , <i>ом</i>	19,9	12,7	5,81	1,53
$M_{3\max}$, <i>см·кг</i>	$0,495 I_B^2$	$0,419 I_B^2$	$0,419 I_B^2$	$0,118 I_B^2$

Таблица 3

Сравнение расчетных и опытных результатов

Пазы №	$C_{\text{пуск}},$ мксф	$R_{\text{пуск}},$ ом	$M_{3\text{max}}$ (расчет), кгс.м	$M_{3\text{max}}$ (опыт), кгс.м	$M_{3\text{max}}$ $M_{\text{кгс.м}}$
1	9	—	0,84	0,8	0,1
1	—	49	2,24	2,0	0,8
2	16	—	2,08	2,0	0,1
2	5,4	—	0,21	0,3	0,1
3	17	—	2,6	2,7	0,23
4	—	—	0,83	0,9	0,22

Пазы ротора у всех машин—грушевидные с оди-
наковыми размерами поперечного сечения. Пазы
сошны на 9 мм. Обмотка статора—с диамет-
ральным шагом.

Таким образом, предлагаемый метод рас-
чета является вполне надежным, так как рас-
четные и опытные результаты отличаются на
маленькие, лежащие в пределах возможных оши-
бок при измерении моментов.

Последний столбец табл. 3, дающий отноше-
ние максимального момента, обусловленного
третьей гармоникой потока, к пусковому моменту
двигателя, является весьма поучительным; он
показывает, что это отношение в случае машин,
имеющих на статоре диаметрально обмотку, мо-
жет достигать солидных значений. Особенно опас-
но это становится при пуске с помощью ак-
тивного сопротивления в пусковой фазе. В этом
случае для получения достаточного пускового
момента приходится увеличивать пусковой ток
значительно большей мере, чем это требуется
при конденсаторном пуске (см. пример расчета
в [Л.3]), а так как момент от третьей гармоники
пропорционален квадрату тока, то отношение
 $\frac{M_{3\text{max}}}{M_3}$ может получиться здесь настолько боль-

шим, что пуск в ход станет невозможным—ро-
тор застрянет на скорости около $\frac{1}{3}$ номиналь-
ной.

Радикальным средством уничтожения момента
и, следовательно, уничтожения провала в
кривой $M=f(s)$ является укорочение шага ста-
торной обмотки до $\frac{2}{3}$ полюсного деления. При
этом $k_{33}=0$ и третья гармоника потока исче-
зает. Однако, это приводит к увеличению числа
пазов на 15,5% по сравнению с диаметральной
обмоткой, так как коэффициент укорочения ра-
вен в этом случае $\sin \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2} = 0,866$. Это при-
водит в свою очередь к увеличению сечения

паза и, следовательно к некоторому возрастанию
габаритов машины. Расход меди на изготовление
обмотки при этом практически не изменяется,
так как происходит значительное укорочение ло-
бовых частей.

Однако, нет особой необходимости в полном
уничтожении момента M_3 ; достаточное же сни-
жение его может быть достигнуто путем отно-
сительно небольшого укорочения шага, не вы-
зывающего вместе с тем столь значительного
увеличения числа витков. В общем случае при
укорочении шага обмотки уменьшение момента
 M_3 происходит в $\frac{1}{k_{3y3}^2}$ раз, а увеличение числа

витков на $\left(\frac{1}{k_{3y1}} - 1\right) 100$ процентов. Здесь k_{3y1}
и k_{3y3} —коэффициенты укорочения шага для пер-
вой и третьей гармоник.

В табл. 4 приведены эти величины в зависи-
мости от укорочения шага.

Таблица 4

$y=$	τ	$\frac{8}{9}\tau$	$\frac{5}{6}\tau$	$\frac{7}{9}\tau$	$\frac{3}{4}\tau$	$\frac{2}{3}\tau$
M_3 — кратность уменьшения	1	1,33	2	4	8	∞
Увеличение числа витков, % . . .	0	1,5	3,5	6,3	8,2	15,5

При наиболее часто встречающемся значении
числа пазов на полюс и фазу, равном трем, уко-
рочение шага обмотки до $\frac{7}{9}$ полюсного деле-
ния, давая увеличение числа витков всего на
6,3%, снижает момент $M_{3\text{max}}$ в 4 раза, т. е. де-
лает его практически неощутимым.

Одна из последующих работ автора будет
посвящена использованию трехфазных асинхрон-
ных микродвигателей в качестве однофазных.
Для таких машин укорочение шага обмотки дает
возможность значительного повышения эффек-
тивности использования.

Литература

1. Ю. С. Чечет. Номографический метод построения
рабочих характеристик однофазных асинхронных микро-
двигателей с расщепленной фазой. Электричество, № 7,
1948.
2. Ю. С. Чечет. Выбор основных размеров и пара-
метров однофазных асинхронных микродвигателей. Элек-
тричество, № 11, 1948.
3. Ю. С. Чечет. Расчет вспомогательной обмотки
однофазных асинхронных микродвигателей. Электричество,
№ 2, 1949.

[9. 3. 1949]



Расчет рассеяния лобовых частей обмоток

Кандидат техн. наук И. В. ШЕХТМАН

Московский энергетический институт им. Молотова

В электрических машинах магнитное поле, создаваемое м. д. с. обмоток, расположено в пространстве, заполненном частью ферромагнитной средой, частью воздухом. Сложное пространственное распределение поля делает точный расчет весьма затруднительным. Для облегчения расчета, как правило, магнитное поле машины делят на несколько частичных полей и каждое из них рассчитывают независимо. Результаты расчета суммируются методом наложения и, таким образом, определяется результирующее поле машины.

Обычно частичные поля связываются с определенной частью контуров обмотки. Чаще всего выделяют главное поле, поле рассеяния пазов, рассеяния лобовых частей и др. Каждое из этих частичных полей связывают с соответствующей частью катушки согласно ее пространственному расположению. В действительности поле в каждой точке пространства создается всем контуром катушки. Только в случае правильного учета этой взаимосвязи подразделение катушки на части для расчета поля теоретически может быть обосновано.

При исследовании поля в зоне лобовых частей многие авторы иногда пытаются разделить это поле на составляющие, выделяя поле рассеяния. Между тем, в технических расчетах в этом нет необходимости.

Поток лобовой части может одновременно охватывать катушечные головки статорных и роторных обмоток, являясь, таким образом, как бы частью главного потока. Этот поток почти не участвует в образовании вращающего момента машины и при расчете в общем балансе напряжений нигде не учитывается. В дальнейшем при расчете рассеяния лобовых частей определяется суммарное поле всей торцевой части машины и учитываются, таким образом, все составляющие потока лобовых частей, а не только собственно поток рассеяния. Этим в известной мере уточняется определение общей э. д. с. машины.

Определения индуктивного сопротивления контура. Общепринятый способ расчета основан

Предлагается метод расчета индуктивного сопротивления рассеяния лобовых частей машин. Выводятся формулы и даются кривые для определения индуктивности и взаимоиндуктивности отрезков конечной длины. Результаты эксперимента подтверждают правильность выбранного метода расчета и достаточную точность предлагаемых формул.

на определении индуктивного сопротивления общему магнитному контуру, сцепленному с ним контуром.

Можно иначе подойти к вопросу опреде-

ления индуктивности контура. Разделим контур на резки, в каждом из которых наводится э. д. с. Общая индуктивность контура a делится как сумма условных индуктивностей взаимоиндуктивностей отдельных отрезков. Рассмотрим контур a (рис. 1). Считаем его состоящим из четырех отрезков: 1, 2, 3, 4. Об индуктивности контура a состоит из суммы индуктивностей и взаимоиндуктивностей отрезков 1, 2, 3, 4.

$$L_a = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 - M_{12} - M_{21} - M_{23} - M_{32} - M_{34} - M_{43}$$

L и M — условные индуктивность и взаимоиндуктивность отрезков конечной длины.

Если контур состоит из отрезков одинаковой длины и равного сечения,

$$L_a = 4L_1 - 4M_{12}.$$

Итак, вместо сложного определения общего тока контура по первому способу можно индуктивность контура определить, как сумму индуктивностей и взаимоиндуктивностей отрезков, определения которых далее предлагаются формулы.

Воспользовавшись вторым способом расчета определим индуктивное сопротивление лобовой части обмотки.

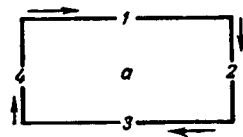


Рис. 1.

По общему потоку, охватывающему катушечную головку во всем пространстве между торцевой и торцевой поверхностью статорного пазов, определялась общая индуктивность лобовой части машины, как сумма индуктивностей от

ных катушечных головок и взаимноиндуктивностей между ними.

При расчете индуктивности катушечная головка разбивалась на отрезки. Общая индуктивность находилась, как сумма индуктивностей и взаимноиндуктивностей этих отрезков.

Учет влияния ферромагнитной среды. Лобовые части обмотки электрической машины расположены в воздушной среде, которая окружает катушечную головку. Граничной поверхностью является ферромагнитная среда, из которой выходят лобовые части катушки. При прохождении тока по обмотке вокруг лобовых частей возникает магнитное поле. Трубки индукции, проходя из воздушной среды в ферромагнитную и обратно, пересекают пограничную поверхность, разделяющую эти среды. При этом на граничной поверхности возникает кажущаяся магнитная плотность, обуславливающая возникновение дополнительной магнитной напряженности, которая в каждой точке складывается с напряженностью, создаваемой непосредственно током.

Влияние ферромагнитной среды на конфигурацию и параметры магнитного поля учитываются автором с помощью метода зеркальных отображений.

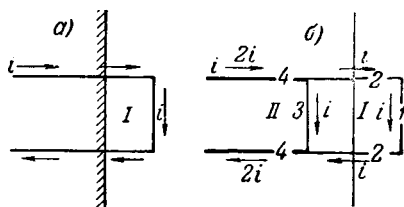


Рис. 2.

Если проводник расположен параллельно граничащей с ним ферромагнитной среде, силовые линии (для стали бесконечной проницаемости) входят в ферромагнитную среду перпендикулярно ее поверхности, которая является эквипотенциальной. Магнитное поле такой системы идентично половине поля, образованного током в его зеркальным отображением того же знака, если оба проводника расположены в воздухе. Поэтому для проводника, расположенного параллельно граничной поверхности, метод вполне применим.

Вопрос о применении метода для расчета поля проводников, расположенных перпендикулярно плоскости раздела, разработан В. Ю. Ломоносовым [Л. 3], который рассмотрел в общем виде задачу применения метода зеркальных отображений для любого расположения проводника. Согласно Ломоносову для интересующего нас случая расположения проводников (рис. 2, а) относительно ферромагнитной среды бесконечной проницаемости при расчете поля части контура I следует учитывать влияние токов дополнительного контура II (рис. 2, б).

В этом контуре II проводник 3 является зеркальным отображением проводника I и во всех дальнейших расчетах влияние тока этого про-

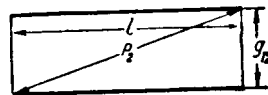


Рис. 3.

водника на поле контура I в настоящей работе учитывается.

Влияние токов отрезков 4 на поле контура I в дальнейшем не учитывается, так как взаимноиндуктивность двух отрезков проводников, расположенных по одной оси, практически очень мала по сравнению с индуктивностью самого отрезка. Однако, при необходимости более точного расчета предлагаемые в этой работе формулы дают возможность учета влияния токов всех отрезков контура II на поле контура I.

Расчетные формулы для определения условных индуктивностей и взаимноиндуктивностей. Расчетные формулы для определения индуктивности и взаимноиндуктивности отрезков конечной длины выведены на основании закона Био-Саварра. Считаем проводник, по которому протекает ток I , состоящим из бесконечно тонких нитей. Делаем предположение, что каждый элемент проводника создает свое элементарное поле и что магнитная индукция в каждой точке складывается из тех магнитных индукций, которые создавались бы под действием каждого из таких элементарных полей в отдельности.

Формулы выведены для проводника конечного сечения. Для удобства интегрирования по сечению применено понятие среднегеометрических расстояний. Вывод формул дан в приложении. В окончательном виде индуктивность уединенного проводника конечной длины

$$L = 0,2\omega^2 l \left[\ln \frac{2l}{g} + \frac{g}{l} - 1 \right] \cdot 10^{-8} [\text{гн}],$$

Взаимноиндуктивность двух параллельных уединенных проводников конечной длины (рис. 3)

$$M_{12} = 0,2\omega^2 l \left[\ln \frac{p+l}{g_{12}} + \frac{g_{12}}{l} - \frac{p}{l} \right] \cdot 10^{-8} [\text{гн}],$$

где g_{12} — среднегеометрическое расстояние между сечениями;

g — среднегеометрическое расстояние сечения от самого себя;

l — длина проводника;

p — диагональ.

Для удобства пользования формулами построены кривые (рис. 4, 5) индуктивного сопротивления самоиндуктивности и взаимноиндуктивности в зависимости от геометрических размеров проводников и расстояния между ними при частоте тока 50 Гц.

Таким образом, задача определения индуктивностей сволится к определению среднегеометрических расстояний площадей сечения самих от себя и друг от друга. Выводом формул среднегеометрических расстояний для различных сечений занимались многие исследователи. Приведем расчетные формулы:

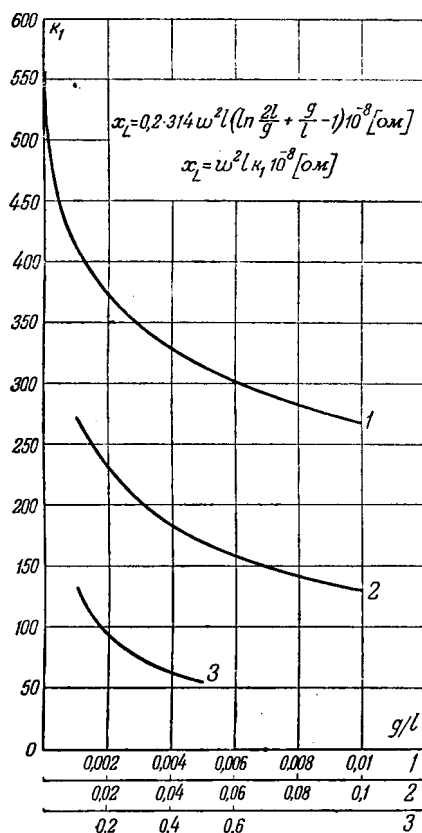


Рис. 4.

среднегеометрическое расстояние площади круга от самого себя

$$g = re^{-\frac{1}{4}} = 0,7788 r;$$

среднегеометрическое расстояние между площадями двух кругов равно расстоянию между их центрами;

среднегеометрическое расстояние площади прямоугольника от самого себя

$$g = 0,224 (a + b),$$

где a и b стороны прямоугольника;

среднегеометрическое расстояние между двумя прямоугольными сечениями

$$\ln g_{12} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{t}{b} \right)^2 \ln g_{b+t} - \left(\frac{t}{b} \right)^2 \ln g_t + \frac{1}{2} \ln g_b,$$

g_t , g_b , $g_{(t+b)}$ — среднегеометрические расстояния прямоугольников с соответствующими размерами от самих себя. Однако, большое количество расчетов индуктивного сопротивления лобовых частей показало, что достигается достаточная точность, если принять за среднегеометрическое расстояние между сечениями расстояние между их центрами (для любых сечений). Ошибка в этом случае весьма невелика [Л. 1].

Изложенным выше методом выведены формулы для определения индуктивности отрезков различной и одинаковой длины, сдвинутых друг относительно друга (рис. 6).

Окончательный вид формул:

для отрезков одинаковой длины

$$M = 0,1 \cdot 314 \cdot \omega^2 10^{-8} [H \ln H + c \ln c - 2\delta \ln \delta] [ом];$$

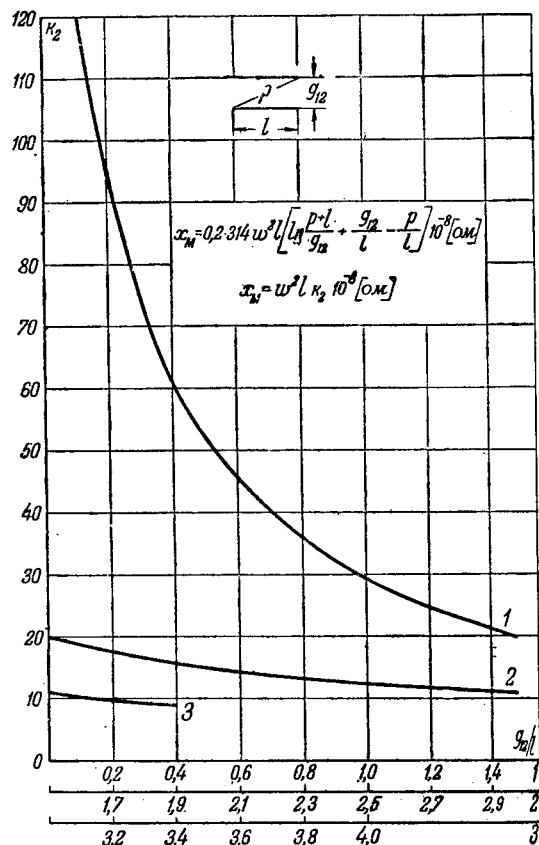


Рис. 5.

для отрезков различной длины

$$M = 0,1 \cdot 314 \omega^2 10^{-8} \left[q + r - s - n + H \ln \frac{g}{H+g} + c \ln \frac{g}{c+r} - \delta_1 \ln \frac{g}{\delta_1+s} - \delta_2 \ln \frac{\ln g}{\delta_2+n} \right] [ом].$$

По этим формулам построены кривые (рис. 5). Экспериментальная проверка. Экспериментальная проверка предложенного метода расчета и формул определения индуктивного сопротивления лобовой части доказало полную пригодность и вполне достаточную точность.

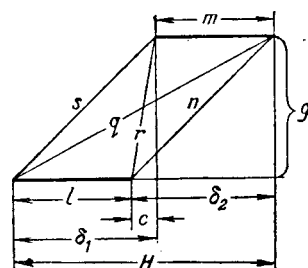


Рис. 6.

Для примера приведем данные испытанной одной опытной машины. Обмотка машины, подвергавшейся испытаниям, была выполнена таким образом, чтобы напряжение, измеренное на концах, равнялось только активному падению напряжения и индуктивному падению напряжения рассеяния лобовой части. С этой целью в

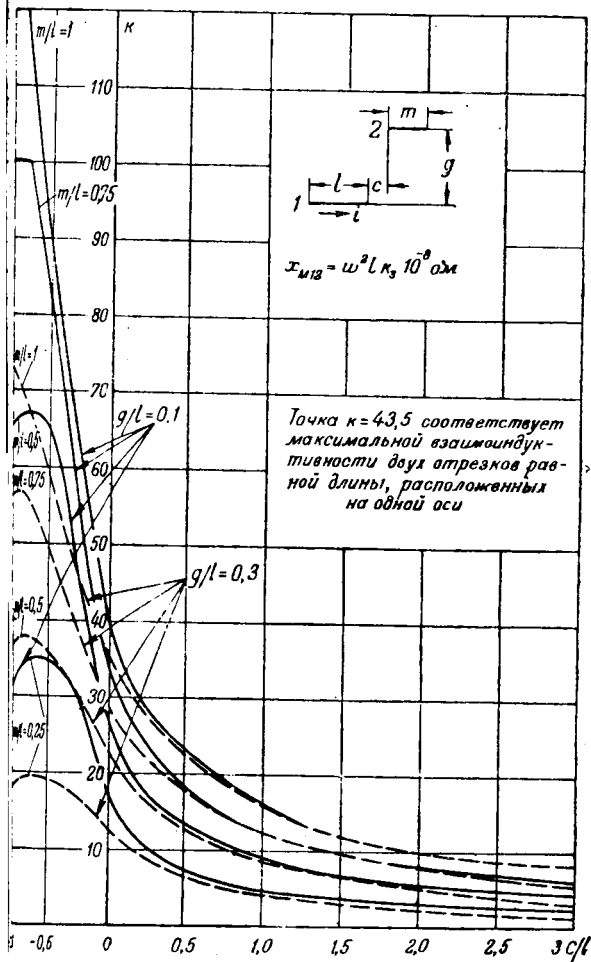


Рис. 7.

двух катушек закладывались в паз бифилярно и направлялись встречно. Как видно из рис. 8, в лобовых частях (отрезки 1) при этом поляра не образуется.

Измерения производились при частоте 500 гц. В качестве примера приведены в таблице.

Данные испытания x , Ом	Данные расчета x , Ом	Расхождение, %
6,37	6,2	3

Расхождение опытных и расчетных данных большинства проведенных опытов не превышает 2—3 %.

Последовательность расчета. Расчет начинается с рассмотрения отдельной катушечной головки лобовой части машины. Как было ранее указано, рассчитывается весь поток, охватывающий катушечную головку, во всем пространстве между катушечной головкой и торцевой частью статорного пакета.

Влияние граничной ферромагнитной среды учитывается методом зеркальных отображений.

Расчетная схема катушечной головки представлена на рис. 10. Сплошными линиями изо-

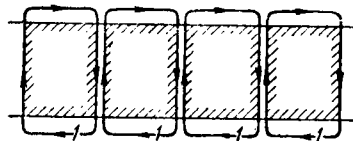


Рис. 8.

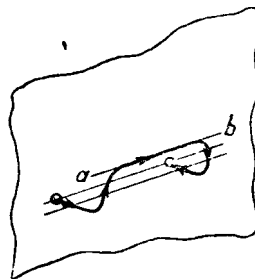


Рис. 9.

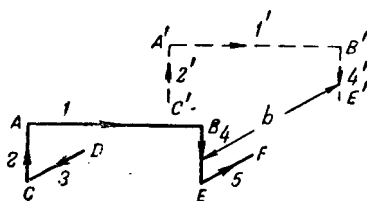


Рис. 10.

бражена действительная катушечная головка, пунктиром—ее зеркальное отображение. Согласно сказанному выше о методе зеркальных отображений, ребра AB , CA , BE , как расположенные параллельно граничной ферромагнитной плоскости, имеют зеркальные отображения $A'B'$, $C'A'$, $B'E'$.

Ребра CD и EF , расположенные перпендикулярно (см. выше), имеют зеркальные отображения, расположенные за расстоянием b , и ввиду их незначительного влияния обычно не учитываются.

Индуктивность такой системы

$$L = L_I + L_{II} + L_{III},$$

L_I — индуктивность аксиальных отрезков 3 и 5;

L_{II} — индуктивность радиальных отрезков—2 и 4;

L_{III} — индуктивность тангенциального отрезка 1.

Для определения L_I рассматриваем систему проводников 5 и 3. Зеркальных отображений в схеме нет. L_3 и L_5 — индуктивные сопротивления отрезков 3 и 5; M_{35} — взаимная индуктивность между отрезками 3 и 5:

$$L_I = 2L_3 - 2M_{35},$$

так как $L_3 = L_5$.

По ранее выведенным формулам для L и M или кривым рис. 4, 5 для данных отношений g/l и g_{12}/l находим значения L_3 и M_{35} или соответственно индуктивные сопротивления в омах.

Для определения L_{II} рассматриваем систему отрезков 2, 4, 2', 4'. Схема имеет зеркальные отображения $C'A'$ и $E'B'$:

$$L_{II} = L_2 + L_4 - 2M_{24} + M_{22'} + M_{44'} - M_{42'} - M_{24'}$$

$$L_2 = L_4; M_{22'} = M_{44'}; M_{42'} = M_{24'};$$

$$L_{II} = 2(L_2 - M_{24'} + M_{22'} - M_{42'}).$$

Все составляющие находятся по кривым рис. 4, 5.

Индуктивность L_{III} определяется для системы проводников 1, 1'

$$L_{III} = L_1 + M_{1,1'}.$$

Составляющие находим, как и в предыдущем случае, по кривым рис. 4, 5. Таким образом, можно определить индуктивное сопротивление одной катушечной головки.

Определив индуктивность одной катушечной головки указанным выше методом, можно рассчитать общее индуктивное сопротивление всей лобовой части, рассматривая ее как последовательное соединение индуктивностей отдельных катушечных головок.

Учет влияния взаимной индукции соседних катушечных головок. Поток взаимной индукции соседних катушечных головок многие исследователи считают возможным не учитывать. Расчеты и опыты, проведенные автором, подтвердили возможность этого. Однако, предложенный выше метод расчета индуктивностей позволяет в случае надобности оценить величину взаимной индуктивности соседних катушечных головок. Схема для расчета показана на рис. 11. Практически можно ограничиться учетом влияния только соседних катушек и рассматривать задачу плоской.

Для определения индуктивного влияния головки b на головку a следует учесть потоки, образующиеся в плоскости катушки a от всех отрезков катушечной головки b . Задача опять сводится к определению индуктивности системы из двух отрезков конечной длины. Последовательно будут определяться индуктивности M_{14} , M_{34} , M_{16} , M_{36} . Так как M_{14} и M_{34} , M_{16} и M_{36} имеют разные знаки, в результате учитывается нужный нам поток в плоскости катушки a .

Формулы для определения индуктивности отрезков различной и одинаковой длины, сдвинутых друг относительно друга, приведены выше. Влияние на общую индуктивность лобовой части статорной обмотки взаимной индуктивности головок ротора можно также учесть предложенным методом. Если ротор короткозамкнут, можно разбить кольцо на прямые участки соответственно количеству катушечных головок статора и учитывать взаимную индуктивность между

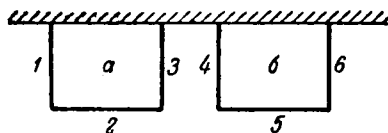


Рис. 11.

отрезками по выведенным формулам. Как и в предыдущих расчетах, влияние ротора весьма незначительно.

Закключение. При определении потоковосцеплений с лобовыми частями обмотки, которые условно рассматривали как рассеяние лобовых частей электрических машин, возникает ряд вопросов, разрешение которых как расчетным так и экспериментальным путем связано с известными затруднениями. Существующие эмпирические формулы для разных типов катушек весьма приближенные и иногда дают простоя верные результаты. Для некоторых типов обмоток предложены формулы, основанные на математическом анализе. Формулы эти получаются весьма громоздкими. Авторам приходилось упрощения вводить ряд допущений и опытно определять коэффициенты, снижающие точность и надежность расчетов. Предложенный метод для определения рассеяния лобовой части достаточно прост и удобен для практического использования. Экспериментальная проверка доказывает вполне достаточную точность метода без введения каких-либо опытных коэффициентов.

Приложение. Вывод формулы индуктивности взаимной индуктивности отрезков конечной длины. Согласно закону Био-Саварра (рис. 12)

$$dB = \frac{\mu I dl}{4\pi R^2} \sin \alpha = \frac{0,4\pi I dl}{4\pi R^2} \sin \alpha \cdot 10^{-8} = 0,1 I \frac{dl}{R^2} \sin \alpha \cdot 10^{-8} [\text{в сек/см}^2].$$

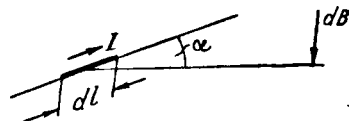


Рис. 12.

Индукция в любой точке p на расстоянии a от проводника длины l , несущего ток i (рис. 13)

$$B = 0,1 \cdot i \cdot \frac{1}{a} \left[\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + a^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right] 10^{-8} [\text{в сек/см}^2].$$

Средняя индукция в отрезке длины l (рис. 14) по длине проводника:

$$B_{cp} = 0,2 \cdot i \cdot \frac{p-a}{al} 10^{-8} [\text{в сек/см}^2].$$

Если проводник имеет сечение s (рис. 15), то для определения средней индукции, которая создается этим проводником на отрезке l , следует B_{cp} проинтегрировать по сечению. Сечение s состоит из бесконечно тонких слоев, по которым протекает ток $\frac{i}{s}$:

$$B_{cp} = 0,2 \cdot i \cdot \frac{p-a}{l} \frac{1}{s} \int_p \frac{1}{\rho} ds \cdot 10^{-8}.$$

Для решения этого интеграла применим понятие среднегеометрических расстояний. Согласно Максвеллу среднегеометрическое расстояние всех точек одной площадки от всех точек другой равно g_{12} :

$$\ln g_{12} = \frac{1}{s_1 s_2} \iint \ln \rho ds_1 ds_2.$$

гипергеометрическое расстояние площади сечения от себя g :

$$\ln g = \frac{1}{s_1^2} \int_{s_1} \int_{s_1} \ln r ds_1 ds_1.$$

В нашем случае сечение одного отрезка составляет s , этого равно нулю:

$$\ln g_{12} = \frac{1}{s_1} \int_s \ln \rho ds_1.$$

Выражение для интегрирования по площади в нашем случае имеет вид:

$$\frac{1}{s} \int_s \frac{1}{\rho} ds.$$

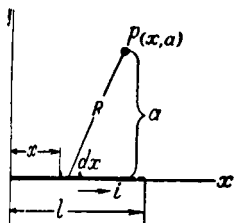


Рис. 13.

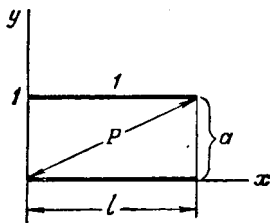


Рис. 14.

что доказать, что, не делая большой погрешности, можно принять (вывод опускаем)

$$\frac{1}{s} \int_s \frac{1}{\rho} ds = \frac{1}{g_{12}}.$$

$$B_{cp} = 0,2i \frac{p-a}{g_{12}l} 10^{-8}.$$

где $(p-a)$ получен в результате определения угла α — расстояние между центрами сечения.

Считаем, что оси сечений проведены на расстоянии гипергеометрического расстояния между сечениями g_{12} . Это доказать, что ошибка при этом получается весьма значительная. Тогда

$$B_{cp} = 0,2i \frac{p-g_{12}}{g_{12}l} 10^{-8}.$$

поток, который создается проводником сечения s , длины l прямоугольнике той же высоты l :

$$\Phi = 0,2 \cdot i 10^{-8} \left[\ln \frac{g_{12} p_1 + l}{g p_2 + l} - \frac{(g_{12} - g)(p_2 - p_1)}{l} \right].$$

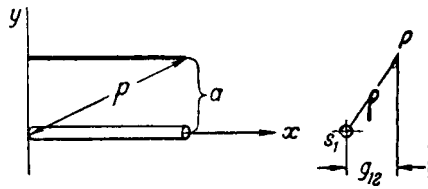


Рис. 15.

На основании всех предыдущих выводов определим поток в пространстве между двумя проводниками длины l , одинакового поперечного сечения s , числа витков w :

$$\Phi = 0,4 \cdot i w l \cdot 10^{-8} \left[\ln \frac{g_{12}}{g} \frac{2l}{p_2 + l} - \frac{(g_{12} - g)(p_2 - l)}{l} \right].$$

Определим индуктивность L системы двух проводников:

$$L = 0,4 w^2 l \left[\ln \frac{g_{12}}{g} \frac{2l}{p_2 + l} - \frac{(g_{12} - g)(p_2 - l)}{l} \right] 10^{-8} [\text{гН}].$$

Выделим отдельно составляющие, относящиеся к самому проводнику, и составляющие общие для обоих проводников:

$$L = \left[0,2 w^2 l \cdot 10^{-8} \left(\ln \frac{2l}{g} + \frac{g}{l} - 1 \right) \right] - \left[0,2 w^2 l \cdot 2 \cdot 10^{-8} \left(\ln \frac{p_2 + l}{g_{12}} + \frac{g_{12}}{l} - \frac{p_2}{l} \right) \right] = 2L_1 - 2M_{12}.$$

Первый член определяет собственную индуктивность проводника, второй — взаимную индуктивность.

Такое определение является удобным математическим приемом, допустимым потому, что в результате определения индуктивности контура мы всегда обязательно определяем обе эти составляющие. Итак, индуктивность системы, состоящей из двух проводников конечной длины и одинакового сечения несущих токи разного направления,

$$L_1 = 0,2 w^2 l \left[\ln \frac{2l}{g} + \frac{g}{l} - 1 \right] \cdot 10^{-8} [\text{гН}],$$

$$M_{12} = 0,2 w^2 l \left[\ln \frac{p_2 + l}{g_{12}} + \frac{g_{12}}{l} - \frac{p_2}{l} \right] 10^{-8} [\text{гН}].$$

Литература

1. И. В. Шехтман. Индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей однофазных обмоток. Диссертация МЭИ.
2. Л. Р. Нейман и П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники, т. III, 1949.
3. В. Ю. Ломоносов. Магнитное поле лобовых частей обмотки. Труды Московского энергетического института им. Молотова, вып. 3, 1949.

[18.9.1949]



Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин

Кандидат техн. наук, доц. Б. И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Аналитическим выражением кривой намагничивания или характеристикой холостого хода электрических машин можно пользоваться при решении задач расчета переходных процессов, в частности при изучении вопросов устойчивости работы электрических машин, работающих отдельно или совместно с линиями передачи электрической энергии.

К уравнению, выражающему характеристику холостого хода, следует предъявить следующие требования:

1. Оно должно возможно точно выражать зависимость э. д. с. машины (или потока) от тока возбуждения.

2. Должно давать возможно более точную зависимость производной э. д. с. по току возбуждения $\left[\frac{dE}{di} = f(i) \right]$.

3. Не должно приводить к слишком сложным для производства вычислениям.

4. Оно не должно содержать большого количества постоянных.

Предметом настоящего исследования является выяснение, насколько некоторые из аналитических выражений кривой намагничивания удовлетворяют первым двум требованиям.

Число постоянных в уравнении берем не больше двух из следующих соображений.

В качестве объекта для сравнения взята «нормальная» характеристика холостого хода. Она является какой-то средней кривой из многих действительных и можно ожидать, что уравнения, точно выражающие ее, будут достаточно хорошо отображать и действительные характеристики. Постоянные в частных случаях, конечно, могут быть различными.

Для возможности оценки кривых $\frac{dE}{di} = f(i)$ найдена зависимость производной от «нормальной» характеристики по току. Использован метод конечных разностей. Применена формула с центрированными разностями [Л. 1, § 36]. В табл. 1

Рассмотрен ряд выражений зависимости э. д. с. электрических машин от тока возбуждения и производной э. д. с. по току возбуждения $\frac{dE}{di} = f(i)$.

Оказалось, что наилучшее приближение обеих кривых к нормальной характеристике холостого хода дает выражение вида $E = A \operatorname{arctg} Bi$.

приведены значения $\frac{dE}{di}$ в зависимости от i .

Рассмотренные выражения и вычисленные коэффициенты приведены в табл. 2.

Коэффициенты более простых уравнений ходились по методу минимальной средней ошибки [Л. 2]. Постоянные по этому методу определяются так, чтобы алгебраическая сумма расхождений между действительными ординатами и вычисленными по формуле была близка к нулю.

Пример расчета дан в приложении 1.

Для определения постоянных в более сложных уравнениях, выражаемых табулируемыми функциями, задавались различными значениями постоянной, стоящей под знаком функции, а в уравнении определяли опять из условия равенства нулю алгебраической суммы всех отклонений вычисленной кривой от нормальной.

Для удобства сравнения в той же таблице дана сводка данных, характеризующих точность каждого уравнения. Отмечены наибольшие отклонения ΔE_{\max} , вычисленной по данному уравнению кривой от нормальной с указанием тока возбуждения, при котором получается это отклонение, и приведены средние отклонения всей кривой. Все отклонения выражены в долях единицы.

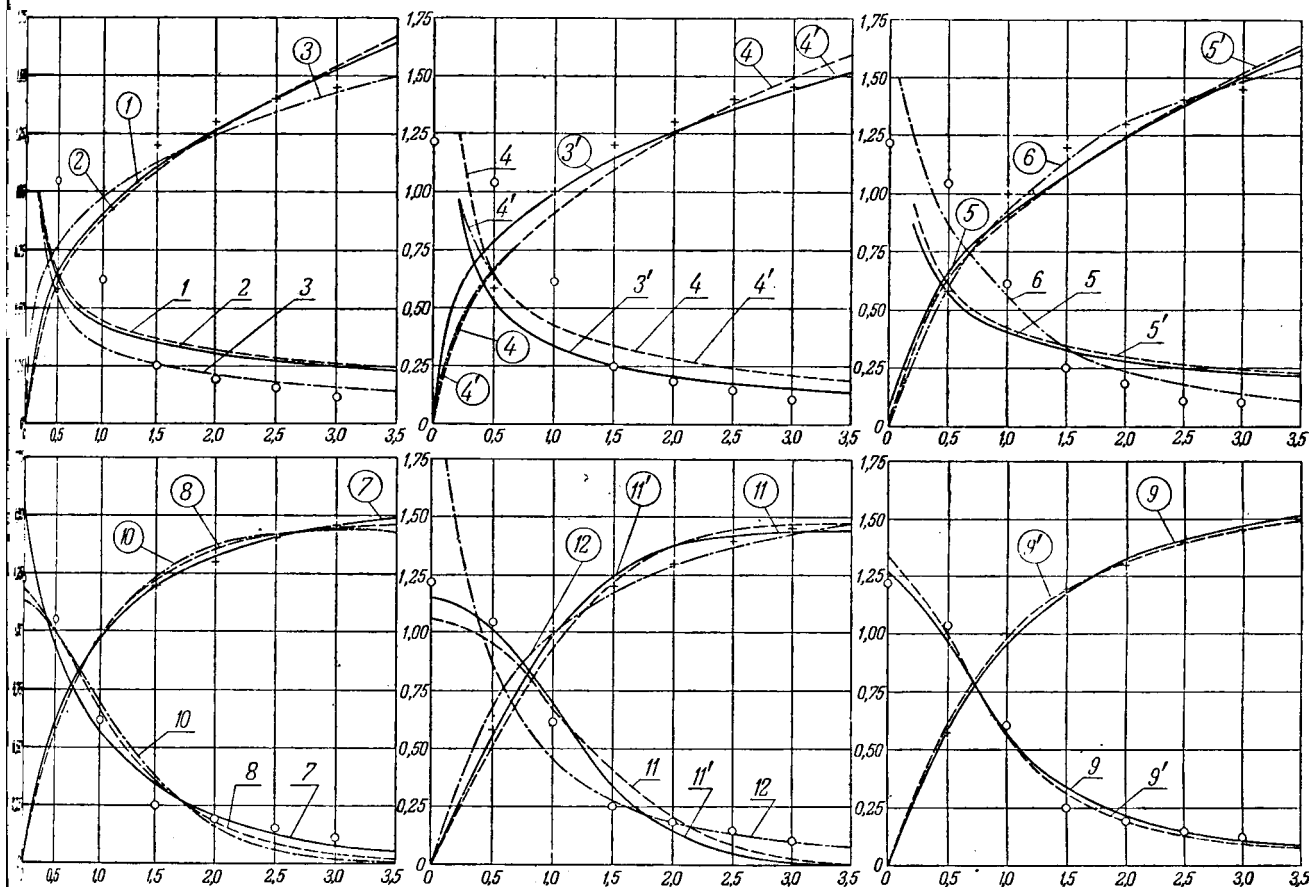
Сравнение уравнений для производной

Уравнения можно разделить на три группы

Табл.

Зависимость E и $\frac{dE}{di}$ от i

i	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
E	0	0,58	1,0	1,2	1,3	1,4	1,45
$\frac{dE}{di}$	1,22	1,044	0,616	0,248	0,187	0,15	0,11



Кривые намагничивания и их производные (цифры у кривых соответствуют номерам уравнений в табл. 2).

1. Уравнения, дающие $\frac{dE}{di} = \infty$ при $i=0$. К этой группе относятся уравнения (1), (2), (3), (3'), (4), (4'), (5) и (5') (табл. 2). Кривые этой группы наиболее отклоняются от кривой для нормальной характеристики. Очевидно, эти кривые нельзя применять для исследования явлений при малых насыщениях машин.

2. Уравнения, для которых $\frac{dE}{di} = f(i)$ имеет точку перегиба, как кривая для нормальной характеристики. К этой группе относятся уравнения (8), (9), (10) и (11). Кривые производной этой группы наиболее приближаются по форме к кривой $\frac{dE}{di} = f(i)$ для нормальной характеристики.

3. Уравнения, для которых $\frac{dE}{di} = f(i)$, не имеет точки перегиба, но при $i=0$ $\frac{dE}{di} \neq \infty$. К этой группе относятся уравнения (6), (7) и (12).

На рисунке представлены результаты всех расчетов. Цифры в кружках поставлены у кривых намагничивания и указывают номер зависимости. Цифры на „полках“ присвоены кривым, показывающим зависимость производной э. д. с. от тока возбуждения; они также указывают номер уравнения. Для сравнения на рисунке точки, принадлежащие нормальной кривой намагничивания, нанесены крестиками, а точки, принадлежащие

производной от нормальной кривой, нанесены кружками.

Выводы. Рассматривая табл. 2 и рисунок, можно видеть, что наилучшее приближение дает формула (9), затем (7), (8), (12) и (6).

Сравнивая производные, можно сделать вывод, что наиболее точное приближение дает уравнение (9), затем (11), (8) и (10).

Таким образом, следует считать, что наилучшее приближение как кривой намагничивания, так и ее производной дает уравнение (9):

$$E = A \operatorname{arctg} Bi.$$

Приложение 1. Нахождение постоянных в уравнении (4)

$$E = A \sqrt{i} - Bi.$$

Для нахождения A и B составляем два уравнения вида:

$$A\sqrt{i} - B\sum i = \sum E_n$$

Все расчеты сведены в табл. 3.

Для первого уравнения взяты две первые точки, для второго — остальные пять.

Уравнения будут:

$$1,707 A - 1,5 B = 1,58,$$

$$7,823 A - 12,5 B = 6,85.$$

Решив их, получим $A = 0,985$ и $B = 0,068$.

Уравнение имеет вид:

$$E = 0,985 \sqrt{i} - 0,068 i.$$

Сравнение уравнений по точности

Таблица

Номер уравнения	Уравнение	Коэффициенты		$\Delta E_{\text{макс}}, \%$	Ток возбуждения i, a	Среднее отклонение $\Sigma \Delta E, \%$	Номер уравнения	Уравнение	Коэффициенты		$\Delta E_{\text{макс}}, \%$	Ток возбуждения i, a	Среднее отклонение $\Sigma \Delta E, \%$
		A	B						A	B			
(1)	$E = A \sqrt{i}$	0,914	2,14	13,7	3,5	7,6	(9')	$E = A \operatorname{arctg} Bi$	1,1	1,1	4	1,0	1,7
(2)	$E = A \sqrt{i}$	0,884	—	16,0	3,5	8,0	(9)	$E = A \operatorname{arctg} Bi$	1,12	1,2	2,6	1,0	1,0
(3)	$E = A \sqrt{i}$	0,99	—	20,6	0,5	5,3	(10) ¹	$E = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{Bi} e^{-t^2} dt$	1,44	0,7	7,4	2,0	3,9
(3')	$E = \sqrt{i}$	—	—	21,4	0,5	5,4							
(4)	$E = A \sqrt{i} - Bi$	0,985	0,068	10,3	3,5	6,7	(11) ²	$E = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Bi} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz$	2,96	0,9	6,6	0,5	4,3
(4')	$E = \sqrt{i} - Bi$	—	0,0787	9,7	1,5	6,8							
(5)	$E = A \sqrt{i} + B$	0,82	0,038	12,1	3,5	7,6	(11) ¹	$E = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Bi} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz$	2,833	1,0	7,1	2,0	3,9
(5')	$E = A \sqrt{i} + B$	0,855	0,04	14	3,5	7,8							
(6)	$E = \frac{i}{A + Bi}$	0,59	0,475	5,8	1,0 и 3,5	3,5	(12) ³	$E = \frac{1 + A}{1 + Ai} i$	1,21	—	10,7	0,5	2,9
(7)	$E = A(1 - e^{-i})$	1,58	—	3,4	1,0	1,6							
(8)	$E = A \operatorname{th} Bi$	1,47	0,8	5,5	2,0	2,6							

¹ Функция $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ называется в [Л. 3] интегралом вероятностей, функцией Крампа, у Янке и Эмде [Л. 4] гауссовым интегралом распределения ошибок или интегралом вероятности ошибок.

В указанной литературе имеются таблицы как самой функции, так и ее производных, поэтому она, несмотря на кажущуюся сложность, удобна для расчетов.

² Функция Лапласа [Л. 5]

³ См. [Л. 6].

Таблица

1	i	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
2	E_n	0,58	1,0	1,2	1,3	1,4	1,45	1,5
3	\sqrt{i}	0,707	1,0	1,225	1,414	1,581	1,732	1,871
4	$0,985 \sqrt{i}$	0,696	0,985	1,203	1,393	1,557	1,705	1,841
5	$0,038 i$	0,034	0,068	0,102	0,136	0,17	0,204	0,238
6	E	0,662	0,917	1,104	1,257	1,387	1,501	1,603
7	$\Delta E = E - E_n$	0,032	-0,033	-0,096	-0,043	-0,013	0,051	0,103
8	$\frac{0,985}{2\sqrt{i}}$	0,697	0,493	0,402	0,348	0,311	0,284	0,263
9	$\frac{dE}{di}$	0,629	0,424	0,334	0,280	0,243	0,216	0,190

Шестая строка табл. 3 дает значения E , полученные из данного уравнения. Седьмая дает отклонения полученной кривой от нормальной.

Производная будет иметь вид:

$$\frac{dE}{di} = \frac{0,985}{2\sqrt{i}} - 0,038.$$

Восьмая и девятая строки дают ее вычисление.

Литература

1. Э. Уиттекер и Г. Робинсон. Математическая обработка результатов наблюдений. ОНТИ, 364 стр., 1935.

2. М. Л. Цуккерман. Эмпирические формулы периодического характера. Госэнергоиздат, 96 стр., 1948.

3. К. А. Семендяев. Эмпирические формулы. ГИИ, 88 стр., 1938.

4. Е. Янке и Ф. Эмде. Таблицы функций с формулами и кривыми. Гостехиздат, стр. 420, 1948.

5. С. Н. Бернштейн. Теория вероятностей. Гостиздат, 556 стр., 1946.

6. Е. В. Нитусов. О переходных процессах в цепях постоянного тока. Электричество, 51 стр., № 1, 1948.

7. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со статическими элементами. Госэнергоиздат, 344 стр., 1948.

[20. 9. 1948]



Асинхронные моменты высших гармоник асинхронного электродвигателя

Кандидат техн. наук О. Б. ПЕВЗНЕР

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В процессе пуска и торможения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором действительные значения его вращающего момента, измеренные посредством динамометра

на машины постоянного тока, могут существенно отличаться от расчетных значений момента. Расхождение может иметь место даже в том случае, когда числа пазов статора и ротора выбраны такими, чтобы устранить возможность появления синхронных паразитных моментов. В этом случае искажения кривой моментов с характерными «провалами» при близких к единичным скольжениях обусловлены асинхронными дополнительными моментами. Эти моменты возникают вследствие неравномерной проводимости воздушного зазора, обусловленной наличием открытых пазов, и действия высших гармонических м. д. с., вызванных сосредоточенным расположением обмоток в пазах.

Большое количество работ по расчету асинхронных моментов, опубликованных в периодической печати, выявило значительные расхождения во взглядах на причины возникновения асинхронных моментов. До сих пор нет метода, позволяющего определить эти моменты с достаточной для практических целей точностью, что объясняется сложностью рассматриваемого физического процесса.

На основании литературных источников и самостоятельного исследования автора здесь предлагается метод расчета дополнительных асинхронных моментов при различных значениях скольжения и доказывається в противоположность установившимся взглядам большое влияние обратно бегущей зубцовой волны на начальную часть пусковой характеристики электродвигателя. Предложенный метод не учитывает неравномерной проводимости воздушного зазора и не может претендовать на полное описание рассматриваемого процесса. Однако, полученные выводы дают возможность с качественной стороны

Рассматриваются методы расчета асинхронных дополнительных моментов вращения асинхронного короткозамкнутого двигателя, создаваемых зубцовыми гармониками поля при равномерном воздушном зазоре. Получены выражения для расчета моментов зубцовых гармоник при различных значениях скольжения и установлена необходимость учета влияния обратнобегущей зубцовой волны в процессах торможения и пуска двигателя.

правильно оценить влияние различных факторов на кривую вращающих моментов.

Полная эквивалентная схема. При расчете момента вращения асинхронного двигателя обыч-

но ограничиваются определением момента, создаваемого основной гармоникой м. д. с. Влияние пространственных высших гармонических учитывается введением в эквивалентную схему (рис. 1) реактивных сопротивлений дифференциального рассеяния: статора x_{1d} и ротора x'_{2d} , соответствующих тем значениям э. д. с. рассеяния, которые индуктируют в статорной цепи высшие гармоники м. д. с. статора, а в роторной цепи высшие гармоники м. д. с. ротора. В схеме рис. 1: x_{mp} — реактивное сопротивление главной гармоники, соответствующее потоку взаимоиндукции; x_{1ns} и x'_{2ns} — реактивные сопротивления статора и ротора, обусловленные потоками рассеяния в пазах и вокруг лобовых частей; r_1 и r'_2 — активные сопротивления обмоток. Штрих над символом указывает, что величина приведена к первичной обмотке; s_p — скольжение по отношению к главной гармонике.

В этой схеме совершенно не учитывается реакция вторичного контура на высшие гармоники. При высоких значениях скольжения, когда $s_p > 0,5$, не всегда можно пренебречь индуктированными в роторе короткозамкнутого двигателя нормальными токами выс-

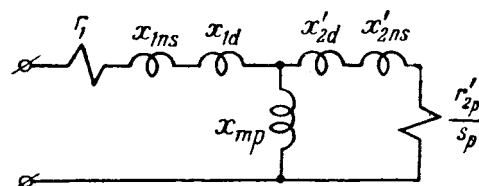


Рис. 1. Обычная эквивалентная схема асинхронного электродвигателя.

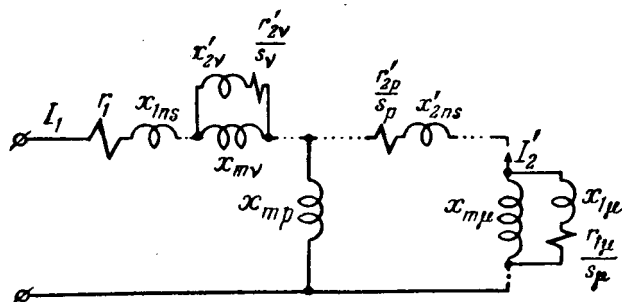


Рис. 2. Полная эквивалентная схема асинхронного двигателя.

ших гармоник. Во многих случаях это приводит к неправильному определению пусковых характеристик.

На рис. 2 изображена полная эквивалентная схема [Л. 11]. В статорной и роторной цепи показано для простоты по одной дополнительной гармонике. Прерывистая линия обозначает бесконечный ряд гармоник. В этой схеме: x_{mv} , x_{mp} — реактивные сопротивления, соответствующие потокам взаимной индукции v -той гармоники м. д. с. статора и μ -той гармоники м. д. с. ротора; x'_{2v} и $x_{1\mu}$ — реактивные сопротивления, соответствующие потокам рассеяния, которые определяются токами, индуктированными в роторе v -той, а в статоре μ -той гармоникой; r'_{2v} — приведенное значение активного сопротивления ротора по отношению к v -той гармонике статора; $r_{1\mu}$ — сопротивление статора по отношению к μ -той гармонике ротора.

Каждую гармонику можно рассматривать, как принадлежащую некоторому элементарному двигателю, у которого при холостом ходе в кривой м. д. с. содержится только эта гармоника [Л. 10]. Тогда весь ряд гармоник м. д. с. статора может быть представлен рядом последовательно включенных двигателей, первичные обмотки которых обтекаются одним и тем же током I_1 .

Электродвигатель, соответствующий главной гармонике, будем именовать главным электродвигателем, а электродвигатели, соответствующие остальным гармоникам м. д. с., — дополнительными электродвигателями, присваивая каждому из них порядковый номер возбуждающей гармоники. Аналогично, гармоники м. д. с. ротора могут быть представлены бесконечным рядом последовательно включенных двигателей, первичные обмотки которых обтекаются током ротора I'_2 . Вторичной обмоткой для этих двигателей служит обмотка статора, которую можно полагать для высших гармоник замкнутой накоротко через сеть.

Все элементарные двигатели следует рассматривать механически соединенными друг с другом так, что величина скольжения в них определяется скоростью вращения ротора реального двигателя. Каждый дополнительный двигатель создает вращающий момент, который мо-

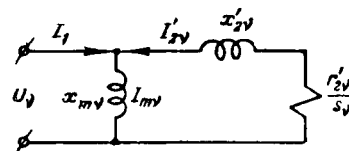


Рис. 3. Эквивалентная схема элементарного двигателя.

жет увеличить или уменьшить момент главного двигателя в зависимости от величины скольжения. Однако, при обычных соотношениях частоты статора и ротора реакция обмотки статора по отношению к высшим гармоникам м. д. с. короткозамкнутого ротора ничтожно мала, так как обмоточные коэффициенты статора по отношению к этим гармоникам малы. По этой причине гармоники м. д. с. ротора при равномерном воздушном зазоре не могут вызвать в обмотке статора сколько-нибудь значительных токов и, следовательно, не могут создавать заметные дополнительные моменты вращения.

Расчет вращающего момента элементарных двигателей. Определение момента, создаваемого дополнительным двигателем v , можно выполнить, исходя из эквивалентной схемы, в которой контуры гармоник, не равных v (в том числе и контуры гармоник), рассматриваются как контуры рассеяния по отношению к v -той гармонике [Л. 10]. Этот метод принципиально точен, но практически весьма неудобен из-за большого количества параметров, входящих в эквивалентную схему. Задача значительно упрощается, приняв во внимание, что в интересующих нас случаях изменения скольжения высших гармоник величина может быть принята неизменной. Она может быть найдена известным путем [Л. 8], пользуясь круговой диаграммой для главной гармоники при значении скольжения соответствующего синхронной скорости v -той гармо-

$$s_{pv} = 1 - \frac{p}{v}.$$

Это допущение позволяет рассматривать каждый дополнительный двигатель самостоятельно. На рис. 3 изображена эквивалентная схема [Л. 4]. В этой схеме: U_v — значение напряжения на зажимах двигателя, соответствующее от s_v ; I_{mv} — намагничивающий ток; I'_{2v} — значение индуктированного v -той гармоникой в роторе.

При холостом ходе по отношению к v -той гармо-

$$s_v = 0, \quad U_{v0} = jI_1 x_{mv} \text{ и } I'_{2v} = 0.$$

При других значениях скольжения основная гармоника м. д. с. индуктированного в роторе тока I'_{2v} , уменьшает магнитный поток дополнительного двигателя и соответственно напряжение на его зажимах.

При $s_v = \infty$ напряжение достигает минимального значения:

$$\dot{U}_{v\infty} = jI_1 \frac{x_{mv} x'_{2v}}{x_{mv} + x'_{2v}}.$$

¹ Порядковый номер гармоники здесь и в дальнейшем равен числу пар полюсов данной гармоники. В воздушном зазоре на протяжении всей расточки, что позволяет избежать появления дробных номеров гармоник. Таким образом, синхронная гармоника имеет номер v [Л. 7].

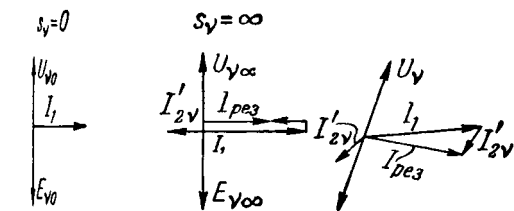


Рис. 4. Векторные диаграммы элементарного электродвигателя при $s_v = 0$, $s_v = \infty$ и некотором промежуточном значении скольжения [Л. 11].

На рис. 4 изображены векторные диаграммы дополнительного двигателя при $s_v = 0$, $s_v = \infty$ и промежуточном значении скольжения.

Уравнения напряжений для первичной и вторичной цепей двигателя могут быть представлены в следующем виде:

$$\dot{U}_v = j(I_1 + I'_{2v})x_{mv}, \quad (2)$$

$$0 = -I'_{2v}r'_{2v} - jI'_{2v}x'_{2v}s_v - j(I_1 + I'_{2v})x_{mv}s_v. \quad (3)$$

Решая эти выражения, получаем:

$$I'_{2v} = -j \frac{I_1 x_{mv}}{\frac{r'_{2v}}{s_v} + j(x'_{2v} + x_{mv})}, \quad (4)$$

$$\dot{U}_v = I_1 x_{mv} \frac{-x'_{2v} + j \frac{r'_{2v}}{s_v}}{\frac{r'_{2v}}{s_v} + j(x'_{2v} + x_{mv})}. \quad (5)$$

Геометрические места концов векторов напряжения и тока являются окружностями, так как их уравнения в комплексной плоскости имеют вид:

$$\frac{\dot{A} + \dot{B}\lambda}{\dot{C} + \dot{D}\lambda},$$

где \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} и \dot{D} — постоянные комплексные числа, а λ — переменная.

На рис. 5 изображена круговая диаграмма дополнительного двигателя.

При изменении скольжения от $s_v = 0$ до $s_v = +\infty$ вектор напряжения изменяется от величины \overline{OA} до величины \overline{OB} , описывая полуокружность AMB . Левая полуокружность соответствует генераторному режиму. Подведенная мощность

$$P_{1v} = 3U_v \cos \varphi_v, \quad I_1 = 3U_{va} I_1 = 3I_1^2 x_{mv}^2 \times \frac{\frac{r'_{2v}}{s_v}}{\left(\frac{r'_{2v}}{s_v}\right)^2 + (x'_{2v} + x_{mv})^2}, \quad (6)$$

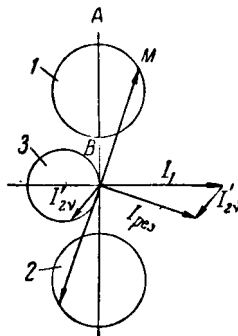
\dot{U}_v — активная составляющая напряжения \dot{U}_v (5).

Активное сопротивление первичной цепи равно нулю, поэтому можно написать следующее выражение для момента дополнительного двигателя, выражая его в синхронных пд, приведенных к синхронной скорости главной машины:

$$M_v = \frac{P_{1v}}{\omega_v} \omega_p = \frac{v}{p} P_{1v}. \quad (7)$$

Рис. 5. Круговая диаграмма элементарного электродвигателя.

1 — геометрическое место концов вектора напряжения на зажимах электродвигателя; 2 — концов вектора э. д. с.; 3 — геометрическое место концов вектора тока, индуцированного в короткозамкнутом роторе.



Подставляя (6), получаем:

$$M_v = 3I_1^2 x_{mv}^2 \frac{v}{p} \frac{\frac{r'_{2v}}{s_v}}{\left(\frac{r'_{2v}}{s_v}\right)^2 + (x'_{2v} + x_{mv})^2}. \quad (8)$$

Определяя отсюда выражение для максимального момента получаем:

$$M_{\max v} = 1,5 I_1^2 \frac{x_{mv}}{1 + \frac{x'_{2v}}{x_{mv}}} \frac{v}{p}. \quad (9)$$

Скольжение, соответствующее максимальному моменту:

$$s_{v \max} = \frac{r'_{2v}}{x_{mv} + x'_{2v}}. \quad (10)$$

Сравнивая выражение (8) и (9), получаем весьма удобное для подсчета моментов выражение

$$\frac{M_{\max v}}{M_v} = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{r'_{2v}}{s_v}}{x'_{2v} + x_{mv}} + \frac{x'_{2v} + x_{mv}}{\frac{r'_{2v}}{s_v}} \right). \quad (11)$$

Для высоких номеров гармоник, к которым относятся гармоники зубцового порядка, реактивное сопротивление дифференциального рассеяния x'_{2dv} почти полностью определяет реактивное сопротивление вторичного контура x'_{2v} , т. е. при приближенных расчетах можно принимать, что

$$x'_{2v} \approx x'_{2dv}.$$

Учитывая, что [Л. 2]

$$1 + \frac{x'_{2dv}}{x_{mv}} = \frac{\left(\frac{\pi v}{z_2}\right)^2}{\left(\sin \frac{\pi v}{z_2}\right)^2} \quad (12)$$

и

$$\frac{x_{mv}}{x_{mp}} = \frac{p^2}{v^2} \left(\frac{k_{w1v}}{k_{w1p}} \right)^2, \quad (13)$$

получаем окончательное выражение для определения максимального момента:

$$M_{\max v} = 1,5 I_1^2 x_{mp} \frac{p}{v} \left(\frac{\sin \frac{\pi v}{z_2}}{\frac{\pi v}{z_2}} \right)^2 \left(\frac{k_{w1v}}{k_{w1p}} \right)^2, \quad (14)$$

где k_{w1v} и k_{w1p} — обмоточные коэффициенты статора по отношению к v -той и главной гармонике;

$$x_{mp} = \frac{U}{I_{06}} - x_1, \quad (15)$$

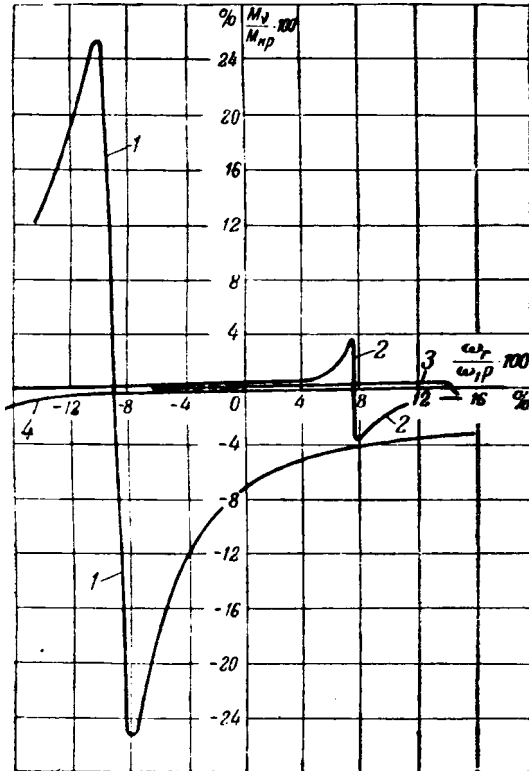


Рис. 6. Кривые вращающих моментов, создаваемых высшими гармониками при равномерном воздушном зазоре.

1 — обратобегущая зубцовая волна, $\nu = z_1 - p$; 2 — прямобегущая зубцовая волна, $\nu = z_1 + p$; 3 — гармоника $\nu = 7p$; 4 — гармоника $\nu = 5p$ ($z_1 = 36$, $z_2 = 44$, $2p = 6$, $\delta = 0,35$ мм, сокращение шага, $\beta = \frac{5}{6}$).

$I_{0\delta}$ — составляющая намагничивающего тока, определяющая значение м. д. с., необходимое для проведения потока через воздушный зазор;

$$x_1 = x_{1ns} + x_{1d} \quad (16)$$

и z_2 — число пазов ротора.

Максимальный момент ν -той гармоники пропорционален квадрату обмоточного коэффициента. Поэтому при рациональном сокращении шага обмотки статора, когда число пазов на полюс и фазу не равно единице, можно значительно уменьшить вредное влияние гармоник $5p$ и $7p$.

Зубцовые гармоники, удовлетворяющие выражению

$$\nu_z = |kz_1 + p|, \quad (17)$$

где k — любое положительное или отрицательное целое число (исключая нуль), удовлетворяют отношению

$$\frac{k\omega_1\nu}{k\omega_1p} = 1 \quad (18)$$

и поэтому, как известно, могут оказывать заметное влияние на кривую моментов.

Максимальные моменты зубцовых гармоник высшего порядка согласно (14) резко уменьшаются с возрастанием ν_z . Наибольшее значение имеют гармоники первого порядка.

Прямобегущая зубцовая волна

$$\nu_{z_1+p} = z_1 + p \quad (19)$$

и обратобегущая зубцовая волна

$$\nu_{z_1-p} = z_1 - p \quad (20)$$

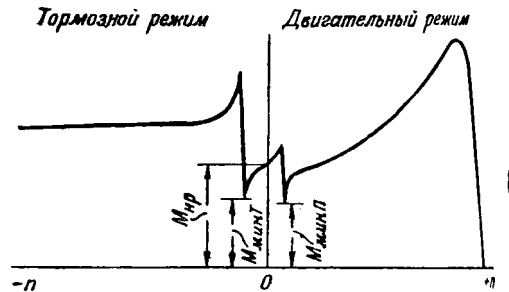


Рис. 7. Искривление кривой моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя под влиянием зубцовых гармоник.

Соответствующие значения моментов будут:

$$M_{\max z_1+p} = 1,5 I_{11}^2 x_{mp} \frac{p}{z_1+p} \left(\frac{\sin \pi \frac{z_1+p}{z_2}}{\pi \frac{z_1+p}{z_3}} \right)$$

$$M_{\max z_1-p} = 1,5 I_{11}^2 x_{mp} \frac{p}{z_1-p} \left(\frac{\sin \pi \frac{z_1-p}{z_2}}{\pi \frac{z_1-p}{z_3}} \right)$$

где I_{11} и I_{12} — значения токов при скольжении, соответствующих максимальным моментам, зубцовых гармоник. Ток I_1 при изменении скольжения от $s_y = 0$ до $s_y = 1$ практически не изменяется, его можно поэтому брать по круговой диаграмме при скольжении

$$s_{p z_1+p} = 1 - \frac{p}{z_1+p},$$

а ток I_{12} при скольжении

$$s_{p z_1-p} = 1 + \frac{p}{z_1-p},$$

соответствующих синхронным скоростям зубцовых гармоник.

На рис. 6 изображены полученные расчетные кривые моментов, создаваемых главной гармоникой и высшими порядками трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя.

По оси абсцисс отложено отношение скорости вращения ротора ω_r к синхронной скорости главной гармоники $\frac{\omega_1}{p}$. По оси ординат отложено отношение момента высших гармоник к начальному моменту основной волны. Как и следовало ожидать, наибольшее значение среди моментов высших гармоник имеют моменты зубцовых гармоник первого порядка. Вопреки распространенному мнению [Л. 3, 5, 7] кривые рис. 6 показывают, что обратобегущая зубцовая волна, создавая весьма значительный паразитный момент в тормозном режиме, создает и в процессе пуска момент, не уступающий по величине максимальному моменту прямобегущей волны.

В результате сложения моментов зубцовых гармоник и главной гармоники получается результирующая кривая (рис. 7) с весьма характерными провалами при скоростях вращения, соответствующих приблизительно синхронным скоростям вращения зубцовых волн:

$$\omega_{z_1+p} = \frac{\omega_1}{z_1+p}$$

при пуске и

$$\omega_{z_1-p} = -\frac{\omega_1}{z_1-p}$$

Если учесть, что в рассматриваемой области изменения момента главной гармоники можно считать постоянным и равным его начальному значению M_{np} , то максимальные значения результирующего момента в периоде пуска $M_{\min n}$ и в периоде торможения $M_{\min T}$ могут быть определены согласно следующим выражениям

$$M_{\min n} \approx M_{np} - M_{\max z_1+p} - M'_{z_1-p}, \quad (27)$$

$$M_{\min T} \approx M_{np} - M_{\max z_1-p} + M'_{z_1+p} \quad (28)$$

M'_{z_1-p} (M'_{z_1+p}) — момент обратнотекущей (прямотекущей) волны при скольжении, соответствующем провалу результирующего момента в периоде пуска (торможения) двигателя.

Для определения значения M'_{z_1-p} можно в выражении (II) подставить величину скольжения, соответствующую синхронной скорости прямотекущей зубцовой волны:

$s_{z_1-p} = 1 + \frac{z_1-p}{z_1+p}$: для определения M'_{z_1+p} — величину скольжения, соответствующую синхронной скорости обратнотекущей зубцовой волны:

$$s'_{z_1+p} = 1 + \frac{z_1+p}{z_1-p}.$$

Начальное значение результирующего момента M_n находится по сравнению с начальным моментом главной гармоники M_{np} , так как обычно значение начального момента обратнотекущей волны M_{nz_1-p} превышает значение начального момента прямотекущей волны M_{nz_1+p} :

$$M_n = M_{np} - (M_{nz_1-p} - M_{nz_1+p}). \quad (29)$$

Необходимо иметь в виду, что согласно определению дифференциальное рассеяние соответствует среднему для всех положений ротора значению рассеяния, поэтому выражение (29) соответствует среднему значению результирующего момента, иначе говоря, не учитывает влияние этого смещения ротора на величину начального момента.

Выводы. На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Максимальный момент зубцовых гармоник пропорционален квадрату тока. Во всех двигателях, в которых повышение момента достигается при одновременном уменьшении тока пуска (двойная беличья клетка, глубокий повышенное скольжение), результирующий момент вращения возрастает не только за счет увеличения момента главной гармоники, но и дополнительно вследствие уменьшения пазовых моментов. Влияние гармоник наиболее сильно проявляется при близких к единице значениях скольжения по отношению к главной гармонике; в особенности в тормозном режиме, так ток даже несколько возрастает по сравнению с начальным значением пускового тока. И наоборот, при малых значениях скольжения в области нормальной работы, когда ток не уменьшается в 6—7 раз по сравнению с то-

ком короткого замыкания, влияние гармоник ничтожное.

2. Максимальный момент зубцовых гармоник в значительной мере определяется дифференциальным рассеянием короткозамкнутого ротора по отношению к этим гармоникам и, следовательно, в большой степени соотношением чисел пазов статора и ротора.

3. Максимальный момент зубцовых гармоник обратно пропорционален величине воздушного зазора в силу того, что момент пропорционален реактивному сопротивлению намагничивающего контура главной гармоники. Поэтому при оценке минимально допустимого значения воздушного зазора нельзя исходить только из соображений механической прочности, необходимо также учитывать возрастание влияния зубцовых гармоник с уменьшением воздушного зазора.

4. Значение минимального результирующего момента в процессе пуска зависит не только от максимального момента прямотекущей зубцовой волны, но и от тормозного момента обратнотекущей зубцовой волны. Это особенно существенно тогда, когда число пазов ротора больше числа пазов статора.

Автор считает своим долгом отметить, что при выполнении данной работы им были получены ценные указания от члена-корр. АН СССР, проф. М. П. Костенко.

Литература

1. Б. П. Апаров. Влияние зубцовых полей на форму кривой крутящего момента в асинхронных двигателях. Труды ГЭИ, вып. 1, 1924.
2. L. Dreyfus. Die Theorie des Drehstrommotors mit Kurzschlussanker. Ing. Vet. Akad., Стокгольм, 1924.
3. Б. П. Апаров. Теория искажений кривой крутящих моментов при разбеге асинхронного двигателя. Электричество, № 8, 1932.
4. M. Krontal. Die Parasitären Kräfte in Induktionsmaschinen, Bulletin Oerlikon, т. 24, стр. 654, 1931; т. 25, стр. 665, 1931; т. 26, стр. 670, 1931.
5. А. Бергер, Л. Грузов, А. Коган, и Е. Нестеров. Асинхронный двигатель в аномальных режимах. Изд. ВЭТА, 1938.
6. М. П. Костенко. Электрические машины. Часть общая. ГЭИ, 1944.
7. Р. Рихтер. Электрические машины, т. IV, Индукционные машины, русский перевод ОНТИ, 1939.
8. Н. Я. Самойлович, О. Б. Певзнер и Б. И. Кузнецов. Формулы поверочного расчета асинхронных двигателей. Сборник научно-технических работ завода „Электросила“, № 5, 1939.
9. F. Heller. Zusätzliche Momente beim Anlauf von KäfigankerMotoren A. f. E., т. 29, стр. 173, 1935.
10. М. П. Костенко. Паразитные вращающие моменты трехфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей. Сборник „Электросила“, № 4, 1947.
11. О. Б. Певзнер. Искажение кривой моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя добавочными асинхронными моментами высших гармонических. Диссертация, ЛПИ, 1947.

[26.7.1949]



Основная классификация электрических машин

Кандидат техн. наук. В. М. МАТЮХИН

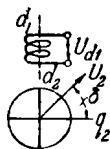
Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

С целью изучения и обзора существующих электрических машин полезно провести возможную их систематизацию. В данной работе предлагается классификация электрических машин по их строению в неподвижных осях, иначе говоря, исходя из того изображения, которое принимается при составлении уравнений машин в неподвижных координатах. Одновременно машины сравниваются с точки зрения существующих в них генераторных связей и способа получения их из простейшей машины.

Предлагаемая классификация названа основной, так как она рассматривает только основные принципы, при помощи которых можно представлять себе образование электрических машин, а именно изменение числа осей машины, генераторной и электрической связи между ними и напряжений, действующих в осях, но не рассматривает других известных способов образования машин, например, связанных с особенностями конструкций (явно выраженные полюсы, расщепленные полюсы), использованием насыщения магнитной цепи и т. д.

Способ изображения машин. Выше было отмечено, что машины представляются таким образом, как это нужно при составлении уравнений машин в неподвижных координатах.

Например, синхронная машина (рисунок) представляется тремя неподвижными осями d_1 ,



d_2 , q_2 . Две оси d_2 и q_2 представляют обмотку якоря и одна ось d_1 — обмотку возбуждения. Обмотка возбуждения принята неподвижной, потому что только в этом случае вектор ее м. д. с. будет неподвижен. Такие второстепенные в принципиальном отношении особенности машины, как явно выраженные полюсы и демпферная

Предлагается классификация электрических машин по признаку строения их обмоток, характеризующим неподвижными в пространстве магнитными осями. Исходным пунктом классификации является понятие генераторной связи между осями машины и исчерпание возможных комбинаций генераторных связей, что определяет столбцы предлагаемой таблицы схем. Распределение машин по рядам таблицы определяется некоторыми другими признаками построения схем.

обмотка, не указывая так как не они образуют основные связи синхронной машины.

Оси машин есть действующих м. д. с. а также место приложения внешних напряжений

Для определения машины помимо ее схемы необходимо задать вектор напряжения, приложенного к машине. Вектор напряжения синхронной машины в неподвижных осях запишется так [Л. 3]:

$$U = U_{d1}d_1 + U_2 \sin \delta d_2 + U_2 \cos \delta q_2$$

Эта запись указывает в символической (умной) форме внешние напряжения, действующие в отдельных осях d_1 , d_2 и q_2 . Напряжения в осях d_2 и q_2 являются проекциями на эти оси вектора напряжения U_2 , приложенного к обмотке якоря.

Уравнения синхронной машины для перекрестного режима, именно для случая внезапного одновременного приложения напряжений по осям машины, будут:

$$U_{d1} = i_{d1}r_{d1} + L_{d1}pi_{d1} + Mpi_{d2},$$

$$U_{d2} = Mpi_{d1} + i_{d2}r_2 + L_{d2}pi_{d2} + i_{q2}\omega L_{q2},$$

$$U_{q2} = -i_{d1}\omega M - i_{d2}\omega L_{d2} + i_{q2}r_2 + L_{q2}pi_{q2}$$

Эти уравнения написаны для явнополюсной синхронной машины.

Обозначения в уравнениях: M — коэффициент взаимной индукции обмотки возбуждения и обмотки якоря по продольной оси; L_{d1} , L_{d2} , L_{q2} — индуктивности обмотки возбуждения и обмотки якоря по осям d_2 и q_2 ; ω — угловая скорость вращения якоря; $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования.

В установившемся режиме $p=0$ и уравнения синхронной машины становятся:

$$U_{d1} = i_{d1}r_{d1},$$

$$U_{d2} = i_{d2}r_2 + i_{q2}\omega L_{q2},$$

$$U_{q2} = -i_{d1}\omega M - i_{d2}\omega L_{d2} + i_{q2}r_2$$

Таким образом, оси машины, а также вектор напряжения машины определяют ее уравнения в переходном и установившемся режиме, а следовательно, определяют все принципиальные свойства машины.

При изображении машин принято, что в том случае, когда машина имеет одноосную обмотку многофазную обмотку, то первая представляет неподвижной, а вторая — вращающейся, как это сделано в рассмотренном примере синхронных машин.

Далее многофазные машины (коллекторные и бесколлекторные) изображаются двухфазными. Отметим также, что с точки зрения рассмотрения принципиальных свойств машины и составления уравнений ее вращающиеся симметричные коллекторные обмотки могут представляться бесколлекторные с двумя парами щеток [Л. 1, 2]. Однако, в приводимой здесь таблице бесколлекторные симметричные обмотки представляются двумя взаимно перпендикулярными осями (рис. 52) для отличия коллекторных и бесколлекторных машин.

Три вида связей между осями электрической машины. Если рассматривать электрическую машину в неподвижной системе координат, то можно различить три вида связей между осями машины: генераторную, трансформаторную и электрическую.

Генераторная связь между осями машины выражается в том, что в неподвижной оси вращающейся обмотки генерируется э. д. с. вращения вследствие наличия м. д. с. по какой-либо другой оси машины. Например, в уравнении (3), написанном для оси q_2 обмотки якоря, слагаемое правой части ($-i_{d1} \omega M$) появляется вследствие генераторной связи от оси d_1 к оси q_2 . Примером машины только с генераторной связью может являться машина постоянного тока с независимым возбуждением 21, помещенная в таблице 1. Генераторная связь между осями машины может быть как односторонней, как в указанной машине постоянного тока, так и двухсторонней, как в случае синхронной машины (между осями d_2 и q_2) или генератора постоянного тока с продольно-поперечным полем 52.

Применением компенсационной обмотки в коллекторных машинах генераторная связь между осями ротора может быть превращена в одностороннюю (электромагнитный усилитель с продольно-поперечным полем 24), благодаря чему получается машина с новыми свойствами (в данном случае по сравнению с машиной 52).

Помимо генераторной связи между осями может существовать трансформаторная и электрическая связи². Генераторная связь между осями машины является основной, так как только при наличии ее может происходить преобразование

механической энергии в электрическую или обратное преобразование. Понятие «генераторная связь» приложимо как к генераторному, так и двигательному (а также к тормозному) режиму машины. Этот термин означает вообще наличие э. д. с. вращения в неподвижной оси вращающейся обмотки.

Возможные комбинации генераторных связей в электрической машине. В основу предлагаемой классификации электрических машин по их строению в неподвижных осях положены возможные комбинации генераторных связей в простейшей машине, которая может иметь максимум четыре оси d_1, q_1, d_2, q_2 , т. е. две оси на статоре и две — на роторе. Предположено, как видно из обозначения, что указанные оси совпадают с осями ортогональной системы координат — генераторная связь между ними имеет экстремальное значение.

Для машины, имеющей четыре оси при отсутствии компенсации (рис. 13 на таблице), генераторная связь между осями может быть записана формулой

$$d_1 \rightarrow q_2 \leftarrow d_2 \leftarrow q_1,$$

причем стрелки указывают направления генераторных связей. Между осями ротора (d_2 и q_2) в данном случае существует двухсторонняя генераторная связь.

Написанная формула дает максимальное число генераторных связей, которое можно получить в машине с ортогональными осями.

Если исходить из этой формулы и схемы (13) на таблице, то генераторная связь в машине может быть изменена путем: 1) удаления обмоток с одной или двух осей статора; 2) удаления щеток с одной оси ротора в коллекторных машинах; 3) устройства в коллекторных машинах компенсационной обмотки на статоре по одной или двум осям ротора, благодаря чему генераторная связь между осями ротора становится односторонней или уничтожается вовсе. Отсюда следует, что применение коллектора дает более широкие возможности для получения машин с различными свойствами (и это является известным). В коллекторной машине можно получить большее число комбинаций генераторных связей. Кроме того, в коллекторных машинах возможно осуществление электрической связи между обмотками статора и ротора при различных скоростях вращения.

С учетом возможности компенсации генераторная связь между осями ротора может принимать следующие формы:

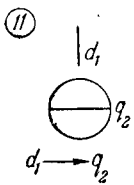
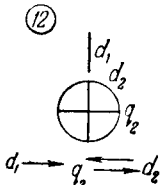
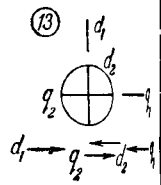
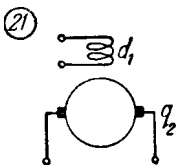
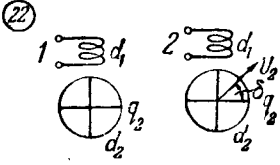
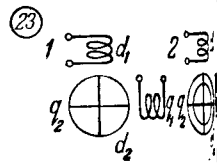
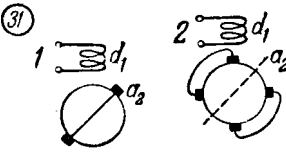
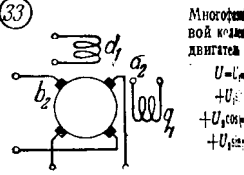
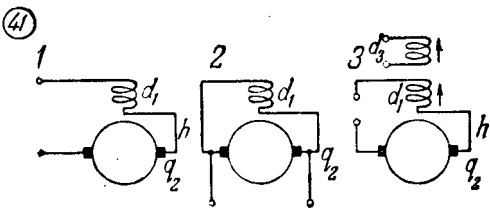
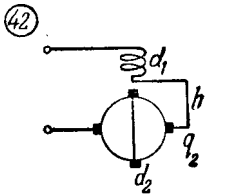
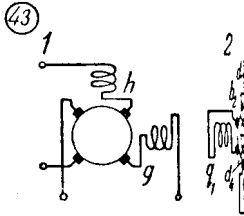
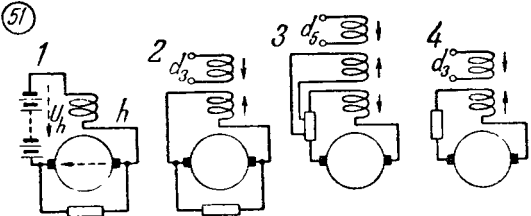
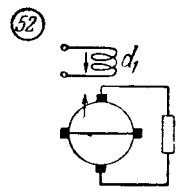
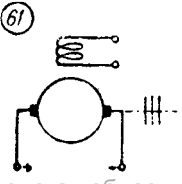
$$\begin{aligned} d_2 &\leftarrow q_2 \\ d_2 &\rightarrow q_2, \\ d_2 &\leftarrow q_2, \\ d_2 &q_2. \end{aligned}$$

В последнем случае генераторная связь между осями ротора не имеет места, что соответствует компенсации ротора по обеим осям.

Возможные комбинации генераторных связей в машине могут быть исчерпаны следующим спо-

¹ Способ нумерации машин в таблице следующий: первая цифра означает номер ряда таблицы, вторая — номер столбца. Цифра, стоящая после точки, означает номер схемы в данной клетке таблицы.

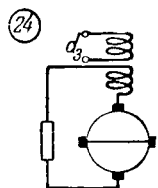
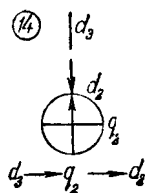
² В качестве примеров машин с трансформаторной и электрической связью между осями можно указать на однофазный реактивный двигатель 31.1, асинхронные машины и др.

	Машины с одноосным ротором	Некомпенсированные	
		Одна ось на статоре	Две оси на статоре
	1	2	3
1 Комбинация генераторных связей формулы генераторных связей			
2 Машины с ортогональными осями	 <p>Машина постоянного тока $U = U_{d1} \cdot d_1 + U_{q2} q_2$</p>	 <p>1. Однофазная асинхронная машина $U = U_{d1} \cos \omega t d_1$ 2. Синхронная машина $U = U_{d1} d_1 + U_2 \sin \delta d_2 + U_2 \cos \delta q_2$</p>	 <p>1. Многофазная асинхронная машина $U = U_1 \cos \omega t d_1 + U_2 \sin \delta d_2 + U_2 \cos \delta q_2$ 2. Двигатель с двойной индукцией $U = U_1 \cos \omega t d_1 + U_2 \sin \delta d_2 + U_2 \cos \delta q_2$</p>
3 Машины с наклонными осями в роторе	 <p>1. Однофазный репульсионный двигатель $U = U_{d1} \cos \omega t d_1$ 2. Двигатель Дери $U = U_{d1} \cos \omega t d_1$</p>		 <p>Многофазный репульсионный двигатель $U = U_1 \cos \omega t d_1 + U_2 \sin \delta d_2 + U_2 \cos \delta q_2$</p>
4 Машины с электрической связью	 <p>1. Серийный двигатель $U = U_h h, U = U_h \cos \omega t h$ 2. Шунтовая машина постоянного тока 3. Компондный двигатель постоянного тока $U = U_{d3} d_3 + U_h h$</p>	 <p>Репульсионный двигатель $U = U_h \cos \omega t h$</p>	 <p>1. Многофазный серийный двигатель $U = U \cos \omega t h + U_h h$ 2. Двигатель Шраге $U = U_4 \cos \omega t d_4 + U_1 d_1$</p>
5 Машины с отрицательной обратной связью (машины-регуляторы)	 <p>1. Схема Гроба $U = U_h h$ 2. Генератор стабильного напряжения $U = U_{d3} d_3$ 3. Машинный усилитель с критическим возбуждением $U = U_{d5} d_5$ 4. Генератор на постоянную величину тока $U = U_{d3} d_3$</p>	 <p>Генератор продольно-поперечного поля $U = U_{d1} d_1$</p>	
6 Преобразователи частоты	 <p>Однофазный преобразователь</p>		

Компенсированные

Одна ось на статоре

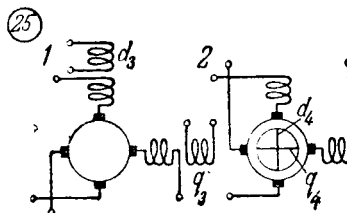
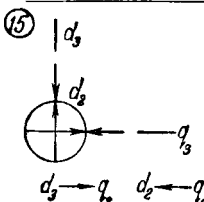
4



Усилитель с продольно-поперечным полем
 $U = U_{d3}d_3$

Две оси на статоре

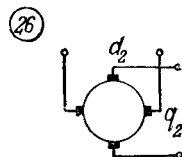
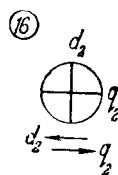
5



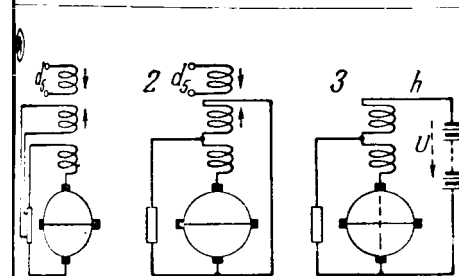
1. Многофазный коллекторный альтернатор
 $U = U_3 \cos \omega t d_3 + U_3 \sin \omega t q_3$
2. То же с возбуждением на роторе
 $U = U_4 \cos \omega t d_4 + U_4 \sin \omega t q_4$

Машины без обязательных обмоток на статоре

6



Фазокомпенсатор
 $U = U \cos \omega t d_2 + U \sin \omega t q_2$



Универсальный усилитель-регулятор с продольно-поперечным полем $U = U_{d5}d_5$
Регулятор стабильного напряжения $U = U_{d5}d_5$
Регулятор стабильного напряжения $U = U_h h$

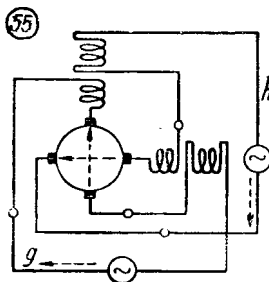
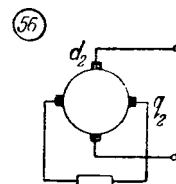
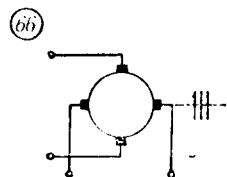


Схема М. П. Костенко
 $U = U \cos \omega t h + U \sin \omega t g$



Метадина Шенфера—Пестарини
 $U = U_{d2}d_2$



Преобразователь частоты

собою: 1) рассматриваются две оси на статоре; 2) одна ось на статоре (например, d_1); 3) рассматривается машина без обмоток на статоре. Во всех этих случаях применяются все четыре указанные выше комбинации генераторных связей между осями ротора.

Таким путем нетрудно получить следующие неодинаковые комбинации генераторных связей в машине:

- 1) $d_1 \rightarrow q_2 \leftarrow d_2 \leftarrow q_1$;
- 2) $d_1 \rightarrow q_2 \rightarrow d_2 \leftarrow q_1$;
- 3) $d_1 \rightarrow q_2 \quad d_2 \leftarrow q_1$;
- 4) $d_1 \rightarrow q_2 \leftarrow d_2$;
- 5) $d_1 \rightarrow q_2 \rightarrow d_2$;
- 6) $d_1 \rightarrow q_2 \leftarrow d_2$;
- 7) $d_1 \rightarrow q_2$;
- 8) $q_2 \leftarrow d_2$;
- 9) $q_2 \rightarrow d_2$.

Всего получаем девять неодинаковых комбинаций генераторных связей, которые возможны в машине с ортогональными осями. Из них комбинации 1, 3, 4, 5, 7 и 8 уже реализованы в машинах, причем комбинации 5 (усилитель с продольно-поперечным полем) и 8 (метадин) сравнительно недавно. Остальные три комбинации (2, 6 и 9), повидимому, не имеют практического применения и не помещены в таблице.

Пояснение к таблице «Основная классификация электрических машин». Выше были указаны принципы изображения машин. В дополнение к этому заметим, что в таблице положение осей коллекторных обмоток определяется только щетками. Оси обмоток статора не указаны, чтобы не затемнять чертеж. В тех случаях, когда необходимо указать относительные направления м. д. с. обмоток, они указываются сплошными стрелками. Для машин с дифференциальным электрическим соединением обмоток (пятый ряд) относительные направления напряжения внешнего источника и э. д. с. обмотки якоря указаны пунктирными стрелками.

В основу построения таблицы и метода классификации машин положен первый ряд таблицы, в котором приведены комбинации генераторных связей, нашедшие практическое применение в машинах. В схемах этого ряда наличие компенсации ротора по какой-либо оси отмечено продолжением этой оси ротора за окружность.

Первый ряд показывает развитие машин в разрезе имеющихся в них генераторных связей, начиная с простейшей машины. Таким образом, все помещенные в таблице машины разбиваются на шесть групп — шесть столбцов таблицы.

Первый столбец таблицы содержит машины с одноосным ротором. Следовательно, это могут быть только коллекторные машины постоянного или однофазного переменного тока (так как принято, что ось ротора неподвижна в пространстве).

Остальные пять столбцов таблицы перечисляют машины с двухосным ротором (точнее с симметричным ротором).

Во втором столбце помещены машины, имеющие двухосный ротор и обмотки на статоре только по одной оси машины. Сюда относятся синхронная машина, однофазный асинхронный двигатель и другие машины.

В третьем столбце таблицы находятся машины, содержащие ротор без компенсации и обмотки по двум осям статора. Это будут, главным образом, бесколлекторные и коллекторные симметричные асинхронные машины (в двухфазном изображении).

К четвертому столбцу таблицы относятся машины амплитудного типа, т. е. схемы с двухосным ротором, компенсацией ротора по одной оси и обмотками статора в той же оси машины. Следует заметить, что компенсация резко изменяет свойства машины благодаря уничтожению обмоточной генераторной связи от продольной оси ротора к поперечной оси. Достаточно сравнить в отношении свойств, например, генератор с продольно-поперечным возбуждением 52 и электромашина 24. Машины этого столбца характеризуются квадратичным возбуждением, т. е. они имеют минимальную мощность возбуждения при заданной мощности на выходе.

К пятому столбцу относятся машины, имеющие двухосный ротор с компенсацией по обеим осям, а на статоре — обмотки по обеим осям. Эти машины, относящиеся к типу многофазных коллекторных компенсированных генераторов, т. е. машины переменного тока, в которых ток первой обмотки не зависит от нагрузки.

Помещенный в этом столбце многофазный коллекторный генератор с возбуждением на роторе 25 · 2 образуется путем переноса обмотки возбуждения в машине 25 · 1 со статора на ротор.

Шестой столбец содержит машины с двухосным ротором без компенсации и без обязательных обмоток на статоре. Это будут машины типа метадин при питании постоянным током и без фазокомпенсатора при питании переменным током.

Строение таблицы по рядам показывает образование машин при помощи простейших принципов.

Второй ряд таблицы занимают машины с ортогональными осями и без электрической связи между обмотками. Машины этого ряда (по сравнению с общими схемами первого ряда) определяются выбором напряжений, действующих в осях машины. В таблице к каждой машине отнесен вектор напряжения, значение которого было пояснено выше.

Изображение машин в неподвижных осях обнаруживает, что свойства машины зависят не только от строения ее, но, как естественно ожидать, и от того, какие внешние силы (т. е. напряжения) приложены к системе. Так, например, синхронная машина 22 · 2, однофазная асинхронная машина 22 · 1, а также генератор с продольно-поперечным полем 52, помещенный в пятый ряд, имеют одинаковое строение, если обмотки их представлять неподвижными осями, но существенно отличаются в своих свойствах благодаря тому, что в неподвижных осях этих машин де-

ствуют различные напряжения. С другой стороны, если составить системы уравнений указанных машин для переходного режима (как более общего случая), то они будут различаться только свободными членами, представляющими внешние силы (напряжения), действующие на систему.

Третий ряд таблицы занимают машины, которые могут быть получены из машин второго ряда (или схем первого ряда) путем поворота осей ротора. Смещение осей ротора имеет в одних случаях принципиальное значение³, а в других случаях это дает более общую схему (коллекторной) машины. Машины этого ряда также не имеют электрической связи между обмотками.

Четвертый ряд таблицы отличается тем, что здесь вводится электрическая связь между обмотками. Введение электрической связи между обмотками, как известно, существенно влияет на автоматические характеристики машины.

Пятый ряд таблицы занимают схемы генераторов⁴ с отрицательной обратной связью. Назначение этих генераторов заключается в поддержании постоянства регулируемого параметра. В случае приращения регулируемого параметра общий поток возбуждения машины получает приращение противоположного знака (отрицательная связь). Последнее в свою очередь объясняется дифференциальным действием на магнитную систему машины некоторой постоянной м. д. с. и м. д. с., пропорциональной регулируемому параметру. В некоторых схемах (51.1, 54.3 и др.) на обмотку возбуждения генератора действуют дифференциально внешнее постоянное напряжение (задающее напряжение) и э. д. с. генератора, так что ток возбуждения машины определяется их разностью. Отметим, что схема генератора стабильного напряжения 54.3 найдена автором по аналогии с другими схемами этого ряда⁵.

Усилитель с продольно-поперечным полем (электромашинный усилитель, 54.1) и усилитель с критическим возбуждением (рототрол 51.3) предназначены для регулирования параметров других машин, для которых эти регуляторы являются возбудителями. Остальные машины этого ряда являются регуляторами собственных параметров (напряжения или тока). В случае генератора с продольно-поперечным полем 52 и метадина 56 отрицательная обратная связь получается автоматически, в других случаях она достигается определенным включением обмоток. Машины с поперечным полем имеют промежуточную ступень усиления (за исключением метадина) в виде поперечной цепи якоря, а потому обладают большей чувствительностью.

³ Однофазный репульсионный двигатель 31.1, в котором таким путем вводится трансформаторная связь между осями, необходимая для создания пускового момента.

⁴ За исключением метадина 56, который является преобразователем.

⁵ Авторское свидетельство № 74025.

Для машин пятого ряда, которые являются статическими регуляторами⁶, может быть написано общее уравнение установившегося режима

$$k(A - mB) = B,$$

где B — регулируемый параметр;

A — величина, пропорциональная потолку регулируемого параметра (напряжение или ампервитки задающей обмотки);

k — величина, пропорциональная общему коэффициенту усиления;

m — постоянный коэффициент.

Знак минус в уравнении выражает отрицательную обратную связь в машине.

Из уравнения получаем выражение для значения регулируемого параметра:

$$B = \frac{A}{m + 1/k},$$

откуда следует, что при достаточно большом коэффициенте усиления k и при изменении его в некоторых пределах параметр B практически сохраняет свою величину, в чем и заключается принцип статического регулирования.

В шестой ряд таблицы включены преобразователи частоты, имеющие на роторе как коллектор, так и кольца⁷.

Предлагаемая система классификации имеет, по нашему мнению, то значение, что благодаря единообразному изображению и логическому способу перехода от одной группы машин к другой облегчается изучение электрических машин с принципиальной стороны. В частности, пятый ряд объединяет машины по признаку, который раньше не был сформулирован и благодаря которому машины этого ряда становятся «очевидными». Эта система может дать также некоторые опорные пункты при разработке новых электрических машин.

Литература

1. А. Г. Иосифьян. Бесконтактный сельсин как обобщенная синхронная машина. Бюллетень ВЭИ, август 1940.
2. В. М. Матюхин. Новая эквивалентная схема синхронной машины с выступающими полюсами. Известия Академии наук СССР, ОТН, № 4, 1948.
3. G. Krön. The application of tensors to the analysis of rotating electrical machinery, 1942.

[11. 11. 1949]

⁶ За исключением регулятора, называемого иногда «рототрол», который является астатическим регулятором.

⁷ Наличие колец в изображении машины указывает, что машина должна описываться одновременно как системой уравнений в неподвижных координатах, так и системой уравнений во вращающихся координатах, в то время как для описания других машин, помещенных в таблице, достаточно системы неподвижных координат. Преобразователи частоты (шестой ряд) располагаются в таблице, исходя из того, как они выглядят со стороны коллектора, т. е. соответственно уравнениям в неподвижных координатах.



Переходные режимы двигателя независимого возбуждения при переменном токе и напряжении

Кандидат техн. наук, доц. В. П. БЫЧКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

При расчете электропривода на постоянном токе часто встречается необходимость в построении кривых переходных процессов двигателя при изменении как напряжения, так и потока. Существующие методы относительно громоздки и требуют большой затраты времени на вычисления [Л. 3] или затрагивают только процесс изменения поля двигателя [Л. 2].

Предлагаемый ниже графоаналитический метод представляет собой развитие и усовершенствование метода, ранее разработанного автором под руководством Д. П. Морозова и описанного им в своей работе [Л. 1].

Переходные процессы двигателя постоянного тока независимого возбуждения, связанные с изменением сопротивления цепи возбуждения его и подводимого напряжения (рис. 1), могут быть описаны следующими уравнениями:

$$U_m = i_m r_s + L_m \frac{di_m}{dt}, \quad (1)$$

$$e_z = C_e n + i R_0, \quad (2)$$

$$i = \frac{M_c}{C_m} + \frac{GD^2}{375 C_m} \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (3)$$

где

U_m , i_m , L_m — напряжение, ток и индуктивность цепи возбуждения двигателя;

r_s — сопротивление цепи возбуждения;

$C_e = \frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot \frac{1}{\sigma} \Phi 10^{-8}$; $C_m = \frac{C_e}{1,03}$ — коэффициенты э. д. с. и момента двигателя;

$e_z = f_1(t)$ — э. д. с. генератора, питающего двигатель;

n , i — скорость вращения и ток двигателя;

R_0 — сопротивление цепи двигатель—генератор или сопротивления якоря двигателя при питании его от сети;

M_c — момент статического сопротивления на валу двигателя;

GD^2 — маховой момент привода.

Предлагается графоаналитический метод расчета переходных процессов двигателя независимого возбуждения при переменном токе и переменном напряжении. Метод позволяет с достаточной степенью точности построить кривые переходных процессов при изменении сопротивления цепи возбуждения двигателя и при переменном напряжении на якоре двигателя.

Уравнение (1) может быть решено независимо от (2) и (3). Уравнение (1) ввиду нелинейности магнитной характеристики будем решать графически.

Заменив производные отношениями конечных приращений, после сложных преобразований получим:

$$\Delta t = b \frac{\Delta \varphi}{I_m - i_m}, \quad (4)$$

где

$$\varphi = \frac{C_e}{C_{en}} = \frac{\Phi}{\Phi_n} \text{ — относительная величина магнитного потока двигателя;}$$

$\Delta \varphi$ — приращение относительного потока;
 C_{en} — коэффициент для э. д. с. двигателя при полном потоке его;

$$b = \frac{W_m C_{en} \sigma}{\frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a} (r_m + r_d)} \text{ — при ослаблении поля двигателя;}$$

$$b = \frac{W_m C_{en} \sigma}{\frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a} r_m} \text{ — при усилении поля двигателя;}$$

I_m , i_m — установившееся и текущее значения тока возбуждения двигателя;

r_m — сопротивление обмотки возбуждения.

На рис. 2 дана кривая намагничивания двигателя в относительных единицах. При вы-

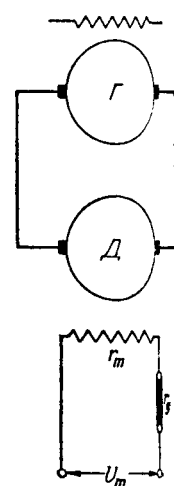


Рис. 1. Схема включения двигателя постоянного тока с регулирующим сопротивлением в цепи возбуждения.

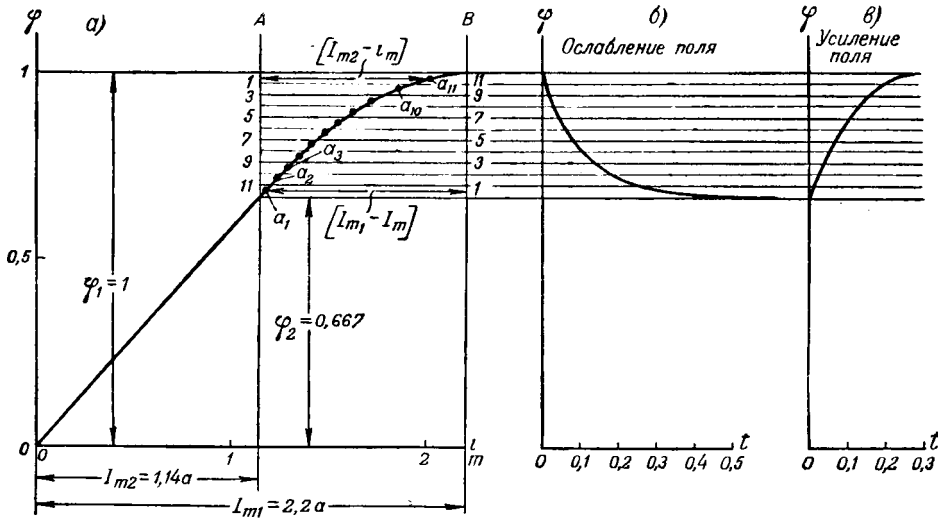


Рис. 2. Построение кривых потока двигателя к примеру.

ключении, например, дополнительного сопротивления цепи возбуждения r_o ток возбуждения уменьшается от I_{m1} до I_{m2} . Поток двигателя изменяется от $\varphi_1 = 1$ до φ_2 .

При таком условии отрезки Aa_1, Aa_2, \dots , заключенные между вертикалью A и кривой намагничивания, представляют собой разность $[I_{m2} - i_m]$, а отрезки Ba_1, Ba_2, \dots $[I_{m1} - i_m]$.

Чтобы построить кривую потока в функции времени, следует разбить на n участков кривую намагничивания в пределах изменения потока, определить графически для каждого $\Delta\varphi$ отрезок $Aa = [I_{m2} - i_m]$ при ослаблении поля или $Ba = [I_{m1} - i_m]$ при усилении поля (рис. 2) и затем решать уравнение (5) относительно Δt . Для большей точности расчета необходимо брать средние значения отрезков $(I_m - i_m)$ на каждом участке $\Delta\varphi$.

Переходим далее к преобразованию уравнений (2) и (3). Исключая в этих уравнениях i , получим равенство;

$$\varphi \frac{e_2}{C_{en}} - \Delta n_{cn} = \varphi^2 n + \theta_n \frac{dn}{dt}, \quad (5)$$

где

$$\Delta n_{cn} = \frac{M_c R_o}{C_{en} C_{mn}} - \text{перепад скорости вращения двигателя при полном потоке и при нагрузочном моменте } M_c,$$

$$\theta_n = \frac{GD^2 \cdot R_o}{375 C_{mn} C_{en}} - \text{электромеханическая постоянная электропривода при полном потоке двигателя.}$$

Последующие преобразования и замена производной отношением конечных приращений приводят к расчетному уравнению для скорости

$$\Delta n = \frac{\varphi^2}{k + \varphi^2} \left[\frac{\varphi \frac{e_2}{C_{en}} - \Delta n_{cn}}{\varphi^2} - n_{нач} \right], \quad (6)$$

где $n_{нач}$ — скорость вращения двигателя в начале отрезка времени Δt .

Уравнение для тока двигателя получается из (2)

$$i = \frac{\frac{e_2}{C_{en}} - \varphi n}{R_o} C_{en}, \quad (7)$$

или из (3)

$$i = \frac{k \Delta n + \Delta n_{cn}}{\varphi R_o} \cdot C_{en}. \quad (7a)$$

Для решения уравнения (6) должны быть предварительно построены кривая э. д. с. генератора $e_2 = f_1(t)$ и кривая потока двигателя $\varphi = f_2(t)$. Кривая тока в функции времени строится по уравнению (7) или (7a) одновременно с построением кривой скорости. Величина k определяет точность построения. С повышением k точность построения увеличивается. При практических расчетах рекомендуется брать $k = 3 \div 5$, что дает вполне достаточную точность расчета.

Пример. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения:

$$P_n = 5,5 \text{ квт}, I_n = 62 \text{ а}, U_n = 110 \text{ в}, n_n = 1270 \text{ об/мин}, \\ GD^2 = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, r_a = 0,3 \text{ ом}, r_{ш} = 50 \text{ ом}, p = 2, a = 1, \\ N = 396, W_{ш} = 3864.$$

Кривая намагничивания в относительных единицах представлена на рис. 2,а. Повышенная скорость вращения двигателя при $M_c = 0,667 M_n$ должна быть равна $n_p = 1,5 \cdot n_n = 1905 \text{ об/мин}$. Следует построить кривые скорости и тока двигателя при ослаблении и усилении поля двигателя, если к якору его приложено постоянное напряжение $U_n = 110 \text{ в}$.

$$C_{en} = \frac{110 - 62 \cdot 0,3}{1270} = 0,072 C_{mn} = 0,07;$$

$$n_0 = \frac{U_n}{C_{en}} = 1,528 \text{ об/мин}; \theta_n = 0,19 \text{ сек.}$$

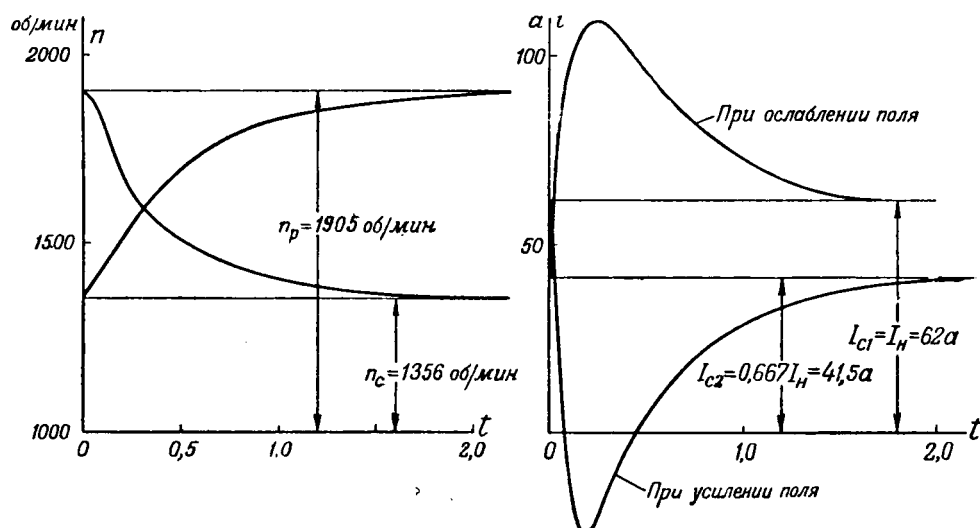


Рис. 3. Построение кривых скорости и тока двигателя к примеру.

Относительная величина потока при повышенной скорости

$$\psi_2 = \frac{n_0 + \sqrt{n_0^2 - 4\Delta n_{сн} n_p}}{2n_p} = \frac{1528 + \sqrt{1528^2 - 4 \cdot 172,2 \cdot 1905}}{2 \cdot 1905} = 0,667.$$

Установившееся значение тока возбуждения при ослаблении $I_{m2} = 1,14$ а, при максимальном потоке $I_{m1} = 2,2$ а.

Дополнительное сопротивление, включаемое в цепь возбуждения, $r_0 = 46,5$ ом. Перепад скорости при полном потоке двигателя и нагрузочном моменте M_c . $\Delta n_{сн} = 172,2$ об/мин, $n_c = n_0 - \Delta n_{сн} = 1356$ об/мин.

При ослаблении поля коэффициент $b = 0,218$, при усилении поля $b = 0,422$. В качестве примера в табл. 1 и 2 приведены расчеты кривых для случая ослабления потока.

Таблица

Построение $\varphi = f(t)$ при ослаблении потока

Номер участка	$\Delta\varphi$	φ	$I_{m2} - i_m$	$\frac{\Delta\varphi}{I_{m2} - i_m}$	Δt	t
1	0,03	0,97	0,86	0,03485	0,0076	0,0076
2	0,03	0,94	0,7	0,04285	0,00935	0,0169
3	0,03	0,91	0,58	0,0517	0,01128	0,0282
11	0,033	0,667	0,03	1,1	0,24	0,478

На рис. 2, построены кривые $\varphi = f_2(t)$ для ослабления и для усиления поля. Кривые скорости и тока для обоих случаев даны на рис. 3.

Таблица

Построение $n = f_1(t)$ и $i = f_2(t)$ при ослаблении потока

Δt	t	$n_{нач}$	φ	$\frac{\varphi^2}{k + \varphi^2}$	$\frac{\varphi \frac{e_r}{c_{сн}} - \Delta n_{сн}}{\varphi^2} - n_{нач}$	Δn	n	φn	$\frac{e_r}{c_{сн}} - \varphi n$	i
0,0475	0,0475	1356	0,87	0,159	176	27,95	1384	1202	326	78,4
0,0475	0,095	1384	0,795	0,1364	268	36,6	1420,6	1130	398	95,3
0,0475	0,1425	1420,6	0,75	0,1231	312,4	38,5	1459,1	1093	435	104,3

Литература

1. Д. П. Морозов. Графоаналитические методы исследования переходных процессов двигателей постоянного тока. Вестник электропромышленности, № 7, 1938 г.

2. В. Т. Касьянов. Расчет процессов регулирования

магнитных полей электрических машин. Вестник электропромышленности, № 5-6, 1944.

3. Тягульский. Переходные режимы шунтового двигателя при ускорении его ослаблением магнитного потока. ВЭП, № 2, 1941.

(20.9.91)



Определение пробивного напряжения по испытаниям образцов

Кандидат техн. наук А. С. ЗИНГЕРМАН

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Определение пробивного напряжения изоляционного аппарата высокого напряжения сопряжено с некоторыми затруднениями. Любой реальный изолятор вследствие своей неоднородности не имеет вполне определенного пробивного напряжения. Пробивное напряжение одинаковых образцов одного и того же изолятора, испытанных в одинаковых условиях, имеет разброс, который может превышать $\pm 50\%$ средней величины. Такой большой разброс пробивного напряжения требует сравнительно большого числа опытов для его надежного определения. С другой стороны, испытание на пробой твердой изоляции приводит ее в негодность.

Указанные причины часто делают невозможным производство подобных испытаний на реальных аппаратах. Поэтому обычно испытаниям на пробой подвергаются не реальные аппараты, а модели или образцы. Однако, так как среднее пробивное напряжение, величина разброса и форма кривой распределения пробивного напряжения зависят от объема изоляции, то непосредственное перенесение результатов испытаний моделей или образцов на реальные аппараты невозможно. Для определения пробивного напряжения реального аппарата требуется пересчитать результаты, полученные из испытаний образцов. В предыдущей работе [Л. 1] был опубликован метод такого пересчета.

Определение пробивного напряжения производится следующим образом:

а) При постоянном или переменном напряжении. На образец подается напряжение и повышается с равномерной скоростью до пробоя. Из нескольких таких опытов определяется среднее пробивное напряжение.

Расположим значения напряжения, при котором пробивались образцы, в возрастающем порядке:

$$U_1, U_2, \dots, U_{k-1}, U_k, U_{k+1}, \dots, U_q. \quad (1)$$

—наименьшее, а U_q —наивысшее пробивные

Излагается метод определения пробивного напряжения по испытаниям образцов, не требующий сложных вычислений. Даются указания, как выбрать необходимое число опытов.

напряжения, имевшие место в опыте. Пусть число образцов с этими пробивными напряже-

ниями будет соответственно

$$n_1; n_2; \dots; n_{k-1}; n_k; n_{k+1}; \dots; n_q. \quad (2)$$

Обозначим общее число испытаний через n .

$$n = \sum_{i=1}^{i=q} n_i. \quad (3)$$

Относительное число образцов с пробивным напряжением U_i приближенно равно p_i — вероятности пробоя наугад выбранного образца напряжением U_i

$$p_i = \frac{n_i}{n}. \quad (4)$$

Вероятность того, что образец пробьется любым напряжением, лежащим в диапазоне от U_1 до U_k включительно, т. е. напряжением, не больше U_k , будет:

$$\Psi_k = \sum_{i=1}^{i=k} p_i. \quad (5)$$

Учитывая (3) и (4), имеем:

$$\Psi_q = \sum_{i=1}^{i=q} p_i = 1. \quad (6)$$

Последнее равенство формулирует положение о том, что образец должен обязательно пробиться напряжением, не больше U_q .

б) При импульсном напряжении. На образец подается несколько раз одна и та же волна с одним и тем же амплитудным напряжением U_k . Пусть при напряжении U_k число пробитых образцов N_k , а число непробитых N_0 . Вероятность пробоя наугад выбранного образца определенной волной с амплитудой не выше U_k приближенно равна относительному числу

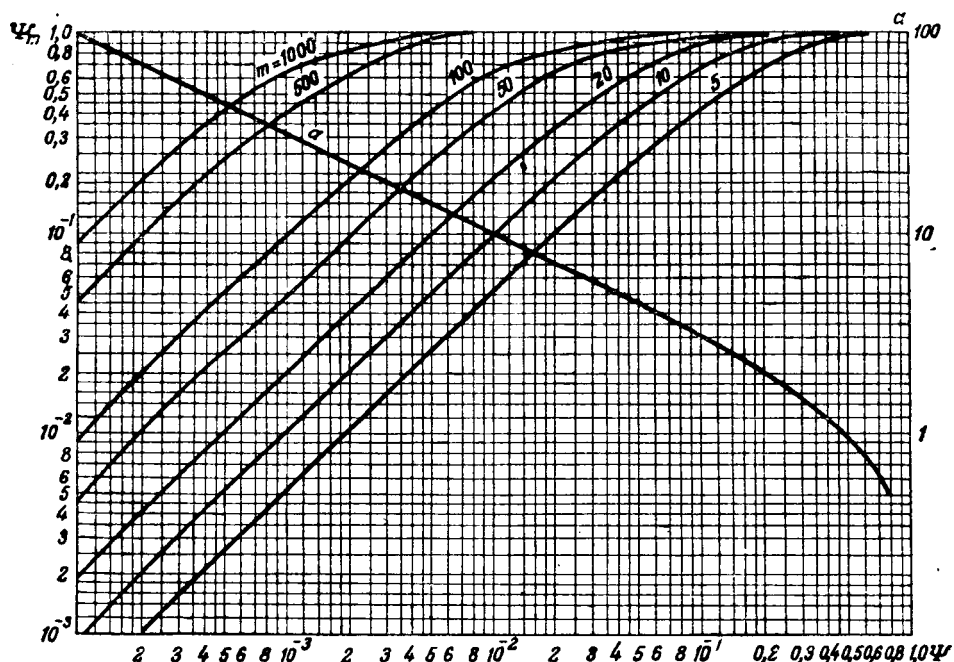


Рис. 1.

пробитых образцов этой волной при амплитудном напряжении U_k

$$\Psi_k = \frac{N_k}{N_k + N_0}. \quad (7)$$

Напряжение, при котором пробивается половина образцов, т. е. когда $\Psi = 0,5$, принимается за пробивное.

Как в первом, так и во втором случаях Ψ зависит от напряжения U и имеет один и тот же физический смысл. $\Psi(U)$ — функция вероятности пробоя наугад выбранного образца напряжением не больше U .

Для образца с изоляцией, имеющей поверхность в m раз большую испытанной, функция вероятности пробивного напряжения Ψ_m , как было показано в предыдущей работе [Л.1], при $m \geq 5$ определяется выражением

$$\Psi_m = 1 - Z_m; \quad (8)$$

$$Z_k = (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_k) = 1 - \Psi_k + \varepsilon, \quad (9)$$

где ε равняется сумме произведений из p_i в различных комбинациях. Так как величины $p_i < 1$, то $\varepsilon \ll \Psi$ и ε можно пренебречь по сравнению с Ψ . Тогда

$$\Psi_m = 1 - (1 - \Psi)^m. \quad (10)$$

На рис. 1 приведены зависимости Ψ_m от Ψ для различных значений m . С помощью этих кривых можно легко получить кривую вероятности пробоя $\Psi_m(U)$ напряжением не больше U для образца с площадью изоляции, в m раз большей, чем площадь испытанного образца. Пусть испытание образцов, площадь которых примем за единицу ($m=1$), дало кривую вероятности пробоя Ψ , изображенную на рис. 2.

Будем эту кривую называть исходной. При напряжении U_1 на исходной кривой соответствует вероятность $\Psi_1 = 2 \cdot 10^{-2}$. Пусть аппарат имеет площадь изоляции в $m=20$ раз больше. Из кривой для $m=20$ (рис. 1) для $\Psi_1 = 2 \cdot 10^{-2}$ получаем $\Psi_m = 0,325$. Следовательно, напряжение U_1 будет вызывать пробой аппарата в 32,5 случаях или вероятность пробоя аппарата напряжением не выше U_1 будет $\Psi_m = 0,325$. Аналогичным образом находим $\Psi_m = 0,57$. Указанным способом строятся кривые вероятности пробоя аппарата, изображенные на рис. 2 сплошной линией (для $m=20$).

Разделим диапазон пробивного напряжения между вероятностями $\Psi_0=0$ и $\Psi_q=1$ на равных интервалов. Ширина интервала

$$\Delta U = \frac{U_q - U_0}{q}.$$

Среднее пробивное напряжение для большого образца с поверхностью в m единиц будет:

$$\begin{aligned} \bar{U} &= U_1 \Psi_m + U_2 (\Psi_m - \Psi_{m_1}) + \\ &+ U_3 (\Psi_m - \Psi_{m_1}) + \dots + U_q (\Psi_m - \Psi_{m_{q-1}}) = \\ &= U_q - \Delta U \sum_{i=1}^{q-1} \Psi_i. \end{aligned}$$

При испытании постоянным или переменным напряжением обычно определяется среднее напряжение, при испытании импульсным напряжением — 50%-ное напряжение, т. е. напряжение, которое вызывает в 50% случаев пробой. Если последнее определение распространить на оба случая, тогда 50%-ное пробивное напряжение образца с увеличенной площадью изоляции в m раз определится весьма просто.

Положив:

$$\Psi_m = 1 - (1 - \Psi_a)^m = 0,5,$$

получим:

$$\Psi_a = 1 - 0,5^{1/m}. \quad (13)$$

Из исходной кривой $\Psi(U)$, полученной при испытании малых образцов, определяется значение U_a , соответствующее вероятности Ψ_a . Это значение U_a будет равно 50 %-ному пробивному напряжению большего образца с площадью изоляции в m раз больше:

$$U_m = U_a.$$

Значения Ψ_a для разных m даны в табл. 1.

Таблица 1

m	1	5	10	20	50	100	500	1000
Ψ_a	0,5	0,133	0,067	0,034	0,0138	0,0068	0,0014	0,0007
n	3	18	38	76	192	388	1925	3850
k		3,4	3,8	3,8	3,85	3,88	3,85	3,85

Таким образом, если образец имеет поверхность изоляции, в m раз меньшую, чем реальный аппарат, можно из табл. 1 узнать вероятность Ψ_a , которую следует определить из опытов над образцами. Пробивное напряжение, соответствующее этой вероятности при опытах с образцами, равное 50 %-ному пробивному напряжению аппарата. Например, пусть площадь образца будет в 10 раз меньше, чем площадь изоляции реального аппарата. Из таблицы для $m=10$ находим $\Psi_a=0,067$. Пусть функция вероятности пробивного напряжения, полученная из опыта с образцами, изображается кривой ($m=1$) на рис. 2. Из этой кривой имеем: для $\Psi=0,067$, $U=U_2$. Следовательно, 50 %-ное пробивное напряжение реального аппарата будет U_2 .

Число опытов, необходимое для надежного определения этого напряжения, зависит от вероятности Ψ_a . Оно определяется следующей формулой [Л. 2]:

$$n = \frac{\Psi_a(1 - \Psi_a)}{\sigma^2}. \quad (14)$$

Вражая точность определения Ψ_a в процентах σ , получим:

$$n = \frac{k_2^2(1 - \Psi_a)}{k_1^2 \Psi_a} = k \frac{1 - \Psi_a}{\Psi_a}, \quad (15)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие соответственно от желаемой точности и надежности определения Ψ_a . При надежности 0,997... $k_2=3$; при надежности 0,9... $k_2=1,64$. Значения коэффициента k для разной надежности и точности определения приведены в табл. 2.

Если определять Ψ_a с точностью $\pm 100\%$ и надежностью 0,9, то $k=2,7$. Необходимое для

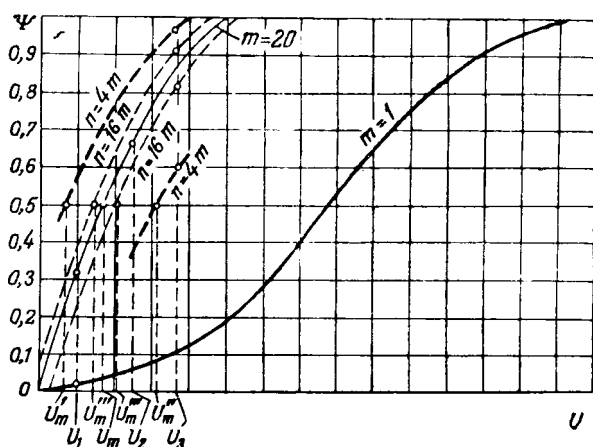


Рис. 2.

этого число опытов n в зависимости от m приведено в табл. 1.

При увеличении точности и надежности определения Ψ_a необходимое число опытов, как это следует из табл. 2, возрастает.

Отношение

$$\frac{n}{m} = \frac{k(1 - \Psi_a)}{m(1 - 0,5^{1/m})}. \quad (16)$$

Разлагая $(1 - 0,5^{1/m})$ в ряд и подставляя значение $\ln 2$, получим:

$$\frac{n}{m} = \frac{k(1 - \Psi_a)}{0,69 + \frac{0,69^2}{2} \frac{1}{m} + \frac{0,69^3}{6} \frac{1}{m^2} + \dots}. \quad (17)$$

При $m \geq 10$ можно пренебречь Ψ_a по сравнению с единицей и вторыми членами в знаменателе. Тогда

$$\frac{n}{m} = \frac{k}{0,69} = 1,45 k. \quad (18)$$

Для принятой точности $\pm 100\%$ и надежности 0,9

$$\frac{n}{m} = 3,92 \approx 4 \text{ и } n = 4m.$$

Таким образом, получается простое и практическое постоянное соотношение между коэффициентом моделирования и числом необходимых опытов. Если при моделировании уменьшается также толщина изоляции, но поле остается подобным, выведенное соотношение остается справедливым и относится тогда к средней напряженности поля. В этом случае m равно

Таблица 2

Значения коэффициента k			
Точность, %	± 25	± 50	± 100
Надежность			
0,9	43	10,75	2,7
0,997	144	36	9

отношению объемов изоляции. Произведение из средней напряженности поля на толщину изоляции дает напряжение, вызывающее в 50% случаев полный или частичный пробой.

Точность определения напряжения U_m , вызывающего 50% пробоев образца с площадью изоляции в m единиц, может быть подсчитана следующим образом. Точность получения вероятности Ψ в исходных опытах с образцами единичной площади зависит от числа опытов и определяется следующей формулой:

$$\eta = k_2 \sqrt{\frac{\Psi(1-\Psi)}{n}}. \quad (19)$$

Выражая точность в процентах от вероятности Ψ

$$\eta = k_3 \Psi, \quad (20)$$

получим:

$$k_3 = k_2 \sqrt{\frac{1-\Psi}{\Psi n}} = \frac{k_2 a}{\sqrt{n}}, \quad (21)$$

где

$$a = \sqrt{\frac{1-\Psi}{\Psi}}. \quad (22)$$

Зависимость a от Ψ приведена на рис. 1. Действительное значение вероятности, определенной из n опытов, будет лежать в пределах $\Psi \pm k_3 \Psi$. Для этих крайних значений можно определить крайние значения Ψ_m из кривых на рис. 2. Поясним этот подсчет на примере. Точность определения вероятности $\Psi=0,1$ при числе опытов $n=4m=4 \cdot 20$ равна $k_3=0,56$ (принимая $k_2=1,64$). Следовательно, пределы действительной вероятности будут:

$$0,1(1 \pm 0,56) = 0,044 \text{ или } 0,156.$$

Для значений $\Psi=0,044$ и $\Psi=0,156$ на рис. 1 для кривой $m=20$ определяем Ψ_m , которое

соответственно равно $\Psi_m=0,58$ и $\Psi_m=0,96$. Пусть на исходной кривой вероятности, полученной из опыта и приведенной на рис. 2, вероятности $\Psi=0,1$ соответствует напряжение U_3 . Следовательно, для образца с площадью изоляции в m раз большей ($m=20$) этому напряжению будут соответствовать пределы вероятности $\Psi_m=0,58$ и $0,96$. Аналогичным образом находятся другие точки предельных кривых, которые приведены на рис. 2 пунктирными линиями. Напряжения U'_m и U''_m , соответствующие на пунктирных кривых $\Psi_m=0,5$, определяют точность вычисления U_m , которая равна

$$+\delta U_m = U''_m - U_m \text{ и } -\delta U_m = U'_m - U_m.$$

Если произвести 16 m опытов, то точность определения U_m $\delta U_m = U_m \pm U'''_m$ будет больше (рис. 2). Точность определения U_m зависит от формы кривой $\Psi(U)$, полученной из опыта.

Все вышеизложенное дает основание следующие рекомендации. При выбранном коэффициенте моделирования следует произвести 4 m опытов и определить $U_m \pm \delta U_m$. Если точность определения U_m окажется недостаточной, то необходимо поставить дополнительное число опытов. Для определения дополнительного числа опытов можно руководствоваться следующим соображением: точность определения пробивного напряжения примерно обратно пропорциональна корню квадратному из числа опытов.

Литература

1. А. С. Зингерман. Статистический метод определения пробивного напряжения диэлектрика, ЖТФ, т. 14, стр. 1029, № 8, 1948.
2. С. Н. Бернштейн. Теория вероятности. 3-е. ОНТИ, стр. 251, 1934.

[28.6.1948]



Исследование устойчивости системы регулирования при введении внутренних связей

Кандидат техн. наук Д. И. Марьяновский

Москва

Покажем на ряде примеров, как исследовать устойчивость системы регулирования при введении внутренних связей. Прежде всего покажем, как сравнивать целесообразность введения внутренних связей в том или ином месте системы регулирования.

Регулирование напряжения синхронного генератора. Рассмотрим систему автоматического регулирования напряжения мощного синхронного генератора (рис. 1).

Регулирование напряжения генератора 1 осуществляется двумя машинами — главным возбуждением 3 и подвозбудителем 5. Первый из них питает обмотку 2 возбуждения генератора, а второй — обмотку 4 главного возбуждателя. Обмотка 6 возбуждения подвозбудителя приключена к выходу электронного усилителя 7. На вход усилителя поступает напряжение, появляющееся в диагонали измерительного моста, и напряжение вторичной обмотки противоколебательного трансформатора 10. Регулируемое напряжение синхронного генератора приложено к первичной обмотке измерительного трансформатора 11. Вторичная обмотка его приключена к накалу лампы 8, работающего в режиме насыщения. Лампа 8 является плечом моста Уитстона, питаемого постоянным током. Три других плеча его — сопротивления 9. Эквивалентное сопротивление лампы 8 зависит от напряжения накала. При некоторой величине этого сопротивления напряже-

Приведенные примеры иллюстрируют теорию, изложенную в статье «Изменение параметров систем регулирования внутренними связями» (Электричество, № 2, 1950). На примере системы регулирования напряжения мощного генератора выясняется целесообразность введения внутренних связей в том или ином месте системы. Влияние некомпенсированности продольного поля электромашинного усилителя на устойчивость статической и астатической системы регулирования рассматривается, как пример одновременного появления в системе жесткой и гибкой связей, коэффициенты усиления которых зависят от одного параметра.

ние в диагонали моста таково, что ток в обмотке 6 соответствует номинальному напряжению генератора 1. Отклонение регулируемого напряжения от заданного значения изменяет эквивалентное сопротивление лампы 8, вследствие чего в диагонали моста появляется приращение на-

пряжения, пропорциональное отклонению регулируемой величины. Если не принимать во внимание действие противоколебательного устройства — трансформатора 10, то напряжение в диагонали моста через усилитель 7, подвозбудитель 5 и возбуждатель 3 вызывает изменение тока в обмотке 2 возбуждения генератора 1. Происходящее при этом изменение э. д. с. генератора поддерживает заданную величину напряжения с точностью, зависящей от статизма системы.

Не учитывая постоянную времени обмотки статора генератора 1 и считая, что напряжение на его зажимах пропорционально э. д. с., можно рассматриваемую систему регулирования без противоколебательного устройства считать состоящей из четырех инерционных звеньев с постоянными времени T_1 , T_2 , T_3 и T_4 и коэффициентами усиления k_1 , k_2 , k_3 и k_4 . Входом первого звена является напряжение, приложенное к первичной обмотке трансформатора 11, а выходом — напряжение в диагонали моста. Выходом остальных трех звеньев являются э. д. с. якорей подвозбудителя 5 и возбуждателя 3 и напряжение генератора 1 или пропорциональные им токи в обмотках 6, 4 и 2 возбуждения этих машин.

В цепь обмотки возбуждения 2 включена первичная обмотка противоколебательного трансформатора 10. Напряжение его вторичной обмотки будем считать пропорциональным производной от тока этой цепи, а следовательно, от производной напряжения генератора 1. Таким образом, производная от выхода системы регулирования подается на вход второго звена.

Связь между коэффициентами характеристического уравнения разомкнутой системы до вве-

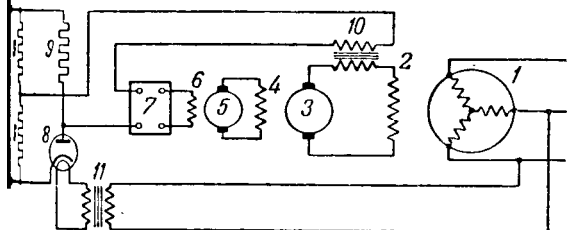


Рис. 1.

дения гибкой связи (a_{14} , a_{24} , a_{34} , a_{44}) и после введения ее (c_{14} , c_{24} , c_{34} , c_{44}) выразится равенствами:

$$\begin{aligned} c_{14} &= a_{14}, \\ c_{24} &= a_{24} + \hat{\beta} \hat{a}_{33}, \\ c_{34} &= a_{34} + \hat{\beta} \hat{a}_{33} \bar{a}_{11} = a_{34} + \hat{\beta} a_{44}, \\ c_{44} &= a_{44}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\hat{\beta} = k_2 k_3 k_4 \beta$.

Используя равенства (1), можно предельный коэффициент усиления рассматриваемой статической системы с простой гибкой связью

$$\varphi_4 = \frac{1}{c_{14}^2 c_{44}} \begin{vmatrix} c_{14} & 1 & 0 \\ c_{34} & c_{24} & c_{14} \\ 0 & c_{44} & c_{34} \end{vmatrix}$$

представить как функцию $\hat{\beta}$:

$$\varphi_4(\hat{\beta}) = \frac{1}{a_{14}^2 a_{44}} (a_{34} + a_{44} \hat{\beta}) (A_{24} + \hat{a}_{13} \hat{a}_{33} \hat{\beta}) \quad (2)$$

В области положительных $\hat{\beta}$ функция $\varphi_4(\hat{\beta})$ не имеет экстремальных значений и монотонно возрастает. Таким образом, эффект от введения гибкой связи возрастает по мере увеличения $\hat{\beta}$. Этого можно достичь как увеличением коэффициента усиления β гибкой связи, так и коэффициентов усиления k_2 , k_3 и k_4 звеньев, охваченных ею.

Допустим, что постоянной времени T_5 инерционного звена, которым замещается статор генератора 1, нельзя пренебречь. Тогда система регулирования на рис. 1 замещается пятью инерционными звеньями и гибкой связью, поданной с выхода четвертого звена на вход второго. При этом связь между коэффициентами характеристических уравнений выразится равенствами:

$$\begin{aligned} c_{15} &= a_{15}, \\ c_{25} &= a_{25} + \hat{\beta} \hat{a}_{33}, \\ c_{35} &= a_{35} + \hat{\beta} \hat{a}_{33} \bar{a}_{12}, \\ c_{45} &= a_{45} + \hat{\beta} a_{55}, \\ c_{55} &= a_{55}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если система пятого порядка состоит только из инерционных звеньев, то в подавляющем большинстве случаев для ее предельного коэффициента усиления можно использовать приближенное выражение

$$\varphi_5 \approx -1 + \frac{c_{35} c_{45}}{c_{25} c_{55}}.$$

Выразив правую часть этого выражения как функцию $\hat{\beta}$, найдем:

$$\varphi_5(\hat{\beta}) \approx -1 + \frac{(a_{35} + \hat{a}_{33} \bar{a}_{12} \hat{\beta}) (a_{45} + a_{55} \hat{\beta})}{a_{55} (a_{25} + \hat{a}_{33} \hat{\beta})}. \quad (4)$$

Если

$$\frac{a_{25}}{\hat{a}_{13}} \geq \frac{a_{35} a_{45}}{a_{35} \hat{a}_{33} + a_{45} \hat{a}_{23}}, \quad (5)$$

то приближенное выражение для $\varphi_5(\hat{\beta})$ не имеет экстремума и монотонно возрастает при увеличении $\hat{\beta}$. Это имеет место, например, когда $\hat{\beta}$ достаточно мало.

Если неравенство (5) не выполняется, то приближенное выражение для $\varphi_5(\hat{\beta})$ имеет максимум, и введение гибкой связи рационально только при достаточно больших $\hat{\beta}$.

Приведенное исследование показывает, что при принятых допущениях введение гибкой связи целесообразно осуществить так, как на рис. 1. Таким же методом можно исследовать в данной схеме целесообразность других вариантов введения внутренних связей.

Полученные результаты могут быть истолкованы в том смысле, что если в любой статической системе четвертого порядка гибкая связь охватывает три инерционных звена или два инерционное и одно колебательное, то можно утверждать, что предельный коэффициент усиления возрастает с возрастанием $\hat{\beta}$. Добавление к такой системе еще одного инерционного звена так, чтобы оно не охватывалось гибкой связью, не изменяет этих результатов в том случае, если постоянная времени добавленного инерционного звена достаточно мала. В противном случае введение гибкой связи целесообразно только при больших $\hat{\beta}$.

Устойчивость системы регулирования при одновременном действии гибкой и жесткой связи. Выше исследовалась устойчивость системы регулирования, когда в нее вводится гибкая связь. При одновременном действии гибкой и жесткой связи выражение для предельного коэффициента усиления становится функцией двух параметров и исследование устойчивости значительно усложняется. Однако, когда гибкая и жесткая связь появляются одновременно не при осуществлении их, а в результате внешних влияний друг на друга разных систем регулирования, бывает, что коэффициенты усиления этих связей являются в свою очередь функциями одного параметра. При этом исследование устойчивости может быть произведено рассмотренным способом.

Как пример одновременного появления гибкой и жесткой связи рассмотрим неполную компенсацию поля якоря электромашинного усилителя. Влияние ее на величину предельного коэффициента усиления статической или астатической системы, звеном которой является этот усилитель.

Допустим, что продольное поле якоря электромашинного усилителя (рис. 2) с короткозамкнутыми щетками 2 в поперечной оси, питающего индуктивную нагрузку 4, неполностью компенсировано компенсационной обмоткой 3. В этом случае, числа витков якоря и компенсационной обмотки, приведенные к продольной оси, не связаны между собой.

Рассмотрим зависимость между напряжением U_a , приложенным к обмотке возбуждения, токами i_1 , i_2 и i_3 в этой обмотке и в поле

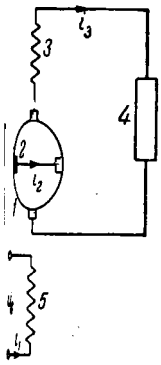


Рис. 2.

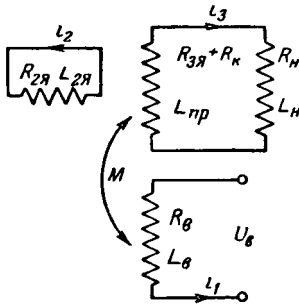


Рис. 3.

и продольной осях якоря. Дифференциальные уравнения, связывающие эти величины, могут быть записаны в виде:

$$L_g Di_1 + R_g i_1 \pm MDi_3 = U_g, \quad (6)$$

$$L_{2\alpha} Di_2 + R_{2\alpha} i_2 = \lambda_1 i_1 \pm \lambda_2 i_3, \quad (7)$$

$$(L_{np} + L_n) Di_3 + (R_{3\alpha} + R_k + R_n) i_3 = \lambda_3 i_2 \mp MDi_1. \quad (8)$$

Параметры всех цепей электромашинного усилителя показаны на рис. 3.

Здесь $R_n, R_g, R_k, R_{2\alpha}$ и $R_{3\alpha}$ — активные сопротивления нагрузки, обмотки возбуждения, компенсационной обмотки и обмотки якоря в поперечной и продольной осях; λ_1, λ_2 и λ_3 — коэффициенты пропорциональности; L_n, L_g и $L_{2\alpha}$ — индуктивности нагрузки, обмотки возбуждения и обмотки якоря в поперечной оси; L_{np} — индуктивность обмотки, эквивалентной встречному последовательному соединению компенсационной обмотки и обмотки якоря в продольной оси, с тем же числом витков, равным разности витков этих обмоток, приведенных к продольной оси; M — коэффициент взаимной индукции упомянутой выше эквивалентной обмотки и обмотки возбуждения. Верхний знак как в уравнениях (6) — (8), так и в дальнейшем относится к случаю перекомпенсации, а нижний — к недокомпенсации.

Член MDi_1 в уравнении (8) отражает то влияние, которое оказывает обмотка возбуждения на протекание переходного процесса в цепи нагрузки. Мощность обмотки возбуждения в крайнем мере в тысячу раз меньше мощности нагрузки, и очевидно, что влияние, которое она оказывает, воздействуя своим полем непосредственно на цепь нагрузки, исчезающе мало. Напротив, цепь нагрузки будет оказывать некомпенсированным полем якоря в продольной оси существенное влияние на цепь обмотки возбуждения даже при малых значениях M . Поэтому в уравнении (8) можно пренебречь членом MDi_1 в сравнении с остальными, в то время как в уравнении (6) с членом MDi_3 этого сделать нельзя.

Заметим, что $\lambda_2 = \eta \lambda_1$, где

$$\eta = \frac{w_\alpha - w_k}{w_g}$$

представляет собой коэффициент некомпенсированности электромашинного усилителя, а w_g, w_k и w_α — числа витков обмотки возбуждения, компенсационной обмотки и якоря, приведенные к продольной оси.

Введем обозначения:

$$T_1 = \frac{L_g}{R_g}; \quad T_2 = \frac{L_{2\alpha}}{R_{2\alpha}}; \quad T_3 = \frac{L_{np} + L_n}{R_{3\alpha} + R_k + R_n},$$

$$k_1 = \frac{1}{R_g}; \quad k_2 = \frac{\lambda_1}{R_{2\alpha}}; \quad k_3 = \frac{\lambda_3}{R_{3\alpha} + R_k + R_n}.$$

Запишем систему уравнений (6) и (8) в виде:

$$\left(D + \frac{1}{T_1}\right) i_1 = \frac{k_1}{T_1} (U_g \mp MDi_3), \quad (9)$$

$$\left(D + \frac{1}{T_2}\right) i_2 = \frac{k_2}{T_2} (i_1 \pm \eta i_3), \quad (10)$$

$$\left(D + \frac{1}{T_3}\right) i_3 = \frac{k_3}{T_3} i_2. \quad (11)$$

Допустим, что рассматриваемый электромашинный усилитель, питающий индуктивную нагрузку, представляет собой часть системы регулирования. Входом ее является напряжение U_g , приложенное к обмотке возбуждения, а выходом — ток нагрузки i_3 . Из дифференциальных уравнений (9) — (11) очевидно, что скелетная схема замещения (рис. 4) этой части системы состоит из трех инерционных звеньев с двумя обратными связями — одной гибкой и другой жесткой, поданными с выхода третьего звена на вход первого и второго.

Представим выражение для коэффициента взаимной индукции в виде

$$M = \mu \sqrt{L_{np} L_g},$$

где μ — коэффициент связи между эквивалентной обмоткой в продольной оси и обмоткой возбуждения.

Отсюда

$$\frac{k_1}{T_1} M = \frac{M}{L_g} = \mu \sqrt{\frac{L_{np}}{L_g}} = \mu \frac{w_\alpha - w_k}{w_g} = \mu \eta. \quad (12)$$

Таким образом, коэффициенты усиления гибкой и жесткой связи оказываются пропорциональными одному параметру η — коэффициенту некомпенсированности электромашинного усилителя.

Принимая во внимание все сказанное выше и исключив из (9) — (11) функции i_1 и i_2 , получим связь между входом — напряжением U_g и выходом — током i_3 в виде:

$$\left\{ \left(D + \frac{1}{T_1}\right) \left(D + \frac{1}{T_2}\right) \left(D + \frac{1}{T_3}\right) \mp \frac{k_2 k_3}{T_2 T_3} \eta \left[(1 - \mu) D + \frac{1}{T_1} \right] \right\} i_3 = - \frac{k_1 k_2 k_3}{T_1 T_2 T_3} U_g. \quad (13)$$

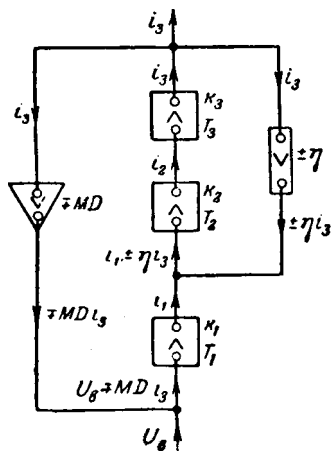


Рис. 4.

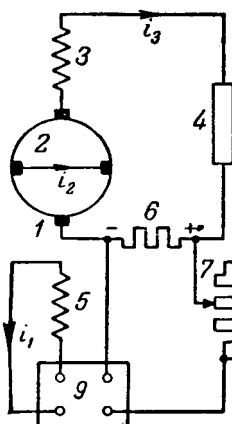


Рис. 5.

Введем обозначения

$$\hat{\gamma} = k_2 k_3 \gamma$$

и

$$\hat{a}_{22} = \frac{1}{T_3 T_3},$$

тогда уравнение (13) может быть записано в виде:

$$\{D^3 + a_{13}D^2 + [a_{23} \mp \hat{\gamma}\hat{a}_{22}(1-\mu)]D + (1 \mp \hat{\gamma})a_{33}\} i_3 = k_1 k_2 k_3 a_{33} U_0, \quad (14)$$

где a_{13} , a_{23} и a_{33} — элементарные симметрические функции, составленные из величин $\frac{1}{T_1}$, $\frac{1}{T_2}$ и $\frac{1}{T_3}$, или, иначе говоря, коэффициенты дифференциального уравнения (13), когда продольное поле электромашинного усилителя полностью компенсировано.

Покажем, что количественное рассмотрение влияния неполной компенсации продольного поля электромашинного усилителя на устойчивость системы регулирования сводится к исследованию предельного коэффициента усиления как функции одного параметра.

Рассмотрим сначала статическую систему на рис. 5, в которой поддерживается постоянство тока i_3 якоря электромашинного усилителя 1, питающего нагрузку 4. Ток нагрузки измеряется падением напряжения в шунте 6 и сравнивается с падением напряжения на некоторой части потенциометра 7, приключенного к батарее 8. Разность этих напряжений подается на вход безинерционного усилителя 9, к выходу которого приключена обмотка возбуждения 5 электромашинного усилителя.

Заданное значение регулируемой величины — ток i_3 устанавливается положением движка потенциометра и определяется как отношение снимаемого с него напряжения к сопротивлению шунта 6.

Допустим, что напряжение U_0 на выходе усилителя пропорционально разности напряже-

ний, приложенных к его входу. Если в уравнении (14) положить:

$$U_0 = \gamma(i_0 - i_3),$$

где γ — равно произведению сопротивления шунта 6 на коэффициент усиления усилителя 9, обозначить через

$$k_c = \frac{k_1 k_2 k_3 \gamma}{1 \mp \hat{\gamma}}$$

коэффициент усиления системы, то дифференциальному уравнению статической системы рис. 5 соответствует характеристическое уравнение

$$p^3 + a_{13}p^2 + [a_{23} \mp \hat{\gamma}\hat{a}_{22}(1-\mu)]p + (1 \mp \hat{\gamma})a_{33}(1 + k_c) = 0.$$

Для устойчивости рассматриваемой системы в случае недокомпенсации при любых $\hat{\gamma}$, в случае перекомпенсации при достаточно малом $\hat{\gamma}$ должно соблюдаться следующее условие:

$$k_c < \frac{a_{13}[a_{23} \mp \hat{\gamma}\hat{a}_{22}(1-\mu)] - (1 \mp \hat{\gamma})a_{33}}{(1 \mp \hat{\gamma})a_{33}} = \varphi_3(\hat{\gamma})$$

Как видно из выражения (15), коэффициент усиления k_c зависит от $\hat{\gamma}$, соответственно увеличиваясь или уменьшаясь при пере- или недокомпенсации. Так как обычно коэффициент усиления системы задается техническими условиями задачи регулирования, то при изменении степени недокомпенсированности электромашинного усилителя допустим, что меняется коэффициент усиления одного из звеньев системы, например величина γ так, что общий коэффициент усиления всей системы остается неизменным и равным заданному. Однако, вне зависимости от того будет ли общий статический коэффициент усиления системы постоянен при изменении $\hat{\gamma}$, будет меняться, величина φ_3 имеет вполне определенный физический смысл, полностью характеризующий устойчивость системы.

Исследуем предельный коэффициент усиления φ_3 как функцию $\hat{\gamma}$. Перепишем предельно выражение для $\varphi_3(\hat{\gamma})$ в виде

$$\varphi_3(\hat{\gamma}) = \frac{\varphi_3(0) \mp \hat{\gamma} \left[\frac{\hat{a}_{22} a_{13}}{a_{33}} (1-\mu) - 1 \right]}{1 \mp \hat{\gamma}},$$

где

$$\varphi_3(0) = \frac{a_{13} a_{23} - a_{33}}{a_{33}}.$$

Заметив, что при любых значениях параметров схемы на рис. 5 справедливо неравенство

$$\begin{aligned} \varphi_3(0) &> \frac{\hat{a}_{22} a_{13}}{a_{33}} (1-\mu) - 1 = \\ &= T_1 \left(\frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \right) (1-\mu) - \mu, \end{aligned}$$

трудно показать, исследуя правую часть уравнения (16), что при увеличении $\hat{\eta}$ предельный коэффициент усиления рассматриваемой системы увеличивается при перекомпенсации и уменьшается при недокомпенсации.

Рассмотрим теперь влияние некомпенсированности электромашинного усилителя на устойчивость следящей системы, изображенной на рис. 6. Назначение этого устройства состоит в том, чтобы заставить вал двигателя 4 следовать за поворотом оси сельсина—датчика 10.

Двигатель 4 с независимым возбуждением 8, являющийся по схеме генератор—двигатель, питается от электромашинного усилителя 1. Обмотка возбуждения 5 его приключена к выходным зажимам безинерционного усилителя 6. Валом двигателя 4 механически связан следящий сельсин 11. Сельсины 10 и 11 включены в трансформаторной схеме. При этом обмотка возбуждения 7 одного из сельсинов питается от сети переменного тока, а обмотка возбуждения 9 другого приключена к входу усилителя 6. В несоответствии в положениях осей сельсинов 10 и 11 на зажимах обмотки 9 появляется напряжение, которое можно считать пропорциональным небольшим углам рассогласования.

Допустим, что этому напряжению в свою очередь пропорционально напряжение на выходе усилителя 6, приложенное к обмотке возбуждения 5 электромашинного усилителя, тогда дифференциальные уравнения следящей системы на рис. 6 могут быть записаны в виде:

$$D + \frac{1}{T_1} i_1 = \frac{k_1}{T_1} \left[\gamma(\theta_d - \theta_{cl}) \mp MDi_3 \right], \quad (17)$$

$$D + \frac{1}{T_2} i_2 = \frac{k_2}{T_2} (i_1 \pm \eta i_3), \quad (18)$$

$$D + \frac{1}{T_3} i_3 = \frac{\sigma_3}{T_3} (i_2 - \nu v_{cl}), \quad (19)$$

$$D + \frac{1}{T_4} v_{cl} = \frac{\sigma_4}{T_4} i_3, \quad (20)$$

$$D\theta_{cl} = \xi_0 v_{cl}; \quad (21)$$

где γ —коэффициент пропорциональности между углом рассогласования сельсинов и напряжением, приложенным к обмотке возбуждения 5; в эту величину входит как множитель коэффициент усиления усилителя 6;

θ_d —угол поворота сельсина-датчика;

θ_{cl} —угол поворота следящего сельсина;

v_{cl} —скорость двигателя 4;

ξ_0 —коэффициент, характеризующий передачу от вала двигателя к следящему сельсину;

T_1 —механическая постоянная времени двигателя и нагрузки;

T_2 —постоянная, численно равная установившемуся значению скорости двигателя при токе якоря, равном единице;

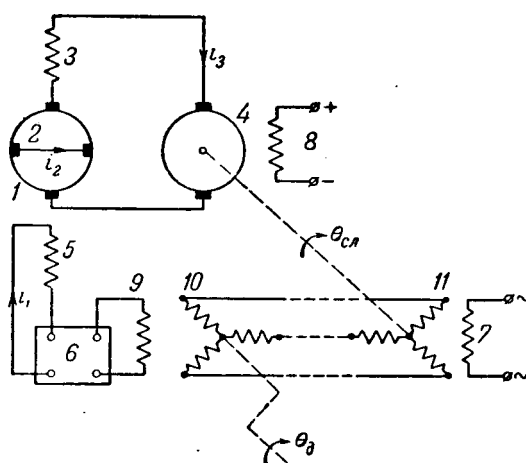


Рис. 6.

τ_3 —электрическая постоянная времени цепи нагрузки, равная значению T_3 в уравнении (11), если в выражении для T_3 положить R_n равным активному сопротивлению, а L_n —индуктивности цепи якоря двигателя;

σ_3 —постоянная, численно равная току в цепи якоря заторможенного двигателя, если ток i_2 в поперечной оси электромашинного усилителя равен единице;

ν —коэффициент, характеризующий э. д. с. вращения двигателя.

Все остальные обозначения такие же, как в уравнениях (3)—(11). Исключив из уравнений (17)—(20) функцию i_3 , получим:

$$\left(D + \frac{1}{T_1} \right) i_1 = \frac{k_1}{T_1} \left[\gamma(\theta_d - \theta_{cl}) \mp \frac{\tau_4 M}{\sigma_4} D \left(D + \frac{1}{T_4} \right) v_{cl} \right], \quad (22)$$

$$\left(D + \frac{1}{T_2} \right) i_2 = \frac{k_2}{T_2} \left[i_1 \pm \frac{\tau_4 \eta}{\sigma_4} \left(D + \frac{1}{T_4} \right) v_{cl} \right], \quad (23)$$

$$\left(D + \frac{1}{T_3} \right) \left(D + \frac{1}{T_4} \right) v_{cl} = \frac{k_3 k_4}{T_3 T_4} i_2, \quad (24)$$

$$D\theta_{cl} = \xi_0 v_{cl}. \quad (25)$$

Здесь $\frac{1}{T_3}$ и $\frac{1}{T_4}$ являются корнями квадратного уравнения

$$p^2 + \left(\frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4} \right) p + \frac{1 + \nu \sigma_3 \sigma_4}{T_3 T_4} = 0,$$

а k_3 и k_4 —новыми постоянными, связанными со старыми постоянными σ_3 и σ_4 равенствами:

$$k_3 = \frac{\sigma_3 T_3}{\tau_3} \text{ и } k_4 = \frac{\sigma_4 T_4}{\tau_4}.$$

Введем обозначения

$$\frac{\tau_4}{\sigma_4} \eta k_2 k_3 k_4 = \hat{\eta}, \quad \frac{1}{T_2 T_3 T_4} = \hat{a}_{33}, \quad \xi_0 \gamma \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{1 \mp \frac{\hat{\eta}}{\tau_4}} = k_a$$

и воспользуемся равенством (12). Тогда, исключив функции i_1 , i_2 и v_{cl} из системы уравнений

(22)–(25), получим дифференциальное уравнение, связывающее углы поворота сельсина-датчика и следящего сельсина. Характеристическое уравнение, соответствующее этому дифференциальному имеет вид:

$$p^5 + a_{14}p^4 + [a_{24} \mp \hat{\eta}\hat{a}_{33}(1-\mu)]p^3 + [a_{34} \mp \hat{\eta}\hat{a}_{33}\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1-\mu}{\tau_4}\right)]p^2 + a_{44}\left(1 \mp \frac{\hat{\eta}}{\tau_4}\right)p + a_{44}\left(1 \mp \frac{\hat{\eta}}{\tau_4}\right)k_a = 0, \quad (26)$$

где a_{14} , a_{24} , a_{34} и a_{44} — элементарные симметрические функции, составленные из величин $\frac{1}{T_1}$, $\frac{1}{T_2}$, $\frac{1}{T_3}$, и $\frac{1}{T_4}$.

Параметры следящей системы на рис. 6 имеют обычно значения, при которых, во-первых, выполняется неравенство:

$$\frac{a_{34}}{\hat{a}_{33}\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1-\mu}{\tau_4}\right)} < \frac{a_{24}}{\hat{a}_{33}(1-\mu)}, \quad (27)$$

а во-вторых, вместо точного выражения для предельного коэффициента усиления может быть взято приближенное выражение

$$\psi_4(\hat{\eta}) \approx \frac{a_{34} \mp \hat{\eta}\hat{a}_{33}\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1-\mu}{\tau_4}\right)}{a_{24} \mp \hat{\eta}\hat{a}_{33}(1-\mu)}. \quad (28)$$

Исследуя это выражение при условии нетрудно показать, что при достаточно малом $\hat{\eta}$, небольшой некомпенсированности электромашиного усилителя, обычно имеющего место на практике, предельный коэффициент усиления при недокомпенсации увеличивается при перекомпенсации уменьшается.

Сравнивая влияние пере- или недокомпенсации электромашиного усилителя в схемах на рис. 5 и 6, можно сделать заключение, что и тот же характер некомпенсированности дает изменение предельного коэффициента усиления разных знаков в зависимости от того, будет ли эта некомпенсированность создавать в статической или астатической системе.

Выводы. При исследовании предельного коэффициента усиления как функции параметров выранных связей выясняется целесообразность дения их в том или ином месте системы.

Если гибкая и жесткая связь появляются в системе одновременно и коэффициенты усиления их зависят от одного и того же параметра, например, при некомпенсированности передаточного поля электромашиного усилителя, то исследование предельного коэффициента усиления как функции этого параметра выясняется в том же общем виде влияние некомпенсированности на устойчивость системы, звеном которой является электромашиный усилитель.

◇ ◇ ◇

Переходные процессы в дросселях насыщения, вызванные изменением напряжения

Кандидат техн. наук, доц. В. Е. БОГОЛЮБОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Расчет переходных процессов дросселей насыщения представляет существенный интерес, особенно в связи с все более широким использованием этих дросселей в современной технике.

Всякие изменения амплитуды переменного напряжения на зажимах дросселя насыщения должны вызывать появление среднего тока [Л. 2]. Под средним током мы будем понимать ток (или токи), изменяющийся по аperiodическому закону и возникающий в одной или нескольких обмотках дросселя насыщения вследствие изменения амплитуды напряжения питания.

В дросселе с параллельным соединением обмоток переменного тока оказывается отличным от нуля среднее значение тока в каждой из

Предлагается метод приближенного расчета тех переходных процессов в дросселях насыщения, которые вызваны изменением амплитуды приложенного к дросселю переменного напряжения.

этих обмоток — средний ток замыкается в контуре, образованном этими обмотками¹. Появление

среднего тока создает апериодическую составляющую магнитного потока. Этот поток алгебраически суммируется с магнитным потоком подмагничивания и соответствующим образом изменяет эффективную индуктивность дросселя².

¹ Строго говоря, в этом случае средний ток замыкается и в контуре подмагничивания, но мы будем заниматься схемами, в которых контур подмагничивания содержит сравнительно большие индуктивности и сопротивления и поэтому можно пренебречь влиянием этого изменения среднего тока на протекание процесса.

² Под эффективной индуктивностью дросселя мы понимаем выражение $L = \frac{U}{I\omega}$, где U и I — напряжение и ток дросселя.

При установлении режима средний ток постепенно исчезает вследствие наличия активного сопротивления в контуре, где замыкается этот средний ток.

Расчет переходного процесса в дросселе наращения в общем случае включает в себя определение мгновенных значений переменного тока в функции времени. Однако, для практических расчетов часто бывает достаточно знать величину среднего тока, выражающуюся значительно более простой функцией времени, так как в нее не входят периодические слагающие. Поэтому мы ставим перед собой задачу определения величины среднего тока при изменении амплитуды переменного напряжения и определения скорости исчезновения среднего тока.

Для простого аналитического определения величины среднего тока при изменении амплитуды напряжения на дросселе: 1) пренебрегаем гистерезисом, 2) аппроксимируем кривую намагничивания сердечника дросселя кубической параболой ($\psi = k\sqrt[3]{i}$) и 3) пренебрегаем влиянием активного сопротивления обмотки пере-
менного тока на процесс появления среднего тока.

Возникает вопрос, не являются ли эти предположения слишком грубым приближением. Экспериментальная проверка показала, что если скорость изменения амплитуды переменного напряжения относительно велика, а величина активного сопротивления дросселя относительно мала, то можно пренебречь влиянием активного сопротивления на протекание процесса появления среднего тока. При скачкообразном изменении переменного напряжения, в частности при включении дросселя на переменное напряжение, влияние активного сопротивления на процесс появления среднего тока можно не учитывать. Однако, переход к установившемуся процессу состоит именно в том, что протекание среднего тока по активному сопротивлению из периода в период все более смещает синусоиду переменного потокосцепления, пока средний ток полностью не исчезнет. Поэтому мы сознательно идем на известную нелогичность, как это часто делают в подобных случаях. Будем пренебрегать незначительным влиянием активного сопротивления на величину среднего тока в процессе его появления, но роль активного сопротивления при установлении стационарного режима обязательно учтется, так как она весьма существенна.

Для решения поставленной задачи можно было бы использовать более точную аппроксимацию кривой намагничивания (например, полином 5-й степени). Однако, это сильно усложнило бы решение задачи. Вместе с тем аппроксимация кривой намагничивания кубической параболой дает достаточно для ориентировочных расчетов точность определения начальных значений тока (см. ниже табл. 1, 2).

На рис. 1 приведена кривая $\psi = f(i)$ и ее аппроксимация. Для простоты выкладок зависимость между потокосцеплением и током будет

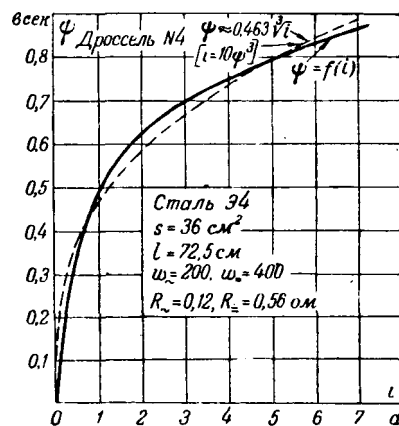


Рис. 1.

представляться в виде $i = \psi^3$ (рис. 1). Для этого либо ток, либо потокосцепление следует измерять в каких-то условных единицах.

Пусть к дросселю, имеющему постоянное подмагничивание $i_{(-)} = \text{const}$, которому соответствует потокосцепление $\psi_{(-)} = \sqrt[3]{i_{(-)}} = a$, подключается переменное напряжение, вызывающее вынужденное потокосцепление $\psi_{(+)} = b \sin(\vartheta + \alpha)$, где $\vartheta = \omega t$, α — начальная фаза принужденного потокосцепления.

Принимаем $\frac{di_{(-)}}{dt} = 0$, что всегда можно обеспечить, введя в цепь прямого тока достаточно большую индуктивность. Практически в большинстве случаев в этом не возникает необходимости, так как параметры схемы таковы, что даже при отсутствии индуктивности приводимые ниже аналитические соотношения достаточно хорошо описывают явление.

При отсутствии потерь в активном сопротивлении суммарное потокосцепление

$$\psi_c = a + b \sin(\vartheta + \alpha) - b \sin \alpha. \quad (1)$$

Ток намагничивания

$$i_c = [a + b \sin(\vartheta + \alpha) - b \sin \alpha]^3; \quad (2)$$

переменный ток

$$i_{(+)} = i_c - i_{(-)}.$$

Среднее значение переменного тока

$$I_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{(+)} d\vartheta = (a - b \sin \alpha)^3 + \frac{3}{2} (a - b \sin \alpha) b^2 - i_{(-)}. \quad (3)$$

В реальных условиях следует учесть влияние активного сопротивления. Согласно известному закону переменного тока в этих условиях среднее значение переменного тока при установившемся режиме равно нулю. Это требует появления отрицательного среднего значения переменного потокосцепления, направленного навстречу потокосцеплению, доставляемому обмоткой подмагничивания.

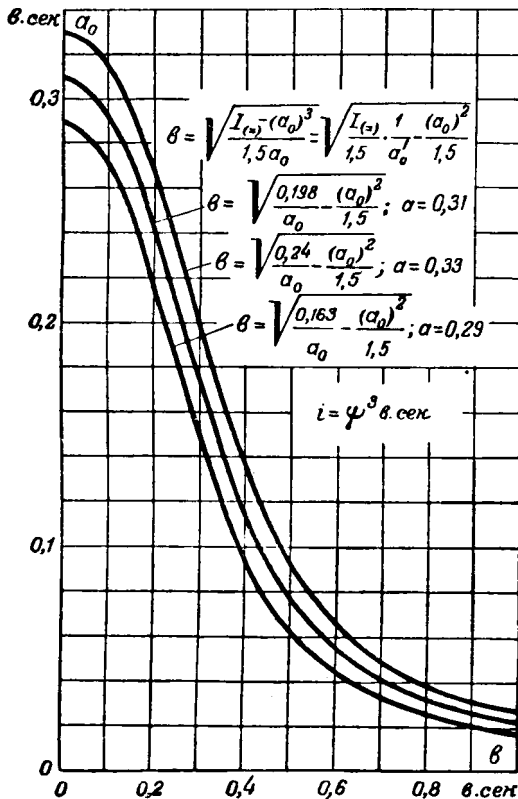


Рис. 2.

Рост абсолютной величины среднего значения переменного потокосцепления снижает величину результирующего потокосцепления с a до значения a_0 , при котором

$$I_{cp} = a_0^3 + \frac{3}{2} a_0 b^2 - i_{(-)} = 0. \quad (4)$$

Очевидно, при заданном подмагничивании среднее значение результирующего потокосцепления a_0 определяется амплитудой переменного потокосцепления b . Задаваясь различными значениями b и решая (4) относительно a_0 , можно построить кривые $a_0 = f(b)$ для различных значений токов $i_{(-)} = \sqrt{a}$.

Располагая семейством кривых³ (рис. 2), можно решить задачу определения среднего тока, возникшего в результате изменения напряжения на зажимах дросселя от одного значения U_1 до другого U_2 . Предполагается при этом, что в начале процесса к зажимам дросселя было длительно приложено напряжение U_1 , которому соответствует амплитуда переменного потокосцепления b_1 . Так как этот режим установился, то среднее значение результирующего потокосцепления должно быть a_{01} и по заданным a и b_1 оно определяется по кривой типа приведенных на рис. 2. При изменении напряжения на зажимах дросселя до U_2 амплитуда принужденного потокосцепления принимает значение b_2 , но среднее значение результирующего потоко-

сцепления в первое мгновение после изменения напряжения остается равным прежнему значению a_{01} .

После скачкообразного изменения амплитуды принужденного потокосцепления от величины b_1 до величины b_2 в момент, когда принужденный магнитный поток имел фазу a , результирующее потокосцепление будет:

$$\psi_{c_2} = [a_{01} - (b_2 - b_1) \sin a] + b_2 \sin(\theta + a).$$

Средний ток, аналогично предыдущему,

$$I_{cp} = [a_{01} - (b_2 - b_1) \sin a]^3 + \frac{3}{2} [a_{01} - (b_2 - b_1) \sin a] b_2^2 - i_{(-)}.$$

Обратимся теперь к частному случаю вычисления дросселя в момент, когда принужденный поток равняется нулю. Если бы шла речь о включении в такой момент дросселя без подмагничивания, то при отсутствии остаточного намагничивания не было бы переходного процесса. Особенность подмагниченного дросселя состоит именно в том, что даже при включении в этот момент должен возникнуть переходный процесс. В этом случае величина среднего тока возникшего при включении дросселя,

$$I_{cp} = a^3 + \frac{3}{2} a b^2 - i_{(-)}.$$

Значение среднего тока, появляющегося при изменении амплитуды принужденного потокосцепления от b_1 до b_2 ,

$$I_{cp} = a_{01}^3 + \frac{3}{2} a_{01} b_2^2 - i_{(-)}.$$

Рассмотрим числовой пример включения дросселя в момент, когда принужденное потокосцепление равно нулю. Пусть $a = 1.5$ и $b = 3.375$. Кривая суммарного потокосцепления для этого случая показана на рис. 3, а пунктиром. По рис. 3, а $I_{cp} = 9$ (рис. 3, а). Переход к установившемуся режиму характеризует величина a_0 . Для данного примера $a_0 = 0.54$ (рис. 3, б). Таким образом кривые мгновенных значений тока и потокосцепления для начального момента изображены на рис. 3, а, а для установившегося состояния — на рис. 3, б.

Сопоставление осциллограмм рисунков 3, а и 3, б позволяет подвести итоги всему изложенному.

Состояние a характеризуется тем, что среднее значение переменного потокосцепления равно нулю, среднее значение результирующего потокосцепления обусловлено лишь обмоткой подмаг-

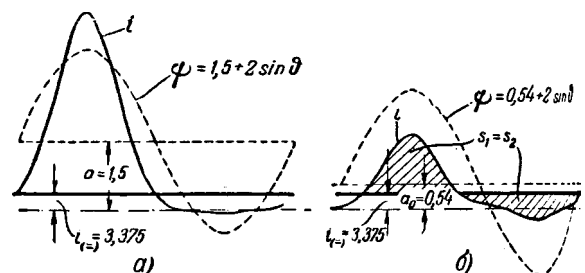


Рис. 3.

³ Аналогичные кривые для аппроксимации параболой 5-й степени дал Шунк [Л. 4].

Таблица 1

Режим	Ток подмагничивания, a Напряжение сети, v	0,16	0,16	0,14	0,14	0,12	0,12
		40	37	41	36	38,5	33
Напряжение U_1 до опрокидывания (по осциллограмме), v . .		107	91	110	87,5	98,5	90
Напряжение U_2 после опрокидывания (по осциллограмме), v . .		60,5	63,5	58,4	61	61	61,5
Наибольшее значение отрицательного среднего тока (расчет), a		0,213	0,161	0,192	0,138	0,142	0,12
Наибольшее значение отрицательного среднего тока (по осциллограмме), a		0,202	0,168	0,177	0,136	0,1315	0,11

Таблица 2

Режим	Ток подмагничивания, a Напряжение сети, v	0,18	0,18	0,15	0,15	0,12	0,12
		3,75	33,5	38,5	32,5	38,5	32,5
Напряжение U_1 до опрокидывания (по осциллограмме), v . .		129	111	133	94	131	107
Напряжение U_2 после опрокидывания (по осциллограмме), v . .		46	42,7	42,7	39,5	23,4	26,6
Наибольшее значение отрицательного среднего тока (расчет), a		0,232	0,229	0,202	0,180	0,170	0,162
Наибольшее значение отрицательного среднего тока (по осциллограмме), a		0,173	0,170	0,152	0,133	0,131	0,110

Таблица 3

Дроссель табл. 1 (напряжение на дросселе убывало от 107 до 60,5 v ; ток подмагничивания 0,16 a)

Число	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
I_{cp} a (расчет)	0,202	0,164	0,139	0,119	0,09	0,066	0,052
I_{cp} a (по осциллограмме)	0,202	0,174	0,133	0,115	0,09	0,174	0,045

Таблица 4

Дроссель табл. 2 (напряжение на дросселе убывало от 133 до 42,7 v ; ток подмагничивания 0,15 a)

Число	0	0,1	0,2	0,3	0,4
I_{cp} a (расчет)	0,132	0,084	0,043	0,0235	0,0179
I_{cp} a (по осциллограмме)	0,132	0,037	0,053	0,0281	0,0127

вания. Средний ток отличен от нуля и среднее значение результирующей напряженности поля превышает значение постоянной напряженности, обусловленной обмоткой подмагничивания. Соотношение b характеризуется тем, что средний ток равен нулю и напряженность поля определяется обмоткой подмагничивания. При этом среднее значение результирующего потокосцепления меньше постоянного потокосцепления обмотки подмагничивания.

Изложенный метод можно использовать и для определения среднего тока, возникающего в процессе квазирелаксационных колебаний феррорезонансных цепях с дросселями насыщения. Однако, при этом надо иметь в виду, что изменение напряжения на дросселе оно можно установить. Это означает, что описанным путем можно определить средний ток, воз-

никший только в результате обратного опрокидывания [Л. 1, 2].

Для проверки точности метода автором были проделаны многочисленные эксперименты.

В качестве примера приведем две таблицы сравнения данных расчета и опыта. Первая из них относится к дросселю рис. 1 с сопротивлением обмоток переменного тока $R_{(=)} = 0,12 \text{ ом}$, вторая — к дросселю с сопротивлением обмоток переменного тока $R = 4,2 \text{ ом}$ (сталь Э4, $S = 7 \text{ см}^2$, $w_{(=)} = 670$, $w = 980$, $R_{(=)} = 4,2 \text{ ом}$). Продолжительность изменения напряжения в обоих случаях составляла около 0,12 сек.

Вторая часть задачи — определение скорости исчезновения среднего тока. Скорость [Л. 1]

$$\frac{dI_{cp}}{dt} = \frac{-I_{cp}R}{t + I_{cp} \frac{dt}{dI_{cp}}}$$

Величина l может быть названа мерой индуктивности дросселя насыщения. Она равна отношению среднего значения результирующего потокосцепления к среднему току

$$l = \frac{\Psi_{p_{cp}}}{I_{cp}}$$

Способ получения кривой $l(I_{cp})$ был указан автором [Л. 1]. Зависимость этой величины от параметров дросселя вскрыта в другой работе автора [Л. 3].

Решение этого нелинейного уравнения при известной кривой $l(I_{cp})$ может быть проведено методом скользящей шкалы. При ориентировочных расчетах с достаточной для практики точностью можно считать величину l постоянной, равной среднему из ее возможных предельных значений l_p . В таком случае кривая изменения среднего тока вырождается в экспоненту с постоянной времени

$\tau_p = \frac{L}{R}$. Зависимость этой величины от параметров дросселя была также приведена [Л. 3].

Для предварительной оценки точности метода аппроксимации экспонентой было проделано значительное число опытов. В качестве примера приведем сопоставление значений среднего тока, полученных расчетным и опытными путями, в различные моменты времени.

Практическая ценность предлагаемых методов состоит в том, что они позволяют относительно просто рассчитывать переходные процессы, вызванные изменением напряжения питания дросселя насыщения, и дают возможность оценить то влияние, которое может иметь изменение

напряжения на режим работы всего устройства элементом которого является данный дроссель насыщения.

Литература

1. В. Е. Боголюбов, Квазирелаксационные явления в феррорезонансных цепях. Труды МЭИ, Сборник посвященный 75-летию члена-корр. Академии наук СССР. К. А. Круга, вып. 3, Госэнергоиздат, 1948.
2. В. Е. Боголюбов, Квазирелаксационные явления в феррорезонансных цепях с подмагничиванием. Электричество, № 6, 1949.
3. В. Е. Боголюбов, Мера затухания подмагниченного дросселя, ВЭП, № 9, 1949.
4. Schunck, Der Wechselfluss einer Eisenkern mit Überlagerter Gleichstrommagnetisierung, A. I. E. I. 12, стр. 428, 1923.

[744]



Решение операционным методом телеграфных уравнений при ненулевых начальных и граничных условиях

Кандидат техн. наук М. П. ПОКРАСС

Московский электротехнический институт связи

При расчете ряда электрических цепей, содержащих проводные линии, возникает необходимость в определении закона изменения тока и напряжения цепи в случае изменения ранее существовавшего режима. Задача, следовательно, сводится к решению телеграфных уравнений при ненулевых начальных и граничных условиях.

Ниже предлагается решение задачи в предположении постоянства параметров цепи.

Общее решение телеграфных уравнений с учетом ненулевых начальных условий. Рассмотрим телеграфные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= Ri + L \frac{\partial i}{\partial t}, \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= Gu + C \frac{\partial u}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R , L , G и C — соответственно сопротивление, индуктивность, проводимость изоляции и емкость 1 км линии;

u и i — напряжение и ток в любой точке линии.

Воспользуемся известным интегралом [Л. 1] для случая ненулевых начальных условий и перепишем уравнения (1):

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial \bar{u}(p, x)}{\partial x} &= (R + pL) \bar{i}(p, x) - pLi(0, x), \\ -\frac{\partial \bar{i}(p, x)}{\partial x} &= (G + pC) \bar{u}(p, x) - pCu(0, x). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Дается решение операционным методом телеграфных уравнений для случая ненулевых начальных и граничных условий. Формулы представляют возможность получать сравнительно легко операционные выражения для определения тока и напряжения в схемах с распределенными и сосредоточенными параметрами. Приводится решение некоторых задач, имеющих практическое значение.

Дифференцируя выражение (2) по x , получим

$$-\frac{\partial^2 \bar{u}(p, x)}{\partial x^2} = -(R + pL) \frac{\partial \bar{i}(p, x)}{\partial x} + pL \frac{\partial i(0, x)}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial^2 \bar{i}(p, x)}{\partial x^2} = -(G + pC) \frac{\partial \bar{u}(p, x)}{\partial x} + pC \frac{\partial u(0, x)}{\partial x};$$

здесь $i(0, x)$ и $u(0, x)$ — значения тока и напряжения при $t=0$.

Решая совместно (2) и (3) и полагая

$$\sqrt{(R + pL)(G + pC)} = \gamma,$$

$$R + pL = z \quad \text{и} \quad G + pC = y,$$

получим:

$$\frac{\partial^2 \bar{u}(p, x)}{\partial x^2} - \gamma^2 \bar{u}(p, x) = -pCzu(0, x) + pLi'(0, x)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{i}(p, x)}{\partial x^2} - \gamma^2 \bar{i}(p, x) = -pLy i(0, x) + pCu'(0, x)$$

Решением уравнения

$$\frac{\partial^2 \bar{u}(p, x)}{\partial x^2} - \gamma^2 \bar{u}(p, x) = 0$$

является функция

$$\bar{u}(p, x) = A_1 \operatorname{ch} \gamma x + B_1 \operatorname{sh} \gamma x.$$

Для уравнения (6) решение можно записать в виде:

$$\bar{u}(p, x) = A_1 \operatorname{ch} \gamma x + B_1 \operatorname{sh} \gamma x + v.$$

Определим функцию v , воспользовавшись, например, следующим методом:

$$\left. \begin{aligned} v &= C_1 \operatorname{ch} \gamma x + C_2 \operatorname{sh} \gamma x, \\ C_1 \operatorname{ch} \gamma x + C_2' \operatorname{sh} \gamma x &= 0, \\ \gamma C_1' \operatorname{sh} \gamma x + \gamma C_2' \operatorname{ch} \gamma x &= \\ &= -pCzu(0, x) + pLi'(0, x). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Отсюда

$$C_1 = \frac{pCz}{\gamma} u(0, x) \operatorname{sh} \gamma x - \frac{pL}{\gamma} i'(0, x) \operatorname{sh} \gamma x, \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{pL}{\gamma} i'(0, x) \operatorname{ch} \gamma x - \frac{pCz}{\gamma} u(0, x) \operatorname{ch} \gamma x. \quad (12)$$

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{pCz}{\gamma} \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma \eta d\eta - \frac{pL}{\gamma} \int_0^x i'(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma \eta d\eta, \\ v &= \frac{pL}{\gamma} \int_0^x i'(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma \eta d\eta - \frac{pCz}{\gamma} \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma \eta d\eta \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} v &= -\frac{pCz}{\gamma} \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma(x - \eta) d\eta - \frac{pL}{\gamma} i(0, 0) \operatorname{sh} \gamma x + \\ &+ pL \int_0^x i(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma(x - \eta) d\eta. \end{aligned} \quad (14)$$

Поэтому общее решение для $\bar{u}(p, x)$ представится следующим образом:

$$\begin{aligned} i(p, x) &= A_1 \operatorname{ch} \gamma x + B_1 \operatorname{sh} \gamma x - \frac{pCz}{\gamma} \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma \times \\ &\times (x - \eta) d\eta - \frac{pL}{\gamma} i(0, 0) \operatorname{sh} \gamma x + \\ &+ pL \int_0^x i(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma(x - \eta) d\eta. \end{aligned} \quad (15)$$

Аналогично для тока находим:

$$\begin{aligned} \bar{i}(p, x) &= A_2 \operatorname{ch} \gamma x + B_2 \operatorname{sh} \gamma x - \\ &- \frac{pL}{\gamma} \int_0^x i(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma(x - \eta) d\eta - \frac{pC}{\gamma} u(0, 0) \operatorname{sh} \gamma x + \\ &+ pC \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma(x - \eta) d\eta; \end{aligned} \quad (16)$$

здесь $u(0, 0)$ — напряжение в начале линии при $t=0$;

$u(0, \eta)$ — напряжение на расстоянии η от начала линии при $t=0$;

$i(0, 0)$ — ток в начале линии при $t=0$;

$i(0, \eta)$ — ток на расстоянии η от начала линии при $t=0$.

Определим значение коэффициентов A_1, A_2, B_2 . При $x=0$ имеем: $\bar{u}(p, 0) = A_1$ и $\bar{i}(p, 0) = A_2$.

Далее имеем:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{u}(p, x)}{dx} &= \gamma \bar{u}(p, 0) \operatorname{sh} \gamma x + \gamma B_1 \operatorname{ch} \gamma x - \\ &- pCz \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma(x - \eta) d\eta + \\ &+ pL \int_0^x i(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma(x - \eta) d\eta + pLi(0, x) - \\ &- pLi(0, 0) \operatorname{ch} \gamma x. \end{aligned} \quad (17)$$

Полагая здесь $x=0$, получаем:

$$\left. \frac{d\bar{u}(p, x)}{dx} \right|_{x=0} = \gamma B_1. \quad (18)$$

Сравнивая найденное выражение с (2) при $x=0$, находим:

$$B_1 = \frac{pL}{\gamma} i(0, 0) - \frac{z}{\gamma} i(p, 0). \quad (19)$$

Аналогичным путем с помощью выражений (16) и (2) определяем:

$$B_2 = \frac{pC}{\gamma} u(0, 0) - \frac{y}{\gamma} \bar{u}(p, 0). \quad (20)$$

После подстановки значений коэффициентов в выражения (15) и (16) и простых преобразований, учитывая, что $\gamma^2 = zu$ и $\frac{z}{\gamma} = z_c$, получаем:

$$\begin{aligned} \bar{u}(p, x) &= \bar{u}(p, 0) \operatorname{ch} \gamma x - z_c \bar{i}(p, 0) \operatorname{sh} \gamma x - \\ &- z_c pC \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma(x - \eta) d\eta + \\ &+ pL \int_0^x i(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma(x - \eta) d\eta, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \bar{i}(p, x) &= \bar{i}(p, 0) \operatorname{ch} \gamma x - \frac{1}{z_c} \bar{u}(p, 0) \operatorname{sh} \gamma x - \\ &- \frac{pL}{z_c} \int_0^x i(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma(x - \eta) d\eta + pC \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma(x - \eta) d\eta. \end{aligned} \quad (22)$$

Формулы (21) и (22) являются окончательными и представляют в операционной форме закон изменения тока и напряжения в линии на расстоянии x от начала в зависимости от времени с учетом ненулевых условий.

При решении уравнений пришлось прибегнуть к интегрированию по частям и дифференцированию под знаком интеграла разрывных функций, к которым относятся ток и напряжение. Однако, и в этом случае преобразованные уравнения остаются в силе [Л. 2].

С помощью некоторых операционных представлений можно осуществить переход от формул (21) и (22) к формулам, полученным Э. А. Мееровичем [Л. 3], исходя из разработанного им метода решения дифференциальных уравнений в частных производных. Используя этот метод [Л. 3], М. В. Точилов [Л. 4] имел возможность исследовать довольно сложные электрические цепи.

В некоторых случаях формулы (21) и (22) могут быть упрощены. Например, если в случае кабельной линии пренебречь индуктивностью и утечкой, то, полагая $G = 0$ и $L = 0$, имеем:

$$\gamma^2 = R_0 C; \quad z_c = \sqrt{\frac{R_0}{pC}}; \quad \frac{z_c}{\gamma} = \frac{1}{pC};$$

следовательно,

$$\bar{u}(p, x) = \bar{u}(p, 0) \operatorname{ch} \gamma x - z_c \bar{i}(p, 0) \operatorname{sh} \gamma x - z_c pC \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma(x - \eta) d\eta; \quad (23)$$

$$\bar{i}(p, x) = \bar{i}(p, 0) \operatorname{ch} \gamma x - \frac{1}{z_c} \bar{u}(p, 0) \operatorname{sh} \gamma x + pC \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma(x - \eta) d\eta. \quad (24)$$

При $x = l$ (в случае кабельной линии без утечки) получаем:

$$\bar{u}(p, l) = \bar{u}(p, 0) \operatorname{ch} \gamma l - z_c \bar{i}(p, 0) \operatorname{sh} \gamma l - z_c pC \int_0^l u(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma(l - \eta) d\eta; \quad (25)$$

$$\bar{i}(p, l) = \bar{i}(p, 0) \operatorname{ch} \gamma l - \frac{1}{z_c} \bar{u}(p, 0) \operatorname{sh} \gamma l + pC \int_0^l u(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma(l - \eta) d\eta. \quad (26)$$

Во всех приведенных выше формулах внеинтегральные члены представляют граничные условия, а интегралы — ненулевые условия при $t = 0$. С помощью полученных формул можно решить ряд задач, представляющих интерес для телемеханики, связи и др.

Индуктивность и утечка на линии принципиально нового в методы расчетов не вносят, а лишь делают их более сложными; поэтому для простоты рассмотрим кабельную линию без утечки, т. е. положим $G = 0$ и $L = 0$. Укажем только, что при распределенной утечке следует по формулам [5, 8]

$$u(x) = Ez_c \frac{R_e \operatorname{ch} \gamma(l - x) + z_c \operatorname{sh} \gamma(l - x)}{(R_0 + R_e) z_c \operatorname{ch} \gamma l + (z_c^2 + R_0 R_e) \operatorname{sh} \gamma l}, \quad (27)$$

$$i(x) = E \frac{z_c \operatorname{ch} \gamma(l - x) + R_e \operatorname{sh} \gamma(l - x)}{(R_0 + R_e) z_c \operatorname{ch} \gamma l + (z_c^2 + R_0 R_e) \operatorname{sh} \gamma l}, \quad (28)$$

найти величины установившегося тока и напряжения для определения начальных условий. В этих формулах R_0 и R_e — соответственно сопротивления в начале и в конце линии; $\sqrt{\frac{R_0}{G}} = z_c$ — волновое сопротивление, $\sqrt{RG} = \gamma$ — постоянная распространения; E — э. д. с. батареи постоянного тока.

Примеры применения выведенных формул для решения некоторых задач из области АТС.
Пример 1. Размыкание цепи. Кабельная линия (рис. 1) с нагрузкой z_0 и z_e по концам обтекается постоянным током. Пусть сопротивление и индуктивность, входящие в со-



Рис. 1.

став z_0 и z_e , постоянны. Требуется определить закон изменения тока и напряжения, если в момент $t = 0$ цепь тока обрывается в конце линии ключом K .

Начальные условия:

$$i(0, x) = \frac{E}{R_0 + R_l + R_e} = \frac{E}{R_l} = I_0;$$

$$u(0, x) = I_0 [R_e + R(l - x)].$$

Граничные условия: $\bar{i}(p, l) = 0$;

$$\bar{u}(p, 0) = E - \bar{i}(p, 0) z_0 + i(0, 0) p L_0.$$

На основании формулы (23) после некоторых преобразований можно написать:

$$\bar{u}(p, x) = u(0, x) + [I_0 - \bar{i}(p, 0)] (z_0 \operatorname{ch} \gamma x + z_c \operatorname{sh} \gamma x) \quad (29)$$

$$\bar{u}(p, 0) = u(0, 0) + [I_0 - \bar{i}(p, 0)] z_0. \quad (30)$$

Рассмотрим процесс спадания тока. Согласно уравнению (24) и после преобразований получим:

$$\bar{i}(p, x) = I_0 - [I_0 - \bar{i}(p, 0)] \frac{z_c \operatorname{ch} \gamma x + z_0 \operatorname{sh} \gamma x}{z_c}. \quad (31)$$

На основании граничного условия $\bar{i}(p, l) = 0$ находим:

$$\bar{i}(p, 0) = I_0 \left(1 - \frac{z_c}{z_c \operatorname{ch} \gamma l + z_0 \operatorname{sh} \gamma l} \right). \quad (32)$$

Подставим (32) в (29), (30) и (31). Тогда

$$\bar{u}(p, x) = u(0, x) + I_0 \frac{(z_0 \operatorname{ch} \gamma x + z_c \operatorname{sh} \gamma x) z_c}{z_c \operatorname{ch} \gamma l + z_0 \operatorname{sh} \gamma l}, \quad (33)$$

$$\bar{u}(p, 0) = u(0, 0) + I_0 \frac{z_0 z_c}{z_c \operatorname{ch} \gamma l + z_0 \operatorname{sh} \gamma l}, \quad (34)$$

$$\bar{i}(p, x) = I_0 - I_0 \frac{z_c \operatorname{ch} \gamma x + z_0 \operatorname{sh} \gamma x}{z_c \operatorname{ch} \gamma l + z_0 \operatorname{sh} \gamma l}. \quad (35)$$

Уравнения (33) и (35) представляют в операторной форме законы изменения тока и напряжения в любой точке цепи, а формулы (32) и (34) — аналогичные законы для начала цепи.

Пример 2. Замыкание цепи. Пусть кабельная линия без утечки, соединенная оди-



Рис. 2.

жом через нагрузку z_0 с батареей постоянного тока, в момент $t=0$ подключается другим током к сопротивлению z_e (рис. 2). Положим, z_0 и z_e обладают индуктивностью и сопротивлением. Найдем закон изменения тока и напряжения в цепи.

Начальные условия:

$$i(0, l) = 0; \quad i(0, 0) = 0.$$

Граничные условия:

$$\bar{u}(p, 0) = E - i(p, 0) z_0,$$

$$\bar{u}(p, l) = \bar{i}(p, l) z_e.$$

Пользуясь выражением (24), находим:

$$\bar{i}(p, x) = \bar{i}(p, 0) \left(\operatorname{ch} \gamma x + \frac{z_0}{z_c} \operatorname{sh} \gamma x \right), \quad (36)$$

$$\bar{i}(p, l) = \bar{i}(p, 0) \left(\operatorname{ch} \gamma l + \frac{z_0}{z_c} \operatorname{sh} \gamma l \right). \quad (37)$$

Далее, на основании формулы (23) можно писать:

$$\bar{i}(p, x) = [E - \bar{i}(p, 0) z_0] \operatorname{ch} \gamma x - z_c \bar{i}(p, 0) \operatorname{sh} \gamma x - \\ - z_c p C \int_0^x u(0, \eta) \operatorname{sh} \gamma (x - \eta) d\eta,$$

откуда

$$\bar{u}(p, x) = E - \bar{i}(p, 0) (z_0 \operatorname{ch} \gamma x + z_c \operatorname{sh} \gamma x); \quad (38)$$

$$\bar{u}(p, l) = E - \bar{i}(p, 0) (z_0 \operatorname{ch} \gamma l + z_c \operatorname{sh} \gamma l). \quad (39)$$

Вспользуемся граничным условием, тогда

$$\bar{i}(p, l) z_e = E - \bar{i}(p, 0) (z_0 \operatorname{ch} \gamma l + z_c \operatorname{sh} \gamma l). \quad (40)$$

Подставляя (37) в (40), получаем:

$$\bar{i}(p, 0) \left(\operatorname{ch} \gamma l + \frac{z_0}{z_c} \operatorname{sh} \gamma l \right) z_e = \\ = E - \bar{i}(p, 0) (z_0 \operatorname{ch} \gamma l + z_c \operatorname{sh} \gamma l);$$

откуда

$$\bar{i}(p, 0) = \frac{E}{(z_0 + z_e) \operatorname{ch} \gamma l + \left(\frac{z_0 z_e}{z_c} + z_c \right) \operatorname{sh} \gamma l}. \quad (41)$$

Вспользовавшись уравнением (37), имеем:

$$\bar{i}(p, l) = \frac{E \left(\operatorname{ch} \gamma l + \frac{z_0}{z_c} \operatorname{sh} \gamma l \right)}{(z_0 + z_e) \operatorname{ch} \gamma l + \left(\frac{z_0 z_e}{z_c} + z_c \right) \operatorname{sh} \gamma l}. \quad (42)$$

Подставим значение $\bar{i}(p, 0)$ в формулы (36) и находим в операторной форме остальные зависящие от нас зависимости:

$$\bar{i}(p, x) = \frac{E \left(\operatorname{ch} \gamma x + \frac{z_0}{z_c} \operatorname{sh} \gamma x \right)}{(z_0 + z_e) \operatorname{ch} \gamma l + \left(\frac{z_0 z_e}{z_c} + z_c \right) \operatorname{sh} \gamma l}; \quad (43)$$

$$\bar{u}(p, x) = E - \frac{E (z_0 \operatorname{ch} \gamma x + z_c \operatorname{sh} \gamma x)}{(z_0 + z_e) \operatorname{ch} \gamma l + \left(\frac{z_0 z_e}{z_c} + z_c \right) \operatorname{sh} \gamma l}. \quad (44)$$

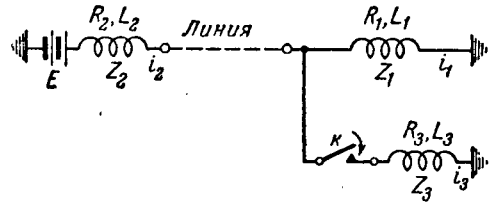


Рис. 3.

Полагая в формуле (44) $x=0$ или $x=l$, получаем в операторной форме закон изменения напряжения в начале или конце линии.

Пример 3. Проба занятой линии. На рис. 3 изображена схема, соответствующая пробе занятой линии в схемах АТС. Пусть цепь, состоящая из кабельной линии (без утечки и индуктивности) и нагрузок z_1 и z_2 по концам, обтекается постоянным током. В момент $t=0$ включим параллельно z_1 нагрузку z_3 . Предположим, что z_1 , z_2 и z_3 обладают сопротивлением и индуктивностью. Определим закон нарастания тока i_3 в нагрузке z_3 .

Начальные условия:

$$i_2(0, x) = i_1(0, l) = I_0 = \frac{E}{R_2 + Rl + R_1}; \quad (45)$$

$$i_3(0) = 0. \quad (46)$$

Граничные условия:

$$\bar{i}_2(p, l) = \bar{i}_1(p) + \bar{i}_3(p); \quad (47)$$

$$\bar{u}(p, 0) = E - \bar{i}_2(p, 0) z_2 + I_0 p L_2. \quad (48)$$

Учитывая ненулевые условия на конце линии, можно написать:

$$\bar{i}(p) z_1 - i_1(0) p L_1 = i_3(p) z_3. \quad (49)$$

Согласно формуле (26) имеем:

$$\bar{i}_2(p, l) = \bar{i}_2(p, 0) \operatorname{ch} \gamma l - \frac{1}{z_c} \bar{u}(p, 0) \operatorname{sh} \gamma l + \\ + p C \int_0^l u(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma (l - \eta) d\eta. \quad (50)$$

Так как

$$u(0, x) = I_0 [R_1 + R(l - x)] \quad (51)$$

и так как

$$p C \int_0^l u(0, \eta) \operatorname{ch} \gamma (l - \eta) d\eta = \\ = I_0 \frac{R_1 + Rl}{z_c} \operatorname{sh} \gamma l + I_0 - I_0 \operatorname{ch} \gamma l, \quad (52)$$

то, подставив (45), (48), (52) в (50), после простейших преобразований получаем:

$$\bar{i}_2(p, l) = I_0 - [I_0 - \bar{i}_2(p, 0)] \frac{z_c \operatorname{ch} \gamma l + z_2 \operatorname{sh} \gamma l}{z_c}. \quad (53)$$

Из условий (47) и (49) следует, что

$$\bar{i}_2(p, l) = \bar{i}_3(p) \frac{z_3 + z_1}{z_1} - I_0 \frac{R_1}{z_1} + I_0. \quad (54)$$

Подставим выражение (54) в предыдущее выражение. Тогда

$$\bar{i}_3(p) \frac{z_3 + z_1}{z_1} = I_0 \frac{R_1}{z_1} - [I_0 - \bar{i}_2(p, 0)] \frac{z_c \operatorname{ch} \gamma l + z_2 \operatorname{sh} \gamma l}{z_c}. \quad (55)$$

Исключим из последнего равенства $\bar{i}_2(p, 0)$; для этого воспользуемся выражением (25). Тогда после необходимых преобразований имеем:

$$\bar{u}(p, l) = [I_0 - \bar{i}_2(p, 0)] (z_2 \operatorname{ch} \gamma l + z_c \operatorname{sh} \gamma l) + I_0 R_1. \quad (56)$$

Далее можно написать $\bar{u}(p, l) = \bar{i}_3(p) z_3$. Поэтому, в нашем случае

$$I_0 R_1 + [I_0 - \bar{i}_2(p, 0)] (z_2 \operatorname{ch} \gamma l + z_c \operatorname{sh} \gamma l) = \bar{i}_3(p) z_3.$$

Отсюда

$$I_0 - \bar{i}_2(p, 0) = \frac{\bar{i}_3(p) z_3 - I_0 R_1}{z_2 \operatorname{ch} \gamma l + z_c \operatorname{sh} \gamma l}.$$

Следовательно, подставляя последнее выражение в формулу (55), находим:

$$\bar{i}_3(p) = I_0 R_1 \times \frac{\operatorname{ch} \gamma l (z_1 z_c + z_2 z_c) + \operatorname{sh} \gamma l (z_1 z_2 + z_c^2)}{\operatorname{ch} \gamma l (z_1 z_2 + z_2 z_3 + z_1 z_3) z_c + \operatorname{sh} \gamma l (z_1 z_c^2 + z_3 z_c^2 + z_1 z_2 z_3)}. \quad (57)$$

Выражение (57) определяет в операторной форме процесс нарастания тока в нагрузке z_3 .

Литература

1. А. М. Эфрос и А. М. Данилевский. Рациональное исчисление и контурные интегралы. Харьков: Государственное изд. Украины, ОНТИ НКТП, 1937.
2. М. И. Контарович. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. Издание Краснознаменной Академии связи им. Буденного, Ленинград, 1947.
3. Э. А. Меерович. Операторный метод решения краевых задач электротехники. Электричество, № 9 и № 10 — 11, 1939.
4. М. В. Тошилов. Теоретический анализ приема сигналов при работе стартстопных телеграфных аппаратов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Московский институт инженеров связи, 1940.
5. К. А. Круг. Переходные процессы в линиях электрических цепей. Госэнергоиздат, 1948.
6. В. И. Коваленков. Устанавливающиеся электромагнитные процессы вдоль проводных линий. Труды Академии наук СССР, М. — Л., 1945.
7. А. Н. Крылов. О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих приложение в технических вопросах. Изд. 2-е, Издательство Академии наук СССР, Л., 1932.
8. П. А. Котов. Устанавливающиеся электромагнитные процессы в линиях с распределенными параметрами и инженерные методы расчета искажений графных сигналов. Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук. Военная электротехническая академия им. Буденного, 1941.
9. М. П. Покрасс. Основы метода исследования пробных сетей АТС, действующих в схемах с распределенными параметрами. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Московский электротехнический институт связи 1949.

[27.11]



КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Для обсуждения предложений и замечаний, выявленных на читательских конференциях в Москве, Киеве, Ленинграде и Свердловске в отношении статей, опубликованных в журнале „Электричество“,

В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ МАЯ 1950 г.

будет проведена в Москве в помещении МОНИТОЭ однодневная конференция авторов журнала „Электричество“.

Редакция журнала и Правление МОНИТОЭ приглашают всех авторов журнала „Электричество“ принять активное участие в работе конференции, о дне и часе открытия которой будет объявлено дополнительно.

Электромашинные автоматические регуляторы дуговых сталеплавильных электропечей

Кандидат техн. наук А. М. ВАЙНБЕРГ

Москва

Автоматические регуляторы дуговых печей появились одновременно с дуговыми печами. Первая дуговая электропечь, заслуживающая

этого названия, появившаяся в конце семидесятых годов XIX столетия, имела автоматический регулятор электромагнитного типа, по идее подобный шунтовым регуляторам дуговых фонарей того времени. Вскоре после создания в конце XIX — в начале XX столетия дуговых печей промышленного типа были разработаны автоматические электромеханические регуляторы дуговых печей. Регуляторы были достаточно надежны, но несколько громоздки. В некоторых электропечных установках они сохранились и теперь.

Затем был предложен регулятор релейно-моторного типа, позволивший получить значительно более высокие скорости перемещения электродов и тем самым улучшить работу печи. Регуляторы этого типа изготовлял в СССР завод ЭМЗ. В области регулирования дуговых сталеплавильных печей и многих других объектов они почти безраздельно господствовали вплоть до тридцатых годов текущего столетия, когда появились электромашинные усилители. Предложено в тридцатых годах регулятору, описанному Deriberé [Л. 2], присущи все те элементы, которые характерны для современных электромашинных регуляторов. При появлении современных электромашинных усилителей пришлось лишь заменить генератор в этом регуляторе новыми усилителями.

Схемы современных электромашинных регуляторов. Схема с электромашинным усилителем, использующим последовательную усилительную обмотку (рис. 1). Усилитель $У$ питает обмотку возбуждения генератора $Г$, питающего в свою очередь электродвигатель перемещения электродов $Д$. Таким образом, регулятор имеет двухкаскадное усиление.

При нормальном режиме суммарные амперы всех обмоток: T , H , TO , OU равны нулю. Напряжение на выходе усилителя равно нулю. При отклонении режима печи от нормального

Рассматриваются схемы и принципы работы электромашинных регуляторов современного типа. Анализируется влияние различных факторов на работу регуляторов. Сравниваются теоретические выводы с результатами экспериментального исследования регуляторов разных типов.

нарушается баланс ампервитков и на выходе усилителя появляется напряжение, пропорциональное величине отклонения от нормального

режима. Электродвигатель перемещения электродов передвигает электрод со скоростью, приблизительно пропорциональной величине отклонения, до тех пор, пока не будет устранено нарушение режима.

Использование параллельной усилительной обмотки. Регуляторы этого типа могут выполняться в однокаскадном и в двухкаскадном исполнении. Однокаскадные регуляторы могут обслужить все сталеплавильные печи действующей в Советском Союзе серии, поэтому здесь рассматривается только однокаскадный вариант. Усилитель $У$ (рис. 2) имеет такие же обмотки возбуждения T и H , как и усилитель рассмотренного выше электромашинного регулятора. В отличие от него в этом регуляторе усилительная обмотка OU включена не последовательно, а параллельно. Кроме того, в усилителях таких регуляторов, применяют еще одну обмотку OP , постоянно питаемую от постороннего источника тока. Назначение этой обмотки — создавать постоянный момент вращения двигателя $Д$ для компенсации момента вращения сил веса неуравновешенного электрододержателя. Такое

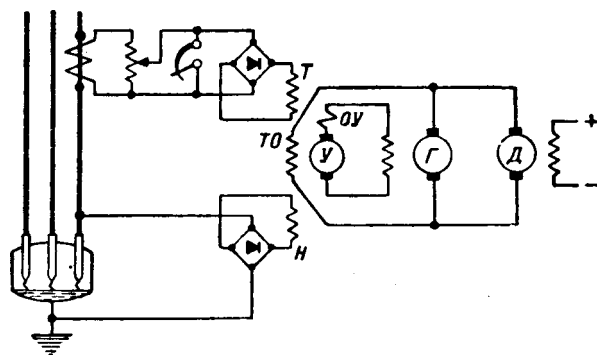


Рис. 1. Упрощенная схема регулятора с усилителем с последовательной усилительной обмоткой.

T — обмотка, питаемая током дуги; H — напряжением дуги; TO — генератором $Г$; OU — обмотка, питаемая полным током усилителя; $Д$ — электродный двигатель.

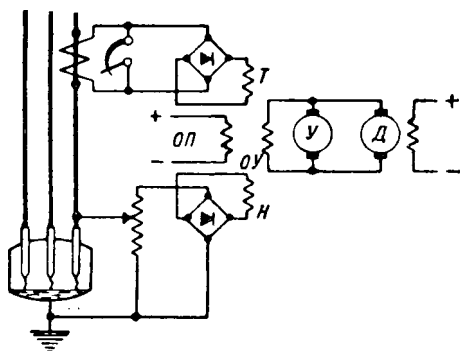


Рис. 2. Упрощенная схема регулятора с усилителем с параллельной усилительной обмоткой.

T—обмотка, питаемая током дуги; *H*—от напряжения дуги; *ТО*—генератор; *ОП*—обмотка независимого возбуждения; *У*—усилитель, *Д*—электродный двигатель.

«электрическое» уравнивание позволяет значительно упростить механизм перемещения электродов. Недостаток регуляторов этого типа—отсутствие возможности использования обратной связи в целях повышения запаса устойчивости обмотки.

Регулятор с двухкаскадным электромашиным усилителем с поперечным полем. В рассматриваемом усилителе поток создается одной обмоткой *ОУ* (рис. 3), обтекаемой током, пропорциональным разности напряжений—напряжения, пропорционального току дуги, и напряжения, пропорционального напряжению дуги. Такая схема возможна потому, что, в отличие от ранее описанных усилителей, на входе этого усилителя потребляется ничтожная мощность, меньше одного ватта. В этой схеме потери в обмотке возбуждения усилителя значительно меньше, чем при наличии двух обмоток—тока и напряжения. Но для предотвращения возможности циркулирования через обмотку управления паразитных токов, вызываемых смещением нулевой точки при несимметричном режиме в печи (что является обычным для начала процесса расплавления), схема требует введения промежуточного разделительного трансформатора *Тр*.

Применение стабилизирующей обмотки обратной связи *ТО* позволяет увеличить устойчивость системы, к тому же малые постоянные времени цепей этого усилителя обеспечивают при прочих равных условиях электропечной установке с этим регулятором более высокую устойчивость, чем с регуляторами других систем. Однако, имеется и обратная сторона: малая мощность на входе и, следовательно, малый магнитный поток обмотки управления, соизмеримый с потоком остаточного магнетизма, создают довольно значительную зависимость напряжения на выходных щетках от величины остаточного магнетизма. Наличие обмотки отрицательной обратной связи позволяет значительно уменьшить, но не устранить влияние остаточного магнетизма.

Результаты исследования. В СССР нашли применение различные образцы современных регуляторов электромашиного типа: с усилителем

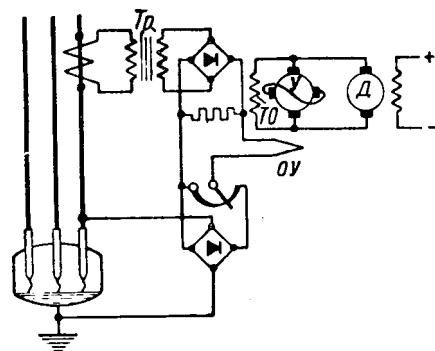


Рис. 3. Упрощенная схема регулятора с применением двухкаскадного усилителя с поперечным полем.

T—разделительный трансформатор; *У*—усилитель, *Д*—электродный двигатель, *ОУ*—обмотка управления усилителя.

с последовательной усилительной обмоткой (рис. 1); снабженные параллельной усилительной обмоткой (рис. 2) и с двухкаскадными усилителями с поперечным полем (рис. 3). Эти регуляторы управляют печами различных мощностей и конструкций. Для сравнения работы этих регуляторов в реальных условиях производственного предприятия приходится прибегать к теоретическому пересчету всех регуляторов к условиям одной печи с определенной скоростью перемещения электрода и сравнить результаты исследования устойчивости, быстроты возвращения к заданному режиму (быстроты) и чувствительности всех регуляторов.

Такому исследованию подверглись следующие установки:

1) электропечь емкостью 1,5 т с регулятором по схеме рис. 1, экспериментально обследованная Центральной лабораторией автоматизации Энергочермет; 2) электропечь емкостью 3 т с регулятором по схеме рис. 2, экспериментально обследованная той же лабораторией; 3) электропечь емкостью 100 кг Лаборатории электрогерметических аппаратов МЭИ с нестандартным оборудованием. Регулятор был осуществлен лабораторией промэлектропривода ВЭИ по схеме рис. 1.

Для сравнения систем первые две установки приводились к условиям системы, которая была лучше изучена: для всех регуляторов принялись одинаковые скорости перемещения, одинаковые моменты инерции и одинаковые параметры токоподвода. Изложим вкратце результаты исследования.

Устойчивость. Наиболее тяжелым является период начала плавки, когда дуга наиболее коротка. Исследование устойчивости велось именно для этого периода.

Скорости перемещения электродов для регуляторов были приняты равными скорости перемещения электродов установки 3—порядка 1 000 мм/мин при отклонении тока на 100% своего нормального значения (без учета перемещения).

Построенные для этих случаев амплитудно-фазные характеристики в рабочих условиях для действительных величин скоростей и параметров установки—даны на рис. 4, а для

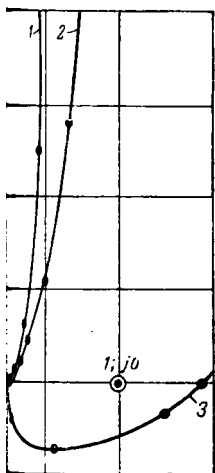


Рис. 4. Амплитудно-фазовые характеристики трех типов промышленных регуляторов дуговых печей в рабочих условиях.

1 — регуляторы с параллельной усилительной обмоткой; 2 — с двухкаскадным усилителем с поперечным полем; 3 — с последовательной усилительной обмоткой.

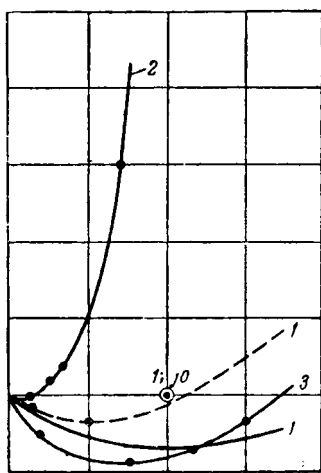


Рис. 5. Амплитудно-фазовые характеристики регуляторов, приведенных к одинаковым условиям работы.

1 — регуляторы с параллельной усилительной обмоткой; 2 — с двухкаскадным усилителем с поперечным полем; 3 — с последовательной усилительной обмоткой.

в рабочих условиях, соответствующих установке 3, рис. 5. Пунктиром на рис. 5 дана характеристика регулятора с усилителем с параллельной усилительной обмоткой, работающего в тех же условиях, что и остальные регуляторы, с тем отличием, что токоподвод соответствует рабочим условиям печи.

Расположение характеристик относительно $(1; j0)$ показывает, что при таких скоростях передвижения электрода, при которых установка с регулятором, использующим двухкаскадный усилитель с поперечным полем, работает более устойчиво (кривая 2), — установки с регуляторами, снабженными последовательной обмоткой 3) или параллельной усилительными обмотками, работают неустойчиво (рис. 5). Однако в действительности установка с регулятором, использующим усилитель с параллельным усилительной обмоткой, работает более устойчиво при весьма хорошем, почти предельном графиком движения. Расхождение объясняется тем, что вследствие невозможности применения в этой схеме дополнительной связи, для достижения устойчивости регулятора была значительно снижена скорость перемещения электродов в печи — в два раза по сравнению с двумя другими исследованными системами. Кроме того, большое соотношение мощности печи, омического и индуктивного сопротивления токоподвода этой установке (включая трансформатор и дроссель) также сыграли большую роль в увеличении запаса устойчивости системы.

Влияние параметров установки на устойчивость можно показать аналитически. Характеристический оператор критерия устойчивости

$$W(j\omega) = A \frac{P(j\omega)}{Q(j\omega)}, \quad (1)$$

как обычно, $j = \sqrt{-1}$; ω — частота;

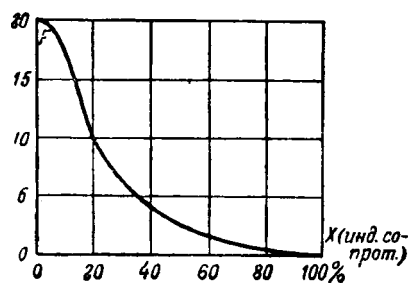


Рис. 6. Влияние индуктивного сопротивления установки на фактор F .

$P(j\omega)$ и $Q(j\omega)$ — функции, коэффициенты которых зависят от параметров отдельных элементов регулятора;

A — постоянный коэффициент, определяющий усиление.

Коэффициент

$$A = \beta(F+1) \frac{a_1 a_2 \dots}{b_1 b_2 \dots}, \quad (2)$$

где $a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$ — постоянные параметры отдельных элементов регулятора;

F — функция омического r_k и индуктивного x_k сопротивлений токопровода и сопротивления дуги при нормальном режиме, $r_{дн} = \frac{E_n}{I_n}$;

$$F = \frac{1 + \frac{r_k}{r_{дн}}}{\frac{r_k}{r_{дн}} + \left(\frac{r_k}{r_{дн}}\right)^2 + \left(\frac{x_k}{r_{дн}}\right)^2}. \quad (3)$$

Нормальное напряжение на электродах изменяется в весьма узких пределах. Для наиболее распространенных типов печей оно находится в пределах 200—220 в. Поэтому величина $\frac{1}{r_{дн}}$ почти пропорциональна мощности печи. Выражение F , являющееся безразмерной величиной, зависит, таким образом, только от параметров печной установки.

Как легко видеть из формул (2) и (3), варьируя параметры установки, возможно увеличить устойчивость работы регулятора. Идя на некоторое ухудшение технико-экономических показателей, это легко осуществить, увеличивая индуктивное сопротивление x_k дросселя, включаемого перед печным трансформатором для уменьшения толчков тока. Обычно это сопротивление ограничивает толчки тока трех-четыrehкратным значением нормального тока печи. Характер изменения фактора F в функции от индуктивного сопротивления x_k показан на рис. 6. На рисунке индуктивное сопротивление дано в процентах.

Опыты на шести печах показали, что практически значение x_k составляет 30—40%. Легко найти из (3), что F весьма мало зависит от мощности установки. Для большинства установок F находится в пределах 4,2—5,5.

Для установки по схеме рис. 2 значение F значительно меньше — оно примерно вдвое меньше средних значений и составляет 2,48, что и соз-

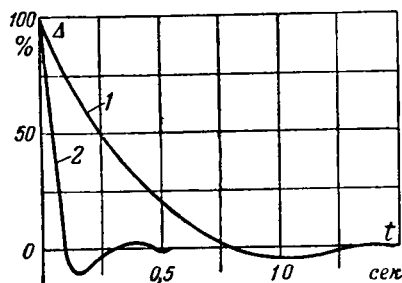


Рис. 7. Графики движения регуляторов в рабочих условиях.

1—регуляторы с усилителем с параллельной усилительной обмоткой; 2—с двухкаскадным усилителем с поперечным полем; Δ — перемещение электрода.

дает, совместно с пониженной скоростью передвижения, достаточный запас устойчивости.

Влияние изменения градиента β , уменьшающегося в процессе плавки от 10—12 в/мм при холодной печи до 1,1 в/мм в конце плавки, также очевидно из формулы (2).

Быстродействие. Под термином «быстродействие» понимается скорость возвращения системы к заданному режиму. Эта скорость зависит от длительности: 1) переходных электромагнитных процессов; 2) разгона электродвигателя и 3) движения с полной скоростью.

Влияние на быстродействие длительности процессов 1) и 2) понятно и не вызывает сомнений. Влияние времени движения с полной скоростью очевидно только для регуляторов релеинно-контакторного типа с постоянной скоростью перемещения электродов. Для регуляторов электромашинного типа требуется учитывать график движения, так как возможны и наблюдаются на практике случаи, когда увеличение скорости передвижения электрода не увеличивает, а уменьшает быстродействие. Это объясняется тем, что увеличение скорости понижает запас устойчивости и уменьшает затухание колебаний, т. е. увеличивает время возвращения к заданному режиму, и при переходе некоторой критической для данного регулятора скорости колебания становятся расходящимися, иными словами, регулятор станет работать неустойчиво.

Таким образом, быстродействие при прочих равных условиях будет больше у того регулятора, который имеет более высокий запас устойчивости при данной скорости передвижения. Из обследованных трех регуляторов максимальным быстродействием обладает регулятор с двухкаскадным усилителем с поперечным полем. У регулятора с усилителем с последовательной усилительной обмоткой в начале расплавления понятие «быстродействие» теряет смысл, так как в этот период работа неустойчива.

Быстродействие регулятора с усилителем с параллельной усилительной обмоткой можно назвать удовлетворительным, хотя оно и значительно ниже, чем у регулятора с двухкаскадным усилителем.

Объективно быстродействие можно определить только по графику движения. Известные в настоящее время способы оценки работы регу-

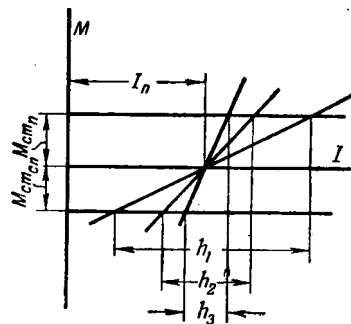


Рис. 8. Зона нечувствительности h регуляторов в зависимости от коэффициента усиления.

M_n , M_c — моменты сил сопротивления при подъеме и спуске; I — ток дуги; I_n — его нормальное значение.

лятора по методу частотных характеристик [Л. 3] без построения графика движения можно только качественно оценить работу регулятора и, кроме того, они довольно трудоемки. На рис. 7 даны теоретические графики движения обследованных регуляторов в рабочих условиях при тех параметрах, которые имеют регуляторы в данных печных установках.

Чувствительность. Чувствительность регулятора определяется шириной зоны нечувствительности. Очевидно, для электромашинных регуляторов момент трогания двигателя определяется отклонением, при котором момент вращения электродвигателя становится равным статическому моменту всех сил сопротивления на двигателе.

Чем круче кривая моментов вращения, тем больше коэффициент усиления усилителя, тем чувствительнее регулятор, иначе говоря, тем больше зона нечувствительности h (рис. 8). При одинаковых коэффициентах усиления чувствительность любых систем регуляторов будет одинакова. Очевидно, максимальная чувствительность регулятора определяется той минимальной величиной коэффициента усиления, при которой работа регулятора еще устойчива, и регулятор с более высоким запасом устойчивости будет обладать большей чувствительностью, если только какие-либо внешние причины, например, ограниченная мощность двигателя, не заставляют искусственно снижать коэффициент усиления и тем самым скорость передвижения электродвигателя.

Рассматривая с этой точки зрения три исследованных регулятора, можно сделать заключение, что для регулятора с усилителем с последовательной усилительной обмоткой теоретическая ширина зоны нечувствительности 9,2—14,2 (при ступенях напряжения соответственно 220 и 171 в) является фиктивной, так как регулятор в начале плавки работает неустойчиво. Лишь после некоторого разогрева печи, после начала устойчивой работы, эта величина становится реальной. Точно так же понятна большая ширина зоны нечувствительности—29,6—24,8% (при ступенях соответственно 220 и 160 в) регулятора с усилителем с параллельной усилительной об-

ной — это объясняется тем, что недостаточный запас устойчивости не позволяет повысить коэффициент усиления.

Ширина зоны нечувствительности регулятора двухкаскадным усилителем — порядка 10% — объясняется большим запасом устойчивости, позволявшим обеспечить большой коэффициент усиления.

Заключение. Автоматические электромашинные регуляторы дуговых печей совершеннее релейно-контакторных не только в отношении чувствительности, но и по эксплуатационным показателям. По литературным данным [Л. 4] технико-экономические показатели работы дуговых печей — длительность плавки, число плавов в неделю, расход энергии на 1 т стали, — у печей, управляемых электромашинными регуляторами, выше в среднем на 11—12%. Поэтому следует признать правильным решение организации Центропромэлектропечи прекратить применение для регулирования дуговых печей релейно-контакторных регуляторов и организовать выпуск электромашинных регуляторов. В качестве усилителя выбран двухкаскадный усилитель с положительным полем, что также следует признать правильным, так как это усилитель обладает некоторыми преимуществами, указанными ранее, по сравнению с другими типами усилителей. Схема, принятая для этого регулятора, несколько отличается от схемы рис. 3, так как по предложению Центральной лаборатории автоматики Чермет и Центропромэлектропечи, в этой схеме используется не только регулирование по величине отклонения регулируемого параметра от задания, но и регулирование по производной отклонения от задания, т. е. $\frac{\partial \Delta}{\partial t}$. Помимо увеличения устойчивости работы это усовершенствование обеспечивает более постоянный на протяжении плавки запас устойчивости, иначе говоря, частично компенсирует изменение условий регулирования при уменьшении градиента β по мере нагрева печи.

Существование электромашинных регуляторов дуговых печей не насчитывает еще и 10 лет,

поэтому можно ожидать дальнейшего усовершенствования регуляторов этого типа. В частности, представляет интерес регулятор, использующий схему, предложенную Д. П. Морозовым [Л. 5].

Можно также предвидеть появление регуляторов, построенных не на электромашинном принципе, но обладающих всеми преимуществами электромашинных регуляторов. Появились сообщения в литературе об изготовлении и испытании в промышленных условиях на действующих электропечных установках регулятора электронно-ионного типа. Имеющиеся скудные сведения хотя и дают представление о его работе, но не позволяют сделать заключение о его эксплуатационных свойствах. Теоретическое исследование показывает, что устойчивость и скорость действия этого регулятора превышает соответствующие показатели всех регуляторов электромашинного типа.

Наконец, возможно создание регулятора, обладающего свойствами электромашинных или электронно-ионных регуляторов, но лишенного вращающихся агрегатов или ионных приборов. Такие регуляторы, использующие мощность небаланса каждой фазы (при отклонении режима этой фазы от нормального) для вращения электродвигателя перемещения электрода этой фазы, будут иметь несомненное преимущество как перед электромашинными, так и перед электронно-ионными регуляторами.

Литература

1. И. В. Окороков. Автоматическое регулирование электрических печей. ОНТИ, стр. 101 — 110, 1935.
2. M. Déribégé. Автоматическое регулирование электрических печей. Изд. Dunod, Париж, стр. 85, 1938.
3. В. В. Солодовников. Применение метода логарифмических частотных характеристик к исследованию устойчивости и к оценке качества следящих и регулируемых систем. Автоматика и телемеханика, стр. 85 — 91, № 2, 1948.
4. L. W. Black. Автоматическое регулирование электродов дуговых электропечей. Iron and Steel Engineering, стр. 35 — 41, № 5, v. 21, 1944.
5. Д. П. Морозов. Новая схема возбуждения генератора в системе Леонарда. Электричество, № 1, 1948. [19-8-1949]



Электронагрев при получении кремнистых ферросплавов

Инж. Я. С. ЩЕДРОВИЦКИЙ

До сих пор исследователи большого класса электроплавильных электродных ферросплавных печей не выявили, в какой мере эти печи можно называть дуговыми. Конструктор и технолог-электрометаллург тем самым лишены отправной точки для расчета параметров печи и выбора электрического режима.

Для снижения потерь энергии при подведении большой мощности к электропечи техника сильных токов обязывает избрать наивысшее возможное напряжение. В этом главный вывод также и теории «короткой сети» электроплавильной печи. Уже неоднократно указывалось и вновь недавно упоминалось Г. А. Сисояном [Л. 1], что: «Во всяком случае на сегодня одно совершенно ясно — все наши печи работают на наивысших имеющихся в трансформаторах ступенях напряжения. Эти положения все же требуют известного уточнения и научного обоснования».

Однако, электротехнические требования здесь недостаточны — следует выяснить, какой электрический режим нужен для проведения физико-химических процессов получения ферросплавов с наименьшими тепловыми потерями.

На основе работ А. А. Байкова, М. А. Павлова, С. С. Штейнберга и др. мы указали [Л. 2], что основным условием успешного получения, например, высокопроцентного ферросилиция является поддержание в восстановительной зоне печи температуры порядка 2000°C . С. А. П. Любан считает, что кроме того, важно не допустить уход восстанавливаемого кремнезема в шлак [Л. 3]. Трудностью восстановления кремнезема из шлака он объясняет невозможность заметного повышения содержания кремния в доменном ферросилиции, хотя температура в фокусе горения по его замерам достигает $1900\text{—}2000^{\circ}\text{C}$ (и у оси горна — $1550\text{—}1600^{\circ}\text{C}$).

В связи с этим возникает вопрос, какой электрический режим обеспечивает поддержание в восстановительной зоне печи необходимой высокой температуры.

В 20-х годах существовало направление, отрицающее полезность создания дугового режима при выплавке ферросплавов. Миге дал ряд конструкций печей, рассчитанных на устранение дуги, как фактора, вызывающего «перегрев металла и шлака» и ведущего к повышенным потерям таких элементов, как марганец, кремний и др. Предполагалось, что печи будут работать при

Среди электротермистов существуют два различных взгляда на процессы в рудно-термических печах. Одни считают (М. С. Максименко, С. И. Тельный, Г. А. Сисоян), что для карбидов кальция и кремнистых ферросплавов обязателен дуговой режим. С. А. Моргулев полагает, что дуговой режим при этих процессах необязателен. Приводятся данные, опыта, которые должны уточнить основные положения Г. А. Сисояна, изложенные в работе «Научно-технические проблемы промышленной электротермии» (Электричество, № 3, 1947). Печатается в порядке обсуждения.

небольшой разности потенциалов на сопротивлении шихты.

Печи с подвижными электродами могут работать на сопротивлении загрузки в частном случае, когда электрод погружен в расплав, обладающий

высоким электросопротивлением. Это может иметь место для шлаковых, в том числе некоторых ферросплавных процессов. Для бесшугового процесса получения кремнистых электроферросплавов жидкий электропроводный расплав способствует возникновению дуги. Путем «кварцевания» ферросилициевой печи можно, конечно, достичь погружения электрода в разбитое кварцевое стекло до уничтожения всякой дуги, когда и на рабочем конце электрода образуется налипший нитеобразный шлак. Тогда действительно, вся энергия фазы начинает выделяться в загрузке — во всей толще ее — когда ник печи быстро проплавляется, оплавляется тантал, иногда и футеровка ванны, но восстановительный процесс прекращается. «Шлакование» печи считается грубым нарушением технологии.

Без образования расплава высокого электросопротивления печь, обладающая подвижными электродами, всегда будет работать, хотя бы и относительно небольшим выделением энергии в дуге. Если же разность потенциалов при отодвигании электрода от твердой загрузки будет значительно меньше, чем «напряжение зажигания», то во-первых, ток будет изменяться толчками, а во-вторых, будут происходить поломки электродных замыканий и тому подобные неприятности.

Возникшая дуга тотчас оказывается местом наиболее высокой температуры в ванне, чем облегчается ее повторное зажигание вследствие термической ионизации газового промежутка. Считать «небольшую» дугу переходным контактом с сопротивлением — значит заниматься маской действительности.

Но что показал опыт применения печей Миге? Советская ферросплавная промышленность в 1934—1936 г. проводила испытания мощных печей Миге-Перрон, установленных на Запорожском заводе. Эти печи оснащались трансформаторами с диапазоном вторичных фазных напряжений от 25 до 57 в. На низших ступенях, соответствующих отсутствию дуги, технически осуществление выплавки ферросилиция не удалось. Миге рекомендовал начать работу на 38—40 в. Основание процесса плавки на этих ступенях напряже-

ния дало в феврале-марте 1934 г. расход энергии в 6 099 квч/т на тонну 45-процентного ферросилиция [Л. 4]. Но в это же время другой завод ферросплавов, работая на вдвое большем напряжении, снизил расход энергии до 5 280 квч/т. Следуя этому примеру, на Запорожском заводе стали работать на последней ступени переключателя (57 в). Через некоторое время оказалось возможным поднять на 4—6% напряжение на печных трансформаторах, в результате чего удельный расход энергии уменьшился до 5 406 квч/т [Л. 4]. Наконец, по предложению С. А. Моргулева трансформаторы печей Миге-ЗФЗ были переключены на удвоенное вторичное напряжение и в декабре 1936 г. одна из печей примерно на ступени 57 в имела расход энергии 5 093 квч/т при вылавке 45-процентного ферросилиция.

Таков убедительный опыт, подтверждающий беспорную полезность создания дуги в ферросилициевой печи.

Возникает вопрос, можно ли определить мощность, приходящуюся на дугу.

М. С. Максименко [Л. 5] делит электроплазменные производства на два класса: дуговые процессы, для которых выделение энергии в газовом промежутке между концом электрода и загрузкой $p > q$, где q — энергия, выделяющаяся в шихте и шкале, и процессы бездуговые, для которых $p < q$.

Считая все процессы смешанными, к 1-му классу Максименко отнес, между прочим, производство карбида кальция, углеродистого ферросплавов и ферросилиция. Электротермисты днепропетровской школы С. И. Тельного [Л. 6] пришли к иному заключению: по их расчетам осциллограммы, снятые на печи Миге, показали, что через шихту проходит 60% всего тока печи».

Но, к сожалению, как пишет Г. А. Сисоян [Л. 1], «в зависимости от условий, в которых горит печная дуга, форма кривой напряжения дуги может меняться в весьма широких пределах».

Наблюдения, поставленные на ферросплавных печах, показывают, что истолкование характера кривых тока и напряжения представляет сложную задачу. Например, в апреле 1949 г. на одной ферросплавной печи, желая получить синусоидальную кривую напряжения, понизили ступень напряжения со 100 до 80 в, не меняя положения электродов в ванне. Затем увеличили ток путем опускания электродов, однако кривая напряжения в это время имела достаточно выраженный зубец. В том же сплаве, но на другой печи, в мае работали при напряжении в 107 в и кривая напряжения была неотличимо близка к правильной синусоиде. При токе, составляющем 62—69% первоначального, были замечены незначительные изменения на одной стороне полупериода (резцы), но при дальнейшем снижении тока до 50% первоначального кривая напряжения снова оказалась правильной синусоидой.

Предлагают устанавливать наличие и длину дуги путем опускания электрода до обнаружения искры от соприкосновения конца электрода с жидкостью или твердыми материалами. В упо-

мянутых апрельских экспериментах для получения номинального тока электроды на ступени напряжения 80 в были опущены: в фазе I — имевшей нагрузку в 52% от номинальной — на 30 мм; в фазе II — имевшей нагрузку 60% номинальной — на 15 мм и в фазе III — имевшей нагрузку в 61% номинальной — на 20 мм. Нарастание нагрузки происходило плавно, как и всегда в ферросплавной печи, если процесс идет нормально и печь разогрета. Следует указать, что в большой ферросилициевой печи иногда можно наблюдать движение электродов вверх и вниз на протяжении порядка 1 м. Таким образом, опыт показывает, что по движению электродов вряд ли будет правильным делать заключение о длине дуги.

Итак, определять, какую часть мощности необходимо и достаточно выделить в газовом промежутке, мы еще не умеем.

Сам по себе факт наличия дуги можно, однако, установить просто: для этого следует прекратить завалку шихты в ферросилициевую печь и через некоторое время дуга станет зримой и доступной слуху; либо можно извлечь электрод из печи и при наличии дуги мы убедимся, что его рабочий конец является наиболее высоко нагретым участком в ванне, а из-под электрода будут вырываться наиболее горячие газы.

В условиях производства желательно обеспечить погружение электродов в шихту и непрерывную завалку шихты так, чтобы дуга не открывалась и чтобы тепловые потери колошника были наименьшими. Именно это обстоятельство и противостояло тенденции повышения напряжения на ферросплавных печах Запорожского ферросплавного завода; возможности повышения напряжения до 114 в остались далеко неиспользованными вследствие повышения тепловых потерь через колошник: несмотря на высокий электрический к. п. д. запорожских печей после резкого снижения тока, удельный расход энергии все же не сравнялся с удельным расходом на печах соревновавшегося с ним завода (см. выше), так как на этих печах потери через колошник ниже («к. п. д. ванны» по нашим подсчетам был выше не менее, чем на 5%).

В этом и заключается необходимое «уточнение» утверждения Г. А. Сисояна [Л. 1], что не «все печи работали, работают и могут работать на наивысших имеющихся в трансформаторах ступенях напряжения», так как на открытой дуге работать нельзя.

Литература

1. Г. А. Сисоян. Научно-технические проблемы промышленной электротермии. Электричество, № 3, 1948.
2. Я. С. Щедровицкий. Отклики и т. д. Сталь, № 6, 1948.
3. А. П. Любан. Исследование доменного процесса. М., 1948.
4. И. Д. Кириченко, В. П. Нахабин, Ш. С. Пхакадзе и А. А. Кушик. Плавильщик ферросплавов. Харьков, 1936.
5. М. С. Максименко. Основы электротермии. Л., 1937.
6. Научные труды Днепропетровского металлургического института, вып. VII. Электрометаллургия, 1940.

[23.10.1948]

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА

В системах электропривода с электромашинной автоматикой получение оптимального пускового тока достигается за счет размагничивающих ампервитков стабилизирующей и токовой обмотки электромашинного возбuditеля — усилителя с поперечным полем.

Точный расчет параметров стабилизирующего трансформатора при наличии токового регулирования для получения оптимального пускового тока обычно производится по графо-аналитическому методу. Академик В. П. Никитин и кандидат техн. наук Н. П. Куницкий предложили приближенный метод, в котором относительно малая постоянная времени T_k короткозамкнутого контура не учитывается.

Кривые, построенные авторами для электропривода по точному графо-аналитическому методу (с учетом T_k) и по приближенному методу, показали полную прелесть последнего для практических расчетов.

Доклады Академии наук СССР, т. 67, № 4, 1949, В. П. Никитин и Н. П. Куницкий)

ПРОЦЕССЫ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ (ПО ИТОГАМ ПАМИРСКИХ ЭКСПЕДИЦИЙ АКАДЕМИИ НАУК)

Не все ливни, наблюдаемые в космических лучах, находят полное объяснение на основе электромагнитной каскадной теории. Наблюдаются, например, ливни из частиц, проникающих сквозь большие толщ. свинца и, следовательно, не являющиеся чисто электронными ливнями. Опытами Оже, Додена и др. было показано, что в широких атмосферных ливнях присутствуют проникающие частицы и частицы, вызывающие ядерные расщепления. Несмотря на эти факты, в зарубежной литературе до сих пор общее распространение имеет ошибочная точка зрения на природу проникающих частиц и на их роль в общей картине космического излучения.

Цикл работ, выполненных в течение последних лет в памирских экспедициях коллективом сотрудников лаборатории космических лучей Физического института им. Лебедева Академии наук СССР, в значительной мере продвинул вперед разрешение многих вопросов в этой области и позволил в основных чертах нарисовать картину явлений, происходящих в космических лучах. Отчет о достигнутых в этом направлении результатах отражен в большой коллективной статье «Электронно-ядерные ливни космических лучей и ядерно-каскадный процесс». В этой статье, хорошо аргументированной данными многократных наблюдений и исследований, иллюстрированной интересными диаграммами и фотографиями, авторы приходят, в частности, к нижеследующим выводам.

Существование особых электронно-ядерных ливней, образуемых проникающими частицами космических лучей, число которых быстро растет с высотой наблюдения, доказано: в их состав входят: фотоны и электроны, ядерно-активные частицы высоких энергий, ядерно-активные частицы, вызывающие обычные расщепления (так называемые «звезды» и одиночные нуклоны), сильно ионизирующие частицы от ядерных расщеплений и нейтроны, μ — мезоны.

Электроны и фотоны, возникшие в этих ливнях, размножаются за счет обычного электромагнитного каскадного процесса, в результате чего проникающие частицы сопровождаются интенсивным электронно-фотонным излучением.

Образование электронно-ядерного ливня есть ядерный процесс, особенность которого состоит в том, что за счет большой кинетической энергии частицы, взаимодействующей с ядром, происходит рождение новых частиц. Ядерно-активные вторичные частицы при высоких энергиях способны создавать новые электронно-ядерные ливни.

(Журнал эксперим. и теорет. физики, т. 19, вып. 9, 1949, Н. Г. Борова, В. И. Векслер, Н. А. Добротин и др.)

ВКЛЮЧЕНИЕ В СЕТЬ КРУПНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ МЕТОДОМ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ

В статье дан сводный материал по большому количеству опытов по самосинхронизации, проведенных на одной из гидроэлектростанций Советского Союза с крупнейшими агрегатами. Доказана возможность применения этого метода для крупных гидрогенераторов без демпферных обмоток. Приведена сводная таблица результатов самосинхронизации агрегатов по отдельным опытам. Отмечается, что преимущества самосинхронизации по сравнению с обычными способами делают актуальным вопрос автоматизации этого процесса. Автоматизация самосинхронизации становится особенно важной в аварийных условиях.

(Электрические станции, № 9, 1949, Б. А. Дробовский, А. В. Максимов, Г. С. Сафранюк)

ЗА РУБЕЖОМ

АНОМАЛИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В ЛИСТОВЫХ ФЕРРОМАГНИТИКАХ ПРИ БОЛЬШИХ ИЗМЕНЕНИЯХ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Является общепринятым рассматривать полные потери в ферромагнетиках, подвергающихся перемагничиванию, как сумму потерь на гистерезис и на вихревые токи.

Потери на гистерезис могут быть измерены баллистическим методом, а потери на вихревые токи рассчитываются по известным формулам, исходя из геометрии материала, его удельного электрического сопротивления и величины изменения магнитного потока.

Однако, в некоторых листовых сталях наблюдается значительное расхождение между расчетными и фактическими потерями на вихревые токи. Этому вопросу посвящена статья.

Опыты проводились на листовых кремнистых сталях с 2 и 3% Si, толщиной 0,24 и 0,29 мм (горячекатанная и холоднокатанная с текстурой).

Намагничивание проводилось прямоугольными импульсами постоянного тока длительностью от 0,2 до 2,5 мкс.

Преимуществом импульсного метода являются отсутствие чрезмерного нагрева сердечника (100 импульсов — секунду), а также возможность более легкого расчета потерь на вихревые токи в области нелинейности $B=f(H)$.

Было найдено, что в большинстве образцов зависимость $B=f(H)$ либо линейна, либо может весьма точно

быть представлена функцией вида $B = \hat{B} (e^{\alpha H} - 1)$, где \hat{B} и α — постоянные.

Эта формула позволяет правильно рассчитать потери на вихревые токи в области нелинейного изменения индукции.

Автор приводит несколько возможных объяснений упомянутого расхождения теории с опытом и рассматривает их в свете экспериментальных данных, полученных при различных изменениях средней индукции намагничиваемого поля, ориентации зерен и толщины образцов.

По мнению автора, одной из причин расхождения является изменение магнитной проницаемости и электрического сопротивления по сечению листа, однако основную роль играет уменьшение эффективной проницаемости, связанное с невозможностью скачков Баркгаузена вследствие кратковременности импульса.

[L. R. Blake, IEEE, ч. II, т. 56, № 53, 1949]

Кандидат техн. наук Л. Ш. КАЗАРНОВСКИЙ

НОВЫЕ ЭЛЕКТРОВОЗЫ ОДНОФАЗНОГО ТОКА НОРМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ВЕНГЕРСКИХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Таблица 1

Скорость	км/час	25	50	75	100	125
Максимальная мгновенная сила тяги	т	21	21	16	12	9,6
Часовая сила тяги	т	13,5	13,5	10,8	8,6	6,9
Часовая мощность на ободу	л. с.	1 250	2 500	3 000	3 200	3 200

На венгерских железных дорогах в 1934 г. была электрифицирована на однофазном токе 50 гц, 16 кв двухпутная линия Будапешт — Хедьешолюм (190 км). До Второй мировой войны линия обслуживалась 29 электровозами с формулой 1-D-1 (1-4-1) и 3 электровозами с формулой F (0-6-0). Электровозы 1-D-1, имеющие максимальную скорость 100 км/час, предназначались для пассажирских и товарных поездов. Электровозы F (максимальная скорость 68,6 км/час) использовались, главным образом, для угольных маршрутов весом более 1000 т.

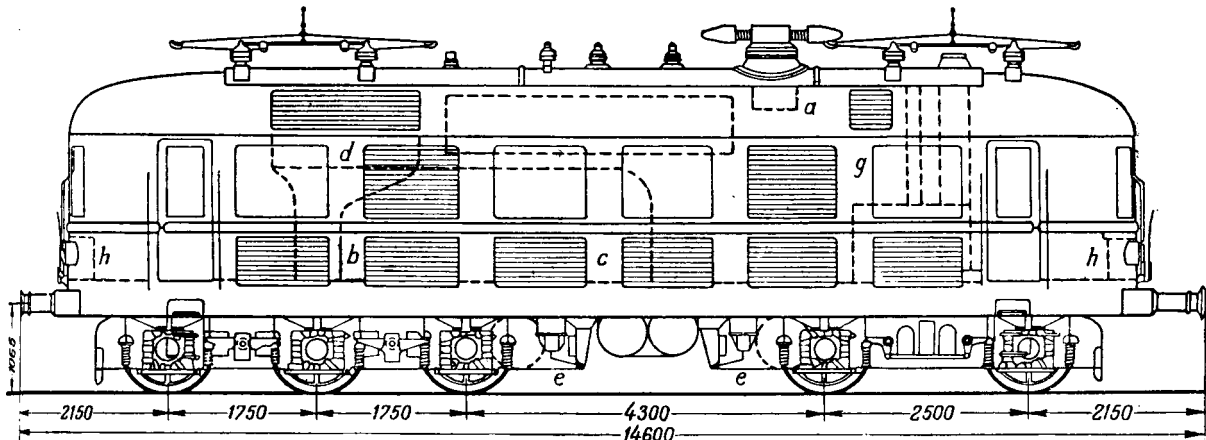


Рис. 1. Электровоз ВоСо Венгерских железных дорог.

а — главный выключатель; б — фазообразователь; с — преобразователь частоты; d — масляное и водяное охлаждение фазообразователя; е — тяговые двигатели; г — водяной реостат; h — контроллер.

Конструкция обоих типов электровозов в основном аналогична. Оборудование включает синхронный фазообразователь, один тяговый двигатель, пусковой реостат автоматического регулятора. Часовая мощность тягового двигателя обоих типов электровозов одинакова и равна 3 л. с.

Передача от тягового двигателя к ведущим осям осуществляется с использованием так называемой рамы Кандо и двух сцепных дышел.

Вес электровоза 1-D-1 98 т, электровоза F 94 т.

Регулирование скорости достигается изменением числа оборотов тягового двигателя.

В настоящее время на венгерских заводах строится электровоза однофазного тока нормальной частоты, отличающиеся от описанных выше.

Новые электровозы (рис. 1) обладают следующими основными характеристиками:

Осевая формула	ВоСо
Нагрузка на ось	17 т
Вес электрической части	42 т
Вес механической части	40 т
Вес прочего оборудования	3 т
Полный вес	85 т
Диаметр колес	1 040 мм
Количество тяговых двигателей	5

Значения ходовых скоростей, силы тяги и мощности при различных скоростях указаны в табл. 1.

Главное отличие нового типа электровоза от прежних заключается в применении индивидуального привода каждого тягового двигателя. Переход на индивидуальный привод позволил изменить электрическую схему электровоза и конструкцию его оборудования.

Схемные диаграммы для различных ступеней скорости приведены на рис. 2.

Полученный ток нормальной частоты от контактного провода подводится к фазообразователю, как это имело место в прежней схеме. Фазообразователь питает преобразователь частоты, представляющий индукционную машину, ротор которой соединен жестко с ротором фазо-

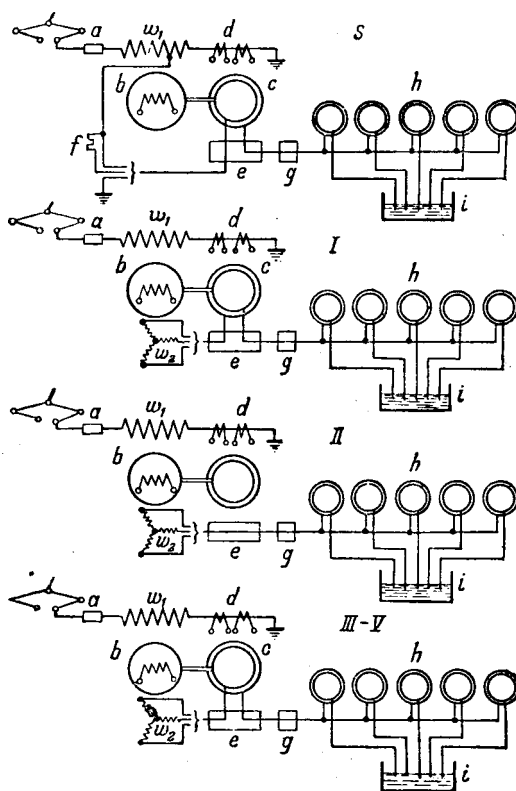


Рис. 2. Принципиальные схемы включений силовых цепей.

S — при пуске; а — главный выключатель; с — преобразователь частоты; e — аппаратура управления; г — переключатель направления движения; h — тяговые двигатели; ω_1 — первичная обмотка фазообразователя; ω_2 — вторичная обмотка фазообразователя. I — V — при ходовых скоростях: б — фазообразователь; d — измерительные трансформаторы; f — добавочное сопротивление; i — водяной реостат.

преобразователя. Соответствующими переключениями число полюсов преобразователя частоты может быть установлено в 2, 4 или 6 полюсов. Число оборотов постоянно и равно 1500 об/мин работа преобразователя при различных ходовых скоростях происходит в порядке, указанном в табл. 2.

Таблица 2

Скорость	км/час	25	50	75	100	125
Число полюсов преобразователя частоты . .	2	—	2	4	6	
Питание подведено . .	К статору	—	К ротору			
Частота	гц	25	50	75	100	125

Тяговые двигатели подключаются к преобразователю частоты. При питании током 50 гц тяговые двигатели присоединяются непосредственно к фазопреобразователю.

Пуск электровоза осуществляется с помощью водяного реостата во вторичной цепи тяговых двигателей. Регулирование сопротивления реостата происходит автоматически. Также автоматически регулируется возбуждение фазопреобразователя сообразно мощности, развиваемой электровозом.

Тяговые двигатели — шестиполюсные, трехфазные индукционные машины на напряжение около 1000 в. При скорости 125 км/час тяговые двигатели дают около 2500 об/мин. Вес двигателя 1,8 т, часовая мощность

640 л. с. Передача зубчатая. Подвеска на оси электровагон — трамвайного типа.

Электровагон может работать с рекуперативным торможением. Рекуперация начинается автоматически, когда скорость превышает установленную позицию контроллера. Соединения между фазопреобразователем и тяговыми двигателями осуществляются электропневматическими контакторами.

Длина и вес рам тележек сведены к минимуму.

При проектировании этого электровоза была поставлена задача, сохранив преимущества системы Кандо, улучшить показатели по удельному весу и по стоимости монтажа, приближающиеся к соответствующим показателям электровазнов постоянного тока или однофазного тока 16²/₃ гц.

Новый электровагон может быть использован для пассажирских и для грузовых поездов.

На подъеме 4‰ при весе поезда 1500 т он развивает скорость 75 км/час, при весе поезда 750 т — 125 км/час.

Учитывая преимущества нового типа электровазнов Венгерские государственные железные дороги рассматривают его как единственный тип, удовлетворяющий требованиям при дальнейшей электрификации железных дорог Венгрии.

Литература

1. L. Verébely (Будапешт), Основы электрической тяги по системе Ганц-Кандо Elektrotechnický Obzor, № стр. 329, 1949.

2. L. Kulmann (Будапешт). Строящиеся электровазны однофазного тока 50 гц Венгерских государственных железных дорог. Bulletin de l'Assoc. Int. du Congrès des Chemins de fer № 8, стр. 725, 1949.

Инж. Л. С. ВИСИ

ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЕВРОПЕЙСКИХ СТРАН НАРОДНОЙ ДЕМОКРАТИИ¹

(о б з о р)

ПОЛЬША

Энергоресурсы и их использование. Польша располагает каменным и бурным углем, торфом, нефтью, природным газом и гидроэнергией.

Запасы каменного угля исчисляются [Л. 1,2] в 76,6 млрд. т, в том числе 7,7 млрд. т в западных областях. Запасы бурого угля оцениваются в 18 млрд. т, в том числе 5 млрд. т в Познанской области и 7 млрд. т в районе Любуш в западных областях.

Газ природный, а также получаемый путем газификации углей предназначается, главным образом, для энергетических целей.

Добыча каменного и бурого угля, нефти и природного газа и производство газа из угля приведены [Л. 3, 4, 5] в табл. 1.

Торфяная промышленность получила свое развитие лишь после установления народной власти. Торф используется, главным образом, как подстилка для скота, в дальнейшем употребляемая как удобрение, а также для производства изоляционных плит, брикетов и как топливо.

Добыча торфа в промышленных масштабах началась лишь в 1949 г. План 1949 г. предусматривал [Л. 4]: добычу торфа для отопления 228,8 тыс. т, производство брикетов из торфа 12 тыс. т, производство подстилочного торфа 419 тыс. тюков (тюк весит от 60 до 100 кг) и производство изоляционных плит 75 тыс. м².

Выработка электроэнергии гидростанциями составляла в 1946 г. 360 млн. кВтч, или 6,3% всего производства электроэнергии [Л. 5]. Установленная мощность гидростанций в том же году составляла 5,6% всей установленной

	Единица измерения	1938	1946	1947	1948
Каменный уголь . . .	тыс. т	69 400	47 290	59 130	70 250
Бурый уголь . . .	" "	5 022	1 454	4 766	5 041
Нефть . . .	" "		117	128	
Газ природный . . .	млн. м ³		149,3	148,3	
Газ из угля . . .	" "		189,1	237,5	

мощности или 119 тыс. кВт. Количество станций в том году равнялось 36, или 16,25%, а средняя мощность равнялась 3300 кВт против 9600 кВт в среднем по стране (все вышеприведенные данные относятся к станциям установленная мощность которых равна или превышает 1000 кВт).

Производство электроэнергии. Производство электроэнергии станциями мощностью свыше 1000 кВт составило [Л. 5, 6] (млн. кВтч):

1938 г.	3 972,0
1946 г.	5 709,0
1947 г.	6 613,5
1948 г.	7 514,4
1949 г. по плану	8 111,0
1955 г. по плану	18 000,0

Ниже, в табл. 2, дано распределение вышеуказанной выработки электроэнергии по видам станций (в млн. кВтч):

¹ Начало обзора (раздел, посвященный Чехословакии) опубликовано в № 2, 1950 г.

Таблица 2

	1946	1947
Производство электроэнергии:		
Станциями общего пользования	3 432	3 976
Промышленными станциями . . .	2 277	2 637
в том числе:		
угльной промышленности . .	1 260	1 428
металлургии	216	228
химической промышленности . .	372	444
цементной промышленности . .	103	1 2
текстильной промышленности . .	96	132
сахарной промышленности . .	40	51
лесной промышленности . .	132	168
и прочих отраслях	58	54

Производство электроэнергии на душу населения в год составляло (квтч):

в среднем за период 1933—1937 гг. . .	110
в 1947 г.	275
в 1948 г.	315
в 1955 г. (по шестилетнему плану) . .	800

Следует отметить, что за 9 лет, предшествовавших войне, в буржуазно-помещичьей Польше прирост производства электроэнергии составил всего 902 млн. квтч, в то время как за период 1945—1949 гг., т. е. за период трех лет существования народнодемократической власти в Польше, прирост этот составил 2 400 млн. квтч.

По данным Управления энергетики общая установленная мощность электростанций на 1 января 1946 г. составляла 2 300 тыс. квт, а на 1 января 1948 г. — 2 284 тыс. квт. Число и мощность электростанций на 1 января 1948 г. указаны в табл. 3 (по станциям, мощность которых равна или выше 1 000 квт).

Таблица 3

	Число станций	Установленная мощность, тыс. квт
Электростанций	232	2 284
из них:		
общего пользования . .	97	1 196
из них:		
электростанций	36	139
промышленных станций	135	1 088
в том числе:		
угльной промышленности . .	37	583
металлургии	10	95
химической промышленности . .	11	133
цементной промышленности . .	7	36
лесной промышленности . .	7	57
текстильной промышленности . .	20	57
сахарной промышленности . .	31	98
и прочих отраслях	14	29

Общая протяженность линий электропередачи высоковольтного напряжения составляла в 1945 г. 31 000 км, в 1946 г. — 34 000 км, в 1948 г. 51 000 км, а по плану 1955 г. составит 76 000 км. Большое значение имеет сооруженная в 1946 г. линия электропередачи Цехинице—Эдзешовице протяжением 120 км, которая кладет начало электрической сети Верхней и Нижней Силезии. Не меньшее значение имеет линия передачи, связывающие Поморское и Познаньское воеводства. Линия Познань—Горжув уже сооружена. Строится линия Щецин—Старград, которая явится частью линии Щецин—Горжув. Эти и другие линии передачи, образующие единое высоковольтное кольцо, имеют напряжение 110 кв. В общей сложности построено 4 000 км новых линий электропередачи.

Размах восстановления и нового строительства в народном энергостроительстве характеризуется величиной капиталовложений в эту отрасль в 1948 г. Эти капиталовложения составили 4,3 млрд. злотых, или около 1,9%

всех вложений в народное хозяйство в целом. В том числе на новое строительство электростанций и сетей было израсходовано около 2,15 млрд. злотых, на капитальный ремонт 1,58 млрд. злотых и на электрификацию деревень — 0,71 млрд. злотых.

Правительство народной Польши обращает особое внимание на электрификацию и механизацию сельского хозяйства. До войны в Польше имелось всего лишь 1 263 электрифицированных населенных пункта. В то время как в период 1920—1939 гг. в электросеть ежегодно включалось около 50 деревень, в 1940 г. была электрифицирована 481 деревня, в 1947 г. — 570, а в 1948 г. — 627 деревень [Л. 7]. К концу 1948 г. в стране насчитывалось 10 290 электрифицированных сел. Число потребителей электроэнергии в сельских местностях увеличилось с 70 000 в 1945 г. до 320 919 в 1948 г. В 1949 г. количество электрифицированных сел достигает уже 11 651, а потребителей электроэнергии в них — 370 000. Годовое потребление электроэнергии в селах составило в 1948 г. 79 млн. квтч.

Электротехническая промышленность. До войны электропромышленность Польши почти полностью находилась под контролем иностранного капитала, который всеми способами тормозил ее развитие. Производство электротехнической промышленности ограничивалось, главным образом, производством товаров широкого потребления, в то время как производство средств производства почти полностью отсутствовало.

За время войны 85% польской электропромышленности было разрушено, а оборудование заводов — увезено в Германию. Основные фонды электротехнической промышленности в предвоенном 1939 г. составляли в ценах 1937 г. 140 млн. злотых. После войны основные фонды этой отрасли оценивались около 90 млн. злотых (с учетом воссоединенных земель).

В послевоенной народнодемократической Польше электропромышленность начала очень быстро расти и из «легкой» отрасли промышленности превращаться в «тяжелую». Продукция электропромышленности в стоимостном выражении за 1945—1949 гг. росла следующим образом [Л. 6]:

	1939	1945	1946	1947	1948	1949 план
Индекс стоимости продукции . .	100	7	37	77	136	177

Еще более быстро растет электротехническая промышленность в шестилетнем плане развития народного хозяйства. Согласно шестилетнему плану продукция этой отрасли увеличивается так [Л. 8]:

	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955
Индекс стоимости продукции 1949=100 . .	100	132	152	182	225	276	327
1939=100 . .	177	216	299	322	398	489	579

Стоимость продукции электропромышленности в 1947 г. составила 168,7 млн. злотых в неизменных ценах 1937 г.

Общее количество предприятий, а также и распределение их по формам собственности на 1 января 1947 г. приведено в табл. 4 (стр. 76).

Производство важнейших видов продукции электротехнической промышленности приведено [Л. 5, 9] в табл. 5.

Вследствие намеченной в шестилетнем плане механизации, автоматизации, химизации и электрификации народного хозяйства Польши, значение электротехнической промышленности неизмеримо вырастает. Валовая продукция электротехнической промышленности в 1955 г. должна достигнуть 980 млн. злотых (в ценах 1937 г.), что составляет 280% уровня производства 1949 г. Сдвиги в структуре продукции по шестилетнему плану представлены в табл. 6 [Л. 10]. При этом следует иметь в виду, что изменение структуры продукции отнюдь не означает снижения абсолютных размеров производства по тем видам продукции, удельный вес которых за шестилетие снижается.

	Общее количество предприятий на 1/1 1947 г.	в том числе			Всего число рабочих на предприятиях	в том числе		
		государственных	кооперативных	частных		государственных	кооперативных	частных
Вся электропромышленность	1 541	142	16	1 383	18 245	13 304	214	4 727
в том числе:								
Производство машин и трансформаторов	22	11	1	10	1 994	1 837	15	15
Производство аппаратов и электроматериалов	65	21	—	44	3 529	3 090	—	439
Ремонтно-монтажные предприятия . . .	1 340	63	11	1 266	6 074	2 435	120	3 519

Таблица 5

	Единица измерения	1946	1947	1948	1949 (план)
Электродвигатели	шт.	8 841	14 830	26 198	40 000
Трансформаторы разные	"	566	1 447	10 625	
Кабели	т	3 100,4	7 434,8	14 008	
Электrolампы, всего	тыс. шт.	7 491	10 903	18 939	18 000
в том числе:					
нормальные	"	4 158	6 703	13 196	
миниатюрные	"	2 797	3 287	3 779	
прочие (радио и др.)	"	536	913	1 964	
Телефонные аппараты	шт.	1 440	31 945	68 648	
Радиоприемники	"	—	7 387	33 704	
Счетчики	"	6 260	61 000	118 256*	185 000
Масляные выключатели	"	141	304	736*	
Аккумуляторы	т	—	1 879	3 662	

* план 1943.

Таблица 6

	1946	1949	1955
	в %		
Электротехническая промышленность (все производство)	100	100	100
в том числе производство:			
Электромашии	15,9	17,5	22,5
Электроаппаратуры	16,3	18,5	23,0
Кабеля	38,6	29,0	18,4
Аккумуляторы	12,0	7,7	5,4
Электrolампы	11,3	13,6	14,9
Радиоизделий	5,9	13,7	15,8

Какие же сдвиги намечаются шестилетним планом в отдельных отраслях электротехнической промышленности?

Производство электрических машин в 1955 г. против уровня 1949 г. вырастет в 4 раза, причем производство асинхронных двигателей по выпускаемой мощности превысит уровень 1949 г. больше чем в 6½ раз. Увеличение производства будет осуществлено путем внедрения передовых методов организации труда и ввода в действие нового завода, работающего поточным методом. Среднегодовое производство трансформаторов увеличится вдвое при одновременном повышении их мощности. Будет приступлено к производству трансформаторов напряжения и трансформаторов тока. Впервые польская электротехническая промышленность приступит к производству турбогенераторов, электровозов и выпрямительных устройств для тяговых подстанций. Предусматривается увеличение производства электроаппаратуры и оборудования для автомобильной промышленности.

Производство контрольно-измерительной аппаратуры увеличится за шестилетие в 5 раз. Значительно вырастет производство диспетчерской и распределительной аппаратуры низкого напряжения. Производство бытовой электроаппаратуры вырастет в 6 раз. В 1955 г. будет выпущено

около 2 400 т продукции общей стоимостью 15 млн. злотых (в ценах 1937 г.).

Аккумуляторная промышленность обеспечит потребность в аккумуляторах растущее производство автомобилей, а также автохозяйства и железнодорожного транспорта. Вновь осваивается производство железных аккумуляторов. Производство батарей (сухих элементов), изготавливаемых почти целиком из отечественного сырья, достигнет в 1955 г. 20 млн. шт.

В промышленности средств связи осваивается производство новых и увеличивается производство уже основных аппаратов. Планом предусмотрен выпуск в 1955 г. 350 тыс. радиоприемников против вышедших в 1938 г. 142 тыс. Производство телефонных аппаратов растет более чем в 6 раз по сравнению с 1949 г.

Производство электrolамп превзойдет уровень 1949 г. на 70% и должно составить в 1955 г. 30 млн. шт. Будет приступлено к выпуску газосветных трубок, ртутных ламп для автомобилей и др. Производство радиоламп полностью обеспечит собственную радиопромышленность. Расширяется производство полуфабрикатов для электrolамповых заводов.

Предусматривается значительное расширение ассортимента выпускаемых кабелей и электрических проводов в целях обеспечения растущей потребности горнодобывающей, механизированной строительной индустрии, развивающихся — связи, радиовещания и энергетики, а также расширяющейся сети электрических железных дорог. В кабельной промышленности найдут применение новые материалы как для производства кабеля, так и для изоляции.

Литература

1. Nachrichten für Aussenhandel 20 июля, № 23, стр. 1948.
2. Iron and Coal Trades Review, 13 июня, № 4170, стр. 1948.
3. Colliery Guardian, № 4543, 4546, 1948.
4. Rzeczpospolita, 9 декабря, № 339, 1948.
5. Rocznik Statystyczny, 1948.
6. Промышленность Польши. Изд. Польского экономического издательства, 1949.
7. Народная Польша. Изд. Польского экономического издательства, 1949.
8. Rzeczpospolita, 9 января, № 8, 1949 и 18 января, № 17, 1949.
9. Wiadomosci Statystyczne № 14, 1949.
10. Gospodarka planowa, № 5, 1949.

БОЛГАРИЯ

Энергоресурсы и их использование. Основными энергетическими ресурсами Болгарии являются каменные и бурые угли и гидроэнергия. Ископаемые угли в Болгарии представлены антрацитами, каменными углями, бурым углем и лигнитами. Страна наиболее богата лигнитами, запасы которых исчисляются лишь по одному Маришкскому месторождению в 2,5 млрд. т [Л. 1]. Антрациты находят преимущественно в районе Софийской и Врачанской горной планины (горы), где они залегают линзами в несколько сот или десятков тысяч тонн каждая. Добыча антрацитов до войны достигала максимума 26 000 т в год. Большая часть этих углей шла на экспорт — на отопление и совсем незначительная часть в промышленность. Каменные угли имеются в ряде районов Болгарии. Угли района Белоградчик являются коксующимися. Угли района Габрово и Сливен так

Таблица 1

	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948 январь— апрель
Добыча угля: в тыс. т	2 285	2 766	3 004	3 667	4 057	3 080	3 568	3 512	4 046	1 379
в среднем в месяц тыс. т	190,4	230,5	250,3	305,6	338,1	256,7	296,9	292,7	337,2	344,6

частично коксуются. Этот последний район объединяет в один трест Балканбасс, созданный после национализации, 16 шахт.

Добыча, достигнутая шахтами этого треста, составляет 10 000 т в год. Угли Балканбасса потребляются для отопления, как топливо для паровозов и пароходов, а также для котельных установок промышленности и на отопление жилых зданий.

Запасы углей Балканбасса пока не установлены. Однако, считают, что они достаточно велики для того, чтобы развивать добычу в этом районе.

Наиболее широко развитой в Болгарии является добыча бурых углей. Основными буроголовыми месторождениями являются: Пернишское, Бобовдолское. Струмско-пиринское, Черноморское и Николаевское. Важнейшее из этих месторождений — Пернишское. Запасы его оцениваются в 120 млн. т. Большую роль играл и еще будет долгие годы играть этот бассейн в деле электрификации страны. На его базе в 1928 г. была сооружена теплоэлектростанция мощностью 9 100 квт. В конце 1951 г. на этой же базе будет построена новая мощная электростанция в 50 000 квт. Добыча угля в Пернишском бассейне составляет 80% от всего добываемого угля в стране. Второй по величине буроголовый бассейн — Бобовдолский. Видимые запасы его оцениваются в несколько миллионов тонн, а вероятно — в несколько десятков миллионов тонн. Для точного установления запасов в настоящее время проводятся геологоразведочные изыскания. Добыча угля в этом бассейне достигла 140 000 т в год. Запасы Струмско-пиринского буроголового бассейна исчисляются в 10 млн. т, но подробно еще не изучены. Добыча здесь достигла 130 000 т в год. Запасы Черноморского бассейна также пока подробно не изучены, но считаются в несколько миллионов тонн. Добыча угля в Черноморском бассейне достигла 140 000 т. В Николаевском бассейне четыре года назад в 1945 г. построена первая шахта «Георгий Димитров».

Основные лигнитных месторождений в стране насчитывается три: Маришский бассейн, выше уже упомянутый, Бургасский бассейн с запасами, ориентировочно исчисляемыми больше чем в 1 млрд. т, и Станинский бассейн с запасами в несколько десятков миллионов тонн. Добыча лигнитного и бурого угля в целом по стране представляется [Л. 2] в табл. 1.

Гидроэнергия является одним из основных источников энергии страны. Мощность, которую может дать гидроэнергия, оценивалась [Л. 3] перед войной в 1 млн. квт. В действительности она значительно больше. Удельный вес электростанций в выработке электроэнергии и в установленной мощности электростанций в Болгарии составляет почти 40%. Общая мощность гидростанций на 1 января 1949 г. составляла [Л. 4] около 56 тыс. квт, или 5,6% возможной.

Производство электроэнергии. Народно-демократическая Болгария за 5 лет достигла огромных успехов в деле развития электрификации. Следуя учению Ленина — Сталина о социалистическом строительстве Георгий Димитров заявил: «Необходимо путем индустриализации и электрификации страны и механизации сельского хозяйства достигнуть за 15—20 лет того, чего другие страны, в других условиях, достигали за столетие. Для этой цели необходимо создать мощное энергохозяйство, путем использования водных и топливных источников энергии в стране».

Рост производства электроэнергии характеризуется следующими показателями [Л. 2, 5, 6].

Годы	млн. квтч	%
1939	266,1	100
1943	340,3	128
1946	437,4	163

Годы	млн. квтч	%
1947	488,7	184
1948	548,0	207
1949 (план)	670,0	253
1953 (план)	1 800	675

Ниже в табл. 2 приводится [Л. 4] распределение выработки электроэнергии по роду первичных двигателей (в млн. квтч):

Таблица 2

	1947	1948 план
Выработка электроэнергии:		
Гидроэлектростанциями	246,2	234
Паротурбинными электростанциями	225,0	310
Дизельными и другими электростанциями	17,4	16,8

Структура потребления электроэнергии в 1947 г. и по плану 1948 г. представлена в табл. 3 (в млн. квтч).

Таблица 3

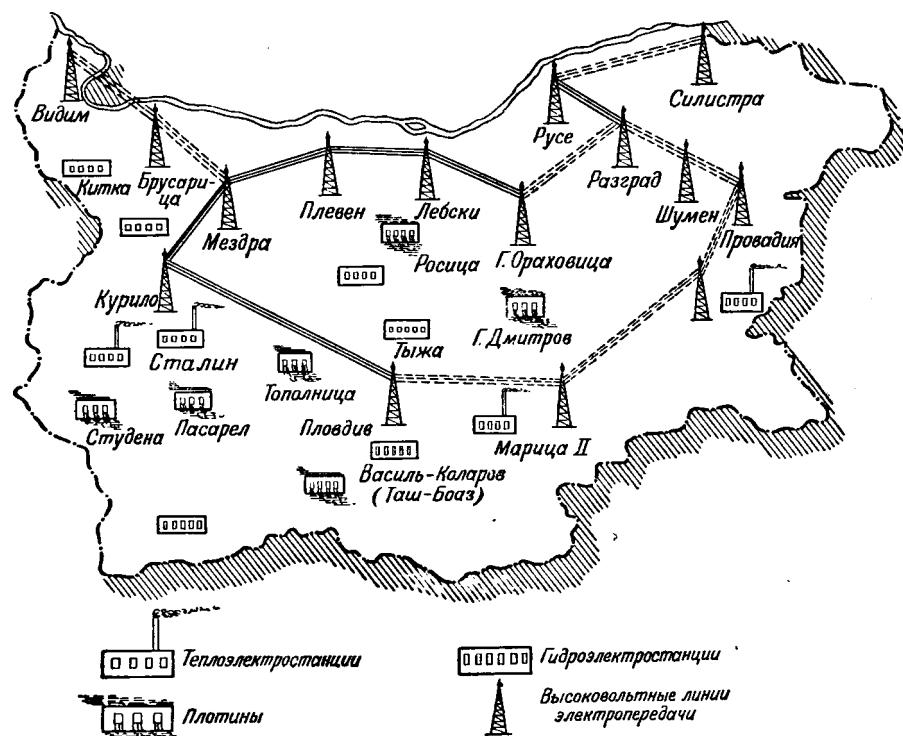
	1947	1948 план
Потребление электроэнергии		
всего	393,5	457
в том числе:		
Силовое потребление	270,4	320
Уличное освещение	7,0	7
Бытовое потребление	116,1	130
Собственные нужды электростанций и потери в сети	95,2	104

В 1945 г. было начато проведение регулярного капитального ремонта электростанций. Электрификацией, путем сооружения сетей низкого напряжения, было дополнительно охвачено 120 сел.

В 1946 г. производство электроэнергии увеличилось против 1945 г. на 22%. Число часов использования мощности электростанций выросло до 4 200. Число электрифицированных сел увеличилось на 206.

В 1947 г. — первом году двухлетнего плана — было начато крупное электростроительство. К концу года было введено в эксплуатацию новых мощностей — 13,7 тыс. квт и смонтировано 1 136 км сетей и линий электропередачи. Производство электроэнергии выросло на 11,2%. Электрификацией было охвачено еще 248 сел.

В 1948 г. продолжался монтаж крупнейших тепловых электростанций: им. Сталина, Марица — 1, Варна и др., а также шло усиленное строительство новых линий электропередачи. Число электрифицированных селений увеличилось на 280. В итоге выполнения двухлетнего плана электроэнергией стало пользоваться 50% всего населения Болгарии. Годовое потребление электроэнергии на душу населения выросло с 42 квтч в 1944 г. до 80 квтч в 1948 г. [Л. 11].



Единая высоковольтная сеть Болгарии.

В плане дальнейшего строительства тепло- и гидроэлектростанций предусмотрены, в частности, следующие объекты (табл. 4).

Таблица 4

Название станций	Мощность, квт	Стоимость, млн. левов
Теплоэлектростанции:		
Марица-II	66 000	3 960
Перник-II	50 000	3 000
Гидроэлектростанции:		
Росица-I	13 200	530
Асеница	6 700	576
Борзья (Петрохан)	25 000	2 000
Видима-I	3 200	143
Петрово (Св. Врач)	2 650	273
Китка (Г. Лом)	3 200	293
Мездра	2 100	320
Разлог	730	100
Владимирцы (Тича)	425	71
Видбол	400	33
Боровица	150	15,4
Тыжа-I	4 845	400
Белы Искор	16 000	300
Радомирицы	730	100
Вуча (расширение)	7 300	190
Микрогэсы	1 000	100

В 1949 г. строительство электростанций развернулось в более широком масштабе. За пятилетие введено в эксплуатацию новых мощностей — 46 тыс. квт. В строительстве находятся 9 теплоэлектростанций и 30 гидроэлектростанций общей мощностью 867 тыс. квт.

По пятилетнему плану (1949—1953 гг.) производство электроэнергии в 1953 г. должно вырасти на 328% против 1948 г.; установленная мощность — на 410% должно быть

электрифицировано еще 1800 Душевое потребление электроэнергии составит 200 квтч [Л. 11].

До установления народной власти электростанции Болгарии были лишь на местную сеть и не были связаны между собой. В настоящее время в Болгарии в целях организации рационального электрического и наилучшего использования мощностей электростанций создается единая высоковольтная сеть. Линии электропередачи кольцом охватывают всю страну; электроэнергия вырабатанная в любой части страны, можно будет передать в любой из пунктов потребления. Схема единой высоковольтной сети Болгарии показана [Л. 9] на рисунке. В качестве первой очереди строительства было намечено [Л. 8] завершение следующих участков: Курило—Пловдив (157 км), Курило—Мездра—Червен Бряг (91 км), Червен Бряг—Плевен (55 км), и далее Плевен—Левски—Горна Оряховица (102 км). Кроме того, в первую же очередь было намечено сооружение линии Русе—Разград, которая от Русе должна быть продолжена до Бухареста, чтобы связать высоковольтной линией Болгарию и Румынию. В настоящее время уже введен в эксплуатацию участок Курило—Пловдив, который связывает

Софию с Пернишским угольным районом, а также с Димитровградом посредством построенной в 1945—1946 гг. линии Пловдив—Димитровград. 27 августа 1949 г. вступил в строй действующих участок Бухарест (Грозавешти)—Русе—Разград, обеспечивающий электроснабжение Северо-восточных сельскохозяйственных районов Болгарии и крупнейшего промышленного центра Русе.

В общей сложности по пятилетнему плану намечено сооружение 1 279 км линий электропередач напряжением 110 кв, 548 км линий напряжением 60 кв и 6 950 км линий напряжением 15—20 кв.

Электротехническая промышленность. В 1948 г. производство электродвигателей увеличилось по сравнению с 1944 г. на 640%, трансформаторов на 112%, телеграфной аппаратуры в 6,5 раза. В 1949 г. валовая продукция электропромышленности превысила 2,5 млрд. лев [Л. 10]. В 1949 г. только для нужд сельского хозяйства страны было изготовлено 4 000 электродвигателей [Л. 13].

Большое электростроительство и внедрение электричества в сельское хозяйство в Болгарии, радиофикация, сооружение телефонных установок в городах и селах требуют больших количеств разнообразных электроаппаратов, машин, электродвигателей, трансформаторов и других механизмов и приспособлений, которые до настоящего времени ввозятся в Болгарию из-за границы. По пятилетнему плану предусмотрено создание собственной электротехнической промышленности. На базе существующих электротехнических мастерских организован трест ЭЛПРОМ, который объединяет всю электротехническую промышленность страны. Этот трест строит [Л. 7, 8] ряд электромашиностроительных и вспомогательных заводов. В Софии строится завод аппаратуры слабых токов, который будет производить телефонную и радиоаппаратуру, электроприборы, а также прочую аппаратуру слабых токов. В одну смену будут работать на заводе от 3 до 4 тыс. рабочих. В районе Софии строится электромашиностроительный завод. Он занимает площадь в 15 га и будет производить ежегодно 15—20 тыс. электродвигателей, 1 000 трансформаторов различной мощности, генераторы для гидротурбин малой мощности и много других машин. На заводе будет работать в одну смену около 2 500 рабочих. Оба завода должны вступить в строй действующих — на полную мощность.

принятый в 1950 г. Строятся заводы по производству электро- и радиоламп; кабельный завод, который будет производить кроме кабеля, изолированный шнур и провод; завод электрофарфора. В 1950 г. трест «ЭЛПРОМ» должен производить только для сельского хозяйства 7 000 электродвигателей, из которых 500 шт. для молотыбы и 1 500 шт. для шлифов. Кроме того будет выпущено большое количество электродвигателей, трансформаторов и др. для электрификации мельниц, маслобоен и для электрификации различных производственных процессов в сельском хозяйстве. В 1950 г. будет выпущена первая партия электротрак-

торов. В программу производства по пятилетнему плану входят разнообразные машины и оборудование, заменяющие труд человека в сельском хозяйстве, а именно: электронасосы, электропоилки, аппараты для электро-

Литература

1. Планово стопанство, № 5, 1948; № 2, 1949.
2. Месечни Известия на Главната дирекция на статистиката, № 6, 1948.
3. Планово стопанство, № 4, 1948.
4. Планово стопанство, II, № 2, 1948.
5. Работническо Дело 11 февраля 1949.
6. Планово стопанство, № 1, 1949.
7. Отечествен фронт, 12 февраля, № 1369, 1949.
8. Отечествен фронт, № 1125, 1948; № 1485, 1498, 1539, 1540, 1949.
9. Отечествен фронт, № 1237, 9 сентября, 1948.
10. Отечествен фронт, 9 ноября, № 1602, 1949.
11. Отечествен фронт, 3 сентября, № 1544, 1949.
12. Отечествен фронт, 16 октября, № 1581, 1949.

Н. И. РОМАШКИН

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С УДАРНОЙ НАГРУЗКОЙ

(Обзор)

Электропривод с пиковой циклической нагрузкой, использующий маховыми массами, представляет собой тему прикладной электротехники, которая продолжает развиваться исследованиям и углубленной разработке. Это свидетельствует ряд работ, опубликованных за последние годы как в советской литературе, так и зарубежной [Л. 1—14]. Целью всех этих изысканий является поиск такого метода расчета электропривода с пиковой нагрузкой и маховыми массами, который давал бы наилучшее приближение к действительным условиям работы привода. Применение такого метода расчета должно было бы получать, с одной стороны, лучшее использование электродвигателя и маховых масс, с другой, — уменьшение расхода электроэнергии и сокращение эксплуатационных расходов. Вместе с тем могут быть установлены требования к характеристикам электрооборудования отвечающего физической сущности и особенностям такого привода.

В категорию электроприводов с ударной нагрузкой входят приводы как сравнительно малой мощности — в единицы и десятки киловатт, так и более мощные — сотни, определяемые сотнями и тысячами киловатт. К первой группе входят молоты, прессы, штамповальные машины, кузнечно-ковочные машины и тому подобные механизмы, во вторую группу — неререверсивные прокатные станы — дефибреры в бумажной промышленности.

В настоящем обзоре мы рассмотрим пути, по которым развивается теоретическая разработка и методология расчетов электроприводов с ударной нагрузкой, а также конструктивные формы схем электрической коммутации, действие которых электроприводы с ударной нагрузкой находят свое время реализуются на практике.

За последние 5 лет (1944—1949) в зарубежной технической литературе было опубликовано 7 работ, посвященных непосредственно теоретическим и практическим вопросам электропривода с маховыми массами. Авторы этих работ, являясь представителями электротехнических фирм в разных странах (Броун-Бовери, Эрликон, АСЕА и др.), отражают в известной мере точку зрения и практические подходы этих фирм в рассматриваемой области.

Непосредственно вопросам пиковых приводов малой мощности (прессы, штамповальные машины, кузнечно-ковочные машины) посвящены работы Хилла [Л. 14] и Мюллера [Л. 10]. Обе работы содержат значительный объем и носят преимущественно теоретический характер. В обеих авторами исходят из упрощенной схематизированной двухчастковой графика ударной нагрузки.

Первая из этих работ [Л. 14] содержит теоретическое обоснование и вывод расчетных формул для электроприводов прессы и сходных с ним механизмов, совершающих

от 20 до 120 рабочих ходов в минуту. В основу исследования положена прямолинейная характеристика двигателя, что представляет собой первое грубое допущение. Но автор частично пользуется и вторым, еще более грубым допущением, а именно — вместо экспоненциального изменения скорости привода (двигателя) принимает линейное ее изменение. В процессе выводов к этому добавляется еще ряд допущений, в результате чего получаемые выводы и формулы требуют весьма осторожного отношения. Во всяком случае они могут применяться только для самых ориентировочных подсчетов и предварительных оценок и не избавляют от необходимости выполнения полных расчетов, основанных на более строгих теоретических предпосылках.

Из числа таких формул следует указать на зависимость, связывающую диапазон q колебаний момента двигателя с величиной его номинального скольжения s_n и относительным падением a скорости за каждый цикл двухчасткового графика:

$$a = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max}}, \quad (1)$$

$$\pm q\% = \pm 100 \frac{a(1 - s_n)}{2s_n \left(1 - \frac{a}{2}\right)} \approx \pm \frac{100a}{2s_n}. \quad (2)$$

Например, если задано $s_n = 15\% = 0,15$ и $a = 20\% = 0,20$, то колебания момента двигателя будут происходить в пределах

$$q\% = \pm 100 \frac{0,2(1 - 0,15)}{2 \cdot 0,15 \left(1 - \frac{0,2}{2}\right)} \approx \pm 63,3\%.$$

или по более грубой формуле

$$q\% = \pm \frac{100 \cdot 0,2}{2 \cdot 0,15} = \pm 67,7\%.$$

Переходя от пульсации момента к пульсации тока, автор только указывает, что из-за наличия составляющей намагничивающего тока колебания тока будут несколько меньше, чем $q\%$; однако, аналитическая зависимость тока от момента в работе отсутствует, тогда как в советской технической литературе соответствующие формулы были опубликованы в 1946 и 1948 гг. [Л. 5].

Другая приближенная формула дает величину среднего квадратичного момента двигателя за цикл

$$M_{\sigma} = \sqrt{\frac{\omega_{cp}}{2\pi n_{кр} i} \left(\frac{A_1 M_1}{\omega_1} + \frac{A_0 M_0}{\omega_0} \right)}, \quad (3)$$

где A_1 и A_0 — работа в кгм , требуемая механизмом во время рабочего хода и соответственно при холостом ходе;

M_1 и M_0 — средний момент в кгм за время рабочего хода и соответственно при холостом ходе;

ω_1 и ω_0 — средние угловые скорости двигателя за время рабочего хода и соответственно при холостом ходе;

ω_{cp} — средняя угловая скорость двигателя за весь цикл;

$n_{кр}$ — число оборотов кривошипного вала за время рабочего хода;

i — передаточное отношение между валом двигателя и кривошипным валом.

Для советских электротехников, привыкших определять величину среднего квадратичного момента двигателя при ударной нагрузке на основе точного решения дифференциального уравнения движения, пользование вышеприведенной формулой (3) являлось бы шагом назад.

Приводимые в конце работы Хилла формулы для потерь в меди ротора двигателя при переменной нагрузке вместе с их выводами являются ни чем иным, как повторением соответствующих формул, впервые опубликованных, около 15 лет назад в советской литературе [Л. 2].

Во второй работе [Л. 10] делается некоторый шаг в сторону от шаблонного и неточного решения на основе прямолинейной механической характеристики двигателя и вместо последней вводится параболическая характеристика вида $M = as - bs^2$. Следует сказать, что в советской технической литературе такая характеристика была предложена и применена для решения задач пикового привода приблизительно на 10 лет раньше [Л. 3 и 4], и именно в такой форме: $\mu = 1 - (1 - \sigma)^2 = \sigma(2 - \sigma)$ (в относительных единицах), где $\mu = M/M_k$, $\sigma = s/s_k$; индекс k относится к точке опрокидывающего момента на характеристике двигателя.

Работа Мюллера не достигает поставленной цели, так как вместо непосредственного решения задачи, исходя из криволинейной характеристики, вводится ряд приближений и обходных приемов. Например, скорость двигателя, отвечающая нагрузке холостого хода, отождествляется с синхронной скоростью и т. д. Все это приводит к расплывчатым формулировкам, далеким от какого бы то ни было общего метода решения; при этом все изложение носит крайне запутанный характер.

Вместо стройного и последовательного метода расчета предлагаются полумпирические рецепты, отнюдь не имеющие универсального значения. Таким образом, например, предлагаются коэффициенты α для определения при двухучастковом графике нагрузки средней квадратичной мощности двигателя P_{σ} по формуле $P_{\sigma} = \alpha P_{\mu}$, где P_{μ} — мощность пика, согласно таблице.

Для ориентировочных подсчетов автор предлагает пользоваться величиной $P_{\sigma} = 0,6 P_{\mu}$. Грубо ориентировочный и достаточно неопределенный характер подобных рекомендаций очевиден сами собой.

Следующие четыре работы [Л. 8 и 11—13] посвящены непосредственно асинхронному электроприводу неререверсивных прокатных станков. В статье Ландау [Л. 12] вопросы работы электропривода трактуются весьма приблизительно, на основе линейной механической характеристики. Величины момента и скорости двигателя описываются известными экспоненциальными уравнениями (рис. 1). Автор ограничивается только приближенными эмпирическими указаниями, часть которых представляет известный практический интерес.

Так, при установлении величин маховика рекомендуется исходить из величины запасаемой в нем энергии при вращении с полной скоростью приблизительно в 1000—1500 кгм на 1 л. с. номинальной мощности двигателя; эти цифры могут быть уменьшены при относи-

	Время пика малое $\alpha =$	Время пика большое $\alpha =$
При небольшом изменении числа об/мин или при почти прямолинейном очертании кривой момента двигателя	0,39÷0,50	0,49÷0,50
При среднем изменении числа об/мин	0,47÷0,55	0,53÷0,55
При большом изменении числа об/мин	0,63÷0,69	0,63÷0,69

тельно продолжительных пропусках и увеличены в случае коротких пропусках.

Для расчета на прочность или выбора редуктора передаточных элементов между двигателем и станком следует руководствоваться величиной максимальной нагрузки, которую должен выдержать редуктор при торможении привода противотоком до полной остановки 10 сек.

Момент торможения маховых масс

$$M = \frac{GD^2 \cdot n}{375 \cdot t} = \frac{GD^2 \cdot n}{3750} \text{ кгм.}$$

Если $M_{\text{д. макс}}$ — максимальный момент, развиваемый двигателем, то пиковый момент, приходящийся на редуктор, составит:

$$M_{0 \text{ макс}} = \frac{GD^2 \cdot n}{3750} + M_{\text{д. макс}},$$

или же, переходя к мощностям в л. с.

$$P_{0 \text{ макс}} = \frac{n}{716} M_{0 \text{ макс}} = \frac{GD^2 \cdot n^2}{716 \cdot 3750} + P_{\text{д. макс}} = \frac{A}{375} + P_{\text{д. макс}},$$

где $A = \frac{GD^2 \cdot n^2}{7160}$ кгм — запас кинетической энергии

вых масс.

Прочие вопросы, рассматриваемые в статье, например, сравнение работы привода с постоянным скольжением в цепи ротора и с контакторным регулированием, способы электрического торможения двухмоторный привод стана и пр. освещаются на элементарном учебника по электроприводу и для электротехников интереса не представляют.

В области пиковых электроприводов значительное внимание уделяется возможности автоматического регулирования нагрузки асинхронного электродвигателя на любую величину независимо от пиков нагрузки привода машины (например, прокатного стана). Для этого необходимо автоматически регулировать скольжение двигателя в зависимости от нагрузки. Такую функцию в принципе мог бы выполнять автоматический жидкостный регулятор скольжения с соответствующим моментным (т. е. синхронным) двигателем, перемещающим электроды. Однако известно, такая система на практике не применяется из-за ее инерционности.

В недавнее время предложено взамен регулятора скольжения, дающего определенные потери энергии, менять систему регулирования, свободную от потерь [Л. 11]. Для этого энергия скольжения ротора подается его колец к коллекторной машине Шербиуса, которая свою очередь возвращает эту энергию в сеть посредством асинхронной машины механически связанной с коллекторной машиной Шербиуса. Коллекторная машина представляет собой в данном случае не что иное, как фазокомпенсатор, применявшийся в свое время для пуска тихоходных асинхронных двигателей. Все это от фазокомпенсатора (функции которого сохраняются в рассматриваемой машине) состоит в нескольких:

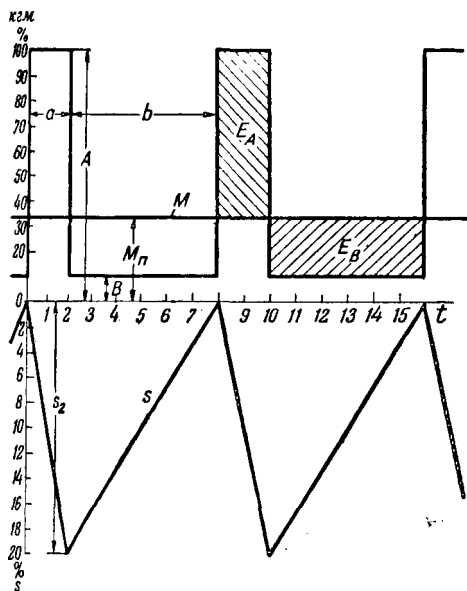


Рис. 1.

ной системе возбуждения и в добавлении автоматического быстродействующего регулятора. Действие схемы видно из рис. 2. Возбуждение коллекторной машины создается из трех составляющих. Первая составляющая создается компаундной обмоткой C, обтекаемой роторным током; эта составляющая создает часть напряжения коллекторной машины, пропорционального току ротора и направленного ему навстречу. Такой же эффект можно было бы получить, заменив коллекторную машину активным сопротивлением в цепи ротора.

Вторая обмотка возбуждения (шунтовая) состоит из двух частей, намотанных во взаимно противоположных направлениях и питаемых от напряжения на кольцах асинхронного двигателя через посредство быстродействующего регулятора напряжения. При питании части обмотки E_a происходит увеличение скольжения, при питании E_b — уменьшение скольжения. Переход от одного режима к другому осуществляется благодаря изменению сектора S в регуляторе по потенциометрическому реостату. Составляющая напряжения коллекторной машины, создаваемая обмотками E_a и E_b , вычитается или соответственно вычитается из первой составляющей.

Наконец, дроссельная катушка L создает третью составляющую напряжения под прямым углом к первым двум, служащую для компенсации $\cos \varphi$.

Скоростные (механические) характеристики асинхронного двигателя с коллекторной машиной показаны на рис. 3. Характеристики b, c, d, e соответствуют разным положениям сектора регулятора. Если выполнить измерительную (вращающуюся) систему регулятора ваттметрической регулировки будет вестись на постоянство мощности. Процесс регулирования представлен линиями ADE.

Хотя описанный способ автоматического регулирования на постоянство мощности в отличие от жидкостного регулятора скольжения называется «способом регулирования без потерь», следует учесть, что это название имеет в большей степени рекламный характер. В действительности при работе коллекторного агрегата с добавочной коллекторной машиной имеют место внутренние потери как электрические, так и механические, которые можно оценить приблизительно в 30—50% отдаваемой с колец ротора мощности. Кроме того, сам по себе коллекторный агрегат является дорогим, а эксплуатация его может вызвать трудности и добавочные расходы.

Необходимая величина GD^2 маховых масс при двухступенчатом графике ударной нагрузки (рис. 1) в случае автоматического регулирования нагрузки асинхронного

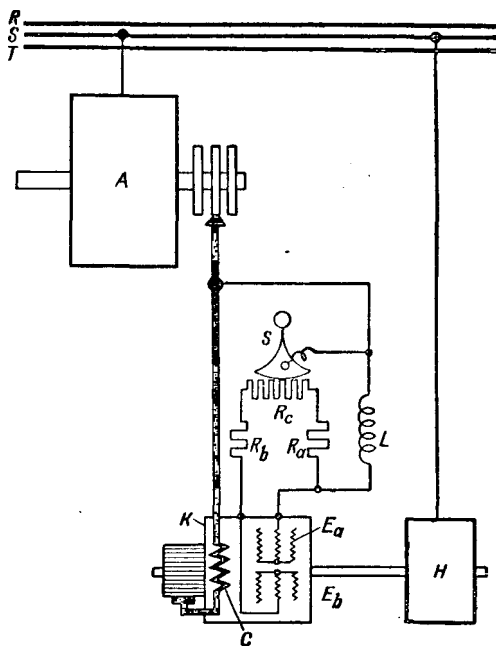


Рис. 2.

двигателя на постоянную величину может быть найдена из формулы

$$GD^2 = \frac{ab}{a+b} \frac{A-B}{s_2 \cdot n_0 \cdot 2,67 \cdot 10^{-3}} \text{ кгм}^2, \quad (6)$$

где в соответствии с рис. 4 $a = t_1$, $b = t_0$, $A = M_1$ и $B = M_0$, n_0 — синхронное число об/мин; s_2 — расчетное предельное скольжение.

Для сравнения работы асинхронного двигателя с постоянным сопротивлением в цепи ротора и с коллекторным фазокомпенсатором был выбран упрощенный идеализированный график ударной нагрузки с двумя участками — пик и пауза — со следующими данными (рис. 4):

$$M_1 = A = 3000 \text{ кгм}, \quad t_1 = a = 2 \text{ сек},$$

$$M_0 = B = 300 \text{ кгм}, \quad t_0 = b = 6 \text{ сек}.$$

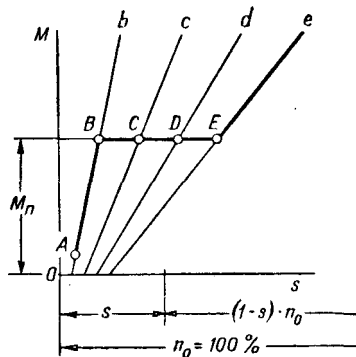


Рис. 3.

Синхронное число оборотов в минуту электродвигателя, на валу которого помещается маховик, равно 750. Предельно-допускаемое снижение скорости при наибольшей нагрузке электродвигателя принято 20%, т. е. $s_2 = 0,2$.

а) При коллекторном фазокомпенсаторе. Нагрузка двигателя определяется моментом постоянной величины (рис. 1)

$$M_n = \frac{3000 \cdot 2 + 300 \cdot 6}{2 + 6} = 975 \text{ кгм},$$

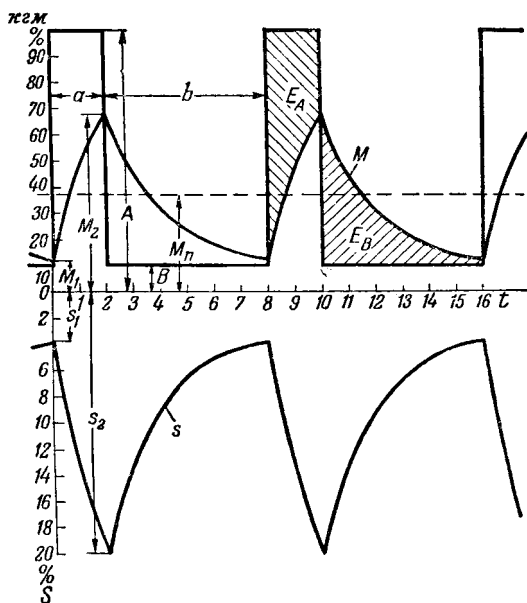


Рис. 4.

т. е. мощность двигателя (полагая $n_n \approx n_0$)

$$P_n \approx \frac{975 \cdot 750}{975} = 750 \text{ квт.}$$

Необходимый маховой момент по формуле (6)

$$GD^2 = \frac{2 \cdot 6}{2 + 6} \cdot \frac{3000 - 300}{0,2 \cdot 750 \cdot 2,67 \cdot 10^{-3}} = 10100 \text{ кгм}^2.$$

б) При постоянном сопротивлении в роторе. Для наглядности сравнения принят тот же маховик, что и в случае п. «а» ($GD^2 = 10100 \text{ кгм}^2$). Номинальное скольжение двигателя $s_n = 0,017$; скольжение с добавочным сопротивлением при номинальном моменте $s'_n = 0,108$. При том же значении $s_2 = s_{\text{макс}} = 0,2$, расчет на основе прямолинейной механической характеристики двигателя приводит к известным экспоненциальным кривым изменения момента двигателя во времени (рис. 4), причем величина момента колеблется между значениями

$$M_{1\partial} = 2030 \text{ кгм} \text{ и } M_{0\partial} = 380 \text{ кгм.}$$

Среднеквадратичное значение момента, по которому выбирается двигатель, $M_n = 1100 \text{ кгм}$ (расчет опускается), а номинальная мощность его

$$P_n = \frac{1100 \cdot 750}{975} = 845 \text{ квт.}$$

Таким образом, в случае п. «а» нагрузка (момент) двигателя остается постоянной и равной 32,5% от заданного пика нагрузки; в случае п. «б» момент двигателя колеблется от 12,7 до 69% заданного пика. Мощность двигателя в случае п. «а» может быть на 11,5% меньше, чем в случае п. «б». Наконец, потери энергии в случае п. «а» должны быть несколько (правда незначительно) ниже по двум причинам: вследствие уменьшения номинальной мощности двигателя и вследствие стабилизированного графика нагрузки (отсутствие пиков мощности и тока).

Кроме уже упомянутой работы Мюллера [Л. 10] попытка уточненного расчета асинхронного электропривода с маховыми массами на основе криволинейной механической характеристики двигателя в зарубежной литературе встречается впервые в работе Кеттенакера [Л. 9], т. е. приблизительно на 7 лет позднее опубликования соответствующих работ в советской техни-

ческой литературе [Л. 3 и 4]. Кеттенакер, используя известную формулу Клосса, приходит к уравнению движения в форме

$$\frac{ds}{dt} = a - \frac{2b}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}},$$

где

$$a = \frac{M_c}{\theta \omega_0}, \quad b = \frac{M_k}{\theta \omega_0},$$

θ — момент инерции вращающихся масс, отнесенный к валу двигателя, в кгмсек^2 ;
 ω_0 — синхронная угловая скорость;
 M_c — момент нагрузки;
 M_k — опрокидывающий момент двигателя. Автор получил решение дифференциального уравнения в функции $t = f(s)$ в трех формах, смотря по тому, какой из трех случаев имеет место:

$$a < b, \text{ т. е. } M_c < M_k,$$

$$a > b, \text{ т. е. } M_c > M_k,$$

$$a = b, \text{ т. е. } M_c = M_k.$$

Полученные решения ничем не отличаются от опубликованных у нас гораздо раньше в соответствующей учебной литературе, например, впервые в учебнике С. Ринкевича [Л. 1]. При этом автор получает решение в виде функции $t = f(s)$. Обратной аналитической зависимости $s = f(t)$ или, что еще более требуется на практике, $M = f(t)$ в работе не дано.

Работа Кеттенакера имеет много недостатков. Автор не воспользовался методом относительных единиц, что не позволило обобщить решения. Лишь в коротком (5 строчек!) послесловии к статье автор, повидимому, пытаясь этот недостаток своей работы, замечает, что следовало бы изобразить кривые, интерпретирующие результаты расчетов, в относительных единицах.

Все кривые построены для случайных значений опрокидывающего скольжения s_k и момента инерции маховых масс, т. е. тех именно параметров, рациональный выбор которых и составляет существо расчета электропривода с ударной нагрузкой. Хотя расчеты проведены для двух вариантов $s_k = 0,2$ и $0,5$ и для двух значений момента инерции маховых масс $\theta = 50$ и 500 кгм^2 , однако эти расчеты выглядят как элементарные численные примеры, из которых никаких сопоставлений или полезных следствий не может быть получено. К тому же изменение величины маховых масс в столь широком диапазоне (в 10 раз) при решении практических вопросов электропривода нереально.

Получив приближенное решение (на основе правильной механической характеристики — в целях сравнения с точным решением), автор почему-то оставляет в форме логарифмической зависимости времени скольжения, не замечая, очевидно, что обратное выражение — скольжение (момент) двигателя в функции времени представляет собой экспоненциальную функцию, которую принято всегда выражать закон движения электропривода определяемый линейным уравнением.

Попытка автора сравнить решения по точному методу (по криволинейной характеристике) и по приближенному методу (по прямолинейной характеристике) могла бы представить большой практический интерес, если бы метод сравнения был вполне безупречным. Между тем диаграмма, представляющая зависимость скольжения от времени, рассмотрены только три значения относительной нагрузки $M_c/M_k = 0,5 - 1 - 1,5$, тогда как для реальной нагрузки характерны именно более высокие значения M_c/M_k , порядка 3—5—10 и даже выше, во всяком случае должно быть $M_c/M_k > 1$.

Неучет реальных условий привел автора к ошибочному выводу, будто «приближенный метод расчета» существенные отклонения от точного метода дает только при большой продолжительности пика (более 4 сек., согласно приведенной в статье диаграмме). О

а если бы кривые были построены для значений $U/U_0 > 1,5$, указанного выше дезориентирующего вывода, нельзя было бы сделать.

Такой же неудачной оказывается попытка автора рассмотреть работу электродвигателя: а) с постоянным сопротивлением в цепи ротора и б) с регулируемым скольжением. Построенные на двух графиках кривые мощности и момента двигателя для указанных случаев носят характер цифровых приписок; никаких полезных выводов или, тем более, обобщений из них сделать нельзя, так как эти кривые предназначены к тому же не в функции времени, а в функции скольжения.

В американской литературе асинхронному электроприводу переверсивного прокатного стана была посвящена работа Беркли [Л. 8, 13]. В работе Беркли рассматривается вопрос о выборе типа электродвигателя к небольшому стану для прокатки латунных заготовок. Сравниваются три варианта: 1) асинхронный короткозамкнутый двигатель нормального типа с «жесткой» характеристикой (номинальное скольжение 3,33%); 2) такой же двигатель, но с «мягкой» характеристикой (номинальное скольжение 7%); 3) асинхронный двигатель с фазовым индуктором и контактными кольцами; 4) синхронный двигатель. Последний вариант сразу был отброшен, так как при пиковых нагрузках, создающихся при поломке соединительных муфт и заклинивании заготовки между вальками, обратная обмотка двигателя подвергалась бы недопустимым толчкам. Равным образом был исключен из рассмотрения асинхронный двигатель с контактными кольцами вследствие его относительно высокой стоимости (этого аппарата) и повышенных эксплуатационных расходов.

Окончательный выбор был сделан в пользу короткозамкнутого двигателя с «мягкой» характеристикой, мощностью в 150 л. с., 600 об/мин, с $3\frac{1}{2}$ -кратным опрокидывающим моментом, по следующим соображениям: 1) маховик используется почти в два раза лучше, чем в двигателе с «жесткой» характеристикой; 2) зубчатая передача между двигателем и маховиком удешевляется, так маховик принимает на себя большую долю нагрузки; 3) пики тока и колебания напряжения в сети уменьшаются.

Работа Беркли, послужившая темой доклада на конференции Американского общества инженеров-электриков, интересна только как пример применения короткозамкнутого двигателя в чуждой для него до сих пор области — электропривода прокатных станов. Вместе с тем данный доклад указывает на расширение конструктивного пространства для короткозамкнутых двигателей с повышенным скольжением до 10 л. с., в то время как известная до сих пор предельная мощность таких двигателей была 70—80 л. с. (в приводах прессов и ковочных машин).

Что касается методологической стороны и теоретической разработки вопроса, то в статье Беркли она совершенно отсутствует. Приводимые расчеты имеют весьма примитивный характер. Диаграммы нагрузки двигателя содержат крупную ошибку: имеется грубое несоответствие между временами пика и холостого хода, с одной стороны, и временами начала зарядки и пика маховых масс, — с другой. На эту ошибку было обращено внимание и во время дискуссии по докладу Беркли [Л. 13].

Подводя итоги нашему обзору, следует сказать, что ни одна из рассмотренных зарубежных работ не содержит универсального метода расчета и конкретных ответов по основным вопросам электроприводов с ударной нагрузкой — о наивыгоднейшей механической характеристике электродвигателя, требуемых величинах маховика и мощности двигателя, удовлетворяющей одновременно требованиям динамической устойчивости и безопасного нагрева двигателя.

Вместе с тем обнаруживается, что теоретическая разработка вопросов пиковых приводов в иностранной литературе за самые последние годы далеко не достигла того уровня, на который эти вопросы продвинуты советскими авторами; имеющиеся попытки расчета приводов на основе криволинейной механической характеристики двигателя и параболическая аппроксимация этой характеристики охватывают только часть вопроса и отстают от опубликованных соответствующих работ советских авторов на 10 и более лет.

Литература

1. С. А. Ринкевич. Электрическое распределение механической энергии. Госэнергоиздат, Часть I, стр. 197—198, 1932.
2. Л. Б. Гейлер. К теории работы электропривода с маховыми массами. Электричество, стр. 7, № 20, 1935.
3. Л. Б. Гейлер. О переходном режиме асинхронного двигателя при внезапном изменении нагрузки на валу. Электричество, стр. 35, № 8, 1937.
4. Г. М. Каялов. Работа асинхронного двигателя при вращающем моменте, близком к опрокидывающему, ВЭП, стр. 29, № 7, 1937.
5. Л. Б. Гейлер. О выборе асинхронного двигателя по среднему квадратичному моменту и току. Электричество, стр. 59, № 4, 1946; также ВЭП, стр. 5, № 2, 1948.
6. Л. Б. Гейлер. Динамические свойства асинхронного двигателя и новый метод расчета пиковых электроприводов. Электричество, стр. 52, № 7, 1947.
7. Г. М. Каялов. Расчет на нагрев асинхронного прокатного двигателя. Электричество, стр. 48, № 3, 1948.
8. L. H. Berkley. Выбор электродвигателя для прокатного стана. El. Eng., стр. 444, № 5, 1947. Реферат: Электричество, стр. 75, № 3, 1948.
9. L. Kettenacker. Условия работы асинхронных двигателей под нагрузкой. A. i. E., т. 38, стр. 35, № 12, 1944.
10. K. E. Müller. Маховиковые приводы с асинхронным двигателем. Bulletin Oerlikon, стр. 1683, № 258, 1945.
11. P. Rauhut. Регулирование мощности для выравнивания сильных толчков нагрузки асинхронных двигателей. BVM, т. 34, стр. 191, № 10—11, 1947.
12. F. Landau. Асинхронные двигатели для прокатных станов. ASEAJ, т. 20, стр. 159, № 11—12, 1947.
13. L. H. Berkley. Выбор электродвигателя для прокатного стана. Tr. AIEE, т. 67, стр. 183, 1948.
14. C. V. Hill. Асинхронные двигатели для прессов и тому подобных приводов. BEAMA J, т. 56, стр. 44, 1949.

Доктор техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР



К статье В. А. Привезенцева „Основные вопросы изоляции обмоточных проводов“

(Электричество, № 9, 1949)

Доктор техн. наук, проф. С. М. БРАГИН

Московский энергетический институт
им. Молотова

В статье В. А. Привезенцева рассматриваются вопросы, связанные с расширением ассортимента, увеличением выпуска и улучшением свойств обмоточных проводов, также с введением новых видов проводов, применение которых в электромашиностроении позволило бы добиться значительного технико-экономического эффекта. Все эти вопросы давно назрели, и обсуждение их на страницах журнала следует признать своевременным и необходимым.

О большинством положений статьи и выдвинутых в ней конкретных предложений по улучшению качества обмоточных проводов можно согласиться. Однако, следовало бы углубить и доработать вопросы, касающиеся технико-экономических характеристик обмоточных проводов. Например, в начале статьи автор говорит, что коэффициент заполнения паза в электрической машине зависит от отношения сечения меди к полному сечению изолированного провода, т. е. от

$$\frac{q_m}{q_n}$$

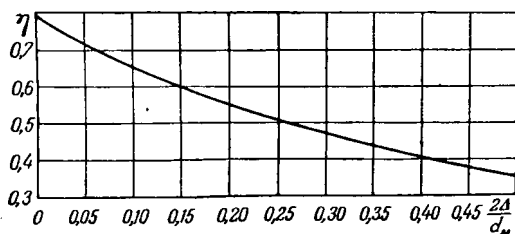
Однако, коэффициент заполнения паза равен не

$$\eta = \frac{q_m}{q_n},$$

как написано в статье, а (для прямоугольного паза и круглой проволоки)

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{q_m}{q_n} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{2\Delta}{d_m}\right)^2}.$$

Последняя формула показывает, что при малом отношении толщины изоляции к диаметру проволоки $\frac{2\Delta}{d_m}$,



коэффициент использования паза электрической машины изменяется значительно медленнее изменения отношения

$\frac{2\Delta}{d_m}$ (рисунок). Так, например, при изменении $\frac{2\Delta}{d_m}$ до 0,01, т. е. в 5 раз, коэффициент использования паза увеличивается от 0,715 до 0,77, т. е. всего на 7,5%. Временные обмоточные провода характеризуются коэффициентом $\frac{2\Delta}{d_m} = 0,20$. При снижении этого соотношения т. е. на 40%, коэффициент использования паза, как показывает рис. 1, изменяется от 0,55 до 0,63, т. е. увеличивается на 14,5%.

Не следует ли отсюда сделать вывод, что для изоляции должен быть какой-то оптимальный коэффициент использования паза, а также другими показателями, например, механической прочностью изоляционного слоя или для проводов с пленочной изоляцией, которая падает со снижением толщины изоляции.

Отношение $\frac{2\Delta}{d_m}$ играет большую роль при выборе изолированной проволоки для различных случаев применения и при учете технико-экономических характеристик проводов; однако, в статье [рис. 3 и формула (2)] пока не приведен другой показатель, а именно отношение толщины изоляции к полному весу изолированного провода, который может представлять интерес только для кабельных заводов.

При рассмотрении влияния прямоугольной формы проволоки на равномерность наложения волокнистой изоляции автор вполне справедливо делает заключение, что изменение радиуса кривизны вызывает неравномерное натяжение нитей волокнистого материала, накладываемого поперек на фасонную жилу, однако никаких мер, кроме увеличения радиуса закругления жилы, не рекомендует. Это связано с потерей сечения меди, не рекомендуемой, кажется, что увеличение радиуса закругления — это дорогая цена за сравнительно небольшое улучшение изоляции провода. Может быть, вся выгода на утоньшении изоляции потеряется из-за уменьшения коэффициента заполнения паза, так как коэффициент заполнения паза уменьшается при увеличении радиуса закругления прямоугольной проволоки. Надо обследовать этот вопрос и проверить практически, что дает увеличение радиуса закругления кабельному заводу и потребителю. Можно обсуждать вопрос о выборе наиболее выгодной формы закругления краев прямоугольной проволоки с целью обеспечения равномерного наложения изоляции (без скопления по длинным сторонам прямоугольного сечения отсутствия прорезания изолирующего слоя острыми краями проволоки).

Нам кажется, что можно было бы дать хорошие обмоточные провода с применением прямоугольной проволоки соответствующей требованиям ГОСТ 434-41; нужно обеспечить хорошее закругление краев при производстве проволоки и принять меры к достижению хорошей укладки пряди волокнистого материала при обмотке проволоке, для чего необходимо обратить особое внимание на выбор подходящей гладилки и формы выпуклого ниппеля обмоточной головки машины. Можно было

думать о создании такой гладилки, которая обеспечила бы меньший нажим на ребрах проволоки, т. е. об отсутствии гладилки с неравномерным обжимом.

Детально было бы на основе формулы (8) подсчитать величину «потери сечения» δ и привести наиболее характерные значения δ для отдельных видов обмоточных проводов, а также учесть уменьшение коэффициента использования лаза электромашины при увеличении радиуса закругления проволоки.

Все мероприятия по улучшению качества нагревостойких проводов с асбестовой и стеклянной изоляцией сводятся к получению кабельными заводами ровницы и качественного волокна более высокого качества, а также к оклеиванию нагревостойкой изоляции с нагревостойкой эмалью. Не будет ли от такой комбинации сильно снижена нагревостойкость провода, и к чему же применять эпоксид и стекло, если имеется нагревостойкая эмаль? Автор рекомендует в качестве нагревостойкой эмали применять винифлекс. Не говоря о том, что изготовление эмалированной проволоки большого сечения чрезвычайно не обеспечено, стоимость провода такой конструкции при пониженной, по существу, из-за применения нагревостойкости будет значительно выше стоимости провода с нормальной асбестовой или стеклянной изоляцией. Неужели нет никаких путей к улучшению качества этих проводов без снижения их нагревостойкости и увеличения стоимости?

В заключение В. А. Привезенцев приводит в числе типов обмоточных проводов также провода с пленочной изоляцией, однако не дает никаких характеристик этих проводов и не приводит никаких примеров практического использования их в электромашиностроении. Можно только пожелать о том, чтобы наша кабельная промышленность ускорила освоение новых типов обмоточных проводов, и в особенности проводов с тонкой бумажной наложенной на провод позивом с подклейкой особым лаком, обеспечивающим хорошие свойства таких проводов. Кабельная промышленность имеет большие возможности к расширению выпуска обмоточных проводов высокого качества и использованию новых видов синтетических изоляционных материалов для этой цели. Необходимо скорее реализовать эти возможности.

Инж. В. Н. Красоткин

Техническое управление МЭП СССР

В. А. Привезенцев осветил ряд вопросов, касающихся улучшения качества выпускаемых обмоточных проводов освоения новых типов проводов.

В части эмальпроводов с высокопрочной изоляцией (винифлекс и металвин) он совершенно правильно отметил, что степень развития их производства и расширения области применения этих проводов целиком зависит от стоимости лака, изготавливаемого предприятиями и организациями Министерства химической промышленности. Надлежащая кооперация между заводами-изготовителями и расширением производства, несомненно, позволили бы значительно снизить стоимость лака.

Другой тип высококачественных проводов, с успехом можно заменить провода с изоляцией из шелка и хлопчатобумажной пряжи, — провода с изоляцией из триацетной пленки. Эти провода, несомненно, найдут широкое применение в электромашиностроении, особенно для обмотки электродвигателей, работающих в среде с повышенной влажностью. Провода с пленочной изоляцией должны изготавливаться как круглого, так и прямоугольного сечения. Качество этих проводов в основном зависит от качества подклейки пленки к проводу. Как указывает В. А. Привезенцев, этот тип изоляции обладает повышенной нагревостойкостью, влагостойкостью и электрической прочностью; длительно допустимая температура нагрева может быть допущена даже большая, чем указывает В. А. Привезенцев, а именно 115° С.

Из искусственных волокон наибольший интерес для изоляции обмоточных проводов представляет капрон, обладающий большой прочностью и малой гигроскопичностью. Другие типы искусственного волокна (ацетатные) из-за малой механической прочности могут применяться в специальных случаях.

Большой интерес представляет применение для изоляции обмоточных проводов тонкой бумаги (средней по толщине между телефонной и микалентной), подклеиваемой к проводу специальными лаками. Бумага может подклеиваться как на голый провод, так и на эмалированный; необходимо освоение бумажной промышленностью производства специальной тонкой изоляционной бумаги, обладающей достаточной механической прочностью при значительном удлинении.

Вопрос об увеличении радиуса закруглений сечения прямоугольной меди неоднократно широко обсуждался в электромашиностроении. Внедрение прямоугольной меди с большими закруглениями (с радиусом до $\frac{a}{2}$) не только уменьшит «распухание» волокнистой изоляции на широкой стороне провода, но и несколько снизит брак при обмотке электрических машин из-за уменьшения случаев продавливания изоляции углами провода при укладке его в паз. Однако, в довольно значительном количестве типов электродвигателей, имеющих большой коэффициент заполнения лаза, применение такой меди вызовет уменьшение мощности или же потребует перерасчета машины с увеличением ее габаритов. Это и является основной причиной, препятствующей внедрению прямоугольных обмоточных проводов с увеличенным радиусом закруглений.

Наиболее дешевыми из выпускаемых нагревостойких обмоточных проводов являются провода с дельта-асбестовой изоляцией марки ПДА. Я считаю, что В. А. Привезенцев не совсем прав, указывая, что для обеспечения уменьшения толщины и улучшения качества проводов ПДА обязательно применение асбестовой ровницы крюд АА. Применение этой ровницы, конечно, значительно повысит качество и позволит уменьшить толщину изоляции. Однако, высокая стоимость ровницы крюд АА сильно удорожит провода ПДА, приблизив их к стоимости проводов со стеклоизоляцией, в частности проводов ПЭТСО. Я считаю, что, применяя ровницу из смеси крюд АА и асбеста 1-го сорта, при разработке более качественных лаков, в особенности пропиточного, и соответствующей технологии пропитки и запечки, обеспечивающей получение наружной лаковой пленки, можно повысить качество проводов ПДА и несколько снизить толщину их изоляции. Возможно, что для этого потребуется некоторая реконструкция оборудования.

В статье В. А. Привезенцева совершенно правильно отмечены преимущества проводов ПЭТСО, которые в дальнейшем, по моему мнению, должны в значительной степени вытеснять провода марки ПСД.

Что касается проводов ПСД, то перед кабельщиками стоит ряд задач как по дальнейшему повышению их качества, в частности механической прочности изоляции, так и в части снижения ее толщины. Для решения первой задачи необходимо переоборудование обмоточных машин, чтобы провода получали многократную (по крайней мере двукратную) запечку. Для освоения высококачественных тонких обмоточных проводов необходимо (а не желательно, как указывает В. А. Привезенцев) освоение легкой промышленностью более тонкой стеклопряди с более тонкими и равномерными элементарными волокнами.

Разработанная и выпускаемая в настоящее время стеклопрядь с малым количеством замасливателя при обмотке проводов «пылит», что заставляет снижать скорости обмотки. Это вызывает необходимость разработки более вязкого замасливателя.

Как видно из вышесказанного, перед кабельной промышленностью стоят большие задачи по дальнейшему повышению качества выпускаемых обмоточных проводов и по освоению новых типов обмоточных проводов. Однако, эти задачи не могут быть решены без помощи работников химической, бумажной и пленочной промышленности, которые должны обеспечить кабельные заводы качественными материалами: электроизоляционными лаками, пленкой, специальной бумагой и т. д.

Доктор техн. наук, проф. Б. М. ТАРЕЕВ

Всесоюзный заочный энергетический институт

Статья В. А. Привезенцева поднимает ряд актуальных для современной электропромышленности вопросов.

В ряде случаев отсутствие необходимых конструкций и типов обмоточных проводов тормозит развитие производства электрических машин и аппаратов, в особенности специального назначения. Нельзя мириться с тем, что круглые эмалированные провода не выпускаются диаметром более 1,65—1,81 мм, в силу чего электромашиностроительные заводы вынуждены применять круглые обмоточные провода больших сечений марки ПБД; это связано с повышением расхода дорогой хлопчатобумажной пряжи и увеличением толщины изоляции. Между тем, техническая возможность эмалирования проводов диаметром по крайней мере до 3 мм доказана. Поэтому следует поддерживать вносимое В. А. Привезенцевым предложение о расширении ассортимента эмалированных проводов, чтобы расширить применение более прогрессивной марки ПЭЛБО вместо ПБД.

Точно так же представляет значительный интерес предложение об освоении производства проводов прямоугольного сечения с изоляцией не только типа винилфлекс или металвин, но и из обычных дешевых эмальлаков. Переход с изоляции марки ПБД на ПЭЛБО на этих проводах был бы также весьма эффективен для электромашиностроительной промышленности.

Существующее положение, когда все виды эмалированных проводов входят в один класс (А) электромашиной изоляции по нагревостойкости, совершенно неправильно. Ошибка должна быть исправлена при пересмотре государственного стандарта на электрические машины.

Заслуживает внимания вопрос об изменении радиуса закругления прямоугольных проводов. Повреждения волокнистой изоляции обмоточных проводов (в особенности сравнительно более жестких неорганических волокон — стеклянных и асбестовых) на острых гранях промежуточных обмоточных проводов встречаются на практике весьма часто. Это до настоящего времени в известной степени тормозит широкое внедрение проводов со стекловолоконной и асбестовой изоляцией.

Расширение внедрения стеклянной изоляции проводов весьма важно для электромашино- и аппаратостроения. Однако, до последнего времени ассортимент этих проводов исчерпывался прямоугольными и круглыми проводами больших сечений. Провода малых сечений со стеклянной изоляцией почти не изготавливаются, хотя спрос на них велик.

В связи с тем, что стоимость стеклянного волокна еще высока, весьма важно расширение выпуска проводов прогрессивной марки ПЭТСО. Применяемые в настоящее время лаки обеспечивают рабочую температуру этих проводов до 125°С; следует форсировать работы по внедрению особо нагревостойких лаков, например кремнийорганических.

Провода с дельта-асбестовой изоляцией, несмотря на создание конструкций проводов со стекловолоконной изоляцией, продолжают привлекать большое внимание. Необходимо отметить, что технология производства этих проводов на наших кабельных заводах за последние 15 лет по сути дела не изменилась. Следует решительно переходить на применение для проводов ПДА более нагревостойких и механически прочных пропитывающих и подклеивающих составов. Комбинация асбестового волокна с битумом в нагревостойкой изоляции явно нецелесообразна, так как несмотря на высокую адгезию к асбесту, битум при нагреве имеет тенденцию к размягчению и вытеканию из изоляции. В частности, это наблюдается при пайке коллекторов.

Калькуляция стоимости дельта-асбестовой изоляции ниже стоимости хлопчатобумажной изоляции, безусловно, не может считаться нормальной.

Провода с пленочной изоляцией весьма перспективны, но их выпуск задерживается недостатком пленки. Необходимо добиться от Министерства кинематографии СССР обеспечения электропромышленности пленкой требуемого ассортимента в больших количествах.

Значительный интерес может представить разработка обмоточных проводов с применением для их изоляции лент из крепированной бумаги, дающей весьма

большое удлинение при растяжении. Крепированная бумага производится в Советском Союзе в промышленном масштабе. Использование этой бумаги для проводов, применяемых в электромашиностроении и подверженных в производстве машины изгибам на малые радиусы, могло бы дать существенную экономию за счет замены хлопчатобумажной пряжи, шелка и других волоконных материалов.

Необходимо систематическое проведение исследовательских работ по изучению тепловых характеристик обмоточных проводов. Необходимо надежное определение важных для электромашино- и аппаратостроения значения теплопроводности изоляции и поверхностной теплоотдачи для различных типов проводов. Необходимо уточнить вопрос о нагревостойкости новых материалов изоляции обмоточных проводов, в частности капро-

Проф. С. А. ПОГОЖЕВ

Московский энергетический институт и.м. Молотова

Статья В. А. Привезенцева затрагивает чрезвычайно важную проблему электромашиностроения. В связи с этим желательно некоторые положения, недостаточно освещенные в статье, обсудить более подробно.

В. А. Привезенцев предлагает расширить диапазон размеров круглых проводов марки ПЭЛБО вплоть до верхнего предела диаметра 2,44 мм. Такое предложение вполне рационально, но при этом не следует упускать из внимания следующих обстоятельств:

а) При применении проводов большого диаметра изготовления секций и полюсных катушек потребуются технические условия на провода, предусмотреть повышенные требования сохранности изоляции при действии удара. Такое требование должно быть основано на том, что при изготовлении секций и катушек неизбежна ударная укладка и подколачивание отдельных витков молотком.

б) Для проводов большого диаметра необходимо остановиться на коэффициенте n [см. формулу (3) статьи], представляющем отношение диаметра цилиндра намотки к диаметру провода, не превосходящем 2, так как секции не должны иметь конструктивно несоразмерных выступов, требующих изменений в размерах обмоточных катушек и увеличивающих вылет лобовых частей обмотки.

Можно согласиться с В. А. Привезенцевым о возможности удешевления проводов с изоляцией винилфлекс или металвин. В первую очередь надлежит обратить внимание на удешевление и расширение выпуска проводов круглого сечения.

Автор статьи ставит вопрос о применении прямоугольных проводов с размером меньшей стороны не менее 1,35 мм, закругленной формы, а для более толстых проводов принять радиус закругления $r = 0,7 \div 2$ мм вместо принятого сейчас $r = 0,3 \div 0,5$ мм. Уменьшение сечения в сравнении с площадью полного прямоугольника в этом получается $10 \div 13\%$ вместо $5 \div 8\%$, принятых ГОСТ 434-41 для наиболее ходовых сечений проводов. Это означает повышение плотности тока приблизительно на 5%, т. е. повышение потерь в обмотках, снижение КПД и повышение нагрева. Для вновь проектируемых машин возможно заранее предусмотреть распределение потерь, связанное с изменением сечения провода. Однако, для готовящихся машин, находящихся на пределе КПД при нагреве, такое снижение сечения может стать недопустимым. Поэтому более приемлемым следует признать, тем не менее, второй вариант, выдвигаемый В. А. Привезенцевым: очертание узкой стороны по эллипсу [рис. 8 и формула (8)].

Все остальные вопросы, затронутые В. А. Привезенцевым и касающиеся проводов со стеклянной и дельта-асбестовой изоляцией, а также с изоляцией из триацетной пленки и искусственного волокна, вполне правильно освещены автором статьи и можно лишь присоединиться к его требованиям и пожеланиям.

Инж. Б. Е. БЕНЕНСОН

Москва

В. А. Привезенцев поставил на обсуждение весьма широкий круг вопросов, касающихся техники изготовления обмоточных проводов и качества их изоляции.

Однако, автор упустил один серьезный элемент качества проводов с эмалью винифлекс, имеющий актуальное значение для значительной отрасли электромашиностроительной промышленности. Как известно, допускаемая температура нагрева изоляции класса А, к которому относится винифлекс, установлена из соображений обеспечения длительной надежной эксплуатации электрических машин продолжение десятков тысяч часов. В тех случаях, когда провода предназначены для работы со сроком службы всего 500—1000 час., используются провода с изоляцией класса А, причем допускаются периодические нагревы до 160°С. В машинах с коротким сроком жизни находят применение провода, обмотанные волокнистой — хлопчатобумажной или шелковой изоляцией, несмотря на значительную большую толщину и меньшую теплопроводность волокнистой изоляции, по сравнению с эмалью винифлекс. Вызывается тем, что винифлекс ощутительно размягчается при температуре 150—160°С, что приводит к провисанию изоляции провода во вращающихся обмотках, имеющих из прямоугольного провода ПЭВП, имеющего к тому же недостаточно равномерную толщину слоя эмали.

Улучшение качества проводов винифлекс должно идти в направлении уменьшения термолластичности и повышения толщины эмалевого слоя, которая должна быть в пределах 0,08—0,12 мм (на две стороны). Допустимо снижение требований к эластичности эмали после остаривания: продолжение 168 час. при температуре 125°С, так очевидно, что для обмоток с коротким сроком жизни является требование, чтобы после вышеуказанного длительного остаривания пленка обладала той же эластичностью, что и до остаривания (ВТУ МЭП 646-47 и ВТУ 1949 г.).

Для повышения нагревостойкости проводов винифлекс необходимо улучшить и степень сцепления эмали с проводом. Сила сцепления эмали с медью должна обеспечивать силу сцепления эмали с пропиточным лаком, так при сдвиге витков разрыв происходил на границе лакокрасочный лак или через лаковую пленку, а не на границе эмали с медью. Если учесть, что высококачественные вращающиеся обмотки быстроходных машин выполняются сильно цементирующими лаками, которым требуется высокая механическая прочность отвердевшей пленки, то вопросы адгезии эмали к меди становятся также важным элементом качества изоляции проводов. Улучшение адгезии должно идти в основном по линии специальной обработки и подготовки меди, предназначенной для покрытия эмалью винифлекс.

В. А. Привезенцев предлагает увеличить радиусы закругления краев прямоугольных проводов с целью исключить возможность повреждения стекловолокнистой и хлопчатобумажной изоляции, по его утверждению имеющей место в настоящее время закруглениях. Увеличение радиуса закругления должно также улучшить и качество эмали на ребрах провода. Это предложение вполне разумно, несмотря на то, что снижение удельного сопротивления меди в катушках обмоток, вызываемое уменьшением расчетного сечения и изменением его конфигурации, можно повлечет за собой некоторое незначительное увеличение габаритов обмоток.

Увеличение радиусов закругления должно быть введено в первую очередь на проводах с эмалью винифлекс. Для проводов ПЭВП, выпускаемых в настоящее время отношение широкой стороны к узкой b/a не менее 2,6 для толщин до 1,35 мм и не менее 2,25 для толщин от 1,35 до 1,95 мм. Предлагаемое увеличение r для толщин провода ПЭВП в 1,35 мм и ниже уменьшение расчетного сечения всего до 2%. Если r равным 0,7 мм для толщин от 1,35 до 1,95 мм, уменьшение расчетного сечения не превысит 3%. Из этого вытекает возможность применения проводов ПЭВП с такой конфигурацией сечения без необходимости конструктивных изменений машин, в которых эти провода ис-

пользуются в настоящее время, тем более, что прямоугольная эмалированная проволока используется в основном в обмотках малых размеров.

Инж. М. П. ТЕРЕНТЬЕВА

Москва

Статья В. А. Привезенцева весьма своевременна, так как в области обмоточных проводов до последнего времени остается нерешенным ряд насущнейших вопросов, подчас тормозящих развитие тех областей промышленности, в которых эти провода применяются.

Основные положения статьи безусловно верны и остается только пожелать, чтобы рекомендуемые В. А. Привезенцевым мероприятия нашли свое осуществление.

В частности, заслуживает внимания предложение об изменении радиусов закругления проводов прямоугольного сечения, так как острые ребра очень часто служат причиной резкого ослабления в этих местах изоляции обмоточных проводов. В особенности же может быть интересно это мероприятие, если оно действительно будет способствовать организации массового производства эмалированных проводов, которые, безусловно, представляют большой интерес для электромашиностроения.

В статье приведена сравнительная стоимость 1 т обмоточных проводов различных марок в зависимости от диаметра по меди. Однако, нам кажется странным замечание автора о том, что провода с дельта-асбестовой изоляцией даже несколько дешевле, чем провода марки ПБД. Нет ли здесь ошибки?

Большой интерес представляют предложения о создании обмоточных проводов с комбинированной эмальной и стеклянной или дельта-асбестовой изоляцией. К сожалению, получение таких проводов даже в виде опытных партий встречает очень большие затруднения.

Для ряда производств в настоящее время требуются провода с высокой электрической прочностью изоляции. В этом отношении очень большой интерес представляют описанные провода с пленочной изоляцией. Быстрейшее освоение производства этих проводов нужно считать важнейшей и первоочередной задачей.

Применение обычных эмалированных проводов марки ПЭЛ-1 или ПЭЛ-2 для изготовления катушек трансформаторов, очень часто вызывает межвитковые замыкания, и поэтому мероприятия по снижению стоимости эмалированных проводов винифлекс весьма своевременны и актуальны.

Следует улучшить качество хлопчатобумажной изоляции проводов, так как при изготовлении секций из проводов марки ПБД часто наблюдается неровная (с просветами) обмотка, что вызывает потом дефекты готовых изделий. На это обстоятельство следует обратить особое внимание и при внедрении обмоточных проводов с капроновой изоляцией. Организация производства их представляет большой интерес, однако очень важно, чтобы обмотка их была сплошной и без просветов.

Инж. В. Н. КОРОЛЕВ

Москва

Поднятый В. А. Привезенцевым вопрос о расширении ассортимента и пересмотре стандарта на ряд обмоточных проводов крайне актуален для электромашино- и аппаратостроительных заводов. Ряд положений, выдвигаемых автором, безусловно, правилен и должен найти в ближайшее время практическое отражение на заводах нашей кабельной промышленности, но некоторые предложения вызывают возражения.

Совершенно необходимы: выпуск проводов с пленочной изоляцией, увеличение предельных диаметров проводов марок ПЭЛ и ПЭЛБО, а также освоение проводов марок ПЭЛБО прямоугольных сечений. Следует приветствовать положения, выдвинутые в части повышения качества проводов со стеклянной и асбестовой изоляцией и разработки и выпуска проводов марки ПЭТСО.

Однако, выдвигаемое В. А. Привезенцевым положение о выпуске проводов с радиусом закругления, равным половине толщин меди, для электромашиностроительных

заводов неприемлемо, так как дало бы, как показывает элементарный расчет для наиболее близкого к практике соотношения размеров меди $a:b=1:2$, уменьшение сечения примерно на 10% и, кроме того, сделало бы катушку менее монолитной и ухудшило бы теплоотдачу.

Поднятый В. А. Привезенцевым вопрос о применении полиамидов вместо шелка, видимо, будет связан со снижением допустимых температур для этих проводов, так как опыт показывает, что нагревостойкость полиамидов невелика, и полиамидное волокно быстро стареет.

Необходимо отметить, что В. А. Привезенцев, уделяя в своей статье относительно много внимания конструктивным вопросам, почти не коснулся вопросов их нагревостойкости изоляции обмоточных проводов.

В настоящее время достаточно назрел вопрос о разработке и выпуске эмалированных проводов, удовлетворяющих по нагревостойкости требованиям к изоляции класса В. Производственному освоению эмальпроводов с повышенной нагревостойкостью должна сопутствовать работа методического порядка и работа в области стандартизации. НИИ КП совместно с ВЭИ должен разработать методику определения предельно допустимых температур для данного вида изоляции в условиях эксплуатации, и результаты этой работы должны быть отражены в виде стандарта. Существующее положение, когда все эмальпровода стандартом относятся к классу А, не отражает действительных качеств этих проводов и не дает возможности по формальным соображениям использовать все их ценные свойства. Стандарты на обмоточные провода, особенно новых конструкций, подобно стандарту на электрические машины, должны иметь указания о предельных рабочих температурах для данной марки провода.

При разработке клеящих составов для пропитки асбестовой и стеклянной изоляции должны учитываться также технология дальнейшего изготовления обмоток машин и аппаратов и применяемые при этом составы лаков и компаундов. Существенно важно получение монолитной обмотки с хорошо склеенными витками, что, очевидно, возможно только при соответствующих комбинациях лаков.

Особо должен быть поставлен вопрос об обмоточных проводах для высоковольтных машин с изоляцией как класса А, так и класса В. В первую очередь кабельные заводы должны освоить производство проводов с асбестовой изоляцией с сечением меди до $9,3 \text{ мм} \times 2,63 \text{ мм}$ — это является требованием данного дня. В дальнейшем совершенно необходимо освоение обмоточных проводов с нагревостойкостью изоляции классов А и В с повышенной надежностью изоляции, чтобы освободить электромашиностроительные заводы от необходимости наложения дополнительной витковой изоляции при намотке катушек. Изоляция этих проводов должна выдерживать без повреждения опрессовку в горячих прессах и рихтовку катушек на шаблонах уalaraми деревянного молотка. Толщина изоляции (на две стороны) должна быть не более 0,7 мм.

Кроме того, актуальным является вопрос о выпуске кабельными заводами проводов с подразделенными сечениями. Эти провода, состоящие из 2, 4, 6 или 8 элементарных, относительно слабо изолированных проводов прямоугольного сечения, должны иметь общую изоляцию, соответствующую указанным выше требованиям для обмоточных проводов высоковольтных машин, т. е. иметь общую витковую изоляцию. Разработка этих проводов, как и других новых типов, должна проводиться кабельными заводами совместно с электромашиностроительными предприятиями.

Профессор В. А. ПРИВЕЗЕНЦЕВ

Москва

В своей статье я не имел возможности осветить ряд вопросов, касающихся отдельных конструкций обмоточных проводов, и отклики на статью в значительной степени ее дополняют.

Однако, с рядом высказанных замечаний согласиться нельзя. Так, С. М. Брагин не совсем прав, утверждая, что в статье величина $\eta = \frac{q_m}{q_n}$ приравнивается

коэффициенту заполнения паза. В таком утверждении нет, в ней только указывается коэффициент заполнения паза зависит от этой величины.

Приведенное С. М. Брагиным выражение для коэффициента заполнения паза

$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{q_m}{q_n} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\left(1 + \frac{2\Delta}{d_m}\right)^2}$$

также далеко не точно, так как оно не учитывает паза изоляции и прокладок между отдельными слоями. Кроме того, провода в пазах в огромном большинстве случаев располагаются не так, как предполагает С. М. Брагин при выводе вышеуказанной формулы. Точно так нельзя согласиться с преуменьшением роли толщины лакировки обмоточных проводов. Приведенный С. М. Брагиным пример непоказателен, так как на практике у обмоточных проводов с волокнистой изоляцией соотношение $\frac{2\Delta}{d_m} = 0,01 \div 0,05$ никогда не имеет места.

Весьма существенным является вопрос об изменении радиусов закругления проводов прямоугольного сечения. Высказанные по этому вопросу замечания весьма существенны и важны. Целесообразно привести в статье соображения проверить экспериментально, а не тщательно подсчитать фактическое уменьшение сечения наиболее ходовых профилей прямоугольных обмоточных проводов при применении указанных способов закруглений, внедрение которых, несомненно, будет способствовать организации массового производства эмалированных прямоугольных проводов, а также проводов с комбинацией эмалево-волокнистой изоляцией.

Интересно отметить, что еще в 1944 г., когда это дело не было производства прямоугольных проводов эмалево- и стеклянной изоляцией, величины радиусов закруглений особым решением ВКС были несколько уменьшены против ГОСТ 434-41, так как недостаточность радиусов закруглений сказывалась даже при применении бумажной и хлопчатобумажной изоляции. В этом фактически уменьшение сечений при применении новых радиусов закруглений будет несколько меньше, что указано в некоторых замечаниях по статье.

Внедрение капронового волокна в производство обмоточных проводов следует всемерно приветствовать. Опасения В. Н. Королева о недостаточной нагревостойкости капрона являются результатом недоразумения. Проведенные в НИИ КП автором и Р. М. Гусевым исследования показывают, что нагревостойкость капрона выше, чем натурального шелка. После суточной выдержки при 150°С капроновое волокно сохраняет свой изначальный вид и до 30% своей разрывной прочности, в то время как у натурального шелка последняя снижается. Провод с капроновой изоляцией после 30 суток выдержки при 125°С сохраняет достаточную эластичность и пригоден для применения в секционных намотках, никак нельзя ожидать от проводов с изоляцией из натурального шелка.

Капроновая изоляция имеет, однако, существенный недостаток — резкое (в 10^3 — 10^4 раз) снижение сопротивления изоляции при нагревании до 100—125°С. Это обстоятельство должно быть учтено и тщательно проверено кабельными и электромашиностроительными заводами.

Значительный интерес представляют обмоточные провода с эмалево-бумажной изоляцией взамен проводов марки ПЭЛБО и ПЭЛШО. Проведенные в этом направлении работы НИИ КП под руководством Р. В. Кулаковой весьма ценны и своевременны. Они в ряде случаев эти провода могут обладать недостатком эластичностью, что является следствием очень небольшого удлинения изоляционных бумаг при разрыве. В этом отношении заслуживает большого внимания предложение Б. М. Тареева о применении крепированной бумаги. Процесс крепирования сложен, недорог и допускает выпуск бумаг с удлинением до 50% и даже выше.

В дискуссии были высказаны сомнения относительно целесообразности комбинирования нагревостойкой волокнистой изоляции (асбест, стекло) с нагревостойкой эмалью. В этом отношении совершенно правы Б. М. Тареев и В. Н. Крайнов.

использованию за возможно быстрое внедрение проводов ПЭТСО. Помимо значительного экономического эффекта за счет сокращения (примерно в два раза) расхода проволоки провода этой конструкции, как показали исследования НИИКП, обладают повышенными электрическими и механическими характеристиками при значительно меньшей толщине изоляции, что для проводов повышенной нагревостойкости имеет особо существенное значение. Точно так же весьма эффективно применение нагревостойкой эмали в проводах с дельта-асбестовой изоляцией, так как в этом случае значительно повышается электрическая и отчасти механическая прочность проводов, что особенно важно для этих проводов, устраняется наличие электрически ослабленных мест, что очень часто встречалось на практике при использовании этих проводов. Следует согласиться с мнением В. Н. Красоткина относительно применения ровницы из смеси асбеста марок АА и I-го сорта. Несомненно, что повышение качества проводов с дельта-асбестовой изоляцией неразрывно связано с улучшением качества применяемой асбестовой ровницы и усовершенствованием технологии производства указанных проводов. Весьма существенно быстрее внедрение предложенных НИИКП в результате проведенных в последнее время работ новых пропитывающих лаков взамен битуминозных.

Интерес, проявленный в дискуссии к проводам с пленочной изоляцией, вполне обоснован, так как

организация их производства сулит большие перспективы для электромашиностроительной промышленности. В кабельной промышленности уже проведены значительные работы по подготовке производства этих проводов, и в настоящее время дело лишь за смежниками, которые должны в конце концов дать кабельной промышленности доступную по стоимости и надлежащего качества пленку с клеящим подслоем в нарезанном (в ролики) виде. Между прочим при организации этого производства сразу будет решен вопрос и о высоковольтных обмоточных проводах, который поднимает В. Н. Королев. Его требования о нагревостойкой эмали вполне обоснованы. Проводимые в НИИКП и на кабельных заводах работы учитывают эти пожелания. Существующий стандарт на эмалированную проволоку ГОСТ 2773-44 предусматривает нагревостойкие эмалированные провода марки ПЭТ, которые испытываются при температуре 125° С.

Точно так же тематика проводимых в кабельной промышленности работ включает пожелание Б. Е. Бененсона относительно снижения термопластичности проводов — винифлекс, причем в последнее время достигнуты определенные положительные результаты. Заслуживают также серьезного внимания соображения Б. Е. Бененсона относительно допустимости некоторого снижения эластичности эмалированных проводов — винифлекс и металвин после длительного нагрева, что дало бы возможность в дальнейшем снизить термопластичность этих проводов.

ОТ РЕДАКЦИИ

Отклики на статью проф. В. А. Привезенцева подтверждают актуальность выдвинутых в этой статье положений. Редакция полагает, что Главкабель Министерства электропромышленности СССР учтет все подтвержденные в дискуссии положения, в частности: о необходимости расширения ассортимента и выпуска эмалированных проводов и проводов марок ЛЭЛБО и ПЭТСО как круглого, так и прямоугольного сечения, и о разработке проводов с изоляцией из крепированной бумаги, а также всесторонне обсудит высказанные в дискуссии соображения относительно целесообразности изменения профиля прямоугольной медной проволоки и примет решение по выбору оптимальных радиусов закругления.

К статье В. Е. Боголюбова „Квазирелаксационные колебания в феррорезонансных цепях с подмагничиванием“

(Электричество, № 6, 1949)

Инж. А. М. РЫВКИН

ЦНИЭЛ

В статье автоколебания объясняются подмагничиванием сердечников дросселя апериодической составляющей тока, протекающего по обмоткам во время переходных процессов, из которых слагаются колебания.

Апериодическая составляющая магнитного потока является необходимым элементом колебаний, но не его причиной. Определение, принятое в статье, приводит к предположению о том, что наличие апериодической слагающей во время переходного процесса вызывает этот процесс. В действительности апериодическая составляющая так же, как и весь процесс колебаний, порождена другим явлением, не рассмотренным в статье.

Для выяснения причин и физической сущности явления в ЦНИЭЛ был проведен анализ осциллограмм, полученных представленной на рис. 1, где верхняя кривая представляет собой запись тока в цепи, нижняя кривая — изменение напряжения на звене дроссель—конденсатор. Обмотка осциллограмм показала, что вольтамперная характеристика участка цепи дроссель—конденсатор является падающей. На рис. 1 видно, что увеличению падения напряжения на участке цепи дроссель—конденсатор (нижняя кривая) соответствует уменьшению тока (верхняя кривая), и наоборот, по мере роста тока уменьшается падение напряжения.

Согласно общей теории колебаний, очевидно, что наличие падающей вольтамперной характеристики (отрицательного динамического сопротивления) делает возможным существование автоколебаний. Следует выяснить, каким путем вольтамперная характеристика приобретает падающий характер и за счет чего режим работы цепи удерживается в области отрицательного наклона характеристики, что необходимо для существования колебаний.

Обычно падающая вольтамперная характеристика имеет место при феррорезонансе, однако, как видно на осциллограмме, в данном случае условия феррорезонанса для первой гармоники не соблюдены, так как не происходит опрокидывания фазы первой гармоники, характерного для феррорезонанса.

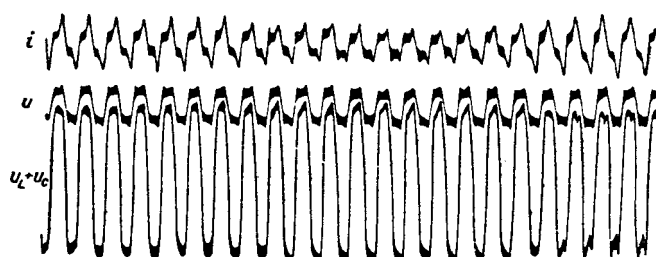


Рис. 1.

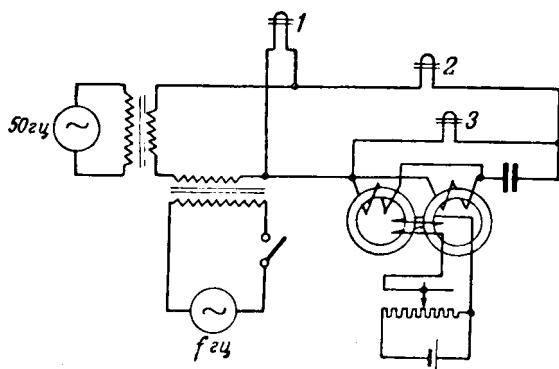


Рис. 2.

Разложение в ряд кривой тока и кривой падения напряжения на звене дроссель—конденсатор показывает, что во время колебаний при переходе от малого тока к большому происходит изменение знака фазового сдвига третьей гармоники напряжения, тогда как остальные гармоники, включая первую, сохраняют знак фазового сдвига. В то же время в кривой тока при переходе от малого тока к большому третья гармоника увеличивается в значительно большей степени, чем остальные. На нижней кривой рис. 1 можно проследить опрокидывание фазы третьей гармоники: переход от заостренной кривой к кривой со впадиной. Это позволяет сделать вывод о том, что в цепи имеет место последовательный феррорезонанс для третьей гармоники.

Приведенные выше результаты дали возможность предположить, что именно вследствие феррорезонанса третьей гармоники имеет место падающая вольтамперная характеристика и при определенных условиях возникают автоколебания.

Для проверки этого предположения был поставлен следующий опыт. В колебательную цепь были последовательно включены два источника напряжения. Один из них имел частоту 50 Гц, частота же другого могла изменяться в широких пределах. При питании цепи частотой 50 Гц подмагничивание дросселя было подобрано так, чтобы возникли колебания, затем амплитуда напряжения была снижена с тем, чтобы сорвать колебания. После этого в цепь подавалось напряжение второго источника, частота которого изменялась, последовательно проходя значения всех гармоник 3, 5, 7, 9 и т. д. Осциллограммы, снятые в схеме рис. 2, показали, что лишь при подаче в цепь частоты 150 Гц, соответствующей третьей гармонике, устанавливаются устойчивые колебания большой амплитуды, представленные на рис. 3, причем, если увеличивать напряжение частоты 150 Гц, в цепи наступает обычный феррорезонансный скачок, не сопровождающийся колебаниями. Проверке подвергалась как схема с параллельным, так и схема с последовательным соединением обмоток переменного тока дросселя.

Можно прийти к следующему заключению. Если в цепи имеет место феррорезонанс для первой гармоники, то она, как обычно, имеет относительно большую величину, то происходит феррорезонансный скачок, не приводящий к автоколебаниям. Если в цепи имеет место феррорезонанс для какой-либо высшей гармоники (например третьей), то при определенном соотношении между резонирующей гармоникой и остальными, вольтамперная характеристика становится падающей. Так как режим цепи определяется совместным действием всех гармоник, возможен случай, когда рабочая точка на вольтамперной характеристике будет принудительно удерживаться на падающем участке, тогда благодаря наличию в цепи отрицательного сопротивления в ней возникнут автоколебания.

Принципиально автоколебания возможны также и при феррорезонансе первой гармоники, но для этого она должна быть достаточно мала по величине сравнительно с остальными гармониками, чтобы их совместное действие удерживало рабочую точку в области падающего участка характеристики. При невыполнении последнего условия автоколебаний не будет, а произойдет обычный феррорезонансный скачок.

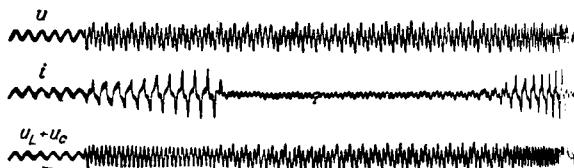


Рис. 3.

Приведенная в статье В. Е. Боголюбова осциллограмма колебаний (Электричество, № 6, 1949 г., стр. 1 рис. 7) также подтверждает сделанные выше заключения.

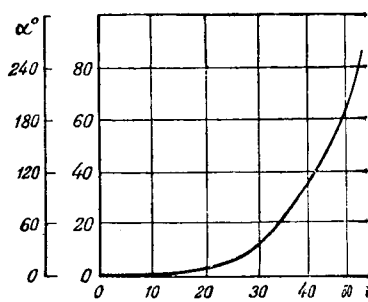
Сложность явления и нелинейность цепи чрезвычайно затрудняют в данном случае аналитическое исследование и расчет. Изложенный материал является лишь первым шагом по пути освоения работы дросселя насыщения в режиме генерации колебаний, однако понимание физической сущности процессов поможет более глубоко изучить это интересное явление и освоить его в технических приложениях.

Кандидат техн. наук В. Е. БОГОЛЮБОВ

**Московский энергетический институт
им. Молотова**

А. М. Рывкин высказывает сомнение в том, что данное мной объяснение правильно. Моя статья в № 6 «Электричество» является только выдержкой из большого исследования, в котором все высказанные положения проверены количественно. В этом исследовании я дал метод расчета медленных колебаний, приводящий к результатам, прекрасно совпадающим с опытом. Гипотеза, позволяющая производить количественные расчеты, подтвержденная опытом, становится уже теорией, обладающей достоверностью.

Изменение
фазового угла
третьей гармоники
при колебаниях в
зависимости от
напряжения сети
 U в вольтах.



В отношении же замечаний А. М. Рывкина необходимо высказать два следующих принципиальных положения:

1. Догадка автора (если можно так назвать то, что впоследствии не подтверждается действительностью) о том, что колебания происходят из-за резонанса третьей гармоники, не подкреплена в заметке абсолютно никакими доводами. Совершенно отсутствует последовательная логическая связь между констатацией факта резонанса и фактом появления медленных колебаний.

2. Само утверждение, что колебания должны сопровождаться феррорезонансом третьей гармоники, неверно. Опрокидывание третьей гармоники равноценно ее смещению на фазовый угол 180° (для ее частоты) или на угол 60° для частоты основной гармоники. Между тем, наблюдая различные режимы колебаний при постепенном повышении приложенного напряжения, мы получаем зависимость фазового смещения тока при колебаниях от приложенного напряжения, показанную на рисунке. Как видно, фазовый сдвиг в зависимости от напряжения может принимать любые величины от 0 до 110° . Частное значение этого сдвига 60° , соответствующее опрокидыванию третьей гармоники, ничем не выделяется среди всех остальных возможных значений. См. также осциллограмму, представленную на рис. 18 в другой моей статье «Квазирелаксионные колебания в феррорезонансных цепях» (Труды МЭИ, вып. 3, 1948).

Правила устройства электротехнических установок¹

Инж. М. Д. ГЛЕЙЗЕР

Узбекэнерго

Расчет анкерной металлической опоры, работающей в условиях сильного гололеда, по «Правилам для линейных линий» (далее «Правила») дает определенные ниже усилия в стойках опоры. Берем маркированные стали, для которых характерно: 1) отношение временного сопротивления к пределу текучести, равное около 2; 2) применяемый коэффициент безопасности при случайных нагрузках, т. е. отношение предела текучести к допускаемому напряжению, составляет величину порядка 1,2. Последнее и принято «Правилами» (раздел II).

Обозначим через α_n коэффициент распределения усилий стойками опоры, приложенных к траверзам. Тогда для опор, рассчитанных на обрыв n проводов при равных T , величины усилий в стойках, доводящих по расчету напряжение материала до предела текучести, будут, очевидно, равны:

$$P_m = \alpha_n T \cdot 1,2.$$

Точно так же величина усилия в стойке, соответствующая напряжению временного сопротивления материала опоры, будет равна:

$$P_b = 1,7 P_m \approx \alpha_n T \cdot 2.$$

Ниже в таблице приводятся расчетные значения усилий в стойках опоры. Рассматриваются наиболее часто применяемые схемы опор: одностоечные и двухстоечные с траверзой. Для последних величины в таблице выписаны при симметричном расположении стоек относительно проводов.

Таблица 1

Расчетные усилия в стойках опор

Расчетные данные	Обозначения	Одностоечная опора		Двухстоечная опора	
		двухстоечная	одностоечная	двухстоечная	одностоечная
Число оборванных проводов	n	2	2	3	3
Коэффициент распределения усилий	α_n	2	2	3,75	3
Максимальное усилие в стойке, соответствующее пределу текучести . .	P_m	2,4T	2,4T	4,5T	3,6T
Максимальное усилие в стойке, соответствующее временному сопротивлению	P_b	4T	4T	7,5T	6T

Фактические усилия в стойках опор в сильно гололедных районах могут быть определены, исходя из общего положения, что тяжение после обрыва может достигнуть величины временного сопротивления проводов, т. е. $R = 2 T$ (см. табл. 2).

Таким образом, если исходить из предположения, что от провода может достигнуть величины его временного сопротивления на разрыв, то при обрыве одного провода напряжение в двухстоечной одностоечной опоре окажется больше предела текучести. Следовательно, при обрыве провода в сильно гололедном районе может произойти повреждение анкерной опоры двухстоечного типа. Поэтому представляется необходимым повысить прочность конструкции линии

Таблица 2

Усилия в стойках опор для линий в сильно гололедных районах

	Обозначения	Одноцепная опора		Двухцепная опора	
		двух- стоеч- ная	одно- стоеч- ная	двух- стоеч- ная	одно- стоеч- ная
<i>Обрыв одного провода</i>					
Коэффициент распределения усилий . .	α_1	1,5	1	1,75	1
Усилия в стойке . .	P_1	3T	2T	3,5T	2T
Коэффициент запаса	P_m/P_1	0,8	1,2	1,3	1,8
<i>Обрыв с числом проводов согласно „Правилам“</i>					
Коэффициент распределения усилий . .	α_n	2	2	3,75	3
Усилие в стойке . .	$P_n = P_b$	4T	4T	7,5T	6T

для таких районов. Надо, чтобы прочность провода была меньше, чем прочность опоры. Представляется целесообразным, чтобы для сильно гололедных районов делалась проверка также на обрыв одного провода при усилиях, равном его временному сопротивлению. Это вызовет утяжеление только одностоечной опоры двухстоечного типа.

Данные в табл. 1 показывают, что каждая из стоек двухстоечной опоры рассчитывается на то же усилие, а для двухстоечной линии даже на большее усилие, чем вся одностоечная опора в целом. Практика проектирования показывает, что, учитывая весьма ограниченное применение опор двухстоечного типа, предлагаемая дополнительная расчетная схема нагрузок с обрывом одного провода практически не вызовет утяжеления анкерных опор.

Стойкость линии электропередачи следует также повысить за счет усиления промежуточных опор. Исходя из того, что во многих случаях промежуточная опора, получившая деформацию, может некоторое время находиться в работе до того, как будет произведен необходимый ремонт или замена, можно принять (условно) расчетные напряжения в материале опоры равными временному сопротивлению σ_b . Действительные напряжения будут несколько меньше за счет разницы в величинах номинального и эксплуатационного запаса прочности провода. При таком расчете промежуточная опора для сильно гололедных районов оказывается тяжелее нормальной опоры, для которой по «Правилам» допускаемые напряжения равны пределу текучести σ_m увеличенному в

$$\frac{2 T \sigma_m}{T \sigma_b} = \frac{2 T}{T \frac{\sigma_b}{\sigma_m}} = \frac{2}{1,7} \approx 1,2 \text{ раза, т. е. на } 20\%.$$

Инж. В. П. ШРЕЙБЕР

Трест «Кавминэнерго» МКХ РСФСР

1. В выпуске «Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1000 в» в § 95 предлагается: «При количестве масла в трансформаторе более 500 кг, а в выключателе или другом маслonaполненном аппарате более 250 кг под ними должен предусматриваться бетонированный маслоприемник», и в следующем § 96: «При количестве масла в трансформаторах или выключателях

¹Обращение редакции к читателям в связи с обсуждением «Правил» начато в 1949 г., № 11, стр. 98; первые выступления напечатаны в № 12, стр. 78.

менее указанного в § 95, но более 25 кг должны устраняться маслоприемники, выполненные в соответствии с § 95 или другого типа».

Неувязку в этих двух параграфах следует разъяснить. Требования о маслобраниках по § 161 и § 229 «Правил технической эксплуатации электроустановок промышленных предприятий» (издание 1947 г.) должны быть согласованы. В редактируемых «Правилах» необходимо дать более точную формулировку, не допускающую неправильных толкований. Надо полагать, что § 96 требует иной редакции, так как иначе он исключает возможность уста-

новки трансформаторов на открытых (мачтовых) трансформаторных пунктах, где осуществление маслобраников исключается.

2. Совершенно необходимо указать в «Правилах» условия расчета вентиляционных отверстий, сечения юных для южных районов должны рассчитываться максимальной летней температуре, что многие проектирующие организации в расчет не принимают, вследствие чего летних условиях трансформаторы нормально не могут греться и вентиляционное устройство трансформаторных пунктов переделяется эксплуатационным персоналом.



Заметки и письма

К ВОПРОСУ О РАССМОТРЕНИИ ГРАДИЕНТОВ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ОБМОТКАХ В ВИДЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

В моих работах [Л. 1—2] было показано, что нестационарное напряжение в обмотках можно выразить уравнением

$$u(x) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cos v_k \frac{k\pi}{l} t \cdot \sin k\pi \frac{x}{l} + u_2(x), \quad (1)$$

где v_k есть функция целого k и имеет размерность скорости [Л. 2, формула (1,45)].

Если бы мы имели $v_k = v = \text{const}$, то $u(x)$ выражалось бы волновой функцией

$$u(x) = \frac{1}{2} Y(x + vt) + \frac{1}{2} Y(x - vt) + u_2(x).$$

Там же было установлено, что если имеем реальную вторичную обмотку, а не гипотетический сплошной экран, то недопустимо полагать $v_k = \text{const}$.

Е. С. Фрид в своих работах [Л. 3—4] на ряде опытов осциллографирования модели показывает, что при достаточно крутых фронтах падающих волн градиент перенапряжения $G = \frac{du(x)}{dx}$ имеет пик, распространяющийся с постоянной скоростью и деформирующийся относительно мало. Этот факт имеет большое практическое значение, так как

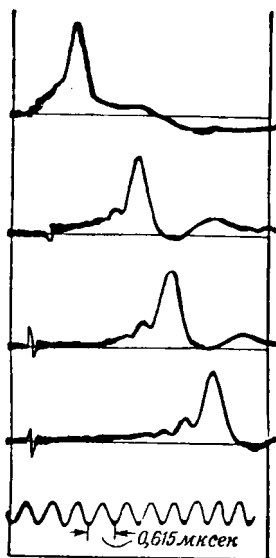


Рис. 1.

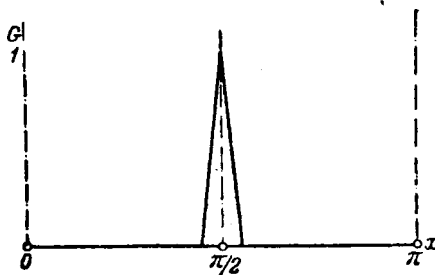


Рис. 2.

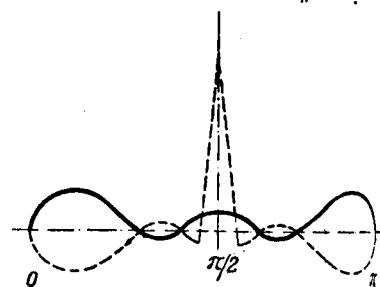


Рис. 3.

облегчает расчет градиентных перенапряжений. Для иллюстрации на рис. 1 приводим осциллограммы, взятые из [Л. 2 и 3]. Сняты градиенты $\frac{du}{dx}$

модели с равномерной обмоткой. Эти четыре осциллограммы относятся к точкам, равностоящим друг от друга. Градиент, как геометрическое место, можно разбить на две составляющие: расплывчатое „основание“ сравнительно низкой амплитуды и „пик“. Пик перемещается с постоянной скоростью, мало деформируясь. Основание перемещается (это можно проследить по бугорку сразу от пика), но сильно деформируется и представляет собой движущуюся вслед за пиком беспорядочно колеблющуюся растянутую по оси абсцисс форму.

Оказывается, что упомянутая выше теория подтверждается этими опытными данными, что мы ниже покажем. Причина в том, что при рассмотрении градиентов приходится придавать главенствующую роль высшим гармоникам.

В [Л. 1] указана формула

$$\frac{v_k}{v_1} \approx \sqrt{\frac{\rho^2 + (k\pi)^2}{\sigma^2 + (k\pi)^2}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma^2 + \pi^2}{\rho^2 + \pi^2}},$$

где ρ и σ — показатели взаимной индукции [Л. 2, ч. 1]. Для среднего случая обмотки можно взять $\rho = \sigma = 10$. При этом имеем связи k и v_k/v_1 :

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
v_k/v_1	1	1,26	1,55	1,74	1,84	1,92	1,96	2,00	2,02

Мы видим, что выше пятой гармоники скорость изменяется мало и здесь можно считать $v_k = \text{const}$.

Схематизируя, предположим, что в некоторый момент времени градиент имеет форму, показанную на рис. 2. Высота треугольника — единица, основание $0,1\pi$. Разложение в ряд для этой формы дает:

$$G = \sum_{k=1, 3, 5, \dots}^{\infty} A_k; \quad A_k = \frac{4\gamma}{\pi} \cdot \sin \frac{k\pi}{2} \left(\frac{\sin k\gamma}{k\gamma} \right)^2, \quad (3)$$

где $4\gamma = 0,1\pi$ — основание треугольника.

Разобьем градиент G на два слагаемых:

$$G = \sum_{k=1}^5 A_k + \sum_{k=7}^{\infty} A_k.$$

На рис. 3 первое слагаемое изображено сплошной, второе — пунктирной линией [подсчеты по формуле (3)]. Согласно сказанному выше пунктирная линия совершает перемещение с постоянной скоростью без искажения. Сплошная кривая следует за пунктирной с иной скоростью, и непрерывно деформируясь. Полная сумма G (и через некоторое время будет представлять собой тот же пик, но в отличие от рис. 2 сопутствуемый неким „подножием“, „основанием“, образованным сложением

пунктирной кривой и деформировавшейся сплошной (до деформирования они взаимно уничтожали друг друга).

Если бы мы исходили не из упрощенной формы рис. 2, а из пика с имеющимся уже „подножием“, мы все равно пришли бы к аналогичному результату.

Следовательно, движение имеет именно тот характер, какой показывают осциллограммы. Общность теории подтверждается.

Литература

1. В. А. Карасев. Теория расчета перенапряжений в обмотках трансформаторов. Электричество, № 11—12, 1944.

2. В. А. Карасев. Теория электромагнитных процессов в обмотках. Госэнергоиздат, 1946.

3. Е. С. Фрид. Основные закономерности импульсных градиентов в обмотках трансформаторов. Электричество, № 3, 1947.

4. Е. С. Фрид. Расчет импульсных градиентов в обмотках трансформаторов. Диссертация, МЭИ, 1949.

Доктор техн. наук, проф. В. А. КАРАСЕВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина



Настройка коммутации электрических машин

(в защиту советского приоритета)

В лаборатории электрических машин Томского электротехнического института инженеров железнодорожного транспорта (ТЭМИИТ) свыше десяти лет ведутся исследования коммутации машин постоянного тока. Последние четыре года они проводились исключительно при помощи электронного пик-вольтметра и катодного осциллографа. Именно эти приборы оказались наиболее пригодными для исследования всех коммутационных явлений в машинах постоянного тока. С помощью этих приборов были проведены экспериментальные исследования, на основе которых доказано несоответствие положений классической теории коммутации действительным явлениям и выявлена роль дополнительных полюсов; намечены общие принципы методологии расчета коммутации и, наконец, разработаны новые способы настройки коммутации. Эти исследования проводились в определенной последовательности по единой методике, разработанной нами в 1945 г. Результаты данных исследований были опубликованы в страницах журнала Электричество (№ 7 и 10, 1948 и № 1, 1949) и в Трудах института (выпуски XII, XIII и XIV, 1948).

И вот, спустя почти год, в июньских номерах 1949 г. американских журналов Electrical Engineering и General Electric Review в статье Лондей (R. T. Lundy), в которой предлагается применение электронного пик-вольтметра, катодного осциллографа и радиоприемника для настройки коммутации машин постоянного тока, повторяются, по существу, вопросы, освещенные в статье «К вопросу о настройке коммутации в машинах постоянного тока», опубликованной в 1948 г. в Трудах Томского института (выпуск XIV, 1948).

Изложение Лондей начинается с рассмотрения существующего метода настройки коммутации по безыскровой работе. Этот метод настройки коммутации, получивший весьма широкое применение в СССР и за рубежом, разработан во всех деталях В. Т. Касьяновым и опубликован в 1934 г. При описании этого метода Лондей ссылается на работу Шредера (T. W. Schroeder) и Айделотта (C. Aydelott), опубликованную в 1941 г. После рассмотрения существующего метода настройки коммутации

Лондей указывает, что им найдены возможности отметить искрение щеток при помощи приборов, что должно обеспечить более точную настройку коммутации. Однако, приведенные им способы обнаружения искрения щеток при помощи катодного осциллографа и радиоприемника совершенно аналогичны предложенным нами в названной выше статье. Способ настройки коммутации при помощи пик-вольтметра Лондей отличается от предложенного нами способа лишь тем, что автор включает пик-вольтметр между разноименными щетками машины, нами же он включается между одной из рабочих щеток в вспомогательной.

Анализируя настройку коммутации при помощи указанных приборов, мы отметили, что преимущества предлагаемых нами способов обнаружения искрения заключаются не только в том, что они обеспечат более объективные результаты в смысле обнаружения начальной стадии искрения щеток, но помимо этого они дадут еще возможность установить и природу данного искрения, иначе говоря, решить вопрос о том, какие факторы — коммутационные или механические — лежат в основе явления искрения машины. По экрану катодного осциллографа можно также установить, какую частоту — пазовую или коллекторную — имеют пики кривой падения напряжения в случае, если искрение обусловлено коммутационными факторами. В заключение своей статьи мы указали, что применение этих приборов дает возможность не только настраивать более точно коммутацию, но и проводить более глубокие исследования работы коллектора машин постоянного тока.

Лондей не имеет достаточно данных претендовать на приоритет в вопросе настройки коммутации при помощи пик-вольтметра, катодного осциллографа и радиоприемника.

Кандидат техн. наук, доц. М. Ф. КАРАСЕВ

Приоритет советских ученых по методике настройки коммутации машин постоянного тока является бесспорным, что вновь подтверждается в изложенной заметке.

РЕДАКЦИЯ



Совещание по защите подземных трубопроводов и кабелей от электрической коррозии

Ущерб, наносимый электрической коррозией подземным сооружениям в больших городах и на магистральных трубопроводах и кабелях, выдвигает вопросы защиты от коррозии в качестве важнейшей и актуальной задачи. Наиболее эффективными следует признать электрические методы защиты в сочетании с мероприятиями по увеличению переходного сопротивления между сооружениями и почвой.

Этим вопросам было посвящено Научно-техническое совещание, состоявшееся 21—24 ноября 1949 г. в Баку по инициативе Азербайджанского отделения Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетики (ВНИТОЭ) и Азербайджанского индустриального института им. Азизбекова.

Совещание вызвало большой интерес инженерно-технической общественности. В нем приняли участие представители научно-исследовательских институтов, вузов и производственных предприятий Москвы, Ленинграда, Киева, Тбилиси, Еревана, Ташкента, Риги, Иванова, Саратова и других городов Советского Союза.

Открывая совещание, директор Азербайджанского индустриального института, кандидат техн. наук С. Б. Годжаев подчеркнул народнохозяйственное значение проблемы защиты подземных трубопроводов и кабелей от электрической коррозии и выразил уверенность, что совещание послужит дальнейшему укреплению связи представителей науки и производства и поможет успешному разрешению сложного комплекса задач, выдвигаемых проблемой борьбы с электрической коррозией подземных металлических сооружений.

Участники совещания с большим интересом заслушали доклады доц. В. С. Калмана (АЗИИ) «Основные положения теории и расчеты заземленных сетей постоянного тока», члена-корр. Академии наук УССР, проф. И. Н. Францевича «Физико-химические параметры катодной защиты», инж. В. А. Пригула (трест «Стальмонтаж») «Обследование коррозионного состояния трубопроводов и коррозионные карты местности» и др.

В докладе кандидата техн. наук, доц. А. А. Спирина (АЗИИ) «Работы Лаборатории токов в земле» была освещена деятельность этой лаборатории Азербайджанского индустриального института за 14 лет ее существования. Приборы и аппаратура, разработанные лабораторией, широко используются в технике противокоррозионной защиты трубопроводов и кабелей и под ее руководством осуществлена успешная электрическая защита многих подземных металлических сооружений. Лабораторией разработан целый ряд инструкций по коррозионным обследованиям подземных сооружений. Проведено большое количество исследовательских работ в этой области.

С докладами и сообщениями выступили также кандидат техн. наук Л. М. Логов (ЭНИИ им. Есмана Академии наук Азербайджанской ССР), кандидат техн. наук, доц. В. Ф. Негреев (АЗНИИ нефти), кандидат техн. наук Б. Г. Лордкипанидзе (ЭНИИ Академии наук Грузинской ССР) кандидат техн. наук Н. К. Цекун (АЗИИ), инж. М. С. Трифель (трест «Бакгаз»), инж. М. Д. Джафаров (Упр. газопровода Саратов-Москва) и инж. Д. С. Гаджиев.

В обсуждении докладов приняли участие: доктор техн. наук М. И. Михайлов (ЦНИИС Минсвязи), проф. Ф. А. Чирахов (Ленинградский институт сигнализации и связи), кандидат техн. наук Б. С. Диковский (Ивановский энергетический институт), кандидат хим. наук А. Ф. Лунев (Институт физ. химии Академии наук СССР), инж. И. Н. Стрельцов (трест «Мосгазстрой»), инж. В. И. Жуков (НИИ «Стройнефть»), инж. В. В. Лян (Саратовский трамвай) и др.

Для участников совещания были организованы выставки: показ аппаратуры и приборов, изготовленных в лабораториях токов в земле АЗНИИ, а также других институтов, и выставка новейшей литературы по коррозии.

Совещание приняло ряд решений. В частности, была признана необходимой организация при городских коммунах и при министерствах, имеющих подземное хозяйство, специального органа по борьбе с коррозией. Для борьбы блуждающими токами рельсового электротранспорта совещание признало необходимым проведение следующих мероприятий по уменьшению блуждающих токов: усиление сети обратного тока путем доведения количества и сечений отсасывающих фидеров до величин, обеспечивающих соблюдение норм падения напряжений на рельсовых путях; улучшение электропроводимости рельсового пути своевременным устранением лопнувших стыков на трамвайных путях; доведение до норм количества междурельсовых и междупутевых соединителей.

Для обеспечения народного хозяйства кадрами специалистов по борьбе с электрической коррозией подземных сооружений совещание решило просить Министерства высшего образования СССР предусмотреть изучение методов борьбы с электрической коррозией подземных металлических сооружений в программах соответствующих вузов, а также включить в учебные планы курсов повышения квалификации инженерно-технических работников дисциплину «Защита подземных металлических сооружений от электрической коррозии».

В целях дальнейшего успешного изучения явления коррозии подземных металлических сооружений и научной разработки методов их защиты совещание признало необходимым организовать разработку нижеследующих научно-исследовательских тем: улучшение составов защитных покрытий для трубопроводов и исследование водостроения различных изолирующих покрытий в грунте различной коррозионности; улучшение антикоррозионных свойств кабелей; исследование протекторной защиты подземных металлических сооружений; развитие методов определения коррозионности почвы; развитие методов расчета электрической противокоррозионной защиты; рассмотрение правил защиты подземных металлических сооружений от почвенной коррозии и блуждающих токов; совершенствование метода определения мест нарушения изоляции трубопроводов без откапывания последних; развитие теории поля блуждающих токов и методов моделирования поля сложных систем; усовершенствование коррозионных карт и более глубокое исследование распределения блуждающих токов в больших городах и промышленных центрах с разветвленным подземным хозяйством и др.

Совещание признало необходимым ввести во все проекты трубопроводов и кабелей обязательный раздел по защите проектируемого объекта от коррозии, а также установить твердый порядок: *проект подземного металлического сооружения, в котором нет разработанных раздела противокоррозионной защиты, не может быть утвержден.*

Совещание вынесло пожелание увеличить выпуск литературы и информационных материалов по вопросам защиты от электрической коррозии подземных металлических сооружений.

Участники совещания признали необходимым организацию при ВНИТОЭ Комитета по защите подземных металлических сооружений от электрической коррозии.

Зам. председателя АЗНИТОЭ, инж. И. М. ПЕТРОВ
Кандидат техн. наук Н. А. ЦЕКУН



Профессор М. Ф. Поярков

К 60-летию со дня рождения и 30-летию научно-педагогической деятельности

Исполнилось 60 лет со дня рождения и 30 лет научно-педагогической деятельности доктора техн. наук, проф. Михаила Федоровича Пояркова. М. Ф. Поярков родился в ноябре 1889 г. в станице Нижне-Чирокской Сталинградской области. В 1916 г. он закончил электромеханическое отделение Ленинградского политехнического института. Еще будучи студентом, он начал работать одной из лабораторий по токам высокой частоты, занимая должность ведущего мастерской по испытаниям и монтажу радиостанций. В 1918 г. М. Ф. Поярков приступил к работе в высшей технической школе, приняв участие в организации механического факультета Кубанского политехнического института.

В 1921 г. М. Ф. Поярков был избран преподавателем теории переменных токов в Киевском политехническом институте, а в августе того же года профессором Харьковского технологического института.

В 1922 г. М. Ф. Поярков работает в высших учебных заведениях Москвы (Московское высшее техническое училище. Высшие инженерные курсы НКПС и Институт народного хозяйства им. Плеханова). С 1931 до 1941 г. заведывал кафедрой специальной электротехники во Всесоюзной промышленной академии.

С октября 1941 г. М. Ф. Поярков занял должность профессора кафедры производства и распределения электроэнергии Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства им. Молотова, а с 1948 г.



по настоящее время заведует этой кафедрой. Одновременно М. Ф. Поярков руководит кафедрой электротехники и гидроэлектростанций Московского гидромелиоративного института им. Вильямса.

В 1938 г. М. Ф. Поярков утвержден в звании профессора, а в 1942 г. ему присвоена ученая степень доктора технических наук.

М. Ф. Поярковым издано несколько учебников и учебных пособий по электрическому оборудованию станций и подстанций. Наряду с подготовкой инженерных кадров М. Ф. Поярков активно участвует в решении инженерных и технических задач. В 1923—1926 гг. он проводит по заданию Московского общества технического надзора обследования фабрик и заводов; затем работает и проводит консультации в трестах «Котлотурбина», «Коммунально-энергострой», «Водоканалпроект» и др. Под его руководством и при его участии разработаны проекты электрооборудования станций и сетей ряда городов и фабрично-заводских предприятий.

Вопросами сельской электрификации проф. М. Ф. Поярков занимался много лет, активно участвуя в работе Технического совета Министерства сельского хозяйства СССР.

**П. Ф. СКВОРЦОВ, М. Г. ЕВРЕИНОВ
С. А. БУРГУЧЕВ, И. А. БУДЗКО**



Библиография

В. Д. ГОЛОПЕРОВ. РЕМОНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ БОЕВЫХ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН. 384 стр., ц. 11 руб. 50 коп. Военное изд-во, 1948.

Электрическое оборудование современных боевых, вспомогательных и транспортных машин существенно необходимо для их работы. По своему объему ремонт электрооборудования составляет значительную долю в общем объеме ремонта указанных машин.

В литературе, посвященной ремонту оборудования подвижных машин, вопросу ремонта их электрического оборудования уделяется очень мало внимания. Поэтому для специальной книги по ремонту электрического оборудования боевых и вспомогательных машин является своевременным.

Книга В. Д. Голоперова состоит из семи глав, в которых описываются возможные неисправности и повреждения электрооборудования, технология ремонта и вспомогательные устройства и приспособления, необходимые для ремонта всего электрооборудования указанных машин подвижных и небольших стационарных ремонтных мастерских.

В первой главе книги рассматриваются неисправности и технология ремонта свинцовых аккумуляторных батарей. Технология ремонта и испытание отремонтированных аккумуляторных батарей освещается

правильно, а рекомендованные приспособления и вспомогательное оборудование действительно позволят ускорить и улучшить ремонт аккумуляторных батарей.

К сожалению, в приложении к этой главе, посвященном зарядке и испытанию отремонтированных батарей, не упоминается зарядное устройство с сухими выпрямителями и катушкой с подмагничиванием от постоянного тока. Такое устройство гораздо проще и лучше двигатель-генераторной установки; изготовление его может быть осуществлено силами ремонтной мастерской. Приложение, посвященное изготовлению аккумуляторных пластин, можно считать излишним, так как в условиях небольших мастерских изготовление пластин трудно наладить, а необходимая потребность их всегда покрывается нашей промышленностью.

Во второй главе книги дается описание наиболее часто встречающихся повреждений и неисправностей генераторов, стартеров и электродвигателей постоянного тока. Указывается технология их ремонта и испытаний, а также приводится описание необходимого для ремонта вспомогательного оборудования и приспособлений. Технология ремонта правильна; описывае-

мые вспомогательные устройства и приспособления практически ценны. Приведенные в конце главы разрезы и схемы генераторов и стартеров и справочные таблицы весьма полезны.

Рекомендованная автором на стр. 106 (а также на на стр. 335) проверка обмоток на наличие короткозамкнутых витков и путем замера их сопротивления, как известно, является далеко не совершенной, но автор совершенно не упоминает об этом. Безусловно, более совершенным методом является проверка на индукционном аппарате, о чем автор упоминает как о вспомогательном методе.

Глава третья посвящена описанию наиболее вероятных повреждений и неисправностей и технологии ремонта реле-регуляторов. Описываемый в конце главы стенд для испытания генераторов и реле-регуляторов очень полезен для ремонтных мастерских. Приведенные основные технические данные и схемы реле-регуляторов необходимы при ремонте.

В четвертой главе рассматривается ремонт аппаратов зажигания (распределителей, магнето, бобин и свечей). Здесь опять приводятся возможные неисправности, технология ремонта и дается описание вспомогательного оборудования, необходимого при ремонте и испытании. В конце главы приводятся справочные таблицы по аппаратуре зажигания. Следует отметить, что ремонт бобин и трансформаторов магнето кустарными способами нерентабелен, а качество ремонта остается низким и отремонтированные устройства быстро выходят из строя. Рекомендация (стр. 272) залить трансформаторным маслом бобин, пропитанных смесью парафина и канифоли, не может быть признана правильной.

В пятой главе, посвященной ремонту измерительных и контрольных приборов, автор совершенно правильно отмечает, что очень часто ремонт этого ценного оборудования не производится и приборы, могущие быть отремонтированными, сдаются в утиль.

К сожалению, автор не разбирает ремонта приборов с металлом, которые получили широкое распространение в современных машинах. Не освещен ремонт термометров указателей давления масла, спидометров и др.

В шестой главе описывается ремонт вспомогательного электрооборудования (фар, сигналы и др.) и бортовой сети. В конце главы приводятся схемы соединения электрооборудования автомобилей отечественных и некоторых иностранных марок.

Седьмая глава приводит краткие сведения о электротехнических и магнитных материалах. К сожалению, в этой главе сделан ряд грубых ошибок. Ошибается это, очевидно, тем, что автор не является специалистом в области электрических и магнитных материалов, а использованная им литература по этому вопросу была современной и достаточно исчерпывающей.

Так, на стр. 364—365 автор говорит, что провода отличаются от ПЭЛ отсутствием лакового покрытия и верх эмалевого покрытия (1). Далее автор путает обмотку проводов с их обмоткой (стр. 365). Неточное сечение проводов АОЛ, АОЛБ и АСОБ. На стр. 375 фраза: «Микафоллий или микалента представляет собой бумагу, на которую с обеих сторон казен и будь лаком приклеен слой слюды» — определение далеко от истины. Отмеченный на стр. 3 бакелит С не имеет клейкости и не идет ни в лаки (бакелитовым), ни в пластмассы. Лак № 458 (стр. 380) — маслостоек. То же относится и к лаку № 462.

Таким образом, достаточно полно освещая многие просы ремонта электрооборудования, книга не лишена и недостатков. При устранении этих недостатков, книга может служить в качестве полезного практического руководства как для технического и ремонтного состава в мастерских вооруженных сил Советской Армии, так и в ремонтных мастерских МТС и совхозов.

Инж. С. П. ИНОЗЕМЦЕВ



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(Издания 1949 г.)

АМАЛИЦКИЙ М. В., ГИРШГОРН Ш. И., КАЛАНТАРОВ Н. И., ЦУЦКОЙ К. А. РАДИОСВЯЗЬ. Допущено в качестве учебного пособия для техникумов связи. 227 стр., ц. 8 руб. Связьиздат.

*** АРУТЮНОВ В. О. РАСЧЕТ И КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ.** Допущено в качестве учебника для электромеханических техникумов. 524 стр., ц. 19 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

ГАПОНОВ В. И. ЭЛЕКТРОНЫ (Научно-популярная библиотека). 48 стр., ц. 80 коп. Гостехиздат.

*** ЗЕЙТЦ Ф. СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА.** Перевод под ред. Г. С. Жданова. 736 стр., ц. 36 руб. Гостехиздат.

КАМИНСКИЙ М. Л. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА В ШАХТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ. 88 стр., ц. 5 руб. 25 коп. Углетехиздат.

КОМАРОВ Б. С. ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРОВОДНОЙ СВЯЗИ. Допущено в качестве учебника для техникумов связи. 270 стр., ц. 11 руб. 75 коп. Связьиздат.

ЛАТМАНОВСКИЙ Л. В. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВВЕДЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ВОЗБУДИМЫХ ЕДИНИЦ. 158 стр., ц. 15 руб. Ленинградский государственный университет им. Жданова.

МЕЖОБЛАСТНОЕ СИБИРСКОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ВОПРОСАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ. Тезисы докладов. Программа и порядок совещания. (Всесоюзное бюро электрической изоляции и Сибирский физико-технический институт). 33 стр., цена не указана. Томск.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается опубликование рецензий.

В брошюре приведены тезисы докладов А. М. Венгера «Достижения советских ученых в области физики диэлектриков и практической электроизоляции», Н. П. Кронберга «Технологические особенности применения изоляции в асинхронных двигателях мощностью до 100 квт», Н. А. Зотова «Эффективный пропиточный процесс обмотки якорей с полужакрытым лазом (вспыная обмотка)», И. Е. Яриева «Применение стеклянной изоляции на заводе «Сибкабель» изолирования динамомашинной проволоки», Л. З. Реут «Эмаль вода с карбамидной изоляцией», В. А. Самойлова «Новые и изоляции обмоточной (динамомашинной) проволоки», В. А. Прес «Новый метод для определения дефектов в электроизоляции кабелей», Ю. Б. Новодворского «Технология вакуумно-плотной керамики», «Технология спая керамики с металлом», А. К. Потужного «Плотовость лаковых пленок», К. А. Водопьянова «Электрические свойства слюды Сибирского месторождения» и М. С. Меник «Экспериментальный метод измерения диэлектрических потерь в листовых изоляторах». **ОРКИНА Б. Г. ПЕРЕДЕЛКА ФАЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРТКОЗАМКНУТЫЕ (МЭС СССР. ЦНИЭЛ).** 52 стр., ц. 1 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

СЛАВНИКОВ М. И. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ И ПЕРИОДИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. 240 стр., ц. 13 руб. Госэнергоиздат.

СПЕРАНСКИЙ В. Г. ПРОИЗВОДСТВО И СВОЙСТВА ЗЕРНОСТРАЛИ. 188 стр., ц. 8 руб. 50 коп. Металлургиздат.

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. (Центральный научно-исследовательский институт связи). Выпуск I. 179 стр., ц. 10 руб. 30 коп. Связьиздат.

ШИНТЛЬМЕЙСТЕР И. ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАМПА КАК ПРИБОР ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ (Физико-материаловедческая библиотека инженера). Перевод под редакцией и с добавками Е. Я. Пумпер. 344 стр., ц. 18 руб. 85 коп. Гостехиздат.



Слано в набор 7/1 1950 г.

Объем 12 п. л.

T-02008

Формат бумаги 60×92¹/₈

уч.-изд. л. 16,6

Тираж 11 500

Подписано к печати 3/III 1950

тип. зн. в 1 печ. л. 551

3м.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА

на **1950** год

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ ЖУРНАЛЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Орган Академии наук СССР, Министерства электростанций СССР
и Министерства электропромышленности СССР

Основан в 1880 г. Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники.

Журнал широко освещает основные теоретические и практические вопросы, связанные с развитием электротехники и электрификации народного хозяйства СССР.

Основные тематические разделы журнала: современные физические и общетеоретические вопросы электричества и электротехники; электрические системы, станции, сети и передача электроэнергии на дальние расстояния; электропривод и электрификация отраслей промышленности; электрификация транспорта; электрификация сельского хозяйства; электрические машины и трансформаторы; техника высоких напряжений (высоковольтная аппаратура и грозозащита); кабельная техника; ионно-электронные преобразователи; прикладная электроника; автоматика, техника релейной защиты; электросварка и высокочастотная электротермия; светотехника; электрические измерения и приборы; электротехнические материалы; электротехнические стандарты, правила, нормы и терминология.

Журнал «Электричество» уделяет особое внимание вопросам внедрения новой передовой техники в области электрификации народного хозяйства СССР.

Журнал систематически освещает вопросы истории русской электротехники.

Кроме основных научно-технических материалов, в журнале помещаются: Дискуссии; Обзоры и рефераты; Хроника; Критика и библиография.

В журнале принимают участие виднейшие ученые и специалисты — электротехники Советского Союза.

Годовым подписчикам на журнал высылается в качестве приложения специальный Календарь-Справочник на 1950 г.

**ПРИНИМАЕТСЯ
ПОДПИСКА**

Городскими и районными
отделениями Союзпечати

12 номеров в год
(144 печатных листа)

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

12	месяцев	96	руб.
6	"	48	"
3	"	24	"