

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

2

1950

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

2
1950
ФЕВРАЛЬ

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

СОДЕРЖАНИЕ

Л. Р. Нейман и И. А. Зайцев — Опытное исследование поверхностного эффекта в трубчатых стальных шинах	
М. А. Розенблат — Переходные процессы в цепях переменного тока при быстром изменении индуктивности	9
Н. П. Степанов — Однофазные распределительные трансформаторы для сетей с малой плотностью нагрузки	13
Д. И. Марьяновский — Изменение параметров систем регулирования внутренними связями	21
В. П. Бычков — Теория и метод расчета системы генератор—двигатель с электромашиным регулятором	33
А. И. Артемьев — Аналитическое определение характеристик асинхронного преобразователя частоты	40
С. В. Страхов — Простой способ получения выражений векторов электрического и магнитного поля через магнитный и электрический векторы Герца	43
В. А. Шубенко и И. С. Пинчук — Графический метод расчета переходных процессов в асинхронном двигателе	47
М. Г. Резин — Эффект реакции ротора и механические характеристики двигателя с дуговым статором	51
В. А. Ильин — Длинные линии с изменяющимися по длине параметрами	53
Б. Е. Коник — Методика расчета пусковых характеристик явнополюсных синхронных двигателей	60
В. Б. Перетц — Влияние параметров измерительной цепи и формы кривой намагничивания на работу измерительного трансформатора постоянного тока	66
В. С. Кравченко — Открытое электрическое искрение в воспламеняющейся рудничной атмосфере	70
В. В. Каплан и В. М. Нашатырь — Схема электрического сдвига начала прохождения тока	76

ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Е. Я. Гаккель — Тепловозы с электрической передачей	78
А. В. Храмой — К. И. Константинов — пионер электроавтоматики	82

ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	85
-----------------------------------	----

ПИСЬМА И ЗАМЕТКИ	92
------------------	----

ХРОНИКА

Организации ВНИТОЭ в движении за содружество ученых и производителей	90
Научно-техническое совещание по газоочистке	91
Сибирское совещание по электрической изоляции	91
Пленум ВНИТОЭ	92

БИБЛИОГРАФИЯ

Г. И. Атабеков — Книга Г. В. Добровольского „Устанавливающиеся процессы в электрических цепях“	93
Е. Г. Комар — Книга И. А. Сыромятникова „Вопросы эксплуатации синхронных генераторов“	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. Бутневич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Гла-**
зунов, 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

Опытное исследование поверхностного эффекта в трубчатых стальных шинах

Доктор техн. наук, проф. Л. Р. НЕЙМАН и кандидат техн. наук, доц. И. А. ЗАЙЦЕВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Применение стальных труб в качестве токоведущих шин на открытых электрических подстанциях преследует цель экономии дефицитной меди. В таких трубах прорезают обычно продольную щель,

что приводит к уменьшению активного сопротивления труб, так как при этом используется для прохождения тока также слой металла, прилегающий к внутренней поверхности стенок труб. Опытные исследования шин из стальных полос и стержней выполнены А. С. Займовским, Б. А. Садиковым, А. А. Кузнецовым [Л. 2] и А. И. Руцким [Л. 4].

Авторы статьи выполнили исследование по нагреванию переменным током частоты 50 гц стальных труб и определению их электрического активного и внутреннего реактивного сопротивления. Исследование имеет особый интерес, так как в случае трубы с продольной щелью мы как раз имеем случай, когда необходимо принять во внимание дополнительное третье условие применимости простых формул (11) [Л. 3], приведенных в статье Л. Р. Неймана, к проводам со сложной формой сечения. Таким образом, это исследование имеет широкое значение: именно, установив экспериментальным путем ту ширину щели, которая оказывается достаточной для полного использования слоя металла, прилегающего к внутренней поверхности трубы, мы получаем надежный критерий применимости простых методов расчета для других форм сечения проводов и, в частности, для всего нормального сортамента фасонной стали.

Для экспериментального исследования имелись стальные трубы, отличающиеся друг от друга геометри-

Приводится экспериментальное исследование электрических параметров стальных трубчатых шин. Уточняется вопрос о разделении индуктивного сопротивления на внешнее и внутреннее для проводов сложной формы сечения. На основе исследования устанавливается критерий применимости простых методов расчета к стальным проводам со сложной формой сечения.

ческими размерами, состоянием поверхности, физическими характеристиками материала и химическим составом. Три трубы из имевшихся образцов представляли собой шины, установленные

на одной из подстанций.

В дальнейшем изложении каждая труба отмечается своим номером, соответствующим номеру в табл. 1 и 2, в которых приведены характеристики труб. На рис. 1 изображены основные кривые намагничения и петли гистерезиса при $B_m = 1 \text{ вб/м}^2$, полученные на кольцах, отрезанных

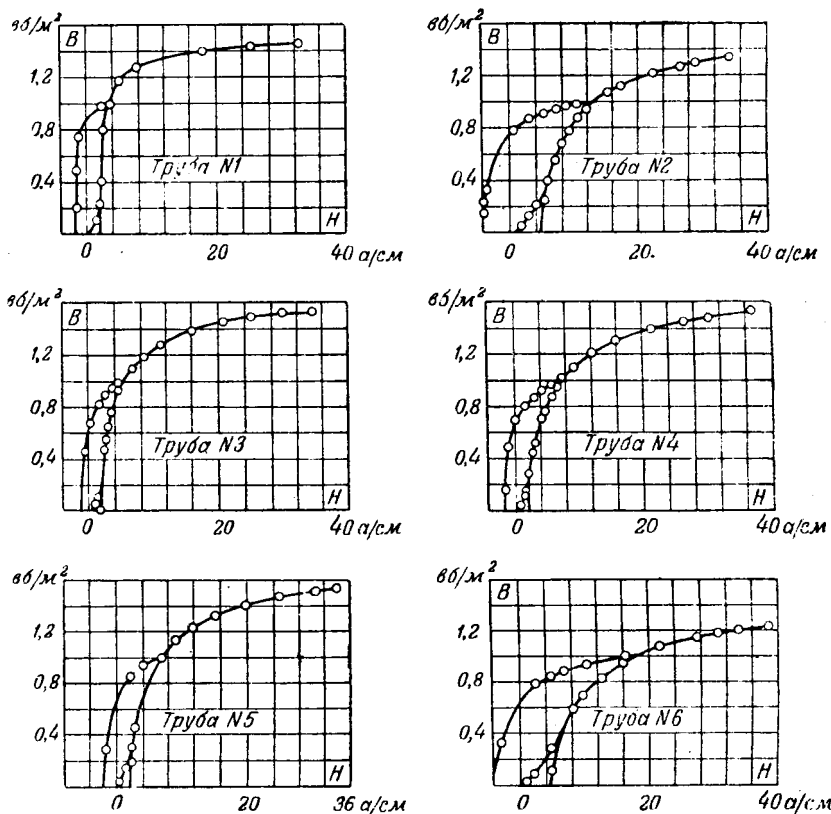


Рис. 1. Магнитные характеристики опытных образцов.

Таблица 1
Размеры и состояние поверхности опытных образцов

№ трубы	Состояние поверхности	Геометрические размеры				
		Наружный диаметр D , мм	Толщина стенок a , мм	Ширина щели b , мм	Сечение S , см ²	Длина трубы l , м
1	Черная, слегка окисленная	114	4	0 3,5 6,5 11,9	13,8 13,66 13,54 13,32	5,88
2	Черная, слегка окисленная	99	4,1	0 3,7	12,2 12,05	5,95
3	Черная	82	5,5	0 2,5	13,22 13,08	4,16
4	Черная, сильно окисленная	76	2,7	0 4,5	6,21 6,09	5,52
5	Черная	48	3,8	0 2 4 8,3	5,26 5,13 5,06 4,9	5,23
6	Оцинкованная	114	6,6	0	22,3	6,16

Таблица 2
Характеристики материала опытных образцов

№ трубы	Физические характеристики материала				Химический состав, %				
	Удельное сопротивление при 20°C $\rho \cdot 10^{-4}$, ом·см	Относительная максимальная магнитная проницаемость μ_{max}	Потери на гистерезис при $B_m = 1,66$ в/м ² P_h , вт/кг	Плотность d , г/см ³	C	Mn	Si	P	S
1	17,8	2420	4,46	7,75	0,08	0,46	Следы	0,020	0,021
2	21,6	660	10,25	7,76	0,35	0,53	0,19	0,018	0,025
3	14,9	2000	3,31	7,81	0,06	0,36	Следы	0,033	0,050
4	13,7	1330	4,62	7,5	0,06	0,40	Следы	0,008	0,025
5	13,1	1480	4,48	7,74	0,05	0,40	Следы	0,079	0,036
6	25,1	570	9,92	7,8	0,27	0,60	0,25	0,044	0,024

от труб до прорезки в них щелей. Все образцы довольно равномерно заполняют диапазон диаметров от 4,8 до 11,4 см и обладают различными физическими характеристиками материала.

Обстановка опыта и метод исследования. Исследование было проведено в закрытом помещении, в большом зале высотой 13 м с площадью пола 12×19 м². Трубы располагались горизонтально на высоте 9 м от пола и на расстоянии 2 м от стены зала и, следовательно, находились в условиях, близких к условиям работы шин на открытых подстанциях при отсутствии ветра и прямого нагрева солнцем.

Так как одновременно ставилась задача определения коэффициента теплоотдачи в указанных условиях охлаждения, то каждый опыт нагрева

велся столь длительный промежуток времени (от 3 до 3,5 час.), пока температура не достигла установившегося значения. Измерения электрического сопротивления производились при установившейся температуре. Ток подводился к трубам при помощи медных полос. Специально произведенный обстоятельный анализ показал, что при длине образцов около 5 м влияние подводящих ток полос и контактов не сказывается на температуре и на распределении тока по сечению в середине трубы. Измерение температуры производилось при помощи термопары, расположенной в середине трубы. Активное и внутреннее реактивное сопротивления определялись по измеренной плотности тока на поверхности трубы. С этой целью к поверхности трубы припаивались для тонкие изолированные проволоочки. Точки припайки лежали на прямой, параллельной оси трубы, т. е. на одной нити тока. Одна из проволоочек прокладывалась вплотную к поверхности трубы до места припайки другой и затем обе проволоочки скручивались между собой и отводились по компенсационной схеме. Электродвижущая сила между концами проволоочек при отсутствии в ней тока равна падению напряжения $\dot{U} = I\rho\delta$ в данной нити тока, так как э. д. с., индуцируемые в нити тока и на проволоочке, пролегающей вдоль поверхности трубы, одинаковы. Здесь обозначено: δ — комплекс плотности тока; ρ — удельное сопротивление; l — длина между точками припайки проволоочек ($l = 20$ см).

Напряжение $\dot{U}$ может быть представлен также в следующем виде:

$$\dot{U} = I\rho\delta = I(r + jx),$$

где I — комплекс действующего значения тока в проводе,
 r — активное и x — внутреннее реактивное сопротивление участка провода длиной

Однако для проводов с фигурным сечением различные нити тока на поверхности проводов охватываются различными потоками. Для правильного определения r и x необходимо найти на поверхности провода такую нить тока, которая не охватывается внутренним магнитным потоком Φ_i . Для этой нити имеем:

$$\frac{\dot{U}}{I} = \frac{l\rho\delta}{I} = r + jx,$$

и следовательно, измеряя указанным методом падение напряжения на этой нити, мы получаем возможность определить r и x .

С целью определить положение этой нити уточним разделение потока на внешний и внутренний для проводов сложной формы сечения например для случая трубы с продольным разрезом.

Помимо магнитных линий, замыкающихся либо целиком вне проводника, либо целиком в теле проводника, появляются магнитные линии частично проходящие по воздуху и частично внутри проводника (рис. 2). Возникает вопрос

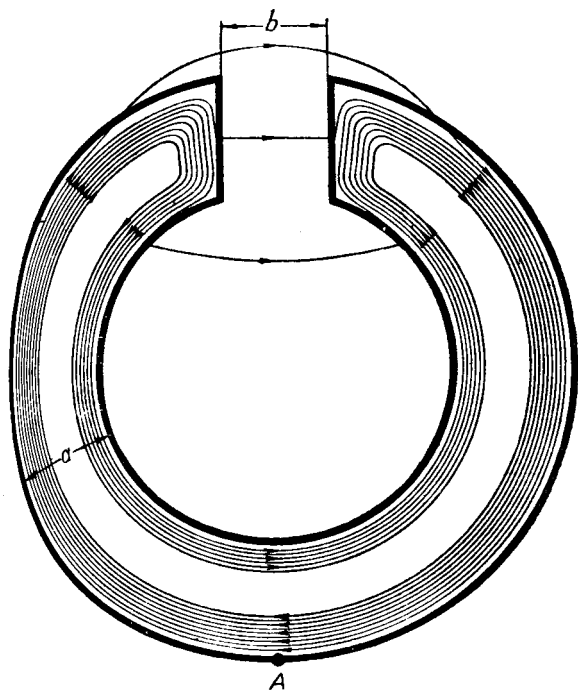


Рис. 2. Картина магнитных линий в случае трубы с продольной щелью.

куда отнести этот последний поток, к потоку внешнему, внутреннему или частично к тому и другому. Чтобы получить правильный ответ, необходимо подойти к вопросу с точки зрения роли того или иного элементарного потока в общем электромагнитном процессе. В этом отношении внутренний поток отличается от внешнего только тем, что его линии сцепляются лишь с частью всего тока в проводе. Как следствие этого при переменном токе благодаря явлению поверхностного эффекта внутренние элементарные потоки не находятся в фазе с общим током и индуктируемые ими э. д. с. сдвинуты по отношению к полному току в проводе на углы, отличные от $\frac{\pi}{2}$. Если исходить из этого признака, то линии потока, частично проходящие через тело проводника, должны быть отнесены к потоку внутреннему. В соответствии с этим будем называть: «внутренними» коэффициент самоиндукции и индуктивное сопротивление, определяемые магнитным потоком, линии которого целиком или частично пронизывают тело проводника; «внешними» коэффициент самоиндукции и индуктивное сопротивление, определяемые магнитным потоком, линии которого охватывают весь провод.

Для трубы с разрезом нить тока, для которой справедлива формула (1), очевидно, проходит через точку А (рис. 2). В общем случае это та нить, в которой плотность тока имеет наибольшую амплитуду.

Для нахождения нужной точки необходимо снять предварительно путем измерений эпюру распределения плотности тока по поверхности провода.

При подстановке в формулу (1) величины δ , измеренной в других точках поверхности про-

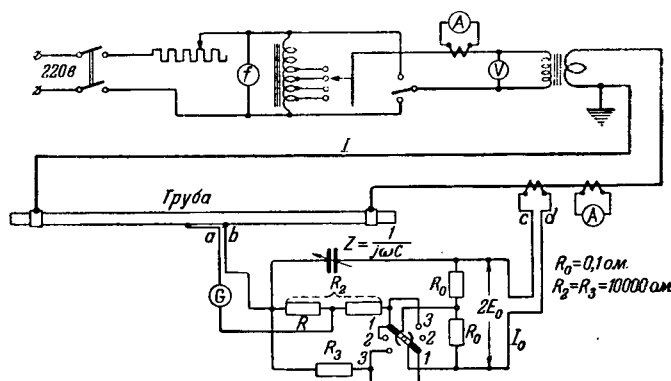


Рис. 3. Схема питания опытного образца и схема компенсатора для измерения э. д. с.

вода, получим ошибку не только в величине x , но и в величине r , так как поток Φ_i не находится в одинаковой фазе с током I .

Измерение э. д. с. на концах припаянных к трубе проволочек производилось при помощи нового комплексного компенсатора, предложенного Л. Р. Нейманом и подробно описанного авторами [Л. 1]. Отличительная особенность этого комплексного компенсатора заключается в том, что он не подвержен влиянию сильных магнитных полей. Общая схема компенсатора, а также схема питания рабочего контура изображены на рис. 3.

Изложенный метод измерения активного и внутреннего реактивного сопротивлений справедлив при синусоидальном изменении тока, что и имело место во время опытов. Хотя напряжение и плотность тока при этом и содержат высшие гармоники, однако при синусоидальном токе достаточно принять во внимание лишь их первые гармоники.

Результаты опытного исследования. Активное сопротивление. Каждая труба подвергалась исследованию первый раз в цельном виде, т. е. без продольной щели (ширина щели $b=0$), и затем повторно после прорезки на фрезерном станке щели вдоль всей трубы ($b \neq 0$). С целью выяснения оптимальной ширины щели трубы № 1 и 5 прорезались последовательно по три раза и для каждой щели производились измерения.

На рис. 4÷9 представлены опытные и расчетные кривые, характеризующие зависимость отношения $\frac{r}{r_0}$ активного сопротивления r к сопро-

тивлению r_0 при постоянном токе от тока I в трубе. Расчет произведен по формулам (11), приведенным в статье Л. Р. Неймана [Л. 3].

На кривых отмечены значения тока, соответствующие превышениям в условиях опыта установившейся температуры трубы над температурой окружающей среды: $\Delta t=30^\circ\text{C}$, $\Delta t=60^\circ\text{C}$ и $\Delta t=80^\circ\text{C}$. Толщина стенок a (рис. 2) всех образцов достаточна, чтобы удовлетворялось условие $a=2z_{0.05}$, при котором применимы формулы, использованные для расчета.

Сопоставление теоретических и опытных кривых свидетельствует, что простая формула

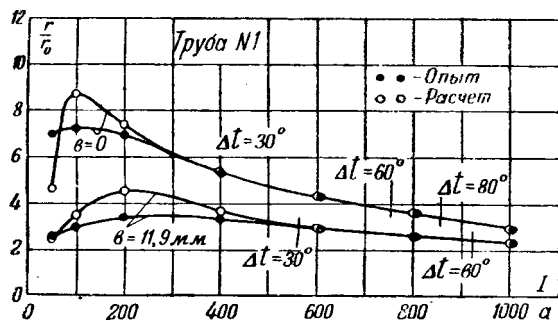


Рис. 4. Отношение активного сопротивления r к сопротивлению r_0 при постоянном токе в зависимости от тока I при различных значениях ширины b продольной щели для образца № 1.

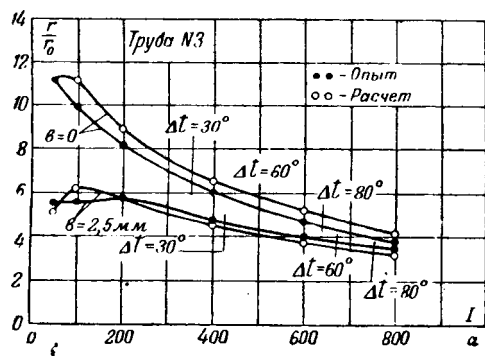


Рис. 6. Отношение r/r_0 в зависимости от I при различных значениях ширины b продольной щели для образца № 3.

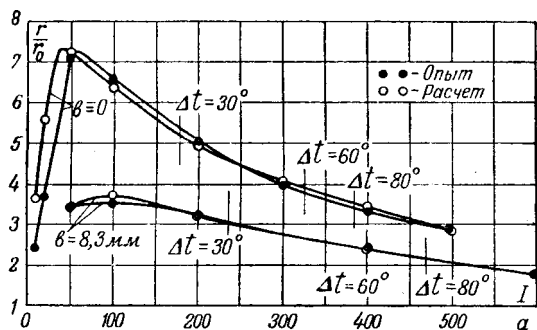


Рис. 8. Отношение r/r_0 в зависимости от I при различных значениях ширины b продольной щели для образца № 5.

для вычисления активного сопротивления, выведенная на основании теоретического анализа явления, дает весьма хорошее совпадение с опытом во всем интервале нормальных значений тока, отвечающим нормальным превышениям температуры провода. В области слабых полей эта формула дает приближенные значения величины r .

Активное сопротивление труб с прорезанной продольной щелью вычислялось по той же формуле, как и для цельных труб, т. е. считалось, что ширина щели достаточна и внутренняя поверхность используется в необходимой мере. Из кривых $\frac{r}{r_0} = f(I)$ при $b \neq 0$ видно, что в трубах

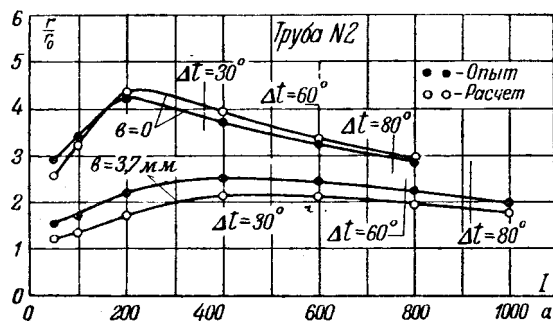


Рис. 5. Отношение r/r_0 в зависимости от I при различных значениях ширины b продольной щели для образца № 2.

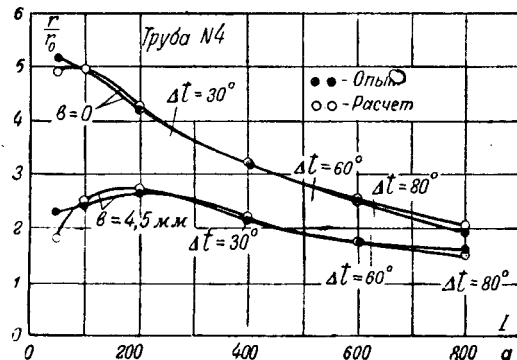


Рис. 7. Отношение r/r_0 в зависимости от I при различных значениях ширины b продольной щели для образца № 4.

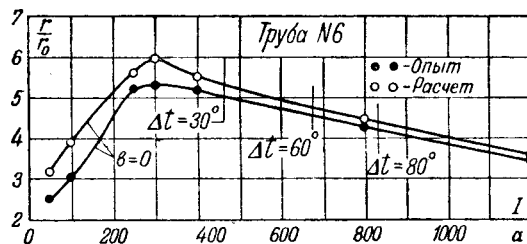


Рис. 9. Отношение r/r_0 в зависимости от I для образца № 6.

№ 1, 4 и 5 были прорезаны щели достаточной ширины и для них расчет прекрасно совпадает с опытом. Ширина щелей в трубах № 2 и 3 была недостаточной, вследствие чего внутренняя поверхность использовалась слабо и измеренное активное сопротивление оказалось больше вычисленного.

Оптимальная ширина продольной щели. Весьма важно установить ту ширину b продольной щели, при которой внутренняя поверхность используется достаточно полно. Достаточной будет такая ширина щели, при которой магнитное сопротивление R_m на пути перехода магнитного потока через щель будет больше магнитного сопротивления $|Z_m|$ на пути магнитного потока по слою металла вдоль внутренней поверхности трубы. Для установления необходимой величины отношения $R_m/|Z_m|$ могут быть использованы приведенные выше эксперимен-

тальные исследования. Для всех пяти труб, в которых были прорезаны щели, было вычислено отношение $R_m/|Z_m|$. Результаты расчета приведены в табл. 3. При этом было взято наибольшее в области сильных полей значение модуля $|Z_m|$, соответствующее наименьшему в этой области значению μ_e , что имеет место при наибольшем, имевшем место в опыте, токе. Величина $|Z_m|$ подсчитывалась по формуле (11), помещенной в статье Л. Р. Неймана [Л. 3], величина R_m рассчитывалась, как сопротивление зазора между полюсами.

Таблица 3

Отношение магнитного сопротивления щели к магнитному сопротивлению пути потока вдоль внутренней поверхности трубы для разных образцов

№ трубы	b , мм	$R_m/ Z_m $
1	11,9	1,79
2	3,7	0,96
3	2,5	0,76
4	4,5	1,65
5	8,3	3,30

Увеличение примерно в два раза периметра u сечения после прорезки щели должно привести при достаточной ширине щели к уменьшению примерно вдвое активного сопротивления трубы. Однако, сравнение сопротивлений до и после прорезки щели необходимо производить при одинаковых значениях магнитной проницаемости μ_e на поверхности труб, т. е. при одинаковых значениях напряженности магнитного поля на поверхности. Последнее имеет место, когда ток в прорезанной трубе в два раза больше тока в цельной трубе. Итак, следует ожидать, что активное сопротивление труб при достаточно широкой щели при токе I будет в два раза меньше сопротивления тех же труб без продольной щели при токе I при условии равенства температур в обоих случаях. Кривые рис. 4, 7 и 8 для труб № 1, 4 и 5 хорошо подтверждают это положение. Небольшие отклонения объясняются различием температур провода в сравниваемых точках. Высказанное положение необходимо было оттенить, так как в литературе [Л. 2] встречается неправильное толкование влияния продольной щели. Сравнение сопротивлений цельной и разрезанной трубы производится при одинаковых токах и тот факт, что при этом отношение сопротивлений оказывается не равным двум, объясняется различием магнитной проницаемости материала внутренней и наружной поверхности вследствие различного наклепа.

Итак, трубы № 1, 4 и 5 имели щели достаточной ширины. Щели у труб № 2 и 3 имели недостаточную ширину. Таким образом, на основании данных табл. 3 можно утверждать, что достаточной является щель, при которой

$$R_m/|Z_m| \geq 1,65.$$

Этот вывод имеет важное общее значение. На основе его можно утверждать, что простые формулы (11) [Л. 3] могут быть использованы для всего нормального сортамента фасонной стали при резком проявлении поверхностно эффекта, т. е. когда соблюдается также второе условие ($a > 2a_{0,05}$). Это условие соблюдается уже при частоте $f = 50$ гц для всего нормального сортамента фасонной стали при нормальных превышениях температуры за исключением только тонких полос из весьма твердой стали.

Чрезмерное увеличение ширины щели нежелательно не только с точки зрения удорожания прорезки или возможности образования при высоком напряжении короны у краев щели, но и потому, что с увеличением ширины щели дальше известного предела активное сопротивление трубы вновь будет возрастать вследствие уменьшения периметра сечения. Таким образом, должна существовать некоторая оптимальная величина b_{opt} .

Для определения b_{opt} был произведен специальный опыт. В трубах № 1 и 5 наибольшего и наименьшего диаметров щель несколько раз уширялась путем последовательной фрезеровки и при каждом значении b измерялось активное сопротивление и превышение Δt установившейся температуры трубы над температурой окружающей среды, пропорциональное в нормализованных условиях охлаждения величине активного сопротивления трубы. Кривые на рис. 10 и 11 изображают зависимость Δt от ширины щели при $I = \text{const}$. Оптимальная ширина щели, соответствующая минимуму активного сопротивления, для трубы № 1 оказалась равной 8 мм и для трубы № 5 — 2 мм.

Отношение магнитных сопротивлений $R_m/|Z_m|$ при этих щелях приведены в табл. 4, причем μ_e определено соответственно наибольшим токам, для которых построены кривые на рис. 10 и 11.

Таким образом, оптимальный зазор определяется условием $R_m/|Z_m| = 1,5$.

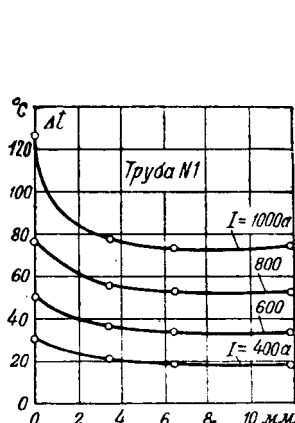


Рис. 10. Превышение Δt установившейся температуры шины над температурой окружающей среды в зависимости от ширины b продольной щели для образца № 1.

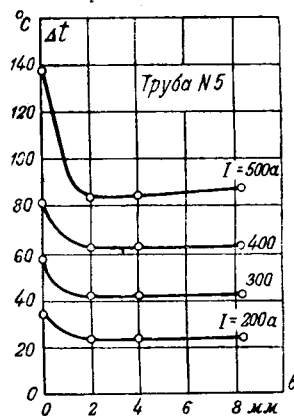


Рис. 11. Превышение Δt установившейся температуры трубы над температурой окружающей среды в зависимости от ширины b продольной щели для образца № 5.

Таблица 4

Отношение магнитного сопротивления щели к магнитному сопротивлению пути потока вдоль внутренней поверхности трубы при оптимальной ширине щели

№ трубы	$b_{opt}, \text{мм}$	$R_m / Z_m $
1	8	1,49
5	2	1,44

Интересно отметить, что, несмотря на столь малую ширину щели, почти половина поглощаемой проводом энергии просачивается через щель и распределяется по внутренней поверхности трубы. Все же плотность тока на внутренней поверхности остается несколько меньшей, чем на наружной поверхности. Рис. 12 иллюстрирует найденное опытным путем распределение плотности тока по поверхности трубы № 1 при $I = 800 \text{ а}$ и $b = 11,9 \text{ мм}$. Расстояние по радиусу от поверхности трубы до пунктирной кривой пропорционально модулю δ плотности тока в соответствующей точке поверхности. Цифры указывают отношение плотности тока в данной точке к средней по всему сечению плотности тока. Векторная диаграмма на рис. 12 дает представление о фазах плотностей тока в различных точках поверхности.

Величина $\text{tg} \varphi$. Внутреннее реактивное сопротивление. Опыт хорошо подтверждает основные теоретические выводы относительно внутреннего реактивного сопротивления и величины $\text{tg} \varphi$ [Л. 3].

Для цельных труб при достаточно сильных полях величина $\text{tg} \varphi$ остается практически неизменной и приблизительно равной $\text{tg} \varphi = 0,6$, что лежит весьма близко к найденному теоретически значению.

Значения $\text{tg} \varphi$ для труб с продольной щелью оказываются большими, чем для цельных труб. Поток, проходящий через щель, сказывается на величине реактивного сопротивления. В итоге реактивное сопротивление в трубе со щелью при токе $2I$ оказывается несколько большим половины реактивного сопротивления цельной трубы при токе I . Однако, для нормального сортамента

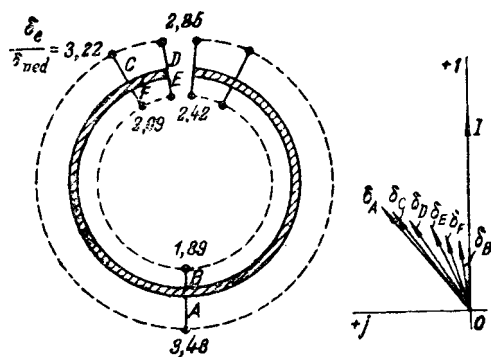


Рис. 12. Распределение плотности тока по поверхности трубы с продольной щелью.

фасонной стали, не содержащего фигур с почти замкнутыми полостями, все же можно принять $\text{tg} \varphi = 0,6$ при достаточно сильных полях на поверхности провода и при резком проявлении поверхностного эффекта.

Выводы. Приведенный анализ большого экспериментального исследования поверхностного эффекта в стальных трубах, хорошо подтверждающий выведенные теоретические формулы для расчета активного и реактивного сопротивлений, должен способствовать рациональному проектированию электротехнических устройств, в которых возможно применение массивных стальных шин.

Исследование показывает, что метод расчета, предложенный одним из авторов статьи [Л. 3], может быть применен при резком проявлении поверхностного эффекта для всего нормального сортамента фасонной стали.

Литература

1. Л. Р. Нейман и И. А. Зайцев. Новый компенсатор переменного тока. Труды Ленинградского индустриального института, № 5, вып. 1, 1939.
2. А. С. Займовский, Б. А. Садиков и А. А. Кузнецов. Железные шины. Труды ВЭИ, Энергониздат, 1934.
3. Л. Р. Нейман. Поверхностный эффект в ферромагнитных проводах и магнитных цепях. Электричество, № 1, 1950.
4. А. И. Рудкий. Железные шины распределительных устройств, Минск, 1947.

[4-5-1949]



Переходные процессы в цепях переменного тока при быстром изменении индуктивности

Кандидат техн. наук М. А. РОЗЕНБЛАТ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

Электрические цепи переменного тока с изменяющейся индуктивностью получают все возрастающее применение. Такие цепи мы имеем, например,

в индуктивных измерителях малых перемещений, в магнитных усилителях, в измерительных трансформаторах постоянного тока, в магнитометрах, основанных на изменении динамической магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника (т. е. проницаемости для переменной составляющей магнитного потока) под влиянием измеряемого поля, и во многих других приборах. Переходные процессы, возникающие в цепи переменного тока при быстром изменении индуктивности в этой цепи, играют существенную роль в работе указанных приборов и в некоторых случаях ограничивают область их применения.

Под быстрым изменением индуктивности следует понимать такое изменение, которое совершается в течение очень малого промежутка времени по сравнению с минимальным значением постоянной времени цепи и периодом переменного тока. Исследование переходных процессов при весьма быстрых изменениях индуктивности представляет значительный интерес еще и потому, что оно часто позволяет оценить переходные процессы при более медленных изменениях индуктивности. Как известно, чем медленнее происходит изменение параметров цепи по сравнению с ее постоянной времени, тем меньше ток переходного режима отличается от установившегося тока [Л. 1]. Если, например, в некоторой цепи окажется возможным пренебрегать переходным процессом при весьма быстрых изменениях индуктивности, то, как правило, при более медленных изменениях индуктивности заведомо можно будет пренебрегать этим процессом.

Цепь переменного тока указанных выше приборов в простейших случаях состоит из последовательно включенных изменяющейся индуктивности L_∂ и постоянной нагрузки $Z_n = R_n + j\omega L_n$ (рис. 1).

При исследовании процессов в цепях с переменными параметрами часто оказывается це-

В статье рассматриваются переходные процессы, возникающие в цепях переменного тока при быстрых изменениях индуктивности. Выясняется влияние отдельных параметров цепи на характер переходного процесса.

лесообразным представить переменный параметр M в виде суммы экспоненциальных функций

$$M = \sum A_n e^{B_n t}.$$

Путем соответствующего выбора постоянных коэффициентов A_n и B_n можно получить почти любой закон изменения M , который представляет практический интерес. В частности, если x — время, а B_n — мнимое число, то получим периодическое изменение M во времени. Сумма двух экспоненциальных функций позволяет довольно точно изобразить аналитически кривую намагничивания ферромагнитных материалов [Л. 4].

Рассматривая схему рис. 1, остановимся на следующем частном случае изменения индуктивности при $t \geq 0$:

$$L_\partial = (L_0 + \Delta L) e^{0t} - \Delta L e^{-kt} = L_0 + \Delta L (1 - e^{-kt}). \quad (1)$$

При $t \leq 0$ $L_\partial = L_0$.

ΔL может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Мы рассмотрим пере-

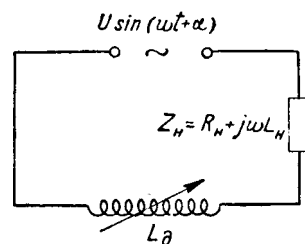


Рис. 1.

ходный процесс для случая весьма быстрых изменений индуктивности L_∂ , при которых $\frac{1}{k}$ весьма малая величина по сравнению с минимальным значением постоянной времени $\frac{L_0 + L_n}{R_n}$ цепи переменного тока. Такое быстрое измене-

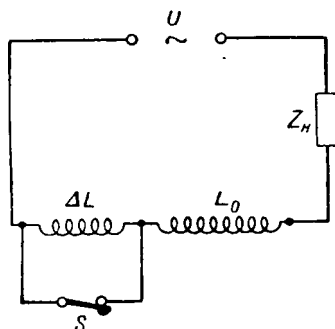


Рис. 2.

ние L_0 имеет место, например, при подключении управляющей цепи дроссельного магнитного усилителя к источнику постоянного тока, через весьма большое омическое сопротивление, а также при размыкании этой цепи.

В пределе, когда $k = \infty$, индуктивность L_0 меняется скачком на величину ΔL . Следует, однако, отметить, что практически невозможно осуществить конечное изменение индуктивности в бесконечно малый промежуток времени и поэтому k всегда является конечной величиной. Это относится и к случаю изменения индуктивности в цепи переменного тока коммутационным способом (например, путем размыкания шунтирующих ΔL в схеме рис. 2 контактов S).

Действительно, вследствие того, что сопротивление между контактами меняется от 0 до ∞ не мгновенно, а в течение конечного промежутка времени, а также вследствие возникающей при размыкании контактов искры, изменение индуктивности цепи происходит в течение конечного, хотя и весьма малого, промежутка времени.

Рассматривая переходные процессы в схеме рис. 1, обозначим старые параметры цепи (при $t \leq 0$) индексом 1, а новые установившиеся параметры (при $t = \infty$) — индексом 2, в частности:

$$L_1 = L_0 + L_n, \quad L_2 = L_0 + L_n + \Delta L,$$

$$Z_1 = \sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_1^2}, \quad Z_2 = \sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_2^2},$$

$$\tau_1 = \frac{L_1}{R_n}, \quad \tau_2 = \frac{L_2}{R_n},$$

$$\varphi_1 = \arctg \omega \tau_1, \quad \varphi_2 = \arctg \omega \tau_2,$$

$$i_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_1), \quad i_2 = \frac{U}{Z_2} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_2).$$

Для рассматриваемой цепи имеем следующее уравнение:

$$R_n i + (L_0 + L_n) \frac{di}{dt} + \frac{dL_0}{dt} i = U \cdot \sin(\omega t + \alpha)$$

или, подставляя выражение (1) для L_0 ,

$$\frac{di}{dt} + \frac{R_n + \Delta L k e^{-kt}}{L_1 + \Delta L (1 - e^{-kt})} i = \frac{U \cdot \sin(\omega t + \alpha)}{L_1 + \Delta L (1 - e^{-kt})}. \quad (2)$$

Как известно, решение дифференциального уравнения вида

$$\frac{di}{dt} + Pi = Q$$

имеет вид:

$$i = e^{-\int P dt} (\int Q e^{\int P dt} dt + C).$$

В нашем случае

$$e^{\int P dt} = e^{\frac{t}{\tau_2}} [L_1 + \Delta L (1 - e^{-kt})]^{\frac{1}{k\tau_2} + 1}$$

и

$$\int Q e^{\int P dt} dt = \int U e^{\frac{t}{\tau_2}} \sin(\omega t + \alpha) \times \\ \times [L_1 + \Delta L (1 - e^{-kt})]^{\frac{1}{k\tau_2}} dt.$$

Так как мы предполагаем, что $\frac{1}{k}$ ничтожно малая величина по сравнению с τ_2 , можно принять:

$$[L_1 + \Delta L (1 - e^{-kt})]^{\frac{1}{k\tau_2}} \approx 1.$$

Тогда

$$\int Q e^{\int P dt} dt = \frac{U e^{\frac{t}{\tau_2}} L_2}{Z_2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_2)$$

и ток:

$$i = -\frac{e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{L_1 + \Delta L (1 - e^{-kt})} \left[\frac{U e^{\frac{t}{\tau_2}} L_2}{Z_2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_2) + C \right]$$

Постоянная интегрирования, определяемая из условия

$$t = 0 \dots i(0) = i_1(0),$$

равна:

$$C = -\frac{U}{\omega} \sin(\alpha - \varphi_1 - \varphi_2) \sin(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Таким образом, ток переходного режима определяется уравнением

$$i = \frac{U \sin(\omega t + \alpha - \varphi_2)}{Z_2} \cdot \frac{L_2}{L_1 + \Delta L (1 - e^{-kt})} - \\ - \frac{U e^{\frac{t}{\tau_2}} \sin(\alpha - \varphi_1 - \varphi_2) \sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{\omega [L_1 + \Delta L (1 - e^{-kt})]}. \quad (3)$$

Как правило, наибольший интерес представляет переходный процесс, имеющий место после завершения изменения индуктивности L_0 . Обычно можно считать, что изменение L_0 практически завершено при $t \geq (3 \div 5) \frac{1}{k}$ (в зависимости от желаемой точности). Для этих значений времени можно принять $e^{-kt} \approx 0$ и тогда (3) переписывается в следующем виде:

$$i = i_2 - \frac{U e^{-\frac{t}{\tau_2}} \sin(\alpha - \varphi_1 - \varphi_2) \sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{\omega L_2}. \quad (4)$$

Первый член правой части (4) представляет собой установившийся ток, а второй — переходный или свободный ток. Как это обычно имеет место в цепях переменного тока, величина переходного тока зависит от фазы напряжения источника питания в моменте ($t=0$) изменения индуктивности L_2 . При $\alpha = \varphi_1 + \varphi_2 + n\pi$, где n — любое целое число, переходный ток равен нулю и ток нагрузки сразу принимает установившееся значение. Переходный ток достигает максимально возможного значения при $\alpha = \varphi_1 + \varphi_2 + (2n+1)\frac{\pi}{2}$.

Из формулы для i находим значение тока в момент времени ($t=0$), непосредственно предшествующий изменению индуктивности:

$$i(0) = \frac{U}{Z_1} \sin(\alpha - \varphi_1).$$

Через весьма небольшой промежуток времени $\delta t = \frac{3 \div 5}{k}$, который в рассматриваемом нами случае настолько мал, что можно принять:

$$\sin(\omega \cdot \delta t + \alpha - \varphi_2) \approx \sin(\alpha - \varphi_2) \quad \text{и} \quad e^{-\frac{\delta t}{\tau_2}} \approx 1$$

(предполагается, что $k \gg \omega$), получим из (4) следующее значение тока

$$i(\delta t) = \frac{U}{Z_2} \sin(\alpha - \varphi_2) - \frac{U \sin(\alpha - \varphi_1 - \varphi_2) \sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{\omega L_2}.$$

После несложных преобразований находим:

$$\frac{i(0)}{i(\delta t)} = \frac{L_2}{L_1}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что при быстром изменении индуктивности в течение времени δt ток также быстро изменяется (в течение того же промежутка времени) на величину

$$\Delta i = i(0) - i(\delta t) = i(0) \frac{L_2 - L_1}{L_2}. \quad (6)$$

Из (5) также вытекает, что

$$\psi(0) = \psi(\delta t), \quad (7)$$

где $\psi(0) = L_1 i(0)$ — полный магнитный поток в цепи при $t=0$, а $\psi(\delta t) = L_2 i(\delta t)$ — полный магнитный поток в момент (δt) завершения изменения индуктивности.

Таким образом, мы приходим к следующему важному выводу: при быстром изменении индуктивности, происходящем в течение весьма малого промежутка времени по сравнению с минимальной постоянной времени цепи и периодом переменного тока, изменение тока таково, что полный магнитный поток цепи ($L i$) остается неизменным. Этот вывод носит общий характер

и не зависит от закона изменения индуктивности.

Изменение тока при быстром изменении индуктивности происходит безинерционно, и если, например, удалось бы завершить изменение индуктивности в течение 1 мксек, то и новое значение тока $i(\delta t)$, определяемое формулой (5), также установится через 1 мксек. Практически можно считать, что переходный процесс, характеризующийся наличием переходного (свободного) тока, начинается после завершения изменения индуктивности. При этом формулу для переходного тока можно получить тем же способом, какой применяется для цепей с постоянной индуктивностью при изменении омического сопротивления цепи или напряжения источника питания. В указанных случаях, как известно, переходный ток определяется формулой

$$i_{\text{пер}} = -[i_1(0) - i_2(0)] e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (8)$$

В рассматриваемом нами случае быстрого изменения индуктивности необходимо писать:

$$i_{\text{пер}} = -[i(\delta t) - i_2(\delta t)] e^{-\frac{t}{\tau_2}}.$$

Практически можно принять $i_2(\delta t) = i_2(0)$. Выражая $i(\delta t)$ через $i_1(0)$, по формуле (5) находим

$$i_{\text{пер}} = -\left[i_1(0) \frac{L_1}{L_2} - i_2(0)\right] e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (9)$$

Нетрудно убедиться в том, что при подстановке значений $i_1(0)$ и $i_2(0)$ в (9), получим второй член в правой части уравнения (4).

Формулы (4) и (9), как и (7), носят общий характер и не зависят от закона изменения индуктивности, лишь бы время изменения индуктивности было очень малой величиной по сравнению с постоянной времени цепи и периодом переменного тока. В частности, эти формулы могут быть использованы для определения изменения тока в схеме рис. 2 при размыкании контактов S .

Следует отметить, что при замыкании контактов S первоначальная цепь превращается в две самостоятельные цепи. В этом случае полный поток каждой новой цепи в момент завершения коммутации будет такой же, как поток соответствующего участка старой цепи в начале коммутации. Переходные токи в обеих цепях будут определяться поэтому формулой (8), в которой подставляются соответствующие каждой цепи значения $i_2(0)$ и τ_2 .

Подчеркнем еще раз, что формулы (4) и (9) характеризуют переходные процессы, имеющие место в цепи переменного тока лишь после завершения изменения индуктивности. Как правило, именно эти процессы и представляют практически интерес ввиду их относительно большой длительности.

Рассмотрим теперь отношение переходного тока к амплитудному значению установивше-

гося тока при наиболее неблагоприятном случае изменения индуктивности ($\alpha = \varphi_1 + \varphi_2 + \frac{\pi}{2}$):

$$\frac{i_{nrex}}{I_2} = - \frac{e^{-\frac{t}{\tau_2}} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \cdot Z_2}{\omega L_2}.$$

Отметим, что

$$\sin(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{R_n^2}{Z_1 Z_2} (\tau_2 - \tau_1) \omega.$$

Поэтому после несложных преобразований имеем:

$$\frac{i_{nrex}}{I_2} = - \frac{e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2}\right)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_1^2}}. \quad (10)$$

Из формулы (10) вытекают следующие важные выводы:

1. Если при изменении индуктивности в цепи переменного тока постоянная времени цепи не меняется, то переходный процесс не будет иметь место, так как в этом случае $i_{nrex} = 0$. В частности, это имеет место при $R_n \approx 0$. При значительных τ_1 и τ_2 практически также оказывается возможным пренебрегать переходным процессом в цепи переменного тока, так как хотя такой процесс действительно имеет место и может продолжаться довольно долго, максимальное значение переходного тока составляет ничтожную часть установившегося тока. Допустим, например, что минимальное значение постоянной времени равно 0,1 сек. Тогда при $f = 50$ гц находим из (10):

$$\left| \frac{i_{nrex}}{I_2} \right| < 0,0318.$$

С повышением минимального значения постоянной времени это отношение уменьшается.

2. Относительная величина переходного тока уменьшается с повышением частоты источника питания. В частности, при $\omega \tau_1 \gg 1$ имеем:

$$\frac{i_{nrex}}{I_2} = - \frac{e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right)}{\omega}.$$

Следует указать, что основные выводы настоящей статьи подтверждаются опытом. Так, например, Кремер [Л. 3] показал, что ток во вторичной цепи трансформатора постоянного тока воспроизводит без искажений и запаздывания все изменения первичного тока, в том числе и скачкообразные. Это объясняется тем, что у трансформаторов постоянного тока постоянная времени цепи переменного тока обычно больше 0,1 сек., вследствие чего можно пренебрегать переходными процессами в этой цепи. Осциллограммы, снятые нами при размыкании управляющей цепи простейших дроссельных, а также более сложных магнитных усилителей, показывают, что при быстром изменении индуктивности ток действительно изменяется скачком и приобретает новое значение, определяемое формулой (5), после чего наступает относительно слабый переходный процесс.

В заключение отметим, что исследование переходных процессов в нерезонансных цепях переменного тока при быстрых изменениях емкости также может быть выполнено рассмотренным выше методом.

Литература

1. Р. Рюденберг. Явления неустановившегося режима в электрических установках. Госэнергоиздат, 1930.
2. Я. З. Цылкин. Электричество, стр. 61—66, № 8, 1946.
3. W. Кгäтег. ETZ, т. 58, стр. 1309, 1937; т. 60, стр. 393, 1939.
4. А. А. Воскресенский, Е. Ф. Воскресенская. Электричество, стр. 62—63, № 4, 1946.

[11. 6. 1948]



Однофазные распределительные трансформаторы для сетей с малой плотностью нагрузки

Кандидат техн. наук Н. П. СТЕПАНОВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Осуществление грандиозной программы электрификации нашей страны требует рациональной системы распределения электроэнергии, надежно и экономичного электрооборудования.

Сельские и пригородные районы, а также коммунальные нужды мелких городов отличаются малой плотностью нагрузки, во многих случаях не превышающей десятка киловатт на километр низковольтной сети, с годовым числом часов использования от 1 500 до 3 500. Применение однофазных сетей в комбинации с трехфазными сетями, которые в нашей литературе известны под названием «смешанной системы», дают наиболее экономичную систему распределения электроэнергии.

При такой системе распределения электроэнергии основные производственные нагрузки питаются от трехфазных распределительных трансформаторов, а мелкие нагрузки — от однофазных распределительных трансформаторов.

Применение однофазных трансформаторов приводит к однофазной системе и в низковольтных сетях. Наиболее приемлемой является однофазная трехпроводная система с напряжением 2×220 в, которая при малых плотностях нагрузки может конкурировать с трехфазной системой $220/380$ в [Л. 1].

При смешанной системе распределения электроэнергии первоначальные затраты на сооружение сетей и подстанций снижаются на 20 ÷ 25 % по сравнению с чисто трехфазной системой распределения электроэнергии.

Если учесть, что в текущей пятилетке только для сооружения высоковольтных и низковольтных сетей сельского назначения потребуется около 170 000 т медных и железных проводов, а применение трехфазно-однофазных сетей в большинстве случаев дает снижение веса проводов примерно вдвое, то становится очевидным преимущество данной системы. Однофазные вы-

Рассматриваются конструкции однофазных трансформаторов с намотанными магнитопроводами из холоднокатаной трансформаторной стали. На основании технико-экономического анализа определяются наиболее экономичная конструкция и целесообразные электромагнитные нагрузки. Дано сравнение основных показателей трансформатора с намотанным магнитопроводом с однофазным и трехфазным трансформаторами той же мощности из обыкновенной трансформаторной стали. Предлагается метод выбора мощности распределительных трансформаторов по длительно допустимой температуре наиболее горячего места обмотки.

соковольтные сети дают возможность осуществить более глубокий ввод высокого напряжения к мелкому потребителю, что приводит к дроблению мощности трансформаторов и увеличению их количества. Поэтому экономический эффект от трехфазно-однофазной системы распределения

электроэнергии в полной мере может быть получен лишь при применении более совершенной конструкции однофазных трансформаторных подстанций с облегченной аппаратурой.

На рис. 1 показана схема однофазной подстанции. С высоковольтной стороны трансформатора устанавливается 2 разрядника от перенапряжений и 2 комбинированных предохранителя-разъединителя.

Для защиты низковольтной стороны трансформатора наиболее целесообразно применение максимально тепловой защиты, состоящей из термического реле, обтекаемого током вторичной обмотки трансформатора, и контактора, находящихся в масле трансформатора.

В заземленных высоковольтных сетях, в которых одним проводом служит земля, отпадает необходимость в одном предохранителе-разъединителе и разряднике (рис. 2). При этом одно-

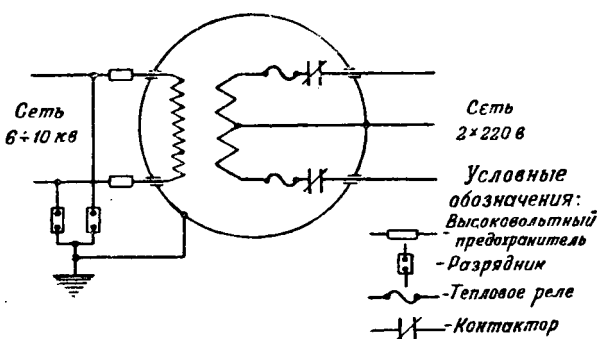


Рис. 1. Схема однофазной распределительной подстанции в высоковольтной сети, изолированной от земли.

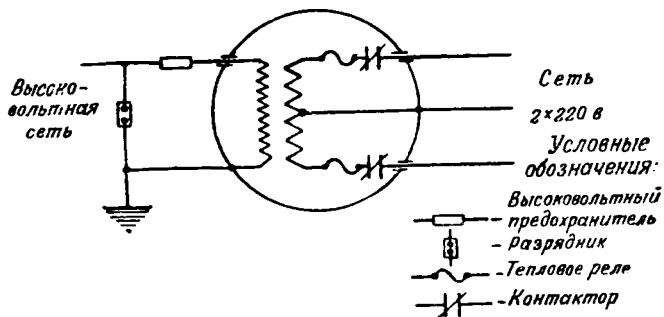


Рис. 2. Схема однофазной распределительной подстанции в заземленной высоковольтной сети.

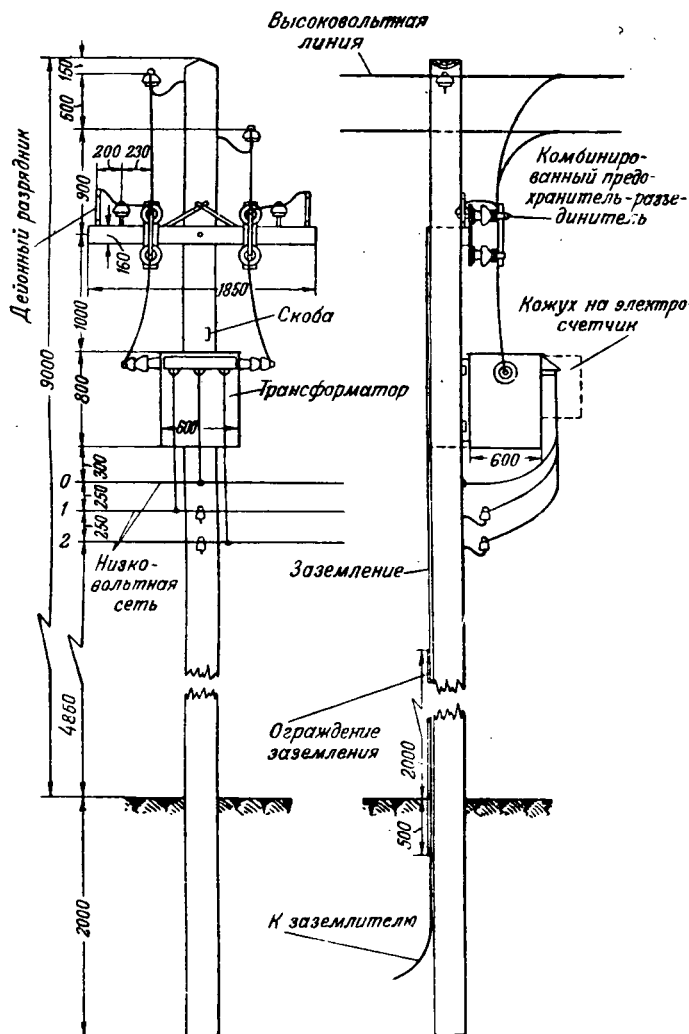


Рис. 3. Подстанция однофазной трансформаторной подстанции в незаземленной высоковольтной сети.

фазный трансформатор может иметь лишь один высоковольтный ввод.

Конструкция однофазной подстанции получается простой, и она размещается на обычном столбе (рис. 3, 4). Электрооборудование однофазной подстанции значительно сокращается по сравнению с трехфазной подстанцией.

Наша электропромышленность до сего времени не приступила к изготовлению однофазных распределительных трансформаторов мощностью 3÷30 кВА и мелких однофазных электродвигателей, что является основным препятствием для широкого распространения однофазных сетей.

Необходимо создать более совершенную и экономичную конструкцию однофазных распределительных трансформаторов, отвечающую особенностям их работы в сетях с малой плотностью нагрузки, и найти пути к их максимальному использованию.

Появление новых сортов холоднокатаной трансформаторной стали с малыми удельными потерями и высокой магнитной проницаемостью ведет к изменению геометрических соотношений трансформаторов и перераспределению в них потерь. Для полного использования свойств холоднокатаной ленточной стали необходимо создать такую конструкцию магнитопровода, при которой магнитный поток всегда будет направлен вдоль прокатки стали, так как в направлении, перпендикулярном прокатке, потери в стали возрастают на 50÷60% и для такого использования эта сталь неэкономична.

На рис. 5 изображена конструкция однофазного трансформатора с намотанным цилиндрическим магнитопроводом броневого типа. Первичная и вторичная обмотки выполнены в виде одной катушки, на длинные стороны которой плотно наматываются два цилиндрических магнитопровода из холоднокатаной ленточной стали. Намотка магнитопровода для такой конструкции производится на специальном станке.

На рис. 6 показан трансформатор броневого типа с намотанным магнитопроводом прямоугольной формы. Магнитопровод собирается из ленточной стали в виде отдельных двухвитковых секций, изготовленных на специальных шаблонах.

Намотанный магнитопровод стержневого типа неудобен в изготовлении и нами не рассматривается.

При технико-экономических расчетах веса меди G_k (в килограммах) для намотанных броневых магнитопроводов цилиндрической формы может быть определен по формуле [Л. 2]:

$$G_k = A f_k d^3 y^2 z \frac{1}{1 - \gamma}, \quad (1)$$

где f_k — коэффициент заполнения меди; d — ширина (диаметр) сердечника в см; y , z , γ — соотношение между геометрическими размерами трансформаторов [Л. 3]; значения (y) определяется с учетом формы поперечного сечения катушек трансформатора; A — коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения катушек: $A = 8,9 \cdot 10^{-3}$ — для квадратного, $A = 12,4 \cdot 10^{-3}$ — для крестообразного и $A = 14 \cdot 10^{-3}$ — для круглого сечения.

Проведенные исследования показали, что вес стали цилиндрических намотанных магнитопроводов может быть определен по известным формулам, служащим для определения веса стали

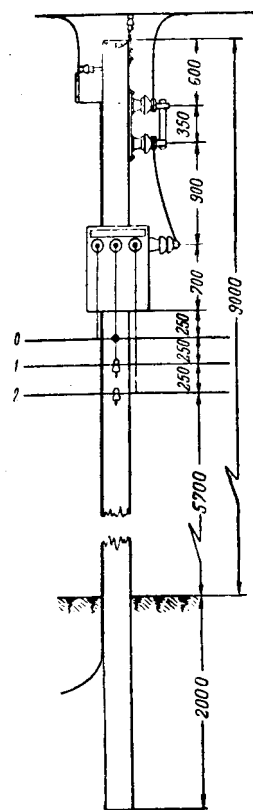


Рис. 4. Конструкция однофазной подстанции в заземленной сети.

ним трансформатором из обыкновенной трансформаторной стали и трехфазным трансформатором той же мощности, изготавливаемым заводом МТЗ.

На основании такого технико-экономического анализа можно определить наиболее экономичную конструкцию трансформатора и установить его целесообразные электромагнитные нагрузки.

В качестве критерия экономичности активной части трансформатора принимаем минимум годовых потерь энергии, дающий максимальный годовой к. п. д. трансформатора [Л. 4].

Для трансформатора с годовым числом часов использования от 1500 до 3500 время эквивалентных потерь энергии T_k , составляет всего лишь от 300 до 1600 час. в год. В расчете принято, что трансформатор непрерывно включен в сеть в течение $T_{np} = 8000$ час. и $T_k = 1600$ час. в год. Эта величина, определяющая экономику трансформатора, положена в основу технико-экономического расчета, представленного в виде кривых на рис. 7 и 8. На этих рисунках даны основные энергетические показатели однофазных и трехфазных трансформаторов мощностью 10 кВА и напряжением 10 кВ.

В расчете приняты удельные потери для обыкновенной трансформаторной стали $P_{уд} = 1,35$ Вт/кг, для холоднокатаной ленточной стали $P_{уд} = 0,75$ Вт/кг; стоимость 1 кг стали в готовом трансформаторе — 2 руб/кг; то же

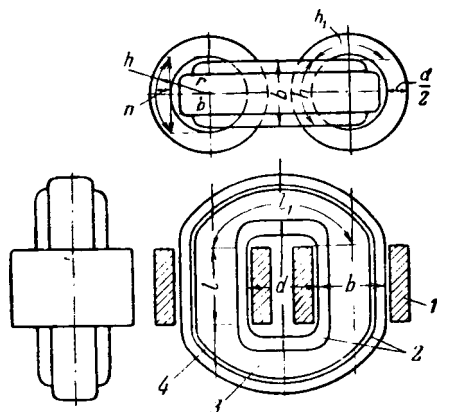


Рис. 5. Намотанный сердечник броневого типа с магнитопроводом цилиндрической формы.

1 — магнитопровод; 2 — низковольтная обмотка; 3 — высоковольтная обмотка; 4 — канал между обмотками.

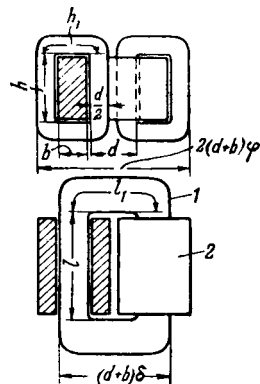


Рис. 6. Намотанный магнитопровод броневого типа.

1 — катушка; 2 — магнитопровод.

прямоугольных магнитопроводов обычной конструкции, несмотря на то, что они геометрически отличаются друг от друга.

Представляет интерес выявить основные энергетические показатели однофазного трансформатора с намотанным магнитопроводом из холоднокатанной стали и произвести сравнение его с однофаз-

1 кг меди — 7 руб/кг; стоимость энергии на подстанции — 25 коп/кВтч.

Основные показатели трансформаторов определены в функции плотности тока, изменяющейся в пределах от 2 до 4 А/мм² для индукции от 11 до 15 кгс (примечание к рис. 7).

Как видно из кривых, с увеличением плотности тока возрастают: потери в стали P_c Вт, потери в меди P_k Вт и общие потери $P_{об}$ Вт; отношение потерь меди к потерям стали α ; активная составляющая короткого замыкания e_r %; годовые потери энергии на единицу установленной мощности $\mathcal{E} \frac{\text{кВтч}}{\text{кВА}}$ и стоимость годовых

потерь энергии C_n руб. С другой стороны, уменьшаются: вес меди G_k кг, вес стали G_c кг; общий вес активных материалов $G_{об}$ кг; ток холостого хода I_0 А; намагничивающая мощность $P_{ж0}$ ВА и стоимость трансформатора C_m руб.

С увеличением индукции все основные показатели трансформатора уменьшаются, за исключением тока холостого хода I_0 и намагничивающей мощности ($P_{ж0}$), которые увеличиваются и ограничивают повышение индукции трансформатора.

Как видно, однофазные трансформаторы из холоднокатаной ленточной стали с плотностью тока $\Delta = 3$ А/мм² и индукцией 15 кгс (на кривых отмечены квадратиком) имеют в среднем на 30–50 % лучшие показатели по сравнению с однофазными трансформаторами из обыкновенной стали.

Общий вес активных материалов, их стоимость и годовые потери энергии однофазного трансформатора из холоднокатаной стали для $\Delta = 3$ А/мм² составляют лишь около 50 % тех же данных выпускаемого ныне МЭП трехфазного трансформатора (данные этого трансформатора МТЗ на рис. 7 и 8 отмечены треугольниками).

Указанные преимущества однофазных трансформаторов с магнитопроводом из холоднока-

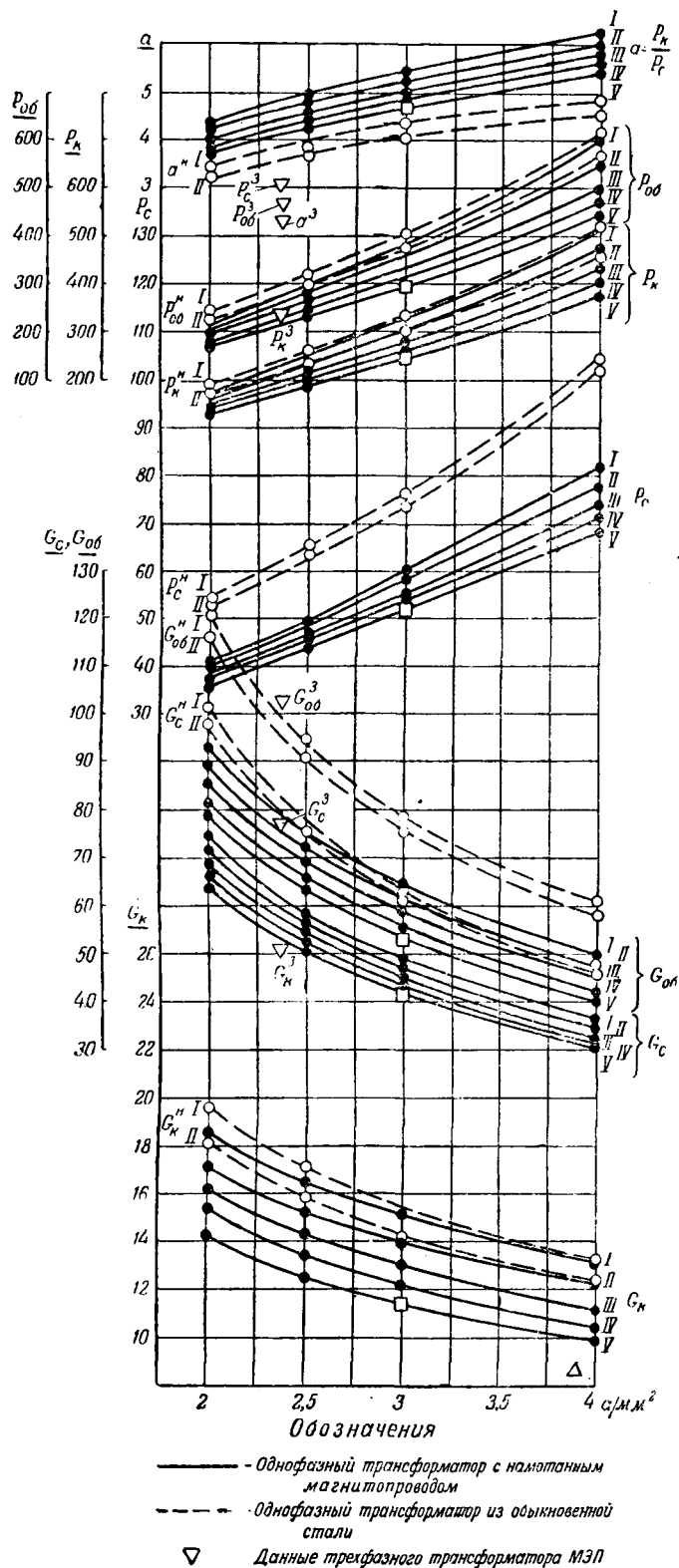


Рис. 7. Основные показатели однофазных и трехфазных трансформаторов мощностью 10 кВА, напряжением 10 кВ.

I — индукция 11 кГс; II — 12 кГс; III — 13 кГс; IV — 14 кГс; V — индукция 15 кГс.

таной стали дают значительный экономический эффект как по уменьшению первоначальных затрат, так и по уменьшению потерь энергии. Применение рекомендуемых однофазных трансформаторов с $\Delta = 3 \text{ а/мм}^2$ по сравнению

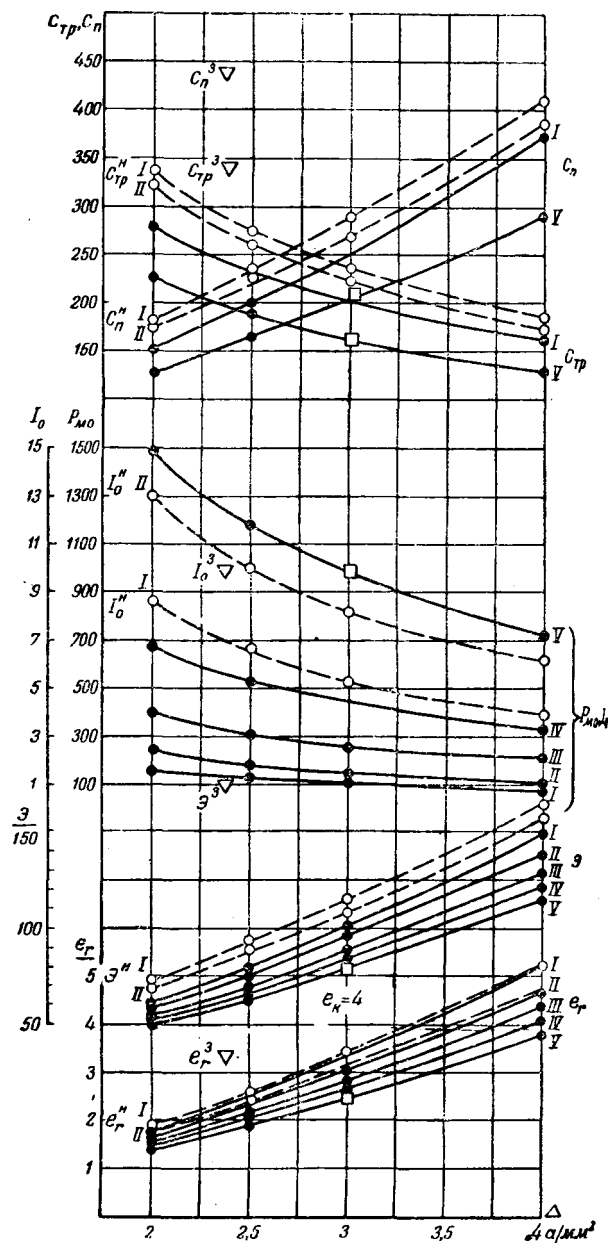


Рис. 8. Основные показатели однофазных и трехфазных трансформаторов мощностью 10 кВА, напряжением 10 кВ.

с трехфазными трансформаторами той же мощности на каждый миллион киловольтампер даст следующий экономический эффект:

Экономия меди — 1 550 т, или 57,5% от общего расхода меди для трехфазных трансформаторов.

Экономия стали — 3 400 т (44,5%).

Общее удешевление активных материалов — 17,6 млн. руб. (52%).

Уменьшение годовых потерь энергии — 95 млн. кВтч (54%).

Уменьшение стоимости годовых потерь (при стоимости энергии 25 коп/кВтч) — 24 млн. руб (54%).

Уменьшение потерь энергии за 15-летний срок службы трансформатора — 1 400 млн. кВтч

Уменьшение стоимости потерь за тот же период — 360 млн. руб.

Напряжение короткого замыкания однофазного трансформатора примерно на 40% ниже обычно принятого значения, что повышает качество электроэнергии однофазных сетей. Кроме того, экономия на потерях электроэнергии только в однофазных распределительных трансформаторах освобождает дополнительную мощность электростанций порядка 25 000 кВт; то же имеет место в повысительных трансформаторах, сетях и т. д.

Более экономичная конструкция распределительных трансформаторов получается при меньшей плотности тока в его обмотках. Например, если уменьшить плотность тока с 3 до 2 а/мм², то удорожание активных материалов на 6,6 млн. руб. полностью окупится к концу первого года эксплуатации трансформаторов, а дополнительная экономия на потерях энергии за 15-летний срок службы трансформаторов превысит 100 млн. руб.

Более интенсивное использование активных материалов ($\Delta > 3$ а/мм²) неэкономично. Например, экономия на стоимости активных материалов однофазного трансформатора 10 кВА при $\Delta = 4$ а/мм² несколько меньше 100 руб. по сравнению с вариантом $\Delta = 2$ а/мм², а стоимость дополнительных потерь энергии за 15-летний срок службы трансформатора увеличивается почти в 25 раз по сравнению с экономией на активных материалах.

Плотность тока порядка 3 а/мм² может быть допустима лишь на первое время, и в дальнейшем следует стремиться к уменьшению ее до 2 а/мм².

Приведенные технико-экономические показатели однофазного трансформатора с намотанным броневым магнитопроводом прямоугольной формы являются средними ориентировочными величинами, поскольку окончательные параметры трансформатора могут быть определены по выполнении его конструкции.

Следует иметь в виду, что при переходе на трехфазно-однофазную систему распределения электроэнергии трехфазный трансформатор заменяется 1 или 2 однофазными трансформаторами меньшей мощности. В среднем можно принять, что мощность однофазного трансформатора будет в два раза меньше по сравнению с трехфазным трансформатором. Не представляет труда показать, что и в этом случае преимущества также остаются на стороне однофазных трансформаторов. Действительно, из законов соразмерности для экономического проектирования трансформаторов следует, что увеличение веса активной части трансформатора на единицу мощности при уменьшении его мощности вдвое составляет:

$$\frac{1}{\sqrt[3]{0,5}} = 1,19, \text{ или } 19\%.$$

На такую же величину изменится процент потерь энергии (при полной нагрузке и $\cos \varphi = 1$).

Электричество, № 2.

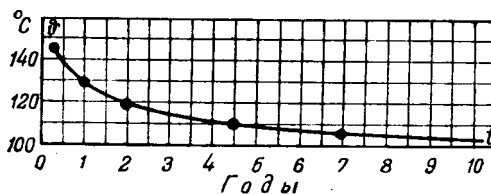


Рис. 9.

Следовательно, приведенные выше данные экономического эффекта от применения однофазных трансформаторов несколько изменятся.

Например, при переходе от трехфазного трансформатора МЭП к рекомендуемому однофазному трансформатору с намотанным магнитопроводом той же мощности экономия на общем весе активных материалов составит 47,7%.

Для варианта наиболее выгодной однофазной сети в случае применения двух однофазных трансформаторов, каждый из которых имеет мощность в два раза меньшую по сравнению с трехфазным трансформатором, экономия на общем весе активных материалов составит 38%. В этом случае экономия уменьшается примерно на 10% по сравнению с предыдущим вариантом и т. д. Следует также отметить, что если мы сравним трехфазный и однофазный трансформаторы, изготовленные из одних и тех же материалов, при одинаковой мощности и к. п. д., то оказывается, что стоимость активных материалов однофазного трансформатора дешевле трехфазного примерно на 18–20%. Нашей металлургической промышленности необходимо помимо изготавливаемой холоднокатаной листовой трансформаторной стали начать производство холоднокатаной ленточной стали, крайне необходимой для экономичных однофазных трансформаторов.

Вторым, не менее важным, вопросом является правильное максимальное использование распределительных трансформаторов.

Выбор мощности распределительного трансформатора должен производиться с учетом условий его эксплуатации.

Срок службы распределительных трансформаторов, выбранных по пику наиболее тяжелого графика нагрузки, достигает 50–60 лет, в то время как моральный срок их службы не превышает 15–20 лет. Очевидно, необходимо более рационально использовать трансформаторы за счет их перегрузочной способности, допуская предельно-возможную температуру их обмоток.

На рис. 9 дана зависимость между непрерывно действующей температурой и временем, в течение которого изоляция полностью изнашивается.

Аналитическая зависимость срока службы изоляции t от температуры θ имеет вид:

$$t = 71\,500 e^{-0,088\theta}, \quad (2)$$

где e — основание натуральных логарифмов. В данном случае мы считаем целесообразным установить длительно допустимую температуру наиболее горячего места обмотки распределительных трансформаторов $\theta_k = 110^\circ \text{C}$.

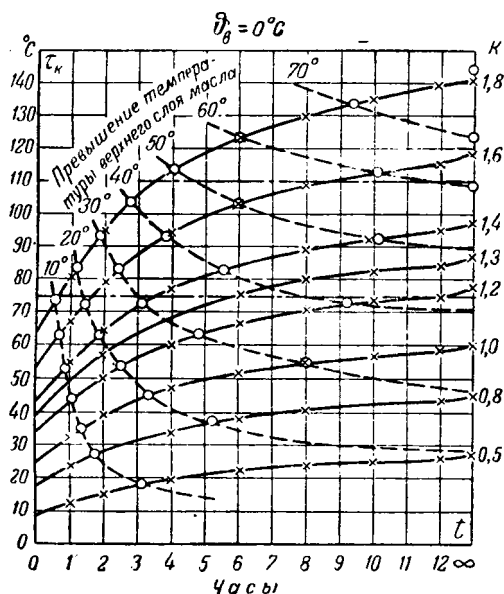


Рис. 10. Кривые превышения наиболее горячего места обмотки и верхнего слоя масла над температурой окружающего воздуха для трансформатора 10 кВа при различных нагрузках.

$$\left(\tau_k^{\text{н}} = 25^\circ \text{C}, \tau_{\text{мн}}^{\text{в}} = 35^\circ \text{C}, \right.$$

$$\left. a = \frac{P_k}{P_c} = 3; T_m = 4_{\text{час}} \right)$$

Как известно, ГОСТ 401-41 устанавливает среднее превышение температуры обмотки в 70°C над окружающей температурой воздуха, меняющейся в пределах $\pm 35^\circ \text{C}$. Таким образом, средняя температура обмотки по ГОСТ меняется в пределах от $+35^\circ \text{C}$ до $+105^\circ \text{C}$, а номинальная рабочая температура обмотки равна 75°C .

По кривой рис. 9 при непрерывно действующей температуре $\theta = 110^\circ \text{C}$ срок службы изоляции составляет 4,5 года.

Для наихудшего с термической точки зрения графика нагрузки трансформатора можно считать, что трансформатор с температурой 110°C работает 3500 час. в году, а остальное время нагрузки не несет.

В этом случае срок службы трансформатора возрастет до $\frac{4,5}{3500:8500} = 11$ лет.

В действительности такого тяжелого графика нагрузки никогда не бывает. Кроме того, принятая температура окружающего воздуха $\theta_b = +35^\circ$ не может держаться 3500 час. в году, так как рассматриваемые трансформаторы устанавливаются на открытом воздухе. Поэтому в действительных условиях эксплуатации распределительных трансформаторов срок их службы будет около 15–20 лет, что является нормальным.

Для практических расчетов выбора мощности распределительных трансформаторов необходим простой метод, не требующий вычислений, особенно сложных при неравномерных графиках нагрузки, и легко запоминающийся. Только в этом случае перегрузка трансформатора займет свое место как совершенно необходимое рациональное

мероприятие и не будет рассматриваться как нежелательное явление.

Для распределительных трансформаторов небольшой мощности целесообразно установить "термическую" мощность, соответствующую температуре наиболее горячего места обмотки трансформатора $\theta_k = 110^\circ \text{C}$ при $\theta_b = 35^\circ \text{C}$.

На рис. 10 приведены кривые превышения температуры обмоток и масла трехфазного трансформатора 10 кВа для различных кратностей нагрузки.

Превышение $\tau_{\text{м}}^{\text{в}}$ температуры верхнего слоя масла над окружающим воздухом изменяется по экспоненциальному закону

$$\tau_{\text{м}}^{\text{в}} = \tau_{\text{мн}}^{\text{в}} \left(\frac{1 + ak^2}{1 + a} \right)^{0,8}, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{мн}}^{\text{в}}$ — превышение температуры верхнего слоя масла над окружающим воздухом при номинальной нагрузке;

$a = \frac{P_k}{P_c}$ — отношение потерь в меди к потерям стали трансформатора;

$k = \frac{P}{P_{\text{ном}}}$ — кратность нагрузки трансформатора (от номинальной).

Перегрев горячего места обмотки над верхним слоем масла

$$\tau_k^{\text{н}} = \tau_{\text{кн}}^{\text{н}} k^{1,5}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{кн}}^{\text{н}}$ — градиент горячего места обмотки над верхним слоем масла при номинальной нагрузке трансформатора. Постоянная времени нагревания трансформатора $T = 4$ час. Данные трансформатора 10 кВа указаны на рис. 10. Для простоты расчетов принято, что для данной нагрузки перегрев $\tau_k^{\text{н}}$ сразу же при включении трансформатора достигает своего установившегося значения.

Превышение температуры наиболее горячего места обмотки над окружающим воздухом (сплошные линии на рис. 10) складывается из превышения температуры верхнего слоя масла над окружающим воздухом $\tau_{\text{м}}^{\text{в}}$ и постоянной величины перегрева горячего места обмотки над верхним слоем масла $\tau_k^{\text{н}}$. Через каждые 10° пунктиром нанесены кривые равных превышений температуры верхнего слоя масла над окружающим воздухом $\tau_{\text{м}}^{\text{в}}$.

Таким образом, каждой точке на кривой перегрева меди соответствует определенная температура масла; поэтому отпадает необходимость в построении кривых нагрева верхнего слоя масла трансформатора. Температура масла обмотки практически возрастает в течение времени 3Т.

Из кривых следует, что превышение температуры горячего места обмотки $\tau_k = 75^\circ \text{C}$ (при $\theta_b = +35^\circ \text{C}$ это соответствует $\theta_k = 110^\circ \text{C}$)

жет быть достигнута при длительной перегрузке трансформатора примерно на 20% от номинальной мощности. Следовательно, термическая мощность трансформатора 10 кВа равна $1,2P_n$, т. е. $P_n = 12$ кВа. Трансформатор получает маркировку 10/12 кВа. Для трансформатора мощностью 5 кВа термическая мощность равна $1,4P_n$, чему соответствует маркировка 5/7 кВа. Попутно отметим, что для автоб. окировочных трансформаторов ОМ 1,2/6 мощностью 1,2 кВа нами в 1940 г. была определена „термическая“ мощность в $1,67P_n$ или маркировка 1,2/2 кВа, что и было принято в практике сельскохозяйственных сетей.

Для кратковременных перегрузок в силу тепловой инерции трансформатора допускаются перегрузки сверх их термической мощности в продолжение времени, необходимого для достижения температуры обмотки 110°C .

Длительность кратковременной перегрузки зависит от предшествующей нагрузки.

На рис. 11 дана кратность перегрузки для случая, когда трансформатор до перегрузки несет 50% нагрузку от пиковой нагрузки суточного графика $P_{пр} = 0,5P_{пик}$ и когда он был не нагружен — $P_{пр} = 0$.

Кроме того, при понижении температуры окружающего воздуха от $+35^\circ\text{C}$ до 0°C на каждый градус, допускается увеличение нагрузки на 1%, т. е. применяется „однопроцентное“ правило. Для $\vartheta_a = 0^\circ\text{C}$ допускается 35%-ная перегрузка трансформатора от его термической мощности. Соответствующие кривые на рис. 11 нанесены пунктиром.

Кратность перегрузки трансформатора в функции от длительности пиковой нагрузки имеет простую зависимость и легко запоминается.

Длительность перегрузки, час.	Допустимая кратность перегрузки при $\vartheta_a = 35^\circ\text{C}$	
	$P_{пр} = 0$	$P_{пр} = 0,5P_{пик}$
1	1,5	1,3
2	1,35	1,2
4	1,2	1,1
6	1,1	1,05

В зимнее время года нагрузка трансформаторов может достигать $(1,6 \div 1,8) P_m$. При этом следует иметь в виду, что электрические характеристики трансформаторов изменятся.

Применение указанных правил не может рассматриваться как предельное термическое использование трансформаторов, а дает весьма умеренное и целесообразное использование.

Действительная температура обмотки ϑ_k будет ниже расчетной величины, поскольку в температурном режиме трансформатора участвует лишь около 80% максимального значения температуры окружающего воздуха.

Например, при $\vartheta_a = 35^\circ\text{C}$ температура обмоток трансформатора будет 103°C вместо 110°C по расчету.

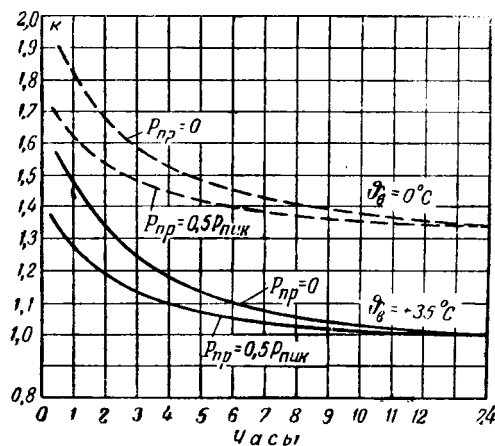


Рис. 11. Допустимые периодические перегрузки распределительных трансформаторов.

Влияние ветра на трансформаторы, установленные на открытом воздухе, может дать значительное снижение их температуры.

Проведенные нами эксперименты над трансформатором мощностью 10 кВа, установленным на открытом воздухе, показали, что при умеренном ветре в 4 балла (скорость $6 \div 6,5$ м/сек) превышение температуры верхнего слоя масла над воздухом $\tau_k^a = 11^\circ\text{C}$ при средней нагрузке 11,5 кВт, длившейся 15 час. (при отсутствии ветра $\tau_k^a = 33^\circ\text{C}$). Превышение температуры меди было $\tau_k = 40^\circ\text{C}$ вместо $\tau_k = 60^\circ\text{C}$ в случае отсутствия ветра.

Выбор мощности распределительного трансформатора сводится к следующему:

1. Для наиболее тяжелого суточного графика нагрузки определяется эквивалентная (среднеквадратичная) нагрузка, предшествующая пиковой нагрузке:

$$P_{эkv} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (5)$$

где $P_1, P_2, \dots, P_n$ — различные величины ступеней нагрузки (в %, кВа);
 $t_1, t_2, \dots, t_n$ — соответственно длительность этих нагрузок в часах. При этом график нагрузки следует упростить, представив его в виде нескольких ступеней нагрузки.

2. По таблице (кривые рис. 11) в зависимости от длительности пиковой нагрузки и предшествующей эквивалентной нагрузки определяется допустимая перегрузка трансформатора при температуре окружающего воздуха $\vartheta_a = +35^\circ\text{C}$.

3. По „однопроцентному“ правилу учитывается поправка на температуру окружающего воздуха.

4. Устанавливается термическая мощность трансформатора, по которой определяется его номинальная мощность.

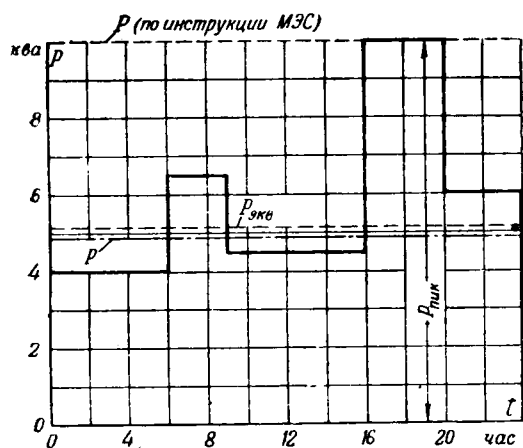


Рис. 12. Суточный зимний график нагрузки.

Пример. Выбрать мощность трансформатора для зимнего суточного графика нагрузки, представленного на рис. 12. Температура окружающего воздуха $t_{\text{в}} = -5^{\circ}\text{C}$.

1. Эквивалентная нагрузка, предшествующая пиковой нагрузке:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{6^2 \cdot 4 + 4^2 \cdot 6 + 6,5^2 \cdot 3 + 4,5^2 \cdot 7}{4 + 6 + 3 + 7}} = 5,2 \text{ кВа, или } 0,52 P_{\text{пик}}.$$

2. Допустимая нагрузка трансформатора для пиковой нагрузки длительностью 4 часа и предшествующей нагрузке $0,5 P_{\text{пик}}$ составляет $1,1 P_{\text{т}}$.

3. По „однопроцентному“ правилу для температуры окружающего воздуха ниже 0°C нагрузка трансформатора составляет $1,35 P_{\text{т}}$.

4. Допустимая нагрузка трансформатора

$$1,1 \cdot 1,35 P_{\text{т}} = 1,48 P_{\text{т}}$$

что для трансформатора 5 кВа составляет:

$$1,48 \cdot 1,4 \cdot 5 = 2,07 \cdot 5 = 10,4 \text{ кВа.}$$

Следовательно, с термической точки зрения для данного графика нагрузки может быть использован трансформатор мощностью 5 кВа, т. е. мощность трансформатора составляет лишь $0,48 P_{\text{пик}}$.

Для сравнения укажем, что допустимая перегрузка трансформатора по трех- и однопроцентному правилу принятому инструкцией по эксплуатации силовых трансформаторов МЭС (1946 г.), не должна превышать 3%. Для рассматриваемого случая трансформатор 5 кВа может быть нагружен не более чем на $1,3 \cdot 5 = 6,5 \text{ кВа}$. Следовательно, по указанной инструкции необходимо применить трансформатор мощностью 10 кВа, который с термической точки зрения будет значительно недоиспользован.

В нашем случае при перегрузках трансформатора температура горячего места обмотки не превышает 110°C (применяется максимально тепловая защита, которой посвящена специальная статья), в то время как по другим методам выбора мощности она может достигать 120 и 130°C .

В более холодное время года, когда, как правило, место более тяжелый график нагрузки, эксплуатация по температуре наиболее горячего места обмотки допускает перегрузки значительно большие, чем по другим методам. Такая эксплуатация распределительных трансформаторов более полно соответствует их условиям работы в сетях с малой плотностью смешанной нагрузки и установленная мощность трансформаторов может быть значительно уменьшена.

Таким образом, если вместо обычной трансформаторной стали применить холоднокатаную сталь, то при том же расходе активных материалов, необходимых для изготовления трехфазных трансформаторов МТЗ общей мощностью 1 млн. кВа, можно изготовить однофазные трансформаторы общей мощностью до $1,5 \div 1,6$ млн. кВа. Если при этом учесть использование перегрузочной способности трансформаторов, то они могут обеспечить нагрузку $2 \div 2,5$ млн. кВа. Это дает возможность намного переполнить пятилетний план электрификации сельского, городского и коммунального хозяйства нашей страны дополнительного расхода материалов на распределительные сети и трансформаторы.

Литература

1. А. Г. Захарин, И. А. Будзко. Смешанная система распределения электроэнергии в сельских районах. Электричество, № 1, 1939.
2. Н. П. Степанов. Проблема использования однофазных трансформаторов в сетях с малой плотностью нагрузки. Диссертация, ВЭИ, 1947.
3. Г. Н. Петров. Распределение потерь и стоимости в активном материале трансформатора. Вестник ретической и экспериментальной электротехники, т. № 11, 1928.
4. Г. Н. Петров. Геометрия трансформатора: эскиз с проблемой электроматериалов. Электрические машины минимального веса. Изд-во Академии наук СССР, 1940.

Изменение параметров систем регулирования внутренними связями

Кандидат техн. наук Д. И. МАРЬЯНОВСКИЙ

Москва

Для получения необходимых динамических характеристик процесса регулирования, в частности для автоматической форсировки, для устранения и ограничения переколебаний и увеличения устойчивости, а также для повышения коэффициента усиления системы и для устранения влияния внешних условий и случайных причин на стабильность ее параметров, в систему регулирования вводятся так называемые внутренние связи.

Сущность введения внутренних связей состоит в том, что функция выхода одного из звеньев системы регулирования, кроме того, что подается на вход последующего звена, после соответствующего преобразования, подается также на вход этого или некоторого другого звена, охватывая, таким образом, часть системы регулирования. Поскольку система регулирования представляет собой замкнутую последовательность звеньев, то принимается охваченной внутренней связью та часть системы, которая не содержит точки присоединения входа системы к ее выходу, т. е. места, где измерительный элемент присоединяется к регулируемому объекту. Направление, в котором передается действие внутренней связи, противоположно направлению распространения возмущения в части системы регулирования, охваченной ею.

Внутренние связи могут быть гибкие и жесткие. При введении жесткой связи подается величина, пропорциональная выходу какого-либо звена, а при введении простой гибкой связи—величина, пропорциональная его производной первого или более высокого порядка. В общем случае введения гибкой связи функция на выходе звена преобразуется по более сложному закону, однако так, что устройство, осуществляющее внутреннюю связь, не пропускает постоянной составляющей.

Внутренние связи появляются либо при искусственном введении их, либо в результате внутренних влияний друг на друга разных частей си-

стемы регулирования и выясняется влияние такого изменения на устойчивость. Показывается, что если кроме жестких ограничиться рассмотрением таких гибких связей, которые осуществляют введение в систему неискаженной величины производной, то предельный коэффициент усиления системы можно выразить как функцию одного параметра. Исследование этой функции дает возможность судить о целесообразности введения внутренних связей. Настоящая статья является продолжением статьи автора «Устойчивость линейных систем автоматического регулирования» (Электричество, № 9, 1946).

стемы регулирования из-за особенностей ее конструкции.

Внутренними связями можно превращать звенья одного вида в звенья другого вида [Л. 1], вводить новые звенья, повышая при этом порядок дифференциального уравнения системы, и, наконец, менять параметры

звеньев, не увеличивая число звеньев и не нарушая структуру системы.

В настоящей статье выясняется влияние, которое оказывает на устойчивость системы введение внутренних связей, не меняющих ее структуру. Как будет показано ниже, введение в систему регулирования, величин, пропорциональных функции выхода какого-либо звена или ее производным, эквивалентно изменению параметров некоторых звеньев системы. Поэтому исследование влияния таких связей может быть заменено исследованием влияния соответствующих параметров на величину предельного коэффициента усиления системы, а следовательно, на ее устойчивость.

Простые гибкие связи. Получить жесткую связь обычно не представляет затруднений. Наоборот, при введении в систему простой гибкой связи большей частью возникают серьезные трудности вследствие того, что на выходе устройства, осуществляющего эту связь, не удается получить точное, неискаженное значение производной от функции, поступающей на его вход.

Приведем два примера электрических устройств, с помощью которых можно с известным приближением осуществить простую гибкую связь.

Допустим, что напряжение $U_{вх}$ приложено к цепи (рис. 1), состоящей из емкости C и сопротивления R . Падение напряжения в сопротивлении R подано на вход безинерционного усилителя с коэффициентом усиления μ . Напряжение $U_{вых}$ на выходе усилителя и напряжение $U_{вх}$ связаны дифференциальным

уравнением:

$$RDU_{\text{вых}} + \frac{1}{C}U_{\text{вых}} = \mu RDU_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где D обозначает дифференцирование по времени.

Возьмем μ настолько большим, а R настолько малым, что первым членом левой части уравнения (1) можно пренебречь. Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$U_{\text{вых}} = \mu RCDU_{\text{вх}} \quad (2)$$

и, следовательно, схема на рис. 1 с известным приближением дает на выходе напряжение, пропорциональное производной от напряжения, приложенного к ее входу.

Если $U_{\text{вх}}$ представляет собой функцию на выходе одного из звеньев системы регулирования, то производной от этой функции явится при сделанных допущениях величина $U_{\text{вых}}$, вводя которую на вход этого или какого-либо другого звена, можно осуществить простую гибкую связь.

Другим примером электрического устройства, служащего для этой же цели, является схема на рис. 2.

Напряжение $U_{\text{вх}}$ приложено к цепи, состоящей из последовательного соединения сопротивления R и первичной обмотки трансформатора, обладающей при разомкнутой вторичной обмотке индуктивностью L . Вторичная обмотка включена на безинерционный усилитель с коэффициентом усиления μ и, следовательно, не нагружена.

Ток первичной обмотки определяется из дифференциального уравнения

$$LDI + RI = U_{\text{вх}}. \quad (3)$$

Во вторичной обмотке наводится э. д. с., пропорциональная производной потока, а следовательно, и тока I первичной обмотки. Если обозначить через M наведенную во вторичной обмотке э. д. с., когда скорость изменения тока I равна единице, то напряжение $U_{\text{вых}}$ на выходе усилителя будет:

$$U_{\text{вых}} = \mu MDI. \quad (4)$$

Исключив I из уравнений (3) и (4), получим:

$$LDJ_{\text{вых}} + RU_{\text{вых}} = \mu MDJ_{\text{вх}}. \quad (5)$$

Если R взято настолько большим, что в каждый момент времени ток первичной обмотки можно считать пропорциональным $U_{\text{вх}}$, то первым членом левой части уравнения (5) можно пренебречь по сравнению со вторым членом и правой частью. Связь между напряжением $U_{\text{вх}}$ на входе и $U_{\text{вых}}$ на выходе может быть записана в виде:

$$U_{\text{вых}} = \frac{\mu M}{R} DJ_{\text{вх}}. \quad (6)$$

Таким образом, если пренебречь переходным процессом в первичной обмотке трансформатора

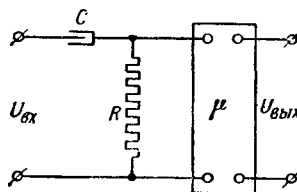


Рис. 1.

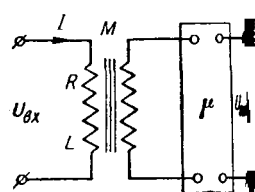


Рис. 2.

то схема на рис. 2 также с известным приближением дает напряжение на выходе, пропорциональное производной от напряжения на входе.

В целях упрощения схемы регулирования приходится отказываться от усилителя в цепи гибкой связи. При этом в уравнениях (1) и (2) следует положить $\mu = 1$.

Если усилитель в схеме на рис. 1 отсутствует, то $U_{\text{вых}}$ получается путем непосредственного использования падения напряжения в сопротивлении R . Для того чтобы $U_{\text{вых}}$ было достаточно велико, т. е. действие гибкой связи достаточно эффективно, приходится брать относительно большие значения R , вследствие чего делается невозможной замена уравнения (1) уравнением (2).

При отсутствии усилителя в схеме на рис. 2 напряжение $U_{\text{вх}}$ равно э. д. с., наведенной во вторичной обмотке. В этом случае единственным способом увеличения $U_{\text{вх}}$ для повышения эффективности гибкой связи явится увеличение потока первичной обмотки, которое может быть достигнуто уменьшением сопротивления. Однако, чем меньше будет это сопротивление, тем больше будет отклоняться ток первичной обмотки от величины, пропорциональной напряжению, приложенному к его зажимам, и тем менее обоснована будет замена уравнения (1) уравнением (6).

Все сказанное будет также относиться к тому случаю, когда вторичная обмотка трансформатора включена на нагрузку, обычно очень малую по сравнению с мощностью первичной обмотки. Это имеет место, например, в схемах, содержащих электромашинный усилитель, когда гибкая связь выполняется в виде трансформатора, питающего одну из его сигнальных обмоток.

Кроме двух примеров, приведенных выше, можно было бы указать на целый ряд других форм выполнения гибкой связи, в частности, в виде механических конструкций. Всех их можно охарактеризовать звеном, функции входа $x_0(t)$ выхода $x_1(t)$ которого связаны дифференциальным уравнением

$$\left(D + \frac{1}{T_0}\right)x_1(t) = \beta_0 Dx_0(t), \quad (7)$$

где β_0 — безразмерный коэффициент, а T_0 — постоянная времени.

Если T_0 сделать достаточно малым, а β_0 достаточно большим, то уравнение (7) можно с известным приближением заменить уравнением

$$x_1(t) = \beta Dx_0(t),$$

где $\beta = \beta_0 T_0$.

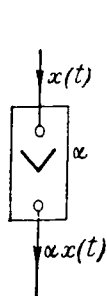


Рис. 3.

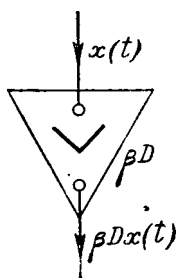


Рис. 4.

Очевидно, что устройства, служащие для получения простой гибкой связи, не дают в точности на выходе производной от функции входа, поскольку переходный процесс в них определяется из уравнения (7), а не (8).

Ниже рассматриваются только простые гибкие связи, т. е. устройства, вводящие в систему первую производную и не вносящие в нее искажений.

Вход и выход таких устройств связаны уравнением (8).

Идеализация, которая придается здесь звену гибкой связи, позволяет очень просто исследовать качественный эффект, вносимый ею в систему регулирования.

Устройства, осуществляющие введение как гибких, так и жестких внутренних связей, рассматриваются как звенья, обладающие детектирующими свойствами.

Звено, которым вводится жесткая связь, изображено на рис. 3. В нем функция выхода получается умножением функции входа на постоянную величину α .

Идеализированное устройство, осуществляющее гибкую связь, показано на рис. 4. Здесь функция входа кроме того, что умножается на постоянный множитель β , предварительно еще дифференцируется.

Величины α и β можно назвать коэффициентами усиления жесткой и гибкой связи. Первый из них представляет собой безразмерную величину, а второй, как видно из уравнения (8), имеет размерность времени.

Жесткая связь охватывает инерционное звено. Инерционное звено, охваченное жесткой связью, изображается схемой на рис. 5.

Дифференциальное уравнение, связывающее функции на входе и выходе его, имеет вид:

$$\left(D + \frac{1}{T_1}\right) x_1(t) = \frac{k_1}{T_1} [x_0(t) - \alpha x_1(t)]. \quad (9)$$

При этом жесткая связь вводится так, чтобы уменьшать возмущающее действие на входе и коэффициент α , который является величиной положительной, следует брать со знаком минус.

Обозначим через T_1' и k_1' величины, определяемые равенствами:

$$-\frac{1+k_1\alpha}{T_1} = \frac{1}{T_1'} \quad \text{и} \quad \frac{k_1}{1+k_1\alpha} = k_1'. \quad (10)$$

Уравнение (9) можно тогда записать в виде:

$$\left(D + \frac{1}{T_1'}\right) x_1(t) = \frac{k_1'}{T_1'} x_0(t). \quad (11)$$

Так как $T_1' < T_1$ и $k_1' < k_1$, то очевидно, что инерционное звено, охваченное жесткой связью, можно заменить инерционным звеном, не охваченным ею, постоянная времени и коэффициент усиления которого уменьшены в одинаковое число раз, зависящее от α .

Несмотря на то, что постоянная времени T_1' при этом уменьшается, функция на выходе при подаче на вход единичного толчка будет нарастать медленнее, чем в том случае, когда жесткая связь отсутствует. Это объясняется тем, что при введении жесткой связи коэффициент усиления k_1' уменьшается, т. е. установившееся значение будет меньше. Поэтому, если на вход такого звена подать единичный толчок, то экспонента на выходе его лежит ниже экспоненты, которая получилась бы у звена с теми же параметрами, но без жесткой связи.

Иногда жесткая связь используется для увеличения коэффициента усиления системы регулирования. При этом она подается так, что увеличивает возмущение, поступающее на вход звена.

Очевидно, что в этом случае

$$T_1' = \frac{T_1}{1-\alpha k_1} > T_1 \quad \text{и} \quad k_1' = \frac{k_1}{1-\alpha k_1} > k_1. \quad (12)$$

Таким образом, инерционное звено, охваченное жесткой связью с коэффициентом усиления α , взятым в уравнении (9) с положительным знаком, может быть заменено инерционным звеном, не охваченным ею, но с соответственно увеличенными коэффициентом усиления и постоянной времени.

Если $\alpha > \frac{1}{k_1}$, то T_1' становится отрицательной величиной, что соответствует режиму самовозбуждения инерционного звена.

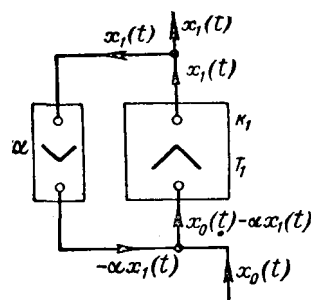


Рис. 5.

Применение жесткой связи при таких значениях α возможно только в статической системе. Сделать устойчивой астатическую систему, у которой T_1' отрицательно, невозможно, как бы ни был мал ее коэффициент усиления.

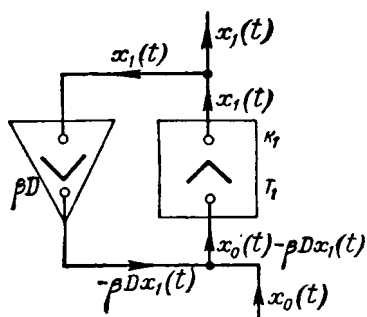


Рис. 6.

Гибкая связь охватывает инерционное звено. Инерционное звено, охваченное гибкой связью, изображается схемой на рис. 6.

Связь между функциями входа и выхода в этом случае выражается дифференциальным уравнением

$$\left(D + \frac{1}{T_1}\right) x_1(t) = \frac{k_1}{T_1} [x_0(t) - \beta D x_1(t)]. \quad (13)$$

Если гибкая связь вводится так, чтобы уменьшать возмущающее действие на входе, то коэффициент β , будучи положительным, берется с отрицательным знаком.

Уравнение (13) может быть записано в виде (11), при этом

$$T_1' = T_1 + \beta k_1 \text{ и } k_1' = k_1.$$

Таким образом, часть системы регулирования, схематически изображенная на рис. 6, может быть заменена инерционным звеном с тем же коэффициентом усиления, но с большей постоянной времени. Для уменьшения постоянной времени следует вводить гибкую связь так, чтобы она увеличивала возмущение, поступающее на вход, и поэтому брать β в уравнении (13) с положительным знаком.

Исследование устойчивости системы при изменении постоянной времени инерционного звена. Выше было показано, что как гибкая, так и жесткая связь, охватывающая инерционное звено, изменяют его постоянную времени. Таким образом, исследование влияния внутренних связей на устойчивость системы сводится к рассмотрению предельного коэффициента усиления φ_n — для статической и ψ_n — для астатической системы [Л. 2], как функции одного параметра — постоянной времени охваченного звена.

Допустим, что статическая и астатическая система регулирования, состоящая из любого числа звеньев, содержит инерционное звено с постоянной времени T .

Будем рассматривать эту величину как параметр, принимающий любые положительные значения.

Обозначим элементарные симметрические функции постоянных времени и собственных частот звеньев рассматриваемой системы через $a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{(n-1)n}, a_{nn}$, а определители Гурвица, составленные из этих величин, через $A_{1n}, A_{2n}, \dots, A_{nn}$.

Допустим, что из этой системы исключено инерционное звено с той постоянной времени T , которая рассматривается как переменный параметр, и из параметров оставшихся звеньев опять составлены элементарные симметрические функции. Обозначим их через $a_{1(n-1)}, a_{2(n-1)}, \dots, a_{(n-1)(n-1)}$.

Значения $a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{(n-1)n}, a_{nn}$ как функции T выражаются равенствами:

$$a_{1n} = a_{1(n-1)} + \frac{1}{T},$$

$$a_{2n} = a_{2(n-1)} + \frac{a_{1(n-1)}}{T}, \quad (14)$$

$$\dots$$

$$a_{(n-1)n} = a_{(n-1)(n-1)} + \frac{a_{(n-2)(n-1)}}{T}$$

$$a_{nn} = \frac{a_{(n-1)(n-1)}}{T}.$$

Подставим эти значения в выражения для φ_n и ψ_n и, полагая, что изменяется только постоянная времени T , будем рассматривать их как функции этой величины, обозначив через $\varphi_n(T)$ и $\psi_n(T)$.

Ниже исследуется характер изменения предельных коэффициентов усиления статической и астатической систем — функций $\varphi_n(T)$ и $\psi_n(T)$ для различных n при изменении T от нуля до бесконечности. Если эти функции увеличиваются, то устойчивость соответствующей системы улучшается, наоборот, при уменьшении их, устойчивость системы ухудшается. При этом можно не принимать во внимание изменение коэффициентов усиления k_c или k_a , которое возникает при введении жесткой связи, так как величины k_c или k_a задаются обычно техническими условиями и уменьшение коэффициента усиления одного из звеньев должно быть компенсировано увеличением его значения для какого-либо другого звена так, чтобы общий коэффициент усиления системы сохранил заданное значение.

Рассмотрим изменение постоянной времени инерционного звена статической системы.

Начнем с рассмотрения системы третьего порядка. Выражение для предельного коэффициента усиления такой системы может быть представлено [Л. 2] в виде:

$$\varphi_3 = \frac{1}{a_{23}} A_{23}. \quad (15)$$

Полагая $n=3$ в равенствах (14), запишем (15) следующим образом:

$$\varphi_3(T) = \left(a_{12} + \frac{1}{T}\right) \left(T + \frac{a_{12}}{a_{23}}\right) - 1 > k_c. \quad (16)$$

Кривая $\varphi_3(T)$ показана на рис. 7; который дает графическое представление условия (16). Левая ветвь кривой $\varphi_3(T)$ асимптотически приближается к оси ординат по мере того, как T стремится к нулю. При возрастании T величина $\varphi_3(T)$ также беспрестанно возрастает. Слева от M и справа от P располагаются области устойчивого состояния системы, так как в них выпол-

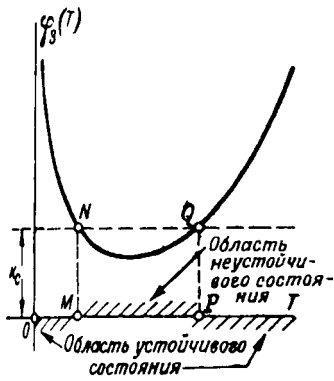


Рис. 7.

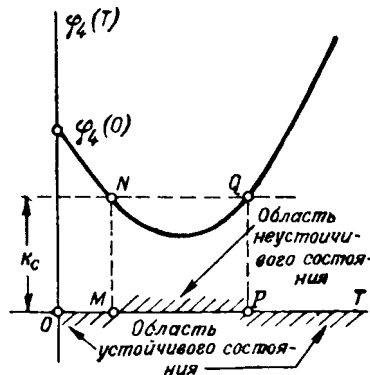


Рис. 8.

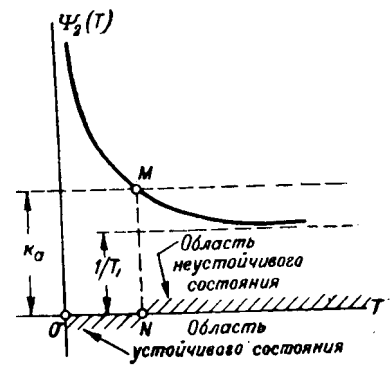


Рис. 9.

няется условие (16). Между M и P это условие не выполняется и для этих значений T система регулирования неустойчива.

Очевидно, что если постоянная времени имеет значение, соответствующее неустойчивому состоянию, то получить устойчивое состояние можно двумя путями: либо уменьшением постоянной времени звена, либо увеличением этого значения.

Действительно, когда постоянная времени становится достаточно мала, то система третьего порядка, по существу, вырождается в систему второго порядка, которая устойчива при любых значениях параметров и коэффициентов усиления.

По мере увеличения постоянной времени переходные процессы в остальных звеньях системы не будут практически оказывать влияния на переходный процесс в рассматриваемом звене и система регулирования будет приближаться к системе с одним звеном, которая также всегда устойчива.

При этом надо иметь в виду, что увеличение устойчивости системы как в этом случае, так и безде в дальнейшем, где увеличение устойчивости появляется в результате увеличения постоянной времени одного из звеньев, покупается ценой замедления переходного процесса.

Таким образом, если статическая система третьего порядка не устойчива, то, увеличивая или уменьшая искусственно постоянную времени инерционного звена, можно сделать ее устойчивой, как бы ни был велик коэффициент усиления.

Если коэффициент усиления меньше минимума функции $\varphi_3(T)$, то система устойчива при любых значениях постоянной времени.

Подставим значения a_{14} , a_{24} , a_{34} и a_{44} , определяемые из (14) при $n=4$, в выражение для предельного коэффициента усиления системы четвертого порядка [Л. 2]

$$\varphi_4 = \frac{1}{a_{14}^2 a_{44}} A_{34}. \quad (17)$$

Тогда условие устойчивости запишется в виде:

$$\varphi_4(T) = \frac{a_{33}T + a_{23}}{a_{33}(a_{13}T + 1)^2} (A_{23}T^2 + a_{13}^2T + a_{13}) - 1 > k_c. \quad (18)$$

Кривая $\varphi_4(T)$ изображена на рис. 8 и напоминает кривую для $\varphi_3(T)$ с той разницей, что

при T , равном нулю, она имеет конечное значение

$$\varphi_4(0) = \frac{A_{23}}{a_{33}} = \varphi_3,$$

т. е. превращается в систему третьего порядка, предельный коэффициент усиления которой определяется неравенством (15).

Если коэффициент усиления меньше $\varphi_4(0)$, то при достаточно малом T условие устойчивости может быть выполнено. Если же коэффициент усиления больше, чем $\varphi_4(0)$, то очевидно, что неравенство (18) не удовлетворяется, и достигнуть устойчивой работы можно только одним способом увеличением постоянной времени T .

Аналогичные результаты получаются для систем пятого и шестого порядка, если параметры их таковы, что значения предельных коэффициентов усиления могут быть заменены приближенными выражениями [Л. 2].

Так, например, для системы пятого порядка, у которой значение предельного коэффициента усиления может быть заменено выражением

$$\varphi_5 \approx -1 + \frac{a_{35}a_{45}}{a_{35}a_{55}},$$

условие устойчивости запишется в виде:

$$\varphi_5(T) \approx \frac{(a_{44}T + a_{34})(a_{34}T + a_{24})}{a_{44}(a_{21}T + a_{14})} - 1 > k_c. \quad (19)$$

Исследование $\varphi_5(T)$ показывает, что кривая, соответствующая этому выражению, совершенно аналогична кривой на рис. 8.

Подставив значения a_{1n} , a_{2n} , ..., a_{nn} из (14) в соответствующие выражения для φ_n , получим функцию $\varphi_n(T)$, для которой при $n \geq 3$ справедливы выражения:

$$\varphi_n(0) = \varphi_{n-1},$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \varphi_n(T) \rightarrow \infty.$$

При изменении T от нуля до ∞ функция $\varphi_n(T)$ непрерывна и для большинства статических систем, встречающихся на практике, имеет один минимум. При этом качественный характер ее изменения такой же, как и функции $\varphi_4(T)$.

Приближенные формулы для предельных коэффициентов усиления, если применение их возможно, дают хорошее количественное приближение для любых значений T .

Перейдем теперь к рассмотрению изменения постоянной времени инерционного звена астатической системы.

Для системы третьего порядка $\psi_2 = a_{12}$. Предельный коэффициент усиления [Л. 2] как функция параметра T запишется в виде:

$$\psi_2(T) = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T} > k_a. \quad (20)$$

Кривая $\psi_2(T)$ показана на рис. 9, который дает графическое представление условия (20) устойчивости астатической системы, состоящей из одного интегрирующего и двух инерционных звеньев, когда изменяется постоянная времени одного из них.

Из рис. 9 видно, что как при уменьшении, так и при увеличении T кривая $\psi_2(T)$ асимптотически приближается к оси ординат в первом случае и к прямой, параллельной оси абсцисс и отстоящей от нее на расстояние $\frac{1}{T_1}$, во втором случае. Если коэффициент усиления меньше этого значения, то система будет устойчива при любом T . Если же коэффициент усиления больше чем $\frac{1}{T_1}$, то при T , меньших ON , лежит область устойчивого состояния, а при T , больших ON , — область неустойчивого состояния системы.

Очевидно, что если постоянная времени рассматриваемого звена имеет значение, соответствующее неустойчивому состоянию, то сделать астатическую систему устойчивой при заданном коэффициенте усиления можно в противоположность системе статического регулирования только одним путем — уменьшением этой постоянной времени.

При уменьшении T устойчивая работа системы всегда возможна, как бы ни был велик коэффициент усиления k_a , так как при этом система вырождается в систему, состоящую из одного инерционного и одного интегрирующего звена, которая всегда устойчива.

При неограниченном увеличении T вопрос об устойчивости системы астатического регулирования будет решаться в зависимости от коэффициента усиления k_a . Если последний меньше $\frac{1}{T_1}$, то при любом T система будет устойчива, если же он больше этого значения, то при достаточно большом T система станет неустойчивой.

Астатической системе четвертого порядка соответствует выражение [Л. 2] для предельного коэффициента усиления

$$\psi_3 = \frac{1}{a_{13}^2} A_{23}.$$

Подставив в это выражение значения a_{13} , a_{23} и a_{33} , определенные из уравнений (14), при $n=3$ найдем, что устойчивость системы чет-

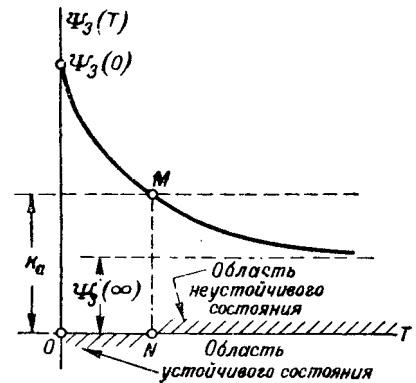


Рис. 10.

вертого порядка при изменении постоянной времени инерционного звена определяется неравенством

$$\psi_3(T) = \frac{a_{12}(a_{22}T^2 + a_{12}T + 1)}{(a_{12}T + 1)^2} > k_a.$$

Функция $\psi_3(T)$ имеет вид, изображенный на рис. 10, и качественно отличается от $\psi_2(T)$ тем, что при $T=0$ она приобретает конечное значение $\psi_3(0) = \psi_2 = a_{12}$.

По мере увеличения T кривая асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс и отстоящей от нее на расстояние

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \psi_3(T) = \frac{a_{22}}{a_{12}}.$$

При уменьшении T рассматриваемая система постепенно приобретает свойства астатической системы третьего порядка.

Если коэффициент усиления меньше $\psi_3(0) = a_{12}$, то при достаточно малом T условие устойчивости может быть выполнено. Если же коэффициент усиления больше этого значения, то достигнуть устойчивости уменьшением постоянной времени рассматриваемого звена не удастся. Очевидно, что такая система неустойчива при любом T .

Если коэффициент усиления меньше $\frac{a_{22}}{a_{12}}$, то система будет устойчива, как бы ни было велико T .

Когда значение коэффициента усиления лежит в интервале

$$\psi_3(0) > k_a > \frac{a_{22}}{a_{12}},$$

то для значений постоянной времени T рассматриваемого звена лежащих слева от точки M располагается область устойчивого состояния, а справа от этой точки — область неустойчивого состояния системы.

Функция $\psi_n(T)$, получающаяся при подстановке в выражение для ψ_n значений $a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{nn}$, определяемых из (14), для подавляющего большинства астатических систем ведет себя при изменении T так же, как и $\psi_3(T)$.

При $T=0$ для любых n справедливо равенство $\psi_n(0) = \psi_{n-1}$. По мере увеличения T зна-

чение $\psi_n(T)$ монотонно уменьшается, приближаясь к некоторому конечному значению $\psi_n(\infty)$.

Воспользовавшись приближенными выражениями [Л. 2] для ψ_n , можно получить приближенные выражения для $\psi_n(T)$.

Так, например, при $n = 4$ имеем:

$$\psi_4(T) \approx \frac{a_{38}T + a_{28}}{a_{28}T + a_{13}}.$$

Приближенные выражения дают для всех T правильную качественную картину поведения этой функции.

По мере увеличения T приближенные и точные выражения дают все лучшее количественное совпадение.

Жесткая или гибкая связь охватывает несколько звеньев системы. Допустим, что в системе регулирования, состоящей из n звеньев, выход $(s+m)$ -го звена или его производная подается на вход $(s+1)$ -го, т. е. m звеньев этой системы регулирования охвачены жесткой или гибкой связью.

Обозначим элементарные симметрические функции параметров звеньев системы регулирования, охваченных внутренней связью, через

$$\hat{a}_{1m}, \hat{a}_{2m}, \dots, \hat{a}_{mm},$$

а всех остальных звеньев, т. е. не охваченных ею, через

$$\bar{a}_{1(n-m)}, \bar{a}_{2(n-m)}, \dots, \bar{a}_{(n-m)(n-m)}.$$

Кроме того, обозначим:

$$\hat{\alpha} = k_{s+1}, \dots, k_{s+m} \alpha,$$

$$\hat{\beta} = k_{s+1}, \dots, k_{s+m} \beta.$$

В этих равенствах величины в правых частях имеют установленные ранее значения, а именно α и β представляют собой коэффициенты усиления звеньев, осуществляющих соответственно жесткую и гибкую связь, а $k_{s+1}, \dots, k_{s+m}$ коэффициенты усиления звеньев той части системы, которая этой связью охвачена.

Рассмотрим случай, когда два звена системы регулирования охвачены жесткой связью, как показано на рис. 11.

Дифференциальные уравнения, связывающие вход и выход этой части системы, запишутся так:

$$\left(D + \frac{1}{T_{s+1}}\right) x_{s+1}(t) = \frac{k_{s+1}}{T_{s+1}} [x_s(t) - \alpha x_{s+2}(t)], \quad (21)$$

$$\left(D + \frac{1}{T_{s+2}}\right) x_{s+2}(t) = \frac{k_{s+2}}{T_{s+2}} x_{s+1}(t). \quad (22)$$

Исключив функцию $x_{s+1}(t)$, найдем:

$$\left[\left(D + \frac{1}{T_{s+1}}\right) \left(D + \frac{1}{T_{s+2}}\right) + \alpha \frac{k_{s+1}}{T_{s+1}} \frac{k_{s+2}}{T_{s+2}} \right] x_{s+2}(t) = \frac{k_{s+1} k_{s+2}}{T_{s+1} T_{s+2}} x_s(t).$$

Допустим, что корни характеристического уравнения

$$p^2 + \left(\frac{1}{T_{s+1}} + \frac{1}{T_{s+2}}\right)p + \frac{1 + \alpha k_{s+1} k_{s+2}}{T_{s+1} T_{s+2}} = \\ = p^2 + \hat{a}_{12}p + (1 + \hat{\alpha})\hat{a}_{22} = z(p) + \hat{a}\hat{a}_{22} = 0$$

вещественны и равны $-\frac{1}{T'_{s+1}}$ и $-\frac{1}{T'_{s+2}}$. Тогда,

очевидно, что рассматриваемые два звена на рис. 11, охваченные жесткой связью, можно заменить двумя эквивалентными звеньями, не охваченными ею с постоянными времени T'_{s+1} и T'_{s+2} и с коэффициентом усиления k'_{s+1} и k'_{s+2} .

Между постоянными времени звеньев до введения жесткой связи и звеньев, им эквивалентных, после введения ее существуют следующие зависимости:

$$\frac{1}{T'_{s+1}} + \frac{1}{T'_{s+2}} = \hat{a}_{12} = \frac{1}{T'_{s+1}} + \frac{1}{T'_{s+2}},$$

$$\frac{1}{T'_{s+1} T'_{s+2}} = \frac{1 + \alpha k_{s+1} k_{s+2}}{T_{s+1} T_{s+2}} = (1 + \hat{\alpha})\hat{a}_{22}.$$

Таким образом, как видно из рис. 12, по мере увеличения α большая постоянная времени охваченных звеньев уменьшается, а меньшая увеличивается. При достаточно большом α два инерционных звена превратятся в колебательное звено [Л. 3].

Связь между соответствующими коэффициентами усиления выражается равенством:

$$k'_{s+1} k'_{s+2} = \frac{k_{s+1} k_{s+2}}{1 + \alpha k_{s+1} k_{s+2}}.$$

Произведение коэффициентов усиления эквивалентных звеньев уменьшается по мере увеличения α , а следовательно, уменьшается общий коэффициент усиления системы.

Если жесткая связь охватывает колебательное звено, то при любом α звеном, эквивалентным охваченному, будет также колебательное звено с увеличивающейся по мере увеличения α собственной частотой и уменьшающимся коэффициентом усиления.

Все сказанное справедливо в том случае, когда жесткая связь вводится, как показано на рис. 11, с отрицательным знаком.

Иногда для увеличения коэффициента усиления системы жесткая связь вводится с положительным знаком. В этом случае во всех приведенных выше равенствах знак у α надо поменять на обратный. По мере увеличения α большая постоянная времени будет увеличиваться, а меньшая уменьшаться.

$$\text{Если} \quad \alpha > \frac{1}{k_{s+1} k_{s+2}},$$

то характеристическое уравнение части системы, охваченной жесткой связью, будет иметь один положительный корень.

Такая внутренняя связь делает астатическую систему неустойчивой — она будет самовозбуждаться при любом коэффициенте усиления.

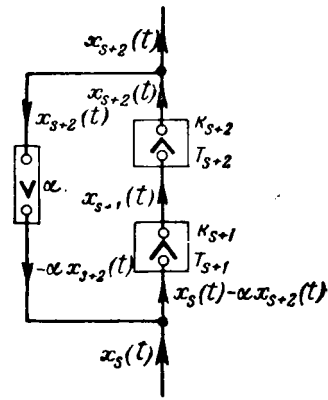


Рис. 11.

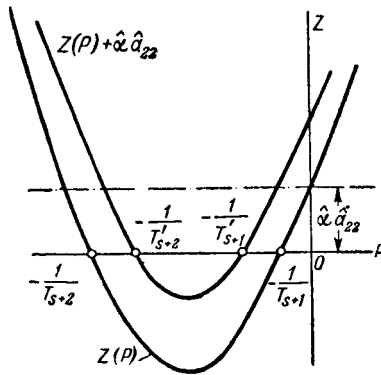


Рис. 12.

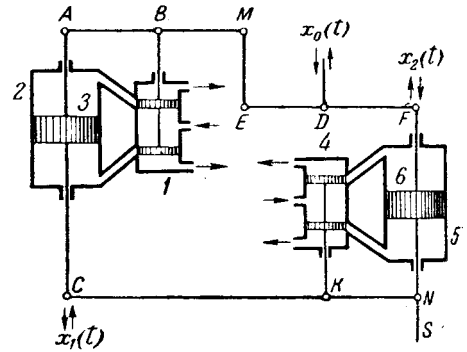


Рис. 13.

Если жесткая связь с положительным знаком вводится в статическую систему, то последняя будет устойчива в некоторой области значений коэффициента усиления, ограниченной как сверху, так и снизу. Верхняя граница явится предельным коэффициентом усиления и определит собой неустойчивость типа автоколебаний, а нижняя — неустойчивость, которая будет иметь характер самовозбуждения. Если такая связь охватывает колебательное звено, то по мере увеличения α собственная частота его будет уменьшаться. При достаточно большом α колебательное звено превратится в два инерционных.

При введении жесткой связи в характеристических уравнениях статической и астатической системы придется T_{s+1} и T_{s+2} заменить соответственно через T'_{s+1} и T'_{s+2} , а k_c и k_a через новые коэффициенты усиления k'_c и k'_a , которые получаются из старых путем замены произведения $k_{s+1} k_{s+2}$ через $k'_{s+1} k'_{s+2}$.

Обозначим через $c_{1n}, c_{2n}, \dots, c_{nn}$ элементарные симметрические функции, составленные как из параметров тех новых инерционных или колебательных звеньев, которые получаются после введения жесткой связи, так и из параметров звеньев, не охваченных ею. Нетрудно заметить, что величины $c_{1n}, c_{2n}, \dots, c_{nn}$ представляют собой коэффициенты характеристического уравнения разомкнутой системы регулирования при наличии жесткой связи и выражаются через принятые выше обозначения следующим образом:

$$\begin{aligned} c_{1n} &= a_{1n} \\ c_{2n} &= a_{2n} + \hat{a}\hat{a}_{22} \\ c_{3n} &= a_{3n} + \hat{a}\hat{a}_{22}\bar{a}_{1(n-2)}, \\ c_{4n} &= a_{4n} + \hat{a}\hat{a}_{22}\bar{a}_{2(n-2)}, \\ &\vdots \\ c_{(n-1)n} &= a_{(n-1)n} + \hat{a}\hat{a}_{22}\bar{a}_{(n-3)(n-2)}, \\ c_{nn} &= a_{nn} + \hat{a}\hat{a}_{22}\bar{a}_{(n-2)(n-2)} = (1 + \hat{a})a_{nn}. \end{aligned} \quad (23)$$

Подставляя в выражение для φ_n и ψ_n вместо $a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{nn}$ соответствующие значения $c_{1n}, c_{2n}, \dots, c_{nn}$, выразим предельный коэффициент

усиления статической или астатической системы, у которой имеется жесткая связь как через параметры системы, так и через коэффициент усиления звена, осуществляющего эту связь. Исследование φ_n и ψ_n как функций коэффициента усиления жесткой связи дает возможность судить о целесообразности введения ее.

Как пример двух инерционных звеньев, охваченных жесткой связью, рассмотрим часть системы регулирования, показанную на рис. 13 и состоящую из двух гидравлических серводвигателей с жесткими выключателями.

Внешнее возмущение в виде перемещения $x_0(t)$ точки D поворачивает рычаг EDF вокруг точки F и посредством тяги ME рычаг MBA вокруг точки A. Золотник 1 сдвигается и поршень 3 серводвигателя 2 перемещается, возвращая золотник к среднему положению.

Серводвигатель 2 с золотником 1 и жестким выключателем — рычагом MBA представляет собой устройство, эквивалентное инерционному звену. Входом его является перемещение точки M, а выходом — перемещение $x_1(t)$ поршня 3. Последнее поворотом рычага CKN смещает золотник 4, вследствие чего начинает перемещаться поршень 6, возвращая, так же как и в первом звене, золотник 4 к его среднему положению. Серводвигатель 5 с золотником 4 и жестким выключателем — рычагом CKN представляет собой второе инерционное звено с возмущением на входе, равным $x_1(t)$, и с выходом — перемещением $x_2(t)$ поршня 6. Это перемещение воздействует тягой NS на следующий за ним элемент системы регулирования, например задвижку турбины, и кроме того, поворачивает рычаг EDF вокруг точки D. При этом точка M перемещается в сторону, противоположную той, в которую она сместилась от внешнего возмущения. Таким образом, в каждый момент времени из перемещения $x_0(t)$ точки D вычитается перемещение, пропорциональное $x_2(t)$ поршня 6. Это вычитание осуществляется рычагом EDF и разность этих перемещений передается тягой ME золотнику 1.

Если внешнее возмущение имеет вид единичного толчка, т. е. точка D мгновенно перемещается в новое положение и в нем остается, то все элементы системы приходят в движение.

которое будет продолжаться, пока золотники 1 и 4 не займут среднего положения, соответствующее неподвижному состоянию поршней 3 и 6. При этом рычаги *СКН* и *АВМ* поворачиваются на некоторый угол вокруг точек *К* и *В*, которые по истечении переходного процесса оказываются в исходном положении.

Допустив, что скорость поршней 3 и 6 в любой момент времени пропорциональна сдвигу золотников 1 и 4, выразим связь между величиной внешнего возмущения $x_0(t)$ и перемещениями этих поршней $x_1(t)$ и $x_2(t)$ в виде следующих дифференциальных уравнений:

$$\left(D + \frac{1}{T_1}\right) x_1(t) = \frac{k_1}{T_1} [x_0(t) - \alpha x_2(t)],$$

$$\left(D + \frac{1}{T_2}\right) x_2(t) = \frac{k_2}{T_2} x_1(t),$$

где T_1 и T_2 — постоянные времени инерционных звеньев, эквивалентных серводвигателям 3 и 6 с золотниками 1 и 4 и с жесткими выключателями;

k_1 — коэффициент усиления инерционного звена, эквивалентного серводвигателю 2 и численно равный смещению поршня 3, если перемещение точки *D* равно единице и если допустить, что рычаг *EDF* не связан с поршнем 6 и поворачивается вокруг неподвижно закрепленной точки *F*;

k_2 — коэффициент усиления инерционного звена, эквивалентного серводвигателю 5 и численно равный смещению поршня 6, если смещение точки *C* равно единице;

α — коэффициент усиления жесткой связи, численно равный такому смещению точки *D*, при котором поворот рычага *EDF* вокруг *F* вызывает такое же смещение *E*, как единичное смещение поршня 6 при повороте этого рычага вокруг точки *D*.

Эти уравнения аналогичны (21) и (22) и рассматриваемая система, таким образом, представляет собой два инерционных звена, охваченных жесткой связью.

Рассмотрим теперь случай, когда два инерционных звена охвачены гибкой связью, как показано на рис. 14.

В этом случае дифференциальные уравнения, связывающие вход и выход рассматриваемой части системы, запишутся так:

$$\left(D + \frac{1}{T_{s+1}}\right) x_{s+1}(t) = \frac{k_{s+1}}{T_{s+1}} [x_s(t) - \beta D x_{s+2}(t)],$$

$$\left(D + \frac{1}{T_{s+2}}\right) x_{s+2}(t) = \frac{k_{s+2}}{T_{s+2}} x_{s+1}(t).$$

Исключив функцию $x_{s+1}(t)$, найдем:

$$\left[\left(D + \frac{1}{T_{s+1}}\right) \left(D + \frac{1}{T_{s+2}}\right) + \beta \frac{k_{s+1} k_{s+2}}{T_{s+1} T_{s+2}} D \right] x_{s+2}(t) = \frac{k_{s+1} k_{s+2}}{T_{s+1} T_{s+2}} x_s(t).$$

Если корни характеристического уравнения

$$p^2 + \left(\frac{1}{T_{s+1}} + \frac{1}{T_{s+2}} + \beta \frac{k_{s+1} k_{s+2}}{T_{s+1} T_{s+2}} \right) p + \frac{1}{T_{s+1} T_{s+2}} = p^2 + (\hat{a}_{12} + \hat{\beta} \hat{a}_{22}) p + \hat{a}_{22} = z(p) + \hat{\beta} \hat{a}_{22} p = 0$$

равны $-\frac{1}{T'_{s+1}}$ и $-\frac{1}{T'_{s+2}}$, то, очевидно, что

так же, как это было сделано выше, рассматриваемую часть системы, охваченную гибкой связью, можно заменить эквивалентными двумя звеньями, не охваченными ею с постоянными времени T'_{s+1} и T'_{s+2} . Однако в отличие от рассмотренного выше случая коэффициенты усиления k_{s+1} и k_{s+2} этих звеньев при введении гибкой связи не меняются.

Постоянные времени эквивалентных звеньев определяются из равенств:

$$\frac{1}{T_{s+1}} + \frac{1}{T_{s+2}} + \beta \frac{k_{s+1} k_{s+2}}{T_{s+1} T_{s+2}} = \frac{1}{T'_{s+1}} + \frac{1}{T'_{s+2}},$$

$$\frac{1}{T_{s+1} T_{s+2}} = \frac{1}{T'_{s+1} T'_{s+2}}.$$

Как видно из рис. 15, по мере увеличения β большая постоянная времени увеличивается, а меньшая — уменьшается. При этом эквивалентные звенья всегда останутся инерционными, как бы ни было велико β .

Если гибкая связь охватывает колебательное звено, то при любом β звеном, эквивалентным охваченному, будет также колебательное звено с постоянной времени, уменьшающейся по мере увеличения β .

Все сказанное справедливо, когда гибкая связь вводится с отрицательным знаком. При этом, как бы ни было велико β , корни характеристического уравнения эквивалентной части системы будут либо вещественные отрицательные, либо комплексные с отрицательной вещественной частью.

Положительная вещественная часть у комплексных корней может появиться в том случае, когда приходится вводить гибкую связь с положительным знаком.

В случае гибкой связи коэффициенты характеристического уравнения разомкнутой системы автоматического регулирования выражаются следующими равенствами:

$$\begin{aligned} c_{1n} &= a_{1n} + \hat{\beta} \hat{a}_{22}, \\ c_{2n} &= a_{2n} + \hat{\beta} \hat{a}_{22} \bar{a}_{31(n-2)}, \\ c_{3n} &= a_{3n} + \hat{\beta} \hat{a}_{22} \bar{a}_{2(n-2)}, \\ &\dots \dots \dots \\ c_{(n-1)n} &= a_{(n-1)n} + \hat{\beta} \hat{a}_{22} \bar{a}_{(n-2)(n-2)} = \\ &= a_{(n-1)n} + \hat{\beta} a_{nn} \\ c_{nn} &= a_{nn}. \end{aligned} \quad (24)$$

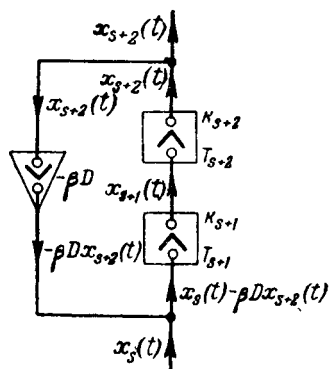


Рис. 14.

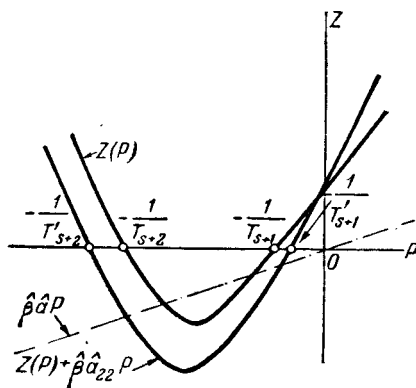


Рис. 15.

Если при подстановке вместо $a_{1n}, a_{2a}, \dots$, значений $a_{nn}, c_{1n}, c_{2n}, \dots, c_{nn}$ в выражения для φ_n и ψ_n последние увеличиваются при увеличении β , то введение гибкой связи для увеличения устойчивости целесообразно, в противном случае оно не имеет смысла.

По виду кривых соответствующих функций $\varphi_n(\beta)$ и $\psi(\beta)$ можно судить также и о тех численных границах, в которых следует брать величину коэффициента усиления гибкой связи для достижения устойчивости.

Если гибкая связь охватывает колебательное звено, то в приведенных выше выкладках следует заменить $\frac{1}{T_{s+1}} + \frac{1}{T_{s+2}}$ и $\frac{1}{T_{s+1}T_{s+2}}$ через $\frac{1}{\tau}$ и ω^2 — параметры этого звена. Эффект, вносимый гибкой связью, сказывается только на постоянной времени τ , т. е. на затухании колебательного процесса.

Как пример гибкой связи, охватывающей колебательное звено, рассмотрим устройство, изображенное на рис. 16. Здесь рамка гальванометра 1 поворачивается моментом, создаваемым током, проходящим через нее. На одной оси с рамкой гальванометра расположено зеркало 3. Световой луч, падающий на него от осветителя 4, отражается и попадает на фотоэлемент 5. В зависимости от угла $x_2(t)$ поворота рамки на фотоэлемент попадает больший или меньший световой поток. Падение напряжения в фотоэлементе, зависящее от величины светового потока, усиливается безинерционным усилителем 6, который питает нагрузку 7, включенную последовательно с первичной обмоткой дифференцирующего трансформатора 8.

Допустим сначала, что дифференцирующий трансформатор не включен. При повороте рамки 1 возникают силы, противодействующие вращающему моменту. Одна из них пропорциональна углу поворота рамки и создается закручиванием пружины 2, другая — ускорению рамки и обуславливается ее моментом инерции, и, наконец, третья, — пропорциональная скорости рамки. Последняя может создаваться как силами вязкого трения, так и противо-э. д. с., которые наводятся в рамке при движении ее в магнитном поле.

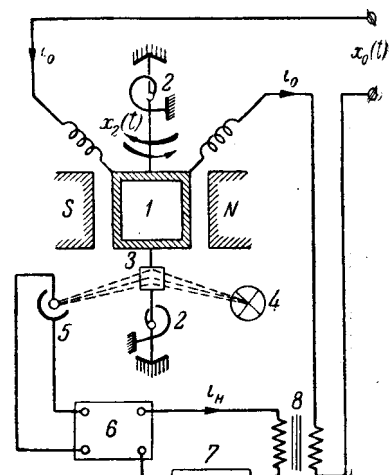


Рис. 16.

Допустим, что рамка гальванометра обладает только активным сопротивлением и момент, приложенный к ней, пропорционален току i_0 , который через нее протекает. Тогда связь между напряжением $x_0(t)$ и углом $x_2(t)$ поворота рамки выразится дифференциальным уравнением.

$$(D^2 + \frac{1}{\tau} D + \omega^2) x_2(t) = k \omega^2 x_0(t).$$

Если относительно трансформатора 8 сделать такие же допущения, как и для устройства на рис. 2, и считать, что ток нагрузки i_n в любой момент времени пропорционален углу $x_2(t)$, то напряжение на вторичной обмотке этого трансформатора будет пропорционально скорости рамки, т. е. производной от $x_2(t)$.

При этом последнее уравнение запишется в виде:

$$(D^2 + \frac{1}{\tau} D + \omega^2) x_2(t) = k \omega^2 [x_0(t) - \beta D x_2(t)].$$

Если по конструктивным или иным соображениям не удастся сделать достаточно большим вязкое трение или противо-э. д. с., наведенную в рамке, то τ будет велико и затухание колебаний в этом звене будет совершаться медленно.

Очевидно, что гибкой связью, введенной с таким знаком, что действие ее противоположно возмущению, можно уменьшить постоянную τ , т. е. сделать затухание более интенсивным.

Вводя гибкую связь так, чтобы действие ее складывалось с возмущением, можно, если это нужно, не только полностью компенсировать противо-э. д. с. и вязкое трение, но и получить систему с так называемым «отрицательным трением», т. е. систему, в которой возможно нарастание колебаний по показательному закону.

Рассмотрим теперь эффект, вносимый внутренней связью, которая охватывает часть системы регулирования, описываемую дифференциальным уравнением третьего порядка.

Эта часть системы регулирования может состоять либо из трех инерционных звеньев, либо из одного инерционного и одного колебательного.

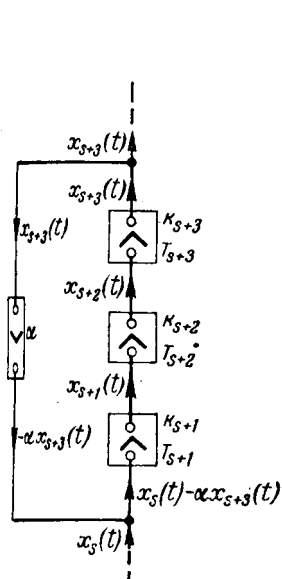


Рис. 17.

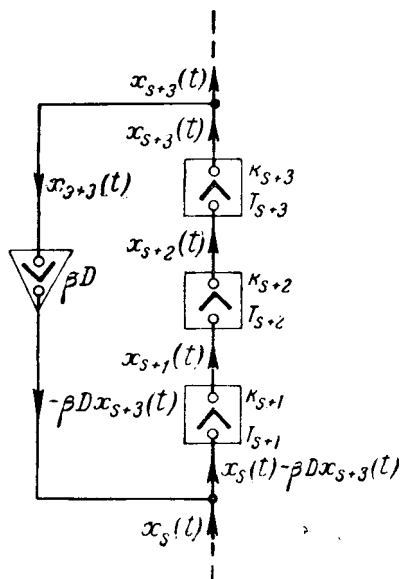


Рис. 18.

На рис. 17 и 18 схематически изображены три инерционных звена, охваченных соответственно жесткой и гибкой связью.

Если написать дифференциальные уравнения для этих звеньев и проделать выкладки, аналогичные приведенным выше, то получим связь между функциями входа и выхода в виде:

$$\left[\prod_{i=1}^3 \left(D + \frac{1}{T_{s+i}} \right) + \alpha \prod_{i=1}^3 \frac{k_{s+i}}{T_{s+i}} \right] x_{s+3}(t) = \prod_{i=1}^3 \frac{k_{s+i}}{T_{s+i}} x_s(t), \quad (25)$$

$$\left[\prod_{i=1}^3 \left(D + \frac{1}{T_{s+i}} \right) + \beta \prod_{i=1}^3 \frac{k_{s+i}}{T_{s+i}} D \right] x_{s+3}(t) = \prod_{i=1}^3 \frac{k_{s+i}}{T_{s+i}} x_s(t). \quad (26)$$

Первое из этих уравнений соответствует наличию жесткой, а второе — гибкой связи.

Дифференциальным уравнениям (25) и (26) соответствуют характеристические

$$p^3 + \hat{a}_{13}p^2 + \hat{a}_{23}p + (1 + \hat{\alpha})\hat{a}_{33} = z(p) + \hat{\alpha}\hat{a}_{33} = 0. \quad (27)$$

$$p^3 + \hat{a}_{13}p^2 + (\hat{a}_{23} + \hat{\beta}\hat{a}_{33})p + \hat{a}_{33} = z(p) + \hat{\beta}\hat{a}_{33}p = 0, \quad (28)$$

в которых $\hat{a}_{13}$, $\hat{a}_{23}$ и $\hat{a}_{33}$ представляют собой элементарные симметрические функции, составленные из величин $\frac{1}{T'_{s+1}}$, $\frac{1}{T'_{s+2}}$ и $\frac{1}{T'_{s+3}}$, а $z(p)$ — характеристическую функцию разомкнутой системы регулирования без внутренних связей.

На рис. 19 и 20 показано, как меняются корни функции $z(p)$ при изменении коэффициента усиления отрицательной жесткой или гибкой связи.

При увеличении коэффициента усиления жесткой связи кривая $z(p)$ сдвигается параллельно

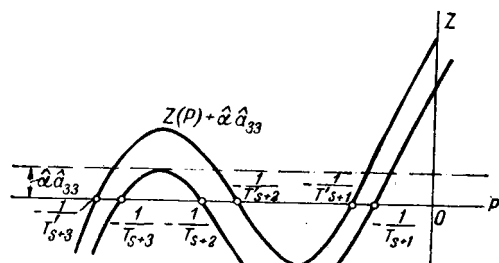


Рис. 19.

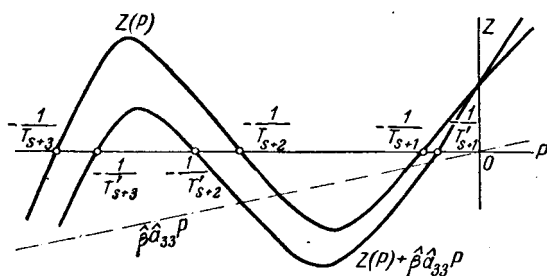


Рис. 20.

самой себе вдоль положительного направления оси ординат, а в случае гибкой связи каждая ордината этой кривой уменьшается на величину, пропорциональную ее абсциссе. Рассматриваемая часть системы регулирования заменяется тремя эквивалентными инерционными звеньями с постоянными времени T'_{s+1} , T'_{s+2} и T'_{s+3} , которые являются величинами, обратными корням уравнений (27) и (28).

Сравнивая постоянные времени звеньев до введения жесткой связи и постоянные времени эквивалентных звеньев после введения ее, можно написать следующие неравенства:

$$T'_{s+1} < T_{s+1}; \quad T'_{s+2} > T_{s+2}; \quad T'_{s+3} < T_{s+3}. \quad (29)$$

Если в систему регулирования вводится гибкая связь, то смысл неравенств (29) меняется на обратный. Все сказанное относится к случаю отрицательных знаков как у гибкой, так и у жесткой связи.

Между коэффициентами усиления звеньев до введения жесткой связи и коэффициентами усиления k'_{s+1} , k'_{s+2} , k'_{s+3} звеньев, им эквивалентных, после введения ее существует зависимость

$$k'_{s+1} k'_{s+2} k'_{s+3} = \frac{k_{s+1} k_{s+2} k_{s+3}}{1 + \alpha k_{s+1} k_{s+2} k_{s+3}},$$

из которой очевидно, что коэффициент усиления рассматриваемой части системы в этом случае уменьшается. При введении гибкой связи коэффициенты усиления эквивалентных звеньев не изменяются. Аналогичные выкладки можно произвести, когда охваченная часть системы содержит колебательное звено.

Коэффициенты характеристического уравнения разомкнутой системы автоматического регу-

лирования, у которой три звена охвачены жесткой связью, выражаются следующими равенствами:

$$\begin{aligned} c_{1n} &= a_{1n}, \\ c_{2n} &= a_{2n}, \\ c_{3n} &= a_{3n} + \hat{a}\hat{a}_{33}, \\ c_{4n} &= a_{4n} + \hat{a}\hat{a}_{33}\bar{a}_{1(n-3)}, \\ &\vdots \\ c_{(n-1)n} &= a_{(n-1)n} + \hat{a}\hat{a}_{33}\bar{a}_{(n-4)(n-3)}, \\ c_{nn} &= a_{nn} + \hat{a}\hat{a}_{33}\bar{a}_{(n-3)(n-3)} = (1 + \hat{a})a_{nn}. \end{aligned}$$

Для случая гибкой связи эти равенства запишутся в виде:

$$\begin{aligned} c_{1n} &= a_{1n}, \\ c_{2n} &= a_{2n} + \hat{\beta}\hat{a}_{33}, \\ c_{3n} &= a_{3n} + \hat{\beta}\hat{a}_{33}\bar{a}_{1(n-3)}, \\ &\vdots \\ c_{(n-2)n} &= a_{(n-2)n} + \hat{\beta}\hat{a}_{33}\bar{a}_{(n-4)(n-3)}, \\ c_{(n-1)n} &= a_{(n-1)n} + \hat{\beta}\hat{a}_{33}\bar{a}_{(n-3)(n-3)} = \\ &= a_{(n-1)n} + \hat{\beta}a_{nn}, \\ c_{nn} &= a_{nn}. \end{aligned} \quad (31)$$

Аналогичные формулы и выкладки могут быть получены для любого числа инерционных и колебательных звеньев, охваченных внутренней связью, и позволяют исследовать влияние ее на устойчивость.

Следует отметить, что если внутренняя связь, безразлично жесткая или простая гибкая, охватывает несколько звеньев системы регулирования, то последние могут быть заменены некоторыми эквивалентными звеньями с измененными параметрами. Параметры всех остальных звеньев при этом не меняются. Таким образом, внутренние связи могут быть отброшены, если охваченные ими звенья заменить эквивалентными.

Если внутренняя связь охватывает только инерционные звенья, то, расположив их в порядке

убывания их постоянных времени и назвав первым звено, обладающее наибольшей постоянной времени, найдем, что при замене рассматриваемой системы регулирования эквивалентной, характер изменения постоянных времени звеньев, стоящих на четных и на нечетных местах, будет разный. Если постоянные времени четных звеньев будут увеличиваться при увеличении коэффициента усиления внутренней связи, то постоянные времени нечетных звеньев будут уменьшаться, наоборот.

Выразив коэффициенты характеристического уравнения разомкнутой системы регулирования через коэффициент усиления внутренней связи представим φ или ψ как функции этой величины и исследуем характер их изменения. Если при увеличении коэффициента усиления внутренней связи величина φ для статической и величина ψ для астатической системы увеличивается, то введение внутренних связей как противокорректирующего устройства целесообразно, а в противном случае — нецелесообразно.

Применение изложенного выше к исследованию устойчивости некоторых систем регулирования при введении внутренних связей составляет содержание следующей статьи.

Выводы. Жесткая связь и при определенных допущениях гибкая связь характеризуются как одна одним параметром и в зависимости от величины его изменяют по определенному закону постоянные времени и собственные частоты только тех инерционных и колебательных звеньев, которые они охватывают. Предельный коэффициент усиления системы может рассматриваться как функция постоянной того или иного звена или как функция параметра жесткой или простой гибкой связи. При исследовании предельного коэффициента усиления как функции указанных параметров выясняется влияние постоянных звеньев на устойчивость.

Литература

1. Д. И. Марьяновский. Системы автоматического регулирования с жесткими внутренними обратными связями. ВЭП. № 3, 1949.
2. Д. И. Марьяновский. Устойчивость линейных систем автоматического регулирования. Электричество № 9, 1946.
3. Л. С. Гольдфарб. Условия апериодичности некоторых систем авторегулирования. Бюллетень ВЭ № 8, 1940.

[21. 9. 194]



Теория и метод расчета системы генератор-двигатель с электромашинным регулятором

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

Московский энергетический институт им. Молотова

Большое количество современных механизмов требует широкого регулирования скорости вращения приводного двигателя. Диапазон регулирования может достигать 100:1 и выше. Обычная система генератор—двигатель не в состоянии обеспечить такой диапазон регулирования, главным образом, из-за невысокой степени жесткости механической характеристики двигателя, питаемого по системе генератор—двигатель. То или иное изменение или дополнение в обычной системе генератор—двигатель, направленное к повышению степени жесткости механической характеристики, должно привести к расширению диапазона регулирования скорости вращения двигателя. Целесообразно использовать схему, в которой с определенной степенью точности поддерживалось бы постоянство скорости вращения двигателя, иначе говоря, применить систему автоматического регулирования, где в том или ином виде имеются обратные связи. Влияние обратных связей на поведение системы различно, и оно зависит от способа включения обратных связей, от параметров цепей этих связей. Не всякое соотношение параметров системы обеспечивает ее работоспособность, а лишь определенное. При проектировании подобных схем знание характера влияния параметров схем на переходный и стационарный режимы является необходимым, так как оно выявляет то соотношение параметров, которое устанавливает заданные условия работы системы.

В настоящей работе дан анализ влияния параметров цепей возбуждения генератора системы генератор—двигатель на степень жесткости механической характеристики и на степень устойчивости. Рассматриваются три модификации системы генератор—двигатель: с тремя обмотками возбуждения у генератора и с электромашинным регулятором при двух вариантах питания обмоток генератора и регулятора.

Система генератор—двигатель с тремя обмотками возбуждения у генератора. На рис. 1 представлена система генератор—двигатель,

Проводится анализ статических и динамических режимов модификаций системы генератор—двигатель, обеспечивающих получение широкого диапазона регулирования скорости вращения двигателя за счет повышения жесткости механической характеристики его. Дается расчет параметров системы генератор—двигатель с электромашинным регулятором.

генератор которой имеет: 1 — обмотку независимого возбуждения — задающую обмотку, 2 — обмотку шунтового возбуждения и обмотку серийного возбуждения 3. Об-

мотка 2, включенная встречно задающей, осуществляет отрицательную обратную связь по напряжению, а обмотка, включенная согласно задающей, — положительную обратную связь по току двигателя. Эти обмотки можно назвать регулирующими, так как посредством этих обмоток обеспечивается поддержание постоянства скорости вращения двигателя — автоматическое регулирование. В такой системе с увеличением нагрузки на валу двигателя регулирующие ампервитки будут уменьшаться. Так как они являются размагничивающими, то суммарные ампервитки генератора и его э. д. с. при этом станут увеличиваться. Увеличение э. д. с. генератора, связанное с повышением нагрузки, приведет к частичной компенсации падения напряжения в силовой цепи от тока нагрузки, к поддержанию с некоторой степенью точности постоянства скорости вращения двигателя.

Уравнение переходного процесса для схемы рис. 1 имеет вид:

$$\left\{ \frac{T_{1u}}{1+k_u} \theta p^2 + \left[\frac{T_{1u}}{1+k_u} + \left(1 - \frac{\sigma k_c + \lambda k_u}{1+k_u} \right) \theta \right] p + 1 \right\} e_z = \frac{u_1 k_1 + I_{cm} R_2 (\sigma k_c + \lambda k_u)}{1+k_u}, \quad (1)$$

где $T_{1u} = T_1 + T_u$.

Уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{u_1 k_1}{C_e (1+k_u)} - \left[1 - \frac{\sigma k_c + \lambda k_u}{1+k_u} \right] \frac{I_{cm} R_2}{C_e}. \quad (2)$$

Второй член правой части уравнения (2) — $\left[1 - \frac{\sigma k_c + \lambda k_u}{1+k_u} \right] \frac{I_{cm} R_2}{C_e}$ представляет собой перепад (уменьшение) скорости вращения двигателя, обусловленный наличием статической нагрузки

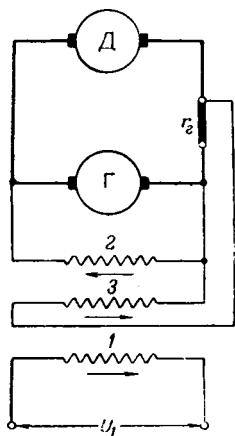


Рис. 1.

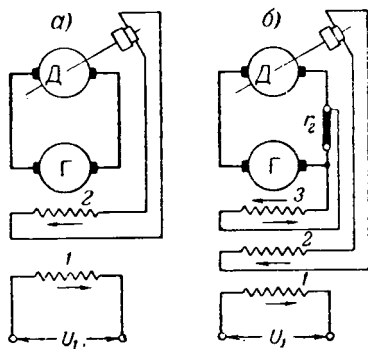


Рис. 2.

на валу двигателя. Чем меньше этот перепад при некоторой заданной нагрузке, тем выше жесткость скоростной (механической) характеристики, тем более широкий диапазон регулирования может быть получен в данной схеме.

Так как перепад скорости вращения двигателя в обычной системе генератор—двигатель $\Delta n_{cm} = \frac{I_{cm} R_z}{C_e}$, то скобка $\left[1 - \frac{\sigma k_c + \lambda k_{ш}}{1 + k_{ш}}\right]$ характеризует снижение перепада скорости, полученное в результате введения в схему обратных связей.

В схеме рис. 1 с помощью обмотки 2 осуществляется два вида обратной связи: обратная отрицательная связь по э. д. с. генератора и обратная положительная связь по току двигателя. Действие обратной связи по току двигателя от обмотки 2 пропорционально величине $-\lambda k_{ш}$, действие обратной связи по току двигателя от обмотки 3 пропорционально величине $-\sigma k_c$ и действие обратной связи по э. д. с. генератора пропорционально величине $\frac{1}{1 + k_{ш}}$.

Учитывая указанное, можно согласно уравнению (2) утверждать, что положительная обратная связь по току двигателя повышает, а отрицательная обратная связь по э. д. с. генератора при условии наличия обратной связи по току понижает жесткость характеристики двигателя в рассматриваемой системе. Если это так, то может возникнуть вопрос, каков же смысл введения в схему обратной связи по э. д. с. генератора.

Схема, имеющая только положительную обратную связь по току двигателя, неудовлетворительна потому, что в такой схеме э. д. с. генератора от остаточного магнетизма, значительно усиленная действием положительной обратной связи, не позволяет получить глубокого снижения скорости вращения двигателя—широкого диапазона регулирования. Отрицательная же обратная связь по э. д. с. действует и ослабляет влияние остаточного магнетизма генератора. Одновременно такая обратная связь (если соотношение постоянных времени $\frac{\theta}{T}$ больше

единицы¹⁾ повышает степень устойчивости системы, что видно из анализа уравнения (1). Кроме указанного, с введением в схему отрицательной обратной связи по э. д. с. представляется возможность получать различные условия регулирования скорости вращения двигателя. Например можно выбрать соотношение параметров регулирующих обмоток так, что суммарные ампервиты всегда будут пропорциональны скорости вращения двигателя. В таком случае рассматриваемая схема будет аналогична схеме с применением тахомашины, питающей регулируемую обмотку генератора (рис. 2, а), где происходит регулирование по скорости вращения двигателя (на входе системы обратной связи подается величина пропорциональная скорости). Условие регулирования по скорости для схемы рис. 1 может быть найдено из равенства:

$$E_{шс} = -(E_z - I_{cm} R_z) k_{ш} + I_{cm} R_z \sigma k_c, \quad (3)$$

где $E_{шс}$ —э. д. с. генератора от ампервитов регулирующих обмоток 2, 3. Учитывая, что $E_z = C_e n + I_{cm} R_z$, напомним:

$$E_{шс} = -C_e n k_{ш} + [\sigma k_c - (1 - \lambda) k_{ш}] I_{cm} R_z, \quad (4)$$

откуда следует, что $E_{шс}$ —пропорциональна скорости при условии

$$(1 - \lambda) k_{ш} = \sigma k_c.$$

Если соотношение параметров определяет неравенством

$$(1 - \lambda) k_{ш} < \sigma k_c,$$

то регулирование, как видно из (4), будет происходить с некоторым положительным и $(1 - \lambda) k_{ш} > \sigma k_c$ с отрицательным компаундированием. Последнему случаю регулирования соответствует эквивалентная схема рис. 2, б, в которой обмотка 3 дополнительно подмагничивает и размагничивает генератор в зависимости от характера компаундирования.

Из указанных здесь способов регулирования наиболее рациональным является регулирование по скорости без дополнительного компаундирования, так как отрицательное компаундирование приводит к снижению жесткости характеристики, а положительное—к ухудшению степени устойчивости и повышению влияния остаточного магнетизма генератора.

Необходимо отметить, что в схеме регулирования по скорости наличие двух регулирующих обмоток генератора не является обязательным. Например, схема рис. 3 с одной регулирующей обмоткой может дать такие же результаты, и схема рис. 1.

Для схемы рис. 3 действительно равенство

$$E_p = [-\gamma (E_z - I_{cm} R_z) + I_{cm} R_z] k_p,$$

¹⁾ Для электроприводов небольшой мощности условие $\frac{\theta}{T} > 1$ обычно является характерным.

где E_p — э. д. с. генератора от ампервитков регулирующей обмотки, $\gamma = \frac{r_n}{R_n}$; $\sigma = \frac{r_2}{R_2}$;

k_p — передаточный коэффициент генератора от регулирующей обмотки.

Из уравнения (7) условие регулирования по скорости для схемы рис. 3 получается в следующем виде:

$$(1 - \lambda)\gamma = \sigma. \quad (8)$$

При регулировании по скорости в схеме рис. 1 уравнение скоростной характеристики напишется так:

$$n = \frac{u_1 k_1}{C_e(1 + k_{us})} - \frac{I_{cm} R_z}{C_e(1 + k_{us})}. \quad (9)$$

Приведенное уравнение показывает, что высокая степень жесткости характеристики может быть получена лишь при больших значениях передаточного коэффициента — k_{us} . Поэтому использование в качестве генератора электрической машины

Схема генератор — двигатель с применением электромашинного регулятора. В рассмотренной выше схеме генератор выполняет одновременно и функции регулятора. Однако, от схемы можно добиться более резкого эффекта, если функции регулирования будет выполнять не генератор, а специально предназначенная для этой цели электрическая машина — электромашинный регулятор.

На рис. 4 представлена схема с таким регулятором, имеющим четыре обмотки возбуждения: шунтовую 2, токовую 3, обмотку сравнения 4 и усиливающую 5.

Регулятор питает при наличии нагрузки на двигателе специальную регулировочную обмотку генератора 6, и э. д. с. генератора повышается с нагрузкой, обеспечивая тем самым компенсацию падения напряжения в силовой цепи.

Усиливающая обмотка, имеющая цель усиливать воздействие обратной связи на регулятор, может быть включена или непосредственно на якорь регулятора, или последовательно с обмоткой 6. Проведем сравнение между собой указанных способов включения усиливающей обмотки. В сравниваемых схемах включения этой обмотки (рис. 5) обмотка отождествляет суммарное действие трех обмоток регулятора — шунтовой 2, токовой 3 и сравнения 4. Сумма ампервитков этих обмоток увеличивается с повышением нагрузки. Поэтому возрастание тока нагрузки на величину ΔI будет примерно равносильно приложению к контуру эквивалентной обмотки I некоторого напряжения ΔU . Принимая во внимание указанное, напишем уравнение переходного процесса для схемы с серийным включением (рис. 5, а):

$$[T_s T_p p^2 + (T_s + T_y + T_p) p + (1 - k_y)] \Delta e_p = \Delta U k_s, \quad (10)$$

и для схемы с шунтовым включением (рис. 5, б)

$$\{ (T_s + T_y) T_p p^2 + [T_s + T_y + (1 - k_y) T_p] p + 1 - (1 - \lambda_1) k_y \} \Delta e_p = \Delta U k_s, \quad (11)$$

где T_s , T_p , T_y — постоянные времени;

k_y — передаточный коэффициент регулятора от усиливающей обмотки;

$\lambda_1 = \frac{r_{ap}}{R_p}$ — отношение сопротивления якоря регулятора к сопротивлению цепи регулятора.

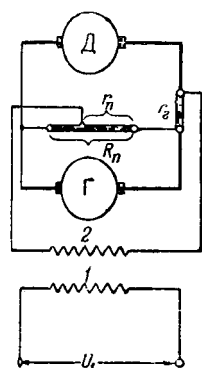


Рис. 3.

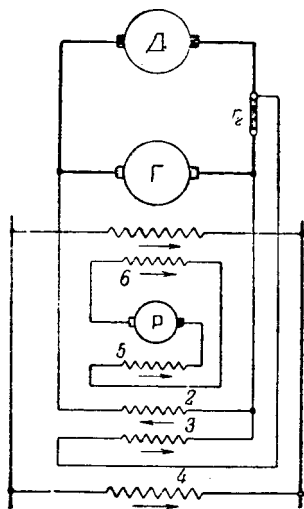


Рис. 4.

нормального исполнения, в которой передаточный коэффициент может быть порядка 2–2,5, не обеспечивает требуемой жесткости характеристики. В таких схемах обычно применяется электромашинный усилитель с поперечным возбуждением (амплидин). Большое значение передаточного коэффициента усилителя позволяет получить высокую степень жесткости характеристики, а следовательно, и широкий диапазон регулирования. Однако, схема с электромашинным усилителем поперечного возбуждения в качестве генератора неустойчива из-за наличия в ней не двух инерционных звеньев, как при нормальном исполнении генератора, а трех, включая сюда поперечную цепь возбуждения усилителя-генератора, и из-за высокого передаточного коэффициента усилителя. Поэтому обязательным в данном случае является применение стабилизирующего устройства.

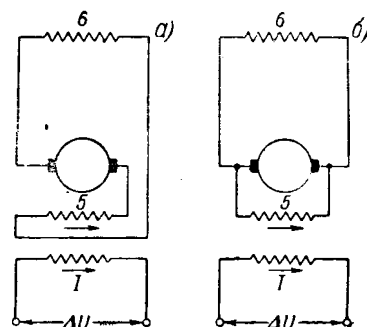


Рис. 5.

Из сравнения уравнений (10) и (11) видно, что схема с серийным включением при одинаковых параметрах дает большую устойчивость процесса регулирования, чем схема с шунтовым включением. Кроме этого схема с серийным включением обладает большим общим передаточным коэффициентом. Такой вывод является справедливым и для случая, когда рассмотренные схемы регулятора входят составной частью в более сложную схему электропривода.

Уравнение переходного процесса схемы рис. 4 имеет вид:

$$\begin{aligned} & \{ [T_{осш} T_{1p} \theta - T_y T_p \theta] p^3 + [T_{осш} T_{1p} - T_y T_p + \\ & + (T_{осш} + T_{1p} - k_y T_1) \theta] p^2 + [T_{осш} + T_{1p} - k_y T_1 - \\ & - \frac{k_{ш} k_p}{k_y} T_y + (1 - k_y) \theta] p + 1 - k_y + k_{ш} k_p \} e_2 = \\ & = u_1 k_1 (1 - k_y + k_{ш} k_p) + I_{cm} R_z k_{ш} k_p, \quad (14) \end{aligned}$$

а уравнение скоростной характеристики:

$$n = \frac{u_1 k_1}{C_e} - \frac{1 - k_y}{1 - k_y + k_{ш} k_p} \cdot \frac{I_{cm} R_z}{C_e}. \quad (15)$$

Уравнение (15) показывает, что жесткость характеристики зависит не только от передаточного коэффициента $k_{ш}$, как в схеме рис. 1 [уравнение (9)], но также и от k_y — передаточного коэффициента от усиливающей обмотки. Так, например, при $k_y < 1$ перепад скорости не равен нулю. В этом случае имеет место статическое регулирование.

При $k_y = 1$ перепад скорости равен нулю. Регулирование астатическое. Рассмотрим протекание процесса регулирования при $k_y = 1$. Если $k_y = 1$, то вольтамперная прямая сливается с прямолинейной частью характеристики холостого хода регулятора. При таком условии всякое значение э. д. с. регулятора на прямолинейной части характеристики будет создаваться ампервитками усиливающей обмотки 5. Предположим в данном случае, что значения э. д. с. регулятора, необходимые для полной компенсации падения напряжения в силовой цепи, не выходят за пределы прямолинейной части характеристики холостого хода. Тогда в установившемся режиме при любой нагрузке сумма ампервитков обмоток 2, 3 и 4 будет равняться нулю, в чем легко убедиться из равенства:

$$u_1 k_0 - (E_z - I_{cm} R_z) k_{ш} + \lambda k_c I_{cm} R_z + E_p k_y = E_p, \quad (16)$$

где в левую часть входят составляющие э. д. с. регулятора соответственно от обмоток 2, 3, 5. При расчете параметров обмоток регулятора удобнее использовать режим идеального холостого хода системы, но такое условие не является обязательным. Для идеального холостого хода действительно в общем виде равенство:

$$u_1 k_0 - (u_1 k_1 + E_p k_p) k_{ш} + E_p k_y = E_p, \quad (17)$$

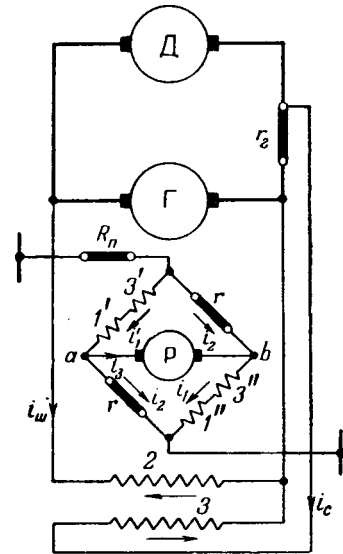


Рис. 6.

где $u_1 k_1 + E_p k_p = E_0$ — э. д. с. идеального холостого хода генератора.

Если $k_y = 1$, то из (17) следует, что

$$u_1 k_0 - u_1 k_1 k_{ш} - E_p k_p k_{ш} = 0. \quad (18)$$

Соотношение параметров обмоток 1, 2, 4 выбирается таким, чтобы при идеальном холостом ходе э. д. с. регулятора равнялась нулю. Согласно (18) это будет иметь место при

$$k_0 = k_1 k_{ш}. \quad (19)$$

С увеличением нагрузки на валу двигателя э. д. с. регулятора должна возрасти до такой величины, при которой сумма ампервитков обмоток 2, 3, 4 осталась бы равной нулю. Эту величину э. д. с. можно определить из (16), которое переписывается в следующем виде:

$$u_1 k_0 - (u_1 k_1 + E_p k_p - \lambda I_{cm} R_z) k_{ш} + \lambda k_c I_{cm} R_z = 0, \quad (20)$$

откуда учитывая (5) и (19), получим э. д. с. регулятора при нагрузке:

$$E_p = \frac{I_{cm} R_z}{k_p}. \quad (21)$$

Система генератор — двигатель с регулятором в мостиковой схеме. Количество обмоток в схеме рис. 4 можно уменьшить, если применить мостиковую схему питания основных обмоток генератора и регулятора (рис. 6). В этой схеме обмотка генератора 1 и обмотка регулятора 2 разделены каждая на две равные части — 1:1' и 2:2'. Соединенные между собой попарно обмотки генератора и регулятора включаются в противоположные плечи мостика. Если сопротивления плеч такого мостика равны между собой, то получается раздельное и независимое питание обмоток генератора и регулятора от двух источников напряжения — возбуждителя регулятора.

При таком включении обмотка генератора 1 является в одно и то же время основной и регулирующей, а обмотка регулятора 3 — обмоткой сравнения и усиливающей. Ампервитки обмотки генератора от тока возбудителя определяют заданное значение э. д. с. генератора (скорости вращения двигателя), а ампервитки этой же обмотки от тока регулятора определяют э. д. с. генератора, компенсирующее падение напряжения в силовой цепи. Ампервитки обмотки регулятора 1 от тока возбудителя сравниваются с ампервитками регулирующих обмоток 2, 3, а ампервитки этой обмотки от тока регулятора усиливают э. д. с. регулятора при $k_y < 1$ или полностью ее определяют при $k_y = 1$. В остальном процесс регулирования в схеме рис. 6 аналогичен процессу в схеме рис. 4.

Уравнение переходного процесса для схемы рис. 6 имеет вид:

$$\{T_s T_{cm} \theta p^3 + [T_s T_{cm} + T_s \theta + T_{cm} \theta + T_y \theta] p^2 + [T_s + T_{cm} + (1 - k_{y2}) \theta] p + 1\} e_z = u_1 k_{s1} + I_{cm} R_z k_{y2}, \quad (22)$$

где $T_{cm} = T_c + T_{ш}$.

Уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{u_1 k_{s1}}{C_e} - (1 - k_{y2}) - \frac{I_{cm} R_z}{C_e}. \quad (23)$$

Применяя критерий устойчивости к (22), можно заметить, что при любых соотношениях постоянных времени схемы, но при $k_{y2} \leq 1$ и $(1 - \lambda) k_{ш} = \pm k_c$, в схеме всегда будет иметь место затухающий переходный процесс. По этой причине применение стабилизирующих устройств в рассматриваемой схеме является излишним.

Расчет параметров схемы. Расчет параметров проводится по условиям статического режима. При расчете принято допущение, что электрическая машина, используемая для регулятора, обладает идеализированной безгистерезисной кривой намагничивания. Расчет устанавливается мощность регулятора и параметры цепей обмоток регулятора (число витков, сопротивление, сечение).

Предлагается следующий порядок расчета.

Ток возбуждения генератора при холостом ходе

$$I_{s0} = \frac{E_o}{\beta_z w_s} = \frac{C_e n_o}{\beta_z w_s}, \quad (24)$$

где n_o — заданная основная скорость вращения двигателя.

Ток в плече мостика от э. д. с. регулятора при нормальной нагрузке

$$I_p = \frac{I_n R_z}{\beta_z w_s}, \quad (25)$$

где I_n — номинальный ток двигателя.

Мощность электрической машины, используемой для регулятора,

$$P_p = 2UI_p, \quad (26)$$

где U — номинальное напряжение электрической машины. Регулятор работает при малых напряжениях, поэтому не следует брать U более 110 в.

Сечение усиливающей обмотки берется равным сечению обмотки возбуждения генератора

$$q_y = q_s. \quad (27)$$

Число витков усиливающей обмотки (приложение IV)

$$w_y = \frac{r_s + 2r_z}{\beta_p - \frac{I_{cp} p}{57 q_y} (1 + 0,004 T_n)}. \quad (28)$$

Сопротивление r_z берется несколько большим сопротивления якоря регулятора.

Сопротивление усиливающей обмотки

$$r_y = \frac{I_{cp} p w_y}{57 q_y} (1 + 0,004 T_n). \quad (29)$$

Передаточный коэффициент от шунтовой обмотки

$$k_{ш} = \frac{\beta_p w_y}{\beta_z w_s}. \quad (30)$$

Число витков шунтовой обмотки (приложение V)

$$w_{ш} = E_o \frac{1 + (1 - \lambda) S_n}{i_s I_{cp} p (1 + 0,004 T_n)} 57. \quad (31)$$

Сечение шунтовой обмотки

$$q_{ш} = \frac{k_{ш} I_{cp} p}{\beta_p 57} (1 + 0,004 T_n). \quad (32)$$

Передаточный коэффициент от токовой обмотки

$$k_c = \frac{(1 - \lambda) k_{ш}}{\sigma}. \quad (33)$$

Число витков токовой обмотки

$$w_c = \frac{\sigma I_n R_z}{I_{cp} p i_s (1 + 0,004 T_n)} 57. \quad (34)$$

Сечение токовой обмотки

$$q_c = \frac{k_c I_{cp} p}{\beta_p 57} (1 + 0,004 T_n). \quad (35)$$

Дополнительное сопротивление, включаемое последовательно с мостиком:

$$R_n = \frac{U_1}{2I_{s0}} - \frac{r_s + r_y}{2}. \quad (36)$$

Каждая регулировочная скорость вращения двигателя имеет свое сопротивление R_n , которое определяется по уравнению (36), но при значении I_{s0} , соответствующем заданной скорости.

Приложение I. Для схемы рис. 1 действительны следующие исходные уравнения:

$$U_1 = i_1 R_1 + w_1 p \Phi, \quad (37)$$

$$\sigma i_2 R_2 = i_c R_c + w_c p \Phi, \quad (38)$$

$$e_2 - \lambda i_2 R_2 = i_{ш} R_{ш} - w_{ш} p \Phi, \quad (39)$$

$$e_2 = i_2 R_2 + C_e n, \quad (40)$$

$$i_2 R_2 = I_{cm} R_2 + \theta p C_e n, \quad (41)$$

$$e_2 = e'_2 + e''_2 - e'''_2, \quad (42)$$

где U_1 , i_1 , R_1 , w_1 — напряжение, ток, сопротивление и число витков в цепи обмотки 1 (рис. 1); i_c ; R_c ; w_c — ток, сопротивление и число витков в цепи обмотки 3;

$i_{ш}$; $R_{ш}$; $w_{ш}$ — то же в цепи обмотки 2;

e_2 ; Φ — э. д. с. и поток генератора;

$$e'_2 = \beta_2 i_1 w_1; e''_2 = \beta_2 i_c w_c; e'''_2 = \beta_2 i_{ш} w_{ш};$$

$\beta_2 = \frac{e_2}{a w_2}$ — тангенс угла наклона прямолинейной части характеристики холостого хода генератора;

i_2 ; R_2 ; — ток и сопротивление силовой цепи;

$$\sigma = \frac{r_{a2}}{R_2}; \lambda = \frac{r_{a2}}{R_2};$$

r_{a2} — сопротивление якоря генератора;

r_2 — дополнительное сопротивление в силовой цепи;

I_{cm} — ток статической нагрузки;

$\theta = \frac{GD^2 R_2}{375 C_e C_m}$ — электромеханическая постоянная привода;

C_e , C_m — коэффициенты э. д. с. и момента двигателя.

Уравнения (37), (38) и (39) умножаем соответственно

на $\frac{\beta_2 w_1}{R_1}$, $\frac{\beta_2 w_c}{R_c}$, $\frac{\beta_2 w_{ш}}{R_{ш}}$ и затем, учитывая, что $\frac{\beta_2 w_1^2}{R_1} p \Phi =$

$$= T_1 p e_2; \frac{\beta_2 w_c^2}{R_c} p \Phi = T_c p e_2; \frac{\beta_2 w_{ш}^2}{R_{ш}} p \Phi = T_{ш} p e_2, \text{ также (42),}$$

получим в результате алгебраического сложения преобразованных уравнений:

$$u_1 k_1 + \sigma i_2 R_2 k_c - (e_2 - \lambda i_2 R_2) k_{ш} = (1 + T_{1cm} p) e_2, \quad (43)$$

где $k_1 = \frac{\beta_2 w_1}{R_1}$ — передаточный коэффициент генератора от обмотки 1, равный отношению э. д. с. генератора от ампервитков обмотки 1, к напряжению, действующему в этой обмотке;

$k_c = \frac{\beta_2 w_c}{R_c}$; $k_{ш} = \frac{\beta_2 w_{ш}}{R_{ш}}$ — то же от обмоток 3 и 2;

$T_{1cm} = T_1 + T_c + T_{ш}$ — сумма постоянных времени цепей обмоток 1, 3 и 2.

После исключения от уравнений (40), (41) и (43) $C_e n$ и $i_2 R_2$ получим уравнение переходного процесса (1). Уравнение скоростной характеристики определяется из (40) и (43), написанных для установившегося режима.

Приложение II. Для схемы рис. 4 можно написать следующие исходные уравнения с учетом преобразований приложения I

$$u_1 k_0 + \sigma i_2 R_2 k_c - (e_2 - \lambda i_2 R_2) k_{ш} + (e_p - w_p p \Phi_2) k_y = (1 + T_{осшy} p) e_p, \quad (44)$$

$$u_1 k_1 + (e_p - w_y p \Phi_p) k_p = (1 + T_{1p} p) e_2, \quad (45)$$

$$e_2 = i_2 R_2 + C_e n, \quad (46)$$

$$i_2 R_2 = I_{cm} R_2 + \theta p C_e n, \quad (47)$$

где $T_{осшy} = T_0 + T_c + T_{ш} + T_y$ — сумма постоянных времени цепей обмоток регулятора 2, 3, 4, 5; $T_{1p} = T_1 + T_p$ — сумма постоянных времени цепей обмоток генератора 6; $k_y = \frac{\beta_p w_y}{R_p}$; $k_{ш} = \frac{\beta_p w_{ш}}{R_{ш}}$; $k_c = \frac{\beta_p w_c}{R_c}$; $k_0 = \frac{\beta_p w_0}{R_0}$

и $k_1 = \frac{\beta_2 w_1}{R_1}$ — передаточные коэффициенты регулятора; $k_1 = \frac{\beta_2 w_1}{R_1}$

$k_p = \frac{\beta_2 w_p}{R_p}$ — передаточные коэффициенты генератора

$$\beta_p = \frac{e_p}{a w_p}; \beta_2 = \frac{e_2}{a w_2}; w_y; w_{ш}; w_c; w_0; w_1; w_p \text{ — виты}$$

обмоток регулятора и генератора; R_p ; $R_{ш}$; R_c ; R_0 ; R_1 — сопротивления цепей обмоток регулятора и генератора; Φ_p ; Φ_2 — потоки регулятора и генератора.

Учитывая, что $k_p w_p p \Phi_2 = T_p p e_2$; $k_y w_y p \Phi_p = T_y p e_1$ перепишем (44) и (45) в следующем виде:

$$u_1 k_0 = (1 - k_y + T_{осшy} p) e_p + (k_{ш} + \frac{k_y}{k_p} T_p p) e_2 - (\sigma k_c + \lambda k_{ш}) i_2 R_2, \quad (48)$$

$$u_1 k_1 = \left(1 - \frac{T_y}{k_y} p\right) k_p e_p + (1 + T_{1p} p) e_2. \quad (49)$$

Исключаем из (46), (47), (48) и (49) $i_2 R_2$; e_p и учитывая условие регулирования по скорости (5), а также (19), получим (14).

Приложение III. Для схемы рис. 6 можно записать следующие исходные уравнения:

$$u_1 = (i_1 + i_2) R_n + i_1 r + \frac{w_y}{2} p \Phi_p + \frac{w_s}{2} p \Phi_2 + i_3 r_3, \quad (50)$$

$$u_1 = (i_1 + i_2) R_n + 2 i_2 r + e_p - i_3 r_3, \quad (51)$$

$$(e_2 - \lambda i_2 R_2) k_{ш} = \beta_p i_{ш} w_{ш} - T_{ш} p e_p, \quad (52)$$

$$\sigma i_2 R_2 k_c = \beta_p i_c w_c + T_c p e_p, \quad (53)$$

$$e_p = \beta_p i' w_y + \beta_p i_c w_c - \beta_p i_{ш} w_{ш}, \quad (54)$$

$$e_2 = C_e n + i_2 R_2, \quad (55)$$

$$i_2 R_2 = I_{cm} R_2 + \theta p C_e n, \quad (56)$$

$$i_1 = i_2 + i_3, \quad (57)$$

где $r = \frac{r_y + r_s}{2}$ — сопротивление плеча мостика; r_y ; r_s —

сопротивление обмотки 3, 3' и 1', 1''; r_3 — сопротивление цепи регулятора между точками а и b; i_1 ; i_2 — токи в плечах мостика; i_3 — ток в якоре регулятора.

Из уравнения (50) исключаем токи i_2 и i_3 , пользуясь (51) и (57) и произведя далее несложные преобразования получим:

$$u_1 (r + r_3) = i_1 (r + R_n) (r + r_3) 2 - (r + R_n) e_p + (2r + R_n + r_3) \times \left(\frac{w_y}{2} p \Phi_p + \frac{w_s}{2} p \Phi_2 \right). \quad (58)$$

После умножения (58) на $\frac{\beta_2 w_s}{2(r + R_n)(r + r_3)}$ имеем:

$$u_1 k_{s1} = e_2 - e_p k_{s2} + \left[\frac{k_{s1}}{k_{y1}} T_y p e_p + T_s p e_2 \right], \quad (59)$$

где $k_{g1} = \frac{\beta_2 \omega_g}{2(r + R_n)}$ — передаточный коэффициент генератора при питании обмотки его от возбудителя; $k_{g2} = \frac{\beta_2 \omega_g}{2(r + r_3)}$ — то же при питании обмотки от регулятора; $k_{y1} = \frac{\beta_p \omega_y}{2(r + R_n)}$ — передаточный коэффициент регулятора от обмотки 3 при питании ее от возбудителя:

$$T_y = \frac{1}{2} \left[\frac{L_y}{2(r + R_n)} + \frac{L_y}{2(r + r_3)} \right] = \frac{T_{y1} + T_{y2}}{2},$$

T_{y1} — постоянная времени цепи обмотки 3 при питании ее от возбудителя; T_{y2} — то же при питании ее от регулятора:

$$T_g = \frac{1}{2} \left[\frac{L_g}{2(r + R_n)} + \frac{L_g}{2(r + r_3)} \right] = \frac{T_{g1} + T_{g2}}{2},$$

T_{g1} — постоянная времени цепи обмотки 1 при питании ее от возбудителя; T_{g2} — то же при питании ее от регулятора.

Если принять, что при идеальном холостом ходе $E_p = 0$, то $u_1 k_{y1} = E_0 k_{u1}$. Так как $E_0 = u_1 k_{g1}$, то

$$k_{y1} = k_{g1} k_{u1} \quad (60)$$

и аналогично

$$k_{y2} = k_{g2} k_{u1}, \quad (61)$$

где $k_{y2} = \frac{\beta_p \omega_y}{2(r + r_3)}$ — передаточный коэффициент регулятора от обмотки 3 при питании ее от регулятора.

Учитывая (60) и (61) и что $e_z = \beta_2 i_1' \omega_g$, получаем из (52), (53) и (54) следующее равенство:

$$(\sigma k_c + \lambda k_{u1}) i_z R_z = (1 + T_{cu} p) e_p, \quad (62)$$

Пользуясь (55) и (56), исключаем из (62) $i_z R_z$, затем из полученного результата и (59) исключаем e_p :

$$u_1 k_{g1} = (1 + T_g p) e_z - \left(k_{g2} - \frac{T_y}{k_{u1}} p \right) \times \\ \times \frac{\sigma k_c + \lambda k_{u1}}{1 + \theta p} \theta p e_z + \frac{\sigma k_c + \lambda k_{u1}}{1 + \theta p} I_{cm} R_z. \quad (63)$$

◇ ◇ ◇

Далее учитывая условие регулирования по скорости (5), получим уравнение (22).

Приложение IV. При критическом сопротивлении цепи усиливающей обмотки $k_{y2} = \frac{\beta_p \omega_y}{2(r + r_3)} = 1$. Так как $r = \frac{r_y + r_g}{2}$, то

$$\beta_p \omega_y = 2r_3 + r_g + r_y = 2r_3 + r_g + \frac{l_{cp} p}{57 \cdot q_y} (1 + 0,004 T_n) \omega_y, \quad (64)$$

где l_{cp} — средняя длина витка обмотки регулятора в м; q_y — сечение обмотки 3 в мм²; T_n — превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды.

Из (64) получаем (28).

Приложение V. Ампервитки шунтовой обмотки регулятора при номинальном режиме

$$I_{sh} w_{sh} = \frac{E_n - \lambda I_n R_z}{R_{sh}} w_{sh}, \quad (65)$$

где $E_n = E_0 + I_n R_z$ — э. д. с. генератора при номинальной нагрузке.

Уравнение (65) можно переписать так:

$$I_{sh} w_{sh} = E_0 \frac{1 + (1 - \lambda) S_n}{R_{sh}} w_{sh}, \quad (66)$$

где $S_n = \frac{I_n R_z}{E_0}$.

Если учесть, что

$$\frac{R_{sh}}{w_{sh}} = \frac{l_{cp} p}{57 q_{sh}} (1 + 0,004 T_n), \text{ а } I_{sh} = i_s q_{sh},$$

где i_s — плотность тока, то из (66) получаем (31).

Литература

1. А. А. Фельдбаум. Связь устойчивости и статизма в электроприводе с бустер-генератором. ВЭП, № 1, 1946.
2. Д. П. Морозов. Возбуждение электрических машин в схемах электромашиной автоматики. Электричество, № 9, 1948.
3. А. Б. Челюсткин. Рототрол и его применение. Американская техника и промышленность, № 7, 1944.
4. С. Р. Пясецкий. Диссертация, МЭИ, 1948.

[28. 7. 1949]

Аналитическое определение характеристик асинхронного преобразователя частоты

Кандидат техн. наук А. И. АРТЕМЬЕВ

Ивановский энергетический институт им. Ленина

Необходимость работы асинхронных двигателей на повышенной частоте ощущается на многих производствах. Практика заводов деревообрабатывающей, авиационной и автомобильной промышленности показала, что наиболее рациональным является асинхронный преобразователь частоты.

Асинхронный преобразователь частоты по сравнению с другими преобразователями обладает рядом достоинств: 1) простота конструктивных форм; 2) возможность получения на кольцах ротора напряжений широкого диапазона частот; 3) высокие технико-экономические показатели.

Схема установки преобразования частоты дана на рис. 1. Схема замещения отличается от обычной Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя наличием проводимости g_{02} (определение g_{02} см. [Л. 1]), учитывающей возрастание активной составляющей тока холостого хода при скольжении s от потерь в стали ротора, вызываемых основной волной магнитного потока.

Преобразуя мостик холостого хода из проводимостей в мостик из сопротивления Z_0 , возможно, как известно, определить значение вектора тока фазы статора по уравнению

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1(Z'_2 + Z_0 + Z'_n)}{Z_1 Z'_2 + Z_1 Z_0 + Z'_2 Z_0 + Z'_n(Z_1 + Z_{10})}, \quad (1)$$

где $Z_1 = r_1 + jx_1$ — сопротивление фазы статора;
 $Z_0 = r_0 + jx_0$ — сопротивление мостика холостого хода;

$Z'_2 = \frac{r'_2}{s} + jx'_2$ — сопротивление фазы ротора;

$Z'_n = \frac{r'_n}{s} + jx'_n$ — сопротивление нагрузки.

Разделяя вещественную и мнимую части (1), получим выражение для тока статора:

$$I_1 = \frac{B_1 s^2 + B_2 s + B_3 - j(B_4 s^2 + B_5 s + B_6)}{A_1 s^2 + A_2 s + A_3}. \quad (2)$$

На основе аналитического исследования рассматривается расчет асинхронного преобразователя частоты, дающий основные рабочие характеристики.

Вещественные коэффициенты A и B определяются параметрами машины и нагрузочным

сопротивлением цепи ротора:

$$A_1 = r_0^2 (x_1 + x'_2 + x'_n)^2 + [x_0 x_1 + x_1 (x'_2 + x'_n) + x_0 (x'_2 + x'_n)]^2 + 2r_0 r_1 (x'_2 + x'_n)^2 + r_1^2 [r_0^2 + (x_0 + x'_2 + x'_n)^2],$$

$$A_2 = 2(r'_2 + r'_n)[(r_0 + r_1)^2 r_1 + r_0(x_0 + x_1)^2],$$

$$A_3 = (r'_2 + r'_n)^2 [(r_0 + r_1)^2 + (x_0 + x_1)^2],$$

$$B_1 = r_0(r'_2 + r'_n)^2 + r_1[r_0^2 + (x_0 + x'_2 + x'_n)^2],$$

$$B_2 = (r'_2 + r'_n)(r_0^2 + 2r_0 r_1 + x_0^2),$$

$$B_3 = (r'_2 + r'_n)^2 (r_0 + r_1),$$

$$B_4 = r_0^2 (x_1 + x'_2 + x'_n) + (x_0 + x'_2 + x'_n) \times [x_1 x_0 + x_1 (x'_2 + x'_n) + x_0 (x'_2 + x'_n)],$$

$$B_5 = 2r_0 x_1 (r'_2 + r'_n),$$

$$B_6 = (r'_2 + r'_n)^2 (x_1 + x_0),$$

$$B_7 = (r'_2 + r'_n) (r_0^2 + x_0^2).$$

Направив $\dot{U}_1$ по оси вещественных количеств из формулы (2) возможно определить коэффициент мощности фазы статора:

$$\cos \varphi_1 = \frac{B_1 s^2 + B_2 s + B_3}{\sqrt{(B_1 s^2 + B_2 s + B_3)^2 + (B_4 s^2 + B_5 s + B_6)^2}}. \quad (3)$$

Мощность, поступающая в статор из сети:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \frac{3U_1^2 (B_1 s^2 + B_2 s + B_3)}{A_1 s^2 + A_2 s + A_3}. \quad (4)$$

Мощность, поступающая в преобразователь с вала приводного двигателя:

$$P_m = \left(1 - \frac{1}{s}\right) [P_{02} + 3I_2'^2 (r'_2 + r'_n)] + P_{mec} + P_{доб}. \quad (5)$$

где P_{02} —мощность потерь в стали ротора преобразователя при $s=1$;
 $P_{мех}$ —мощность механических потерь;
 $P_{доб}$ —мощность добавочных потерь (поверхностные и пульсационные потери от зубчатости и полных токов паза).
 Ток фазы ротора, приведенный к обмотке статора:

$$I_2' = U_1 s \sqrt{\frac{B_7}{(A_1 s^2 + A_2 s + A_3)(r_2' + r_n')}} \quad (6)$$

Полезная активная мощность ротора

$$P_2 = 3 I_2'^2 r_n' = \frac{3 U_1^2 s^2 B_7 r_n}{(A_1 s^2 + A_2 s + A_3)(r_2' + r_n')} \quad (7)$$

Зная мощности P , P_2 и P_m , находим к. п. д. преобразователя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_m} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \quad (8)$$

где ΣP —суммарная мощность потерь.

Если в схеме замещения рис. 1 выделить нагрузочные сопротивления r_n' и x_n' , то приведенное напряжение на зажимах нагрузки

$$U_2' = \frac{I_2'}{s} \sqrt{r_n'^2 + x_n'^2 s^2} \quad (9)$$

Потеря напряжения в преобразователе

$$\Delta U = U_1 - U_2' \quad (10)$$

$$\Delta U \% = \frac{U_1 - U_2'}{U_1} 100 \quad (11)$$

Полная мощность нагрузки

$$P_{2\text{квa}} = \frac{P_2 \cdot 10^{-3}}{\cos \varphi_2} \quad (12)$$

где $\cos \varphi_2$ —коэффициент мощности нагрузки.

Отношение полной мощности статора к полной мощности нагрузки может быть определено по формуле

$$\gamma = \frac{P_{1\text{квa}}}{P_{2\text{квa}}} = \frac{P_1 \cos \varphi_2}{P_2 \cos \varphi_1} \quad (13)$$

Зная $P_{2\text{квa}}$ и γ , определяем $P_{1\text{квa}}$, которая, как известно, служит отправным пунктом для расчета асинхронной машины. Таким образом, расчет преобразователя может быть сведен к расчету обычного асинхронного двигателя [Л.1].

Коэффициент γ с достаточным приближением может быть определен из графика рис. 2. Для анализа рабочих характеристик иногда требуется определить сопротивление нагрузки для заданной машины по известным значениям

$$s, \varphi_2, U_1 \text{ и } P_2.$$

Для этого в уравнении (9) вместо x_n' подставим его выражение через r_n' по формуле

$$x_n' = r_n' \operatorname{tg} \varphi_2 \quad (14)$$

и решим его относительно r_n' .

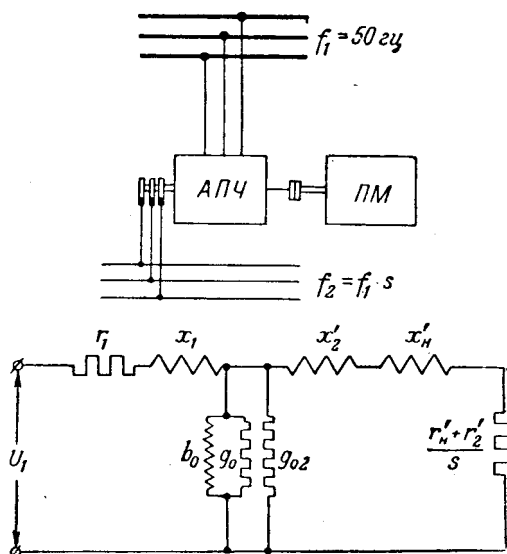


Рис. 1. Схема замещения преобразователя.

Принимая во внимание значение B_7 , уравнение (7) возможно записать:

$$P_2 = \frac{3 U_1^2 s^2 r_n' (r_0^2 + x_0^2)}{A_1 s^2 + A_2 s + A_3} \quad (7')$$

С учетом (14) коэффициенты A_1 , A_2 и A_3 примут значение:

$$\begin{aligned} A_1 = & r_n' \operatorname{tg}^2 \varphi_2 [r_0^2 + (x_1 + x_0)^2 + 2 r_0 r_1 + r_1^2] + \\ & + r_n' \operatorname{tg} \varphi_2 [2 r_0^2 (x_1 + x_2') + 2 (x_0 x_1 + x_1 x_2' + x_0 x_2') \times \\ & \times (x_1 + x_0) + 2 r_1^2 (x_0 + x_2')] + r_0^2 (x_1 + x_2')^2 + \\ & + (x_0 x_1 + x_1 x_2' + x_0 x_2')^2 + 2 r_0 r_1 x_2'^2 + r_1^2 r_0^2 + \\ & + r_1^2 (x_0 + x_2')^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_2 = & 2 r_n' [(r_0 + r_1)^2 r_1 + r_0 (x_0 + x_1)^2] + \\ & + 2 r_2' [(r_0 + r_1)^2 r_1 + r_0 (x_0 + x_1)^2], \\ A_3 = & r_n'^2 [(r_0 + r_1)^2 + (x_0 + x_1)^2] + \\ & + 2 r_n' r_2 [(r_0 + r_1)^2 + (x_0 + x_1)^2]. \end{aligned}$$

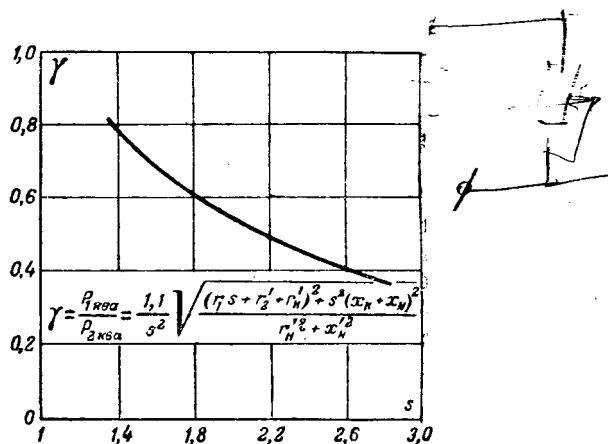


Рис. 2. Коэффициент γ в функции от скольжения.

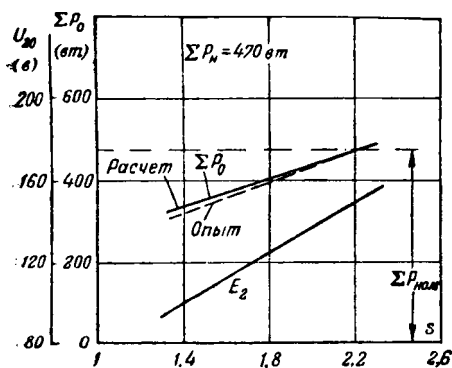


Рис. 3. Характеристики холостого хода преобразователя.

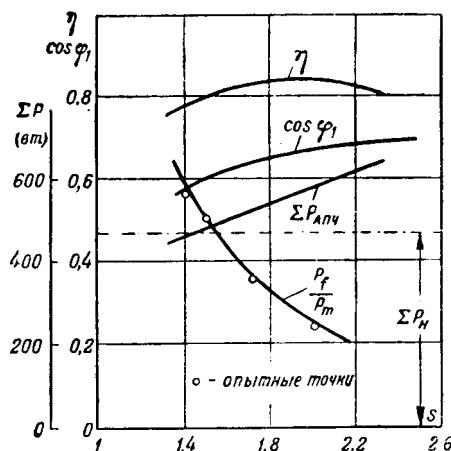


Рис. 4. Нагрузочные характеристики преобразователя (машина МКА-13).

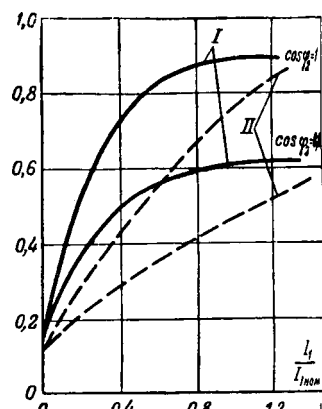


Рис. 5. Коэффициент мощности преобразователя для машин МКА-13 (II) и МКПР 15/4 (I).

Произведя подстановку A_1 , A_2 и A_3 в формулу (7'), после небольших преобразований получим уравнение для определения r'_n :

$$Cr_n'^2 + Dr_n' + F = 0, \quad (15)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} C &= s^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_2 [r_0'^2 + (x_1 + x_0)^2 + 2r_0 r_1 + r_1'^2] + \\ &\quad + (r_0 + r_1)^2 + (x_0 + x_1)^2, \\ D &= [2r_0^2 (x_1 + x_2') + 2(x_0 x_1 + x_1 x_2' + x_0 x_2') \times \\ &\quad \times (x_1 + x_0) + 2r_1^2 (x_0 + x_2') + 2s^2 \operatorname{tg} \varphi_2 + \\ &\quad + [(r_0 + r_1)^2 r_1 + r_0 (x_0 + x_1)^2] s + \\ &\quad + 2r_2' [(r_0 + r_1)^2 + (x_0 + x_1)^2] - \frac{3U_1^2 s^3 (r_0^2 + x_0^2)}{P_2}, \\ F &= s^2 [r_0^2 (x_1 + x_2')^2 + (x_0 x_1 + x_1 x_2' + x_0 x_2')^2 + \\ &\quad + 2r_0 r_1 x_2'^2 + r_1^2 r_0^2 + r_1^2 (x_0 + x_2')^2] + \\ &\quad + 2r_2' s [(r_0 + r_1)^2 r_1 + r_0 (x_0 + x_1)^2]. \end{aligned}$$

Обозначив $\frac{D}{C} = M$; $\frac{F}{C} = N$, получим окончательное уравнение для определения r'_n :

$$r_n'^2 + Mr_n' + N = 0. \quad (16)$$

Корни этого уравнения

$$r_n' = -\frac{M}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 - N}. \quad (17)$$

Приведенные аналитические зависимости полностью определяют основные рабочие характеристики преобразователя.

Расчетные и опытные характеристики преобразователя. В целях подтверждения изложенных аналитических зависимостей были проведены опыты с машиной МКА-13 в режиме преобразователя частоты по схеме рис. 1.

На основе параметров двигателя для каждого значения скольжения s возможно точным образом были определены потери в режиме холосто-

го хода и затем был проведен опыт холостого хода. Данные расчета и опыта представлены в рис. 3 в виде графика мощности потерь в преобразователе и э. д. с. ротора в функции от скольжения. Анализ этого графика подтверждает, что в машинах нормального насыщения потери холостого хода возрастают пропорционально скольжению. Для этого режима интересно отметить, что при скольжении $s > 2,2$ мощность потерь холостого хода превосходит номинальные потери этой машины в режиме двигателя. Это показывает, что асинхронная машина с значительными электромагнитными нагрузками становится неэкономичной в режиме преобразователя.

В ротор исследуемого преобразователя была включена симметричная звезда сопротивлений и исследовалась зависимость суммарных потерь ΣP , отношения мощностей $\frac{P_1}{P_m}$, $\cos \varphi_1$ и к. п. д. преобразователя η от скольжения и тока нагрузки ($\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 1$).

Опыты были проведены с двумя машинами: МКА-13 — машина нормального насыщения ($B_1 = 7000$ гс), МКПР 15/4 — машина малого насыщения ($B_1 = 5000$ гс).

Анализ графиков рис. 4 и 5, полученных опытным путем, позволяет сделать следующие выводы: 1) максимальный к. п. д. преобразователя для хорошо использованных машин находится в пределах значений скольжения от 1,8 до 2,2; 2) потери в преобразователе возрастают пропорционально скольжению; 3) подтверждает строгая гиперболическая зависимость мощности поступающей из статора в преобразователь от скольжения; 4) уменьшение насыщения стали (или применение стали с высокими значениями проницаемости) благоприятно отражается на характере кривой $\cos \varphi_1 = \psi(I_1)$ и дает более высокое значение экономического коэффициента $\eta \cos \varphi_1$.

Литература

1. А. И. Артемьев. Асинхронный преобразователь частоты. Диссертация МЭИ, 1948.

[25. 7. 19]

Простой способ получения выражений векторов электрического и магнитного поля через магнитный и электрический векторы Герца

Кандидат техн. наук, доц. С. В. СТРАХОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В теории распространения радиоволн довольно широко применяется метод интегрирования уравнений Максвелла, основанный на введении магнитного и электрического вектора Герца, являющегося некоторым обобщением электродинамических запаздывающих потенциалов φ и $\vec{A}$. Известно, что электромагнитное поле электрического диполя, в простейшем случае небольшого стерженька, в середине которого включен высокочастотный генератор (рис. 1), называемого также электрическим излучателем, выражается через так называемый электрический вектор Герца, параллельный оси этого диполя. В возбуждении этого поля первичную роль играют электрические заряды и их электрические моменты. Электромагнитные волны, испускаемые электрическим диполем, часто называют электрическими волнами.

Известно далее, что электромагнитное поле магнитного диполя, в простейшем случае элементарной рамки или петельки, питаемой высокочастотным генератором (рис. 2), называемой также магнитным излучателем, выражается через так называемый магнитный вектор Герца, параллельный оси этой рамки. Магнитный вектор Герца несколько отличается от электрического вектора Герца характером своей связи с векторами электрического и магнитного поля. В данном случае первичная роль принадлежит электрическому току и его магнитному моменту. Электромагнитные волны, испускаемые магнитным диполем, часто называют магнитными волнами.

Введение вектора Герца имеет еще и то преимущество, что электромагнитный процесс ($\vec{E}$ и $\vec{B}$) определяется изменением во времени

Показано, каким образом можно вполне строго и вместе с тем достаточно просто, исходя из системы уравнений Максвелла, получить выражения векторов электрического и магнитного поля через магнитный вектор Герца для поля магнитного диполя и те же выражения через электрический вектор Герца для поля электрического диполя. Магнитный и электрический моменты соответствующих диполей предполагаются изменяющимися во времени по произвольному закону. Пространство, окружающее диполи, характеризуется удельной проводимостью, электрической и магнитной проницаемостями; объемные заряды в нем предполагаются отсутствующими. Указаны ошибки, которые иногда делаются при формальном получении поля магнитного диполя из поля электрического диполя и наоборот.

и в пространстве только одного этого вектора. Стало быть, устраняется двойственность, которая имеет место в общем случае при описании электромагнитного процесса с помощью скалярного и векторного потенциалов φ и $\vec{A}$.

Рассмотрим сначала поле магнитного диполя. Нас будет интересовать поле во всем бесконеч-

ном пространстве за исключением лишь области, непосредственно прилегающей к началу координат, внутри которой мы и поместим магнитный диполь. Предположим, что окружающее пространство однородно и характеризуется материальными константами γ , ϵ , μ , т. е. в нем могут возникать наряду с токами смещения также и токи проводимости. Кроме того, предположим, что ток элементарной рамки, а следовательно, и ее магнитный момент изменяются во времени по произвольному закону. Как обычно при рассмотрении поля магнитного диполя, предположим, что окружающее бесконечное пространство лишено объемных электрических зарядов ($\rho=0$), т. е. что в нем будут существовать только замкнутые токи проводимости, а стало быть, и только замкнутые токи смещения. При этих

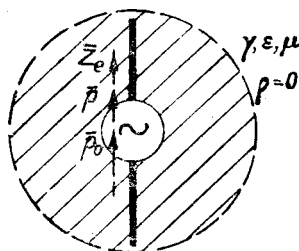


Рис. 1. Электрический диполь.

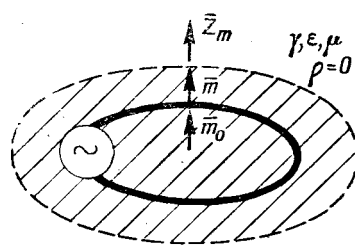


Рис. 2. Магнитный диполь.

Будем исходить из уравнений (3), (4) и (1). Как и для магнитного диполя, чтобы удовлетворить уравнениям (3) и (4), достаточно принять, что векторы $\bar{B}$ и $\bar{E}$ являются в свою очередь роторами от вектора $\bar{Z}_e$, взятыми один или, в общем случае, несколько раз.

Далее, чтобы тождественно удовлетворить уравнению (1), во-первых, в составе $\bar{B}$ должен быть член, зависящий от $\frac{\partial \bar{Z}_e}{\partial t}$ и учитывающий магнитное поле токов смещения, и во-вторых, член, зависящий от $k\gamma \bar{Z}_e$ и учитывающий магнитное поле токов проводимости. Здесь коэффициент k введен только для удовлетворения требований размерности. В соответствии со сказанным выше полагаем:

$$\bar{B} = \text{rot} \left(\frac{\partial \bar{Z}_e}{\partial t} + k\gamma \bar{Z}_e \right). \quad (15)$$

Поскольку оба члена в скобке должны иметь одинаковую размерность, из соотношения

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} \right] = [k\gamma] \quad (16)$$

устанавливаем, что

$$[k] = \left[\frac{1}{\phi/\text{см}} \right] = \frac{1}{[\epsilon]}. \quad (17)$$

Стало быть, естественно положить:

$$k = \frac{1}{\epsilon}, \quad (18)$$

и соотношение (15) переписывается в виде:

$$\bar{B} = \text{rot} \left(\frac{\partial \bar{Z}_e}{\partial t} + \frac{\gamma}{\epsilon} \bar{Z}_e \right). \quad (19)$$

Обращаясь теперь к уравнению (1), в соответствии со сказанным выше заключаем, что поскольку

в левую часть (1) уже входит $\text{rot} \frac{\bar{B}}{\mu}$, $\bar{B}$ должно определяться именно однократно взятым ротором от суммы $\frac{\partial \bar{Z}_e}{\partial t} + \frac{\gamma}{\epsilon} \bar{Z}_e$, в то время как $\bar{E}$

должно быть равно двукратно взятому ротору только от $\bar{Z}_e$, ибо временная производная от $\bar{E}$, а стало быть и от $\bar{Z}_e$, уже имеется в правой части (1). Поэтому

$$\bar{E} = k_1 \text{rot rot } \bar{Z}_e, \quad (20)$$

где коэффициент k_1 введен только для удовлетворения требований размерности. На основании этого можно написать:

$$[\bar{E}] = [k_1 \text{rot rot } \bar{Z}_e], \quad (21)$$

откуда

$$[k_1] = [\text{см}^2/\text{сек}^2] = [v^2] = \left[\frac{1}{\epsilon\mu} \right]. \quad (22)$$

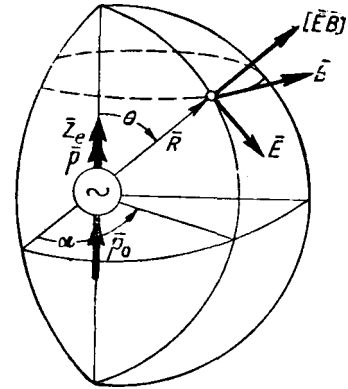


Рис. 4. Начало сферической системы координат находится в центре электрического диполя.

Поэтому окончательно

$$\bar{E} = \frac{1}{\epsilon\mu} \text{rot rot } \bar{Z}_e. \quad (23)$$

Подставляя выражения $\bar{E}$ и $\bar{B}$ из (23) и (19) в уравнение (1), легко убедиться, что последнее тождественно удовлетворяется.

Остается определить, какому уравнению удовлетворяет сам вектор $\bar{Z}_e$. Для этого нужно только подставить выражения $\bar{E}$ и $\bar{B}$ из (23) и (19) в уравнение (2). После простых преобразований получим:

$$\text{rot}(\nabla^2 \bar{Z}_e) = \text{rot} \left(\gamma\mu \frac{\partial \bar{Z}_e}{\partial t} + \epsilon\mu \frac{\partial^2 \bar{Z}_e}{\partial t^2} \right). \quad (24)$$

Отсюда, как простейший результат, получаем:

$$\nabla^2 \bar{Z}_e - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \bar{Z}_e}{\partial t^2} - \gamma\mu \frac{\partial \bar{Z}_e}{\partial t} = 0, \quad (25)$$

т. е. в случае учета проводимости среды γ электрический вектор Герца должен удовлетворять телеграфному уравнению.

Пренебрегая теперь, как обычно, проводимостью среды ($\gamma=0$), из (25) получим:

$$\nabla^2 \bar{Z}_e = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \bar{Z}_e}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \bar{Z}_e}{\partial t^2}. \quad (26)$$

Сферически-симметричным решением этого уравнения, если рассматривать только волну, движущуюся от центра, расположить начало сферической системы координат в центре электрического диполя (рис. 4), направить вектор электрического момента диполя $\bar{p}$ вдоль полярной оси и считать, что вектор $\bar{Z}_e$ параллелен $\bar{p}$ и им определяется, является, как известно, выражение

$$\begin{aligned} \bar{Z}_e &= \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{4\pi R v} f\left(t - \frac{R}{v}\right) \bar{p}_0 = \\ &= \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\bar{p}\left(t - \frac{R}{v}\right)}{4\pi R v}. \end{aligned} \quad (27)$$

где $\vec{p}_0$ — постоянный вектор, характеризующий электрический момент диполя и параллельный его оси. Предполагая $\vec{p}(t - \frac{R}{v})$ изменяющимся по закону синуса

$$\vec{p}(t - \frac{R}{v}) = \vec{p}_0 \text{Im} \left[e^{j\omega(t - \frac{R}{v})} \right] \quad (28)$$

и интересуясь полем в волновой зоне, пользуясь формулами (28), (27), (19) и (26), после ряда преобразований получим известные формулы

$$E_R = E_a = B_R = B_\theta = 0, \quad (29)$$

$$E_\theta = \frac{\sin \theta}{4 \pi \epsilon R v^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(t - \frac{R}{v}) = - \frac{\omega^2 \sin \theta}{4 \pi \epsilon R v^2} \sin \omega \times (t - \frac{R}{v}) p_0, \quad (30)$$

$$B_a = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\sin \theta}{4 \pi R v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(t - \frac{R}{v}) = \sqrt{\epsilon \mu} E_\theta. \quad (31)$$

Таким образом, при установлении выражений $\vec{E}$ и $\vec{B}$ через $\vec{Z}_m$ и $\vec{Z}_e$ [формулы (5), (6), (19) и (23)] мы их не „угадываем“, а вводим в результате точного анализа системы максвелловых уравнений.

Итак, мы получили окончательно следующие выражения:

Для магнитного диполя:

$$\vec{B} = \text{rot rot } \vec{Z}_m, \quad (6)$$

$$\vec{E} = \text{rot} \left(-\frac{\partial \vec{Z}_m}{\partial t} \right), \quad (5)$$

Для электрического диполя

$$\vec{B} = \text{rot} \left(\frac{\partial \vec{Z}_e}{\partial t} + \frac{\gamma}{\epsilon} \vec{Z}_e \right), \quad (19)$$

$$\vec{E} = \frac{1}{\epsilon \mu} \text{rot rot } \vec{Z}_e. \quad (23)$$

Анализируя эти выражения, видим, что нельзя утверждать, как это иногда встречается в литературе, что при переходе от магнитного диполя к электрическому $\vec{B}$ и $\vec{E}$ в их выражениях через $\vec{Z}_m$ и $\vec{Z}_e$ „до известной степени“ поменялись местами. Также нельзя говорить, что $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в волновой зоне магнитного диполя (при равенстве $p = \sqrt{\epsilon \mu} m$) получаются из соответствующих выражений для электрического диполя заменой $\vec{E}$ на $-\vec{B}$ и $\vec{B}$ на $-\vec{E}$ [Л. 1]. Можно лишь утверждать, что при пренебрежении проводимостью среды ($\gamma=0$) для волновой зоны E_a магнитного диполя получается из B_a электрического диполя заменой p на $\sqrt{\epsilon \mu} m$ и умножением его на $\frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$ с изменением знака. В то же время для волновой зоны B_θ магнитного диполя получается из E_θ электрического диполя заменой p на $\sqrt{\epsilon \mu} m$ и умножением его на $\sqrt{\epsilon \mu}$ без изменения знака.

Сказанное запишем так:

$$\left. \begin{aligned} E_{a \text{ магн. дип}} &= -\frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} B_{a \text{ эл. дип}} \\ B_{\theta \text{ магн. дип}} &= \sqrt{\epsilon \mu} E_{\theta \text{ эл. дип}} \end{aligned} \right\} \text{при } p = \sqrt{\epsilon \mu} m \text{ и } \gamma=0 \quad (32)$$

Литература

1. И. Е. Тамм. Основы теории электричества. Гостехиздат, стр. 497, 1946.

[14-5-88]



Графический метод расчета переходных процессов в асинхронном двигателе

Кандидат техн. наук В. А. ШУБЕНКО

инж. И. С. ПИНЧУК

Рассмотрению электромагнитных переходных процессов, обусловленных коммутационными процессами в статорной цепи (включение, переключение, короткое замыкание), при условии постоянства скорости вращения ротора посвящено сравнительно много работ, особенно в последнее время.

Слабее изучены имеющие существенный практический интерес вопросы влияния переходных электромагнитных процессов на динамику асинхронного двигателя и, наоборот, влияние изменения скорости на характер протекания электромагнитных переходных процессов. Некоторые вопросы из этой области были исследованы на интеграле [Л. 5] для частных случаев.

Первые попытки аналитического исследования имеются в работах Е. Я. Казовского [Л. 1] и Л. И. Столова [Л. 4]. Столов рассматривает влияние электромагнитных переходных процессов, вызванных включением, на динамику пуска короткозамкнутого двигателя. Переходные процессы, обусловленные резким изменением скорости двигателя, затронуты в работе Казовского [Л. 1]. Автор определяет моменты, развиваемые двигателем при линейном изменении скорости, пользуясь при этом предложенным комплексным изображением переменных. Этот метод, облегчающий запись и в ряде случаев решение дифференциальных уравнений, при рассмотрении конкретных задач требует, однако, большого числа достаточно сложных вычислений, снижающих точность расчета при большой затрате времени.

Излагаемый графический метод расчета переходных процессов, вызванных резким изменением скорости (приложение переменной нагрузки, отдельные периоды пусковых и тормозных режимов и др.), дает возможность полностью использовать преимущества комплексного (векторного) изображения переменных. При симметричном приложенном напряжении расчет базируется на обычной круговой диаграмме двига-

Рассмотрены переходные процессы в асинхронном двигателе с одной обмоткой на роторе, вызванные резким изменением скорости. При исследовании непрерывное изменение скорости заменяется ступенчатым, что позволяет для каждого участка использовать закономерности, справедливые при постоянной скорости, применить метод последовательных интервалов и полностью использовать преимущество комплексного изображения переменных.

теля без привлечения дополнительных данных.

Очевидно, влияние изменения скорости проявляется только при малых скольжениях, так как это приводит к резкому изменению токов

как по величине, так и по фазе и, следовательно, влечет за собой появление переходных токов.

При исследовании процесса непрерывное изменение скорости заменяется ступенчатым. Это дает возможность для каждого участка использовать закономерности, справедливые при постоянстве скорости, и весь расчет вести методом последовательных интервалов.

Уравнения, описывающие переходные процессы при постоянной скорости в двигателе с одной обмоткой на роторе и в отсутствии токов в обмотках статора и ротора в момент включения, приведены в литературе [Л. 2].

При решении задачи методом последовательных интервалов необходимо учитывать неравные нулю начальные для каждого интервала значения токов. В связи с этим уравнения, описывающие переходный процесс, должны быть дополнены членами, содержащими i_{s0} и i_{r0} , и окончательно в операторной форме и системе относительных единиц примут вид:

$$U = [r_s + x_s(p + j)] i_s + x_m(p + j) i_r - x_s p i_{s0} - x_m p i_{r0}, \quad (1a)$$

$$0 = [r_r + x_r(p + js)] i_r + x_m(p + js) i_s - x_r p i_{r0} - x_m p i_{s0}, \quad (16)$$

где x_s и x_r — полные реактивные сопротивления статорной и роторной обмоток,
 x_m — реактивное сопротивление взаимной индукции, выраженные в относительных единицах;
 i_{s0} и i_{r0} — токи в статорной и роторной обмотках при $t=0$.

Решая их относительно i_s , получим:

$$i_s = \frac{\frac{U}{x_s \sigma} (p + a_r + js) + p \left[i_{s0} (p + a'_r + j - j \frac{\omega}{\delta}) + \frac{x_m}{x_s} i_{r0} (a'_r - j \frac{\omega}{\sigma}) \right]}{p^2 + p [a'_s + a'_r + j(1+s)] + a'_s a'_r \sigma - s + j(a'_r + a'_s s)}, \quad (2)$$

где $\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_s x_r}$ — полный коэффициент рассеяния;

$$a'_s = \frac{r_s}{x_s \sigma}; \quad a'_r = \frac{r_r}{x_r \sigma}$$

или, переходя от $i_s(p)$ к $i_s(t)$:

$$i_s(t) = i_{sy} + C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t}. \quad (3)$$

Следовательно, статорный ток в общем случае помимо установившегося значения имеет две составляющие переходного тока. Значение i_{sy} получается подстановкой в уравнение (2) $p=0$, а постоянные C_1 и C_2 получаются автоматически при преобразовании $i_s(p)$ в $i_s(t)$ по теореме разложения Хевисайда:

$$C_1 = (i_{s0} - i_{sy}) \frac{p_1 + a'_r + j - j\omega/\delta}{p_1 - p_2} + (i_{r0} - i_{ry}) \frac{x_m}{x_s} \cdot \frac{a'_r - j\omega/\delta}{p_1 - p_2}, \quad (4)$$

$$C_2 = -(i_{s0} - i_{sy}) \frac{p_2 + a'_r + j - j\omega/\delta}{p_1 - p_2} - (i_{r0} - i_{ry}) \frac{x_m}{x_s} \cdot \frac{a'_r - j\omega/\delta}{p_1 - p_2}, \quad (5)$$

где в свою очередь коэффициенты p_1 и p_2 определяются из соотношения [Л. 2]

$$p_{1,2} = \frac{1}{2} [-(a'_s + a'_r) - j(1+s) \pm \sqrt{(a'_s - a'_r)^2 + j\omega^2 + 4(1-\sigma)a'_s a'_r}]. \quad (6)$$

При больших скоростях вторая составляющая сравнительно мала и тем меньше, чем меньше сопротивление статорной обмотки r_s . Пренебрегая сопротивлением r_s , влияние которого в данном случае мало, будем иметь:

$$p_1 = -a'_r - js, \quad (7)$$

$$p_2 = -j \quad (8)$$

и потокосцепления статорной обмотки¹

¹ Соотношение $\psi_s = \text{const}$ при $r_s = 0$ справедливо только при отсутствии коммутационных процессов в статоре, когда переходный процесс, обусловленный изменением скорости, начинается при установившемся значении потокосцеплений статора $\psi_{s0} = \frac{U}{j}$. Записывая уравнение (1a) в форме $U = (p + j) \psi_s - p \psi_{s0}$, где $\psi_s = x_s i_s + x_m i_r$; $\psi_{s0} = x_s i_{s0} + x_m i_{r0}$, найдем: $\psi_s = \frac{U + p \psi_{s0}}{p + j}$, или, подставляя $\psi_{s0} = \frac{U}{j}$: $\psi_s = \frac{U + p \frac{U}{j}}{p + j} = \frac{U}{j} = \psi_{s0} = \text{const}$.

$$\begin{aligned} \psi_s &= x_s i_s + x_m i_r = x_s i_{s0} + x_m i_{r0} = \\ &= x_s i_{sy} + x_m i_{ry} = \text{const}. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$(i_{s0} - i_{sy}) = -\frac{x_m}{x_s} (i_{r0} - i_{ry}). \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в (4) и (5), получим:

$$C_1 = i_{s0} - i_{sy}; \quad C_2 = 0. \quad (10)$$

Таким образом, при отсутствии активного сопротивления в статоре ($r_s = 0$) имеется только одна составляющая переходного тока, вращающаяся вместе с ротором и затухающая с постоянной времени $T = \frac{1}{a'_s}$.

Так как [Л. 3] $s_k = a_r \sqrt{\frac{a_s^2 + 1}{a_s^2 + \sigma^2}}$ и при $a_s = s_k = \frac{a_r}{\sigma} = a'_r$, то $T = \frac{1}{s_k}$, где критическое скольжение s_k легко определяется по круговой диаграмме.

Известно, что круговая диаграмма дает значения установившихся токов двигателя при различных скольжениях в синхронно вращающихся координатах². Следовательно, переходная составляющая на круговой диаграмме должна вращаться со скоростью скольжения по часовой стрелке при $s > 0$ и против часовой стрелки при $s < 0$ (рис. 1). Постоянная $C_1 = i_{s0} - i_{sy}$ на круговой диаграмме определяется, очевидно, отрезком $a_{i-1} b_i$.

² В такой трактовке круговая диаграмма дает пространственную, а не временную картину.

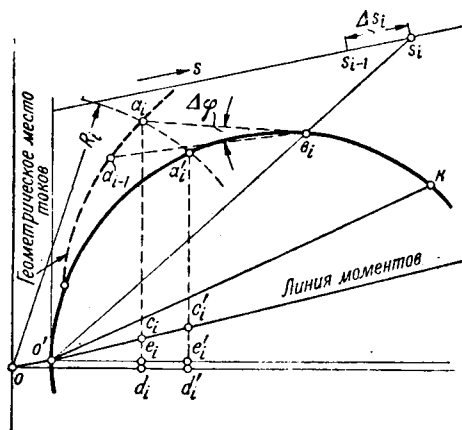


Рис. 1.

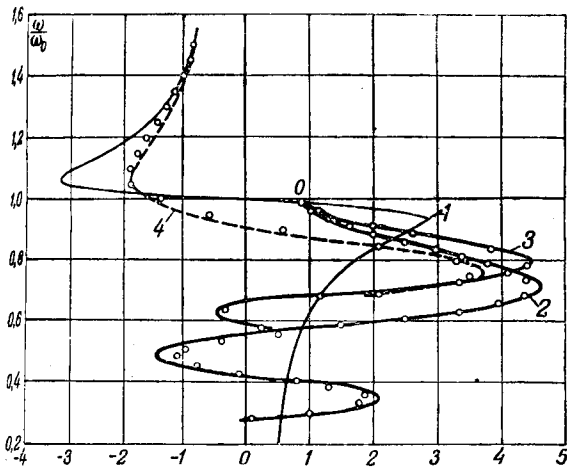


Рис. 2.

К началу следующего отрезка времени переходная составляющая затухнет до величины $-z_r \Delta t$

$a_i b_i = a_{i-1} b_i e^{-z_r \Delta t}$ и повернется на угол $\Delta \varphi_i = s_i \Delta t$. Ток статора к началу следующего участка будет определяться отрезком Oa_i .

Вращающий момент двигателя при отсутствии сопротивления в статоре определяется электромагнитной мощностью — отрезком $a_i e_i$.

Влияние³ электрических потерь в статоре на вращающий момент можно учесть посредством следующего приближенного метода: если $Oa_i = Oa_i'$, то отрезок $C_i e_i'$ и дает, очевидно, искомые потери. Вращающий момент будет определяться приближенно разностью отрезков $a_i \cdot e_i - c_i' \cdot e_i'$ или $a_i \cdot d_i - c_i' \cdot d_i'$.

Зная момент двигателя, легко найти, пользуясь уравнением движения, приращение скольжения для следующего интервала времени.

Примеры и эксперимент. Для иллюстрации точности предлагаемого метода было проведено несколько расчетов переходных режимов двигателя с $x_s = x_r = 3,07$, $x_m = 2,99$, $r_s = r_r = 0,01$, исследованных ранее на интеграле [Л. 5]. На рис. 2. представлены кривые, полученные на интеграле с нанесением точек, рассчитанных по вышеизложенному методу. Кривая 1 — статическая характеристика; кривая 2 соответствует замедлению от $s = 0,01$ с постоянным изменением скорости на 1 за 6 периодов; кривая 3 — при замедлении, соответствующем изменению скорости на 1 за 12 периодов; кривая 4 — при замедлении от $s = 1,5$ с постоянным изменением скорости на 1 за 12 периодов. Совпадение результатов можно считать вполне удовлетворительным.

На рис. 3 приведен расчет четырех первых (от точки 0) точек для режима, изображенного на рис. 2 кривой 3. При $t = 0$ двигатель работал в установившемся режиме при скольжении $s = 1\%$. В этом режиме ток в статорной обмотке I_{s0} определяется на круговой диаграмме отрезком oa_0 . Длительность одного интервала выбрана равной $\Delta t = 1,884$ радian. За этот интервал времени скольжение изменится на $\frac{100}{12} \cdot 1,884 = 2,5\%$.

³ Казовский [Л. 1] учитывает влияние статорного сопротивления прибавлением разности статических моментов, развиваемых двигателем при данном скольжении, подсчитанных с учетом сопротивления статора и без него. Это дает погрешность тем большую, чем больше действительный ток статора отличается от статического при данном скольжении.

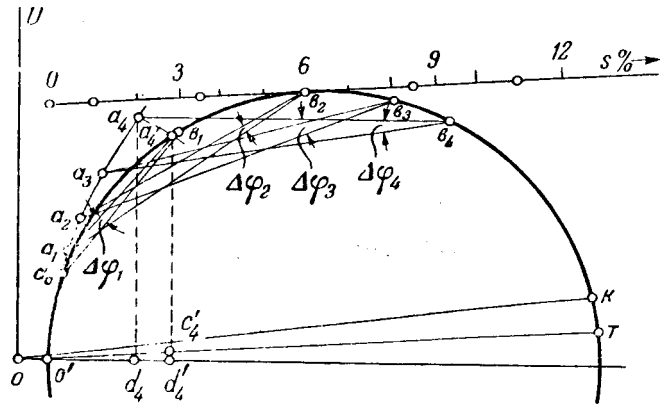


Рис. 3.

К концу первого интервала скольжение $s_1 = 3,5\%$. Установившийся ток статора при этом скольжении определится на круговой диаграмме вектором ob_1 . Следовательно, для первого интервала постоянная $C_1 = i_{s0} - i_{sy}$ определяется вектором $b_1 a_0$. Для нахождения точки a_1 необ-

ходимо вектор $b_1 a_0$ уменьшить в отношении $e^{-z_r \Delta t} = e^{-0,0315 \cdot 1,884} = 0,89$ и повернуть на угол $\Delta \varphi_1 = s_1 \Delta t$ радian $= s_1 \cdot 108^\circ = 2,4^\circ$ (для большей точности в расчете принимается среднее на участке скольжение $s_{cp} = \frac{s_0 + s_1}{2} = \frac{1,0 + 3,5}{2} = 2,25\%$). В конце первого участ-

ка ток в статоре определяется вектором oa_1 , он же является начальным током для следующего, второго участка. К концу второго участка скольжение $s_2 = 6\%$. Соответственно этому установившийся ток статора на втором участке определяется вектором ob_2 , а постоянная C_1 — вектором $b_2 a_1$ и т. д.

Данные расчета по четырем точкам сведены в таблицу. Чтобы не затемнять рисунок, определение момента двигателя показано только для четвертой точки (рис. 3).

	$i = 1$	2	3	4
$s_i, \%$	3,5	6	8,5	11
$\Delta \varphi_i, \text{град}$	2,4	5	7,5	10
M_i	1,16	1,48	1,85	2,60

Ниже приводятся результаты экспериментального исследования электромеханических переходных процессов в асинхронном двигателе. На рис. 4 представлена осциллограмма пуска двигателя АД-31/6 со следующими данными ($P = 1,2 \text{ кат}$, $n = 960 \text{ об/мин}$, $U = 500 \text{ в}$ (χ), $x_s = 240 \text{ ом}$, $x_r = 230 \text{ ом}$, $x_m = 220 \text{ ом}$, $r_s = 11 \text{ ом}$, $r_r = 4,8 \text{ ом}$

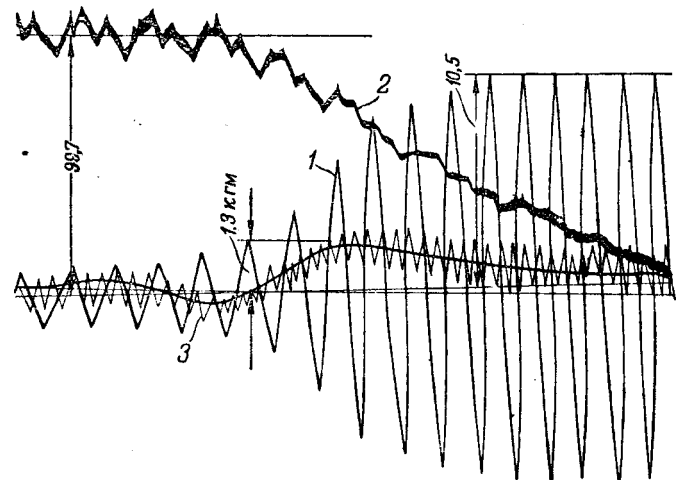


Рис. 4.

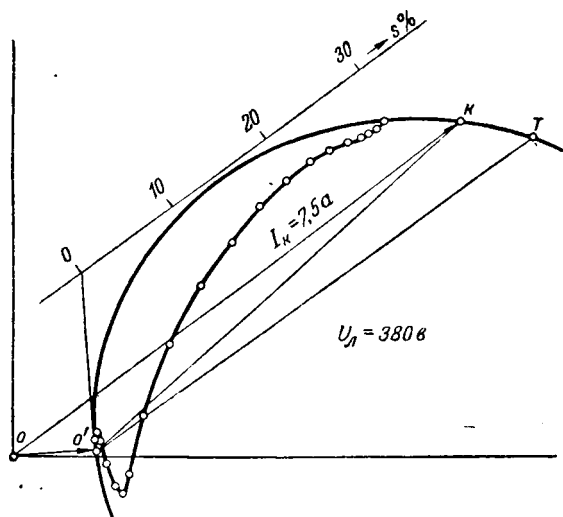


Рис. 5.

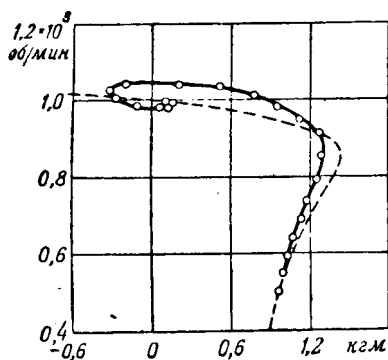


Рис. 6.

$GD^2 = 7,9 \cdot 10^{-2} \text{ кгм}^2$. Осциллограмма получена в лаборатории электропривода Уральского политехнического института. Эксперимент проводился при напряжении $U = 380 \text{ в}$. Осциллограмма дает ток фазы статора 1, скорость двигателя 2 и ускорение двигателя 3, пропорциональное моменту двигателя, так как пуск происходил без нагрузки. Кривая ускорений снята с помощью специального прибора, разработанного и созданного в лаборатории. По техническим условиям нулевая линия кривой ускорений имеет некоторый наклон.

Рис. 5 представляет экспериментально снятую по ряду режимов круговую диаграмму того же двигателя с нанесенными расчетными точками, дающими действительное геометрическое место токов при пуске (расчет проведен, начиная с $\omega = 0,5$). На рис. 6 пунктиром показана статическая механическая характеристика двигателя, снятая экспериментально. Сплошная кривая представляет характеристику двигателя при пуске с учетом переходного процесса, полученная расчетным путем.

На рис. 7 представлена кривая измерения момента двигателя во времени, взятая из осциллограммы, и нанесены точки, полученные расчетным путем. Как видно из при-

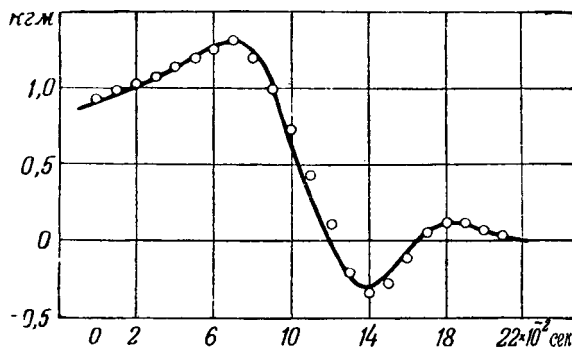


Рис. 7.

веденных материалов, моменты, развиваемые двигателем при пуске, значительно отличаются от моментов определенных по статическим характеристикам (при нормальном напряжении 500 в разница была бы еще более существенной).

Интересно отметить, что благодаря переходному процессу двигатель при пуске разгоняется до сверххронной скорости, переходит на некоторое время в генераторный режим и после нескольких колебаний приходит к установившемуся режиму.

Приведенные примеры наглядно показывают, что:

- 1) описанный метод является весьма наглядным, простым и сравнительно малотрудоемким;
- 2) позволяет получить одновременно как ток так и моменты двигателя;
- 3) дает удовлетворительные результаты даже при значительных сопротивлениях в обмотке статора, что имело место в экспериментальном двигателе.

Следует отметить, что метод может быть применен также в тех случаях, когда переходные процессы вызываются не только изменением скорости, но и коммутационными процессами в аппаратуре, в частности, шунтированием пускового сопротивления в двигателях с кольцами.

Литература

1. Е. Я. Казовский. Обобщенное рассмотрение переходных режимов в асинхронных и синхронных машинах. Сборник "Электросила", № 2 — 3, 1945.
2. Е. Я. Казовский. Переходные режимы в асинхронных машинах при включениях и коротких замыканиях. Электричество, № 6, 1947.
3. Дискуссия по статье Е. Я. Казовского. Переходные режимы в асинхронных машинах при включении коротких замыканий. Электричество, № 10, 1948.
4. Л. И. Столов. Влияние переходных электрических процессов на динамику пуска короткозамкнутого двигателя. Электричество, № 6, 1948.
5. F. Maginniss, N. Schoultz. Transient performance of induction motors. El. Eng., № 9, 1944.

[30-44]



Эффект реакции ротора и механические характеристики двигателя с дуговым статором

Кандидат техн. наук М. Г. РЕЗИН

Уральский политехнический институт им. Кирова

Двигатели с разомкнутым магнитопроводом давно привлекают внимание нашей инженерной мысли. Применение их позволяет создать рациональную систему электрического привода для тихоходных рабочих машин.

Значительное число конструкций двигателей с дуговым статором было разработано П. А. Фридкиным.

Дуговые статоры, несмотря на привлекательные возможности органического их объединения с производственными механизмами, до сих пор не получили значительного практического применения. Причиной этого является отчасти отсутствие физических предпосылок работы этих машин, теории и разработанной рациональной методики их расчета.

Существенный вклад в теорию двигателей с разомкнутым магнитопроводом сделали Г. И. Штурман и Р. Л. Аронов [Л. 1, 2]. Для дальнейшей разработки теории индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом, требующей проведения больших экспериментальных исследований, завод «Уралэлектроаппарат» совместно с кафедрой электрических машин Уральского политехнического института спроектировали и построили двигатель с дуговым статором мощностью 20 кВт, 220 в (рис. 1).

Электрический расчет двигателя был выполнен по существующей методике для обычных машин. Построенная машина имеет короткозамкнутый ротор диаметром 1357 мм, отдельные стойки с шариковыми подшипниками, дуговой статор, охватывающий четверть окружности ротора.

Изменяя число пазов на полюс и фазу q , можно получить следующие синхронные скорости: $q = 1$; $n_1 = 125$; $q = 1\frac{1}{4}$; $n_1 = 150$; $q = 1\frac{1}{2}$; $n_1 = 187$ об/мин. Для удобства переключения на разные синхронные скорости концы всех секций статорной обмотки были выведены на доску зажимов, расположенную у лобовых частей обмотки.

При заторможенном роторе напряжение по катушкам одной и той же фазы распределяется равномерно, несколько снижаясь к концам ста-

Указывается на явление зависимости распределения напряжения на катушках каждой фазы статорной обмотки от направления вращения ротора. Даны рабочие характеристики экспериментального двигателя с дуговым статором мощностью 20 кВт.

тора (рис. 2,б). Принципиально иная картина получается при вращающемся роторе (рис. 3,а).

Сопоставление кривых

для правого и левого вращения показывает, что распределение напряжений по катушкам одной и той же фазы зависит от направления вращения ротора двигателя. Падение напряжения получается минимальным на катушках, расположенных со стороны входа роторных стержней под активную зону и постепенно возрастает в направлении вращения ротора.

В результате распределение напряжения на секциях обмотки дугового статора получается неравномерным: приблизительно на одну треть обмотки каждой фазы ложится незначительная доля общего падения напряжения.

Распределение поля дугового статора при вращающемся роторе резко отличаются от поля при неподвижном роторе. Поле сдвигается по направлению вращения ротора так, что минимальные индукции имеют место под концом ста-

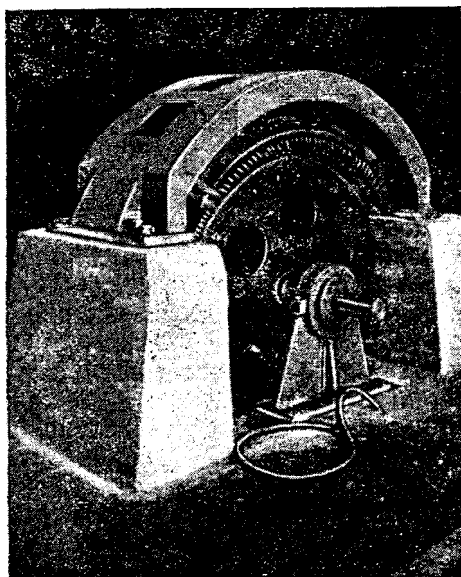


Рис. 1.

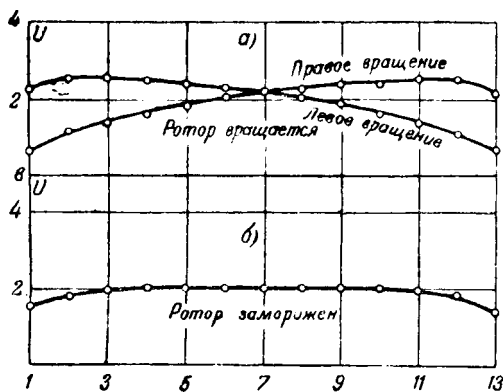


Рис. 2. Распределение падения напряжения в катушках статорной обмотки одной фазы.

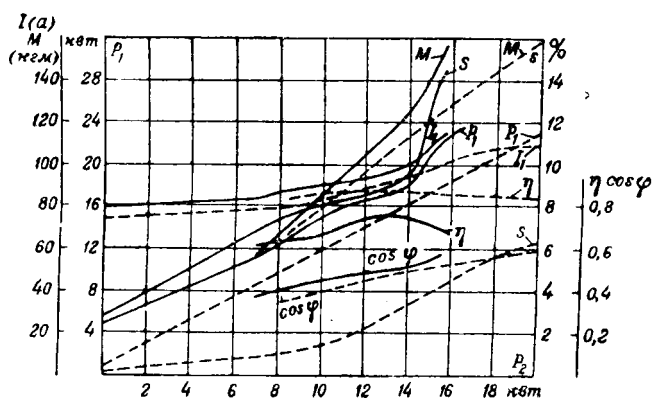


Рис. 3. Опытные (сплошные) и расчетные рабочие характеристики двигателя.

тора, со стороны входа роторных стержней под активную зону и максимальные индукции — под концом статора, где роторные стержни выходят из-под активной зоны. В итоге наблюдается физическое явление, которое по аналогии с машинами постоянного тока можно назвать «реакцией ротора». Естественно, явление реакции ротора в двигателе с дуговым статором при его вращении должно оказывать существенное влияние на рабочие режимы машины.

Г. И. Штурман показал [Л. 1], что «стационарный режим работы индукционных двигателей с разомкнутым магнитопроводом органически сочетается с наличием переходных процессов во вторичных контурах, непрерывно входящих в область активной зоны машины». Переходные процессы в значительной степени определяются наличием пульсирующих полей, так как роторные стержни движутся относительно этих полей не со скоростью скольжения, а со скоростью вращения ротора.

Пульсирующее поле наибольшее влияние оказывает на роторные стержни, расположенные под концами статора, т. е. на входе и на выходе. Размагничивающий эффект роторных стержней при входе под активную зону выше, чем при выходе, что и подтверждают экспериментально полученные кривые распределения напряжения вдоль обмотки каждой фазы.

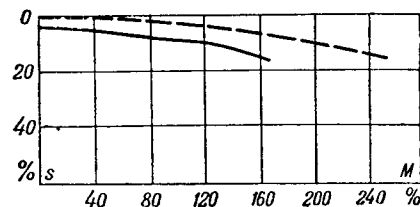


Рис. 4. Опытные (сплошные) и расчетные механические характеристики двигателя.

Размагничивающий эффект реакции ротора приводит к снижению магнитного потока, следовательно, влияет на рабочие характеристики двигателя: вращающий момент, скольжение и пр.

На рис. 3, 4 сопоставлены опытные характеристики (сплошные линии) с характеристиками найденными из круговой диаграммы (пунктирные линии). В режиме холостого хода скольжение двигателя при $q = 1$ ($n_1 = 125$ об/мин) составляет 2,8% при $q = 1,5$ ($n_1 = 187$ об/мин) 5,9%. Мощностная потребляемая двигателем при холостом ходе равна 4,9 кВт при расчетной — 0,82. Опытная кривая лежит значительно выше кривой, найденной из круговой диаграммы.

Сильно отличается линия скольжения, построенная при испытании, от подобной кривой, построенной на основе круговой диаграммы. Максимальные моменты, определенные из опыта и из круговой диаграммы, имеют место при одном и том же скольжении 15%. Значение максимального момента, полученное из опыта, составляет 65% от момента согласно круговой диаграммы. Пусковой ток согласно диаграмме равен 255 а, а по опыту составляет 235 а. Максимальный к. п. д. составляет 74%.

Значительные потери в двигателе с дуговым статором, резко отличающиеся от потерь в обычных двигателях, увеличенное скольжение и т. п., указывают на специфические особенности электромагнитных процессов, происходящих в двигателях этого типа.

При испытании экспериментального двигателя с дуговым статором наблюдалась практическая симметрия токов статорной обмотки и в режиме холостого хода, так и в режиме нагрузки при симметрично приложенном линейном напряжении.

Необходимо дальнейшее изучение физических явлений в двигателях с дуговым статором с целью разработки специальных методов проектирования машин с разомкнутым магнитопроводом.

При выполнении экспериментальных работ автор получил ценные указания проф. Н. Сиунова.

Литература

1. Г. И. Штурман. Электричество, № 10, 1948, № 6, 1948.
2. Г. И. Штурман и Р. Л. Аронов. Электричество, № 2, 1947.

Длинные линии с изменяющимися по длине параметрами

Кандидат техн. наук В. А. ИЛЬИН

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

За последние годы все больший интерес привлекают неоднородные линии, погонные параметры которых z_1 и y_1 изменяются с координатой x . Такие неоднородные линии находят применение в качестве широкополосных трансформаторов сопротивления в антенно-фидерной технике [Л. 1], коаксиальных спиральных линий в усилителях сантиметрового диапазона [Л. 2] и т. д.

В настоящее время изучаются возможности создания различных устройств на базе теории этих линий. Такие устройства предполагается использовать в качестве высокочастотных широкополосных трансформаторов, фазовращателей, цепей временной задержки, фильтров и т. д.

Несмотря на то, что в области теории длинных линий есть ряд ценных работ отечественных и иностранных авторов, значительно продвинувших исследования длинных линий [Л. 3—9], до сих пор еще не создана общая теория и нет общей методики исследования неоднородных линий.

В настоящей работе даны общий метод исследования и основы теории неоднородных линий для стационарного режима. Рассматривается линия, в которой генератор синусоидальной э. д. с. включен в начале, а в конце включена комплексная нагрузка. Считается, что практически может быть реализовано независимое изменение погонных параметров линии $z_1(x)$ и $y_1(x)$ по произвольному закону. Это может быть осуществлено путем изменения с координатой x магнитной проницаемости, диэлектрической постоянной, конфигурации линии и др.

Кроме погонных параметров z_1 и y_1 вводится параметр ρ — эквивалентное сопротивление длинной линии, равное отношению напряжения к току i в данной точке линии $\rho = \frac{u}{i}$. Выводится и исследуется уравнение, связывающее три параметра z_1 , y_1 и ρ , а также описываются способы решения полученного уравнения. Уста-

новлены основы теории длинных линий, погонные параметры которых изменяются с координатой x по произвольному закону. Теория построена на введении параметра линии — эквивалентного сопротивления, равного отношению напряжения к току в данной точке линии; рассматривается стационарный режим. Описан метод построения и исследования линий, параметры которых изменяются по любому закону. На основании анализа предложена классификация линий. Дан метод расчета и получены основные расчетные формулы.

навливается связь между основными величинами характеризующими линию через указанные параметры.

На основании анализа показывается, что параметры z_1, y_1 и ρ достаточно полно характеризуют любую неоднородную линию.

Предлагаемый метод приводит к простым и наглядным выражениям и является основой общей теории длинных линий.

Уравнение линии и его общее решение. Рассмотрим длинную линию, у которой погонные параметры z_1 и y_1 в общем случае распределены по длине неравномерно и зависят только от координаты x .

Исходными уравнениями длинной линии для стационарного режима являются:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= z_1 i, \\ \frac{di}{dx} &= y_1 u. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь x — расстояние данной точки от конца линии, при этом на конце ($x=0$) включена нагрузка. Напряжение u , ток i , а также z_1 и y_1 — в общем случае переменные комплексные величины.

Уравнения (1) обычно путем дифференцирования приводятся к известным дифференциальным уравнениям второго порядка с переменными коэффициентами. Решение и анализ полученных уравнений позволяют описать процессы, происходящие в линии. Такой путь, по нашему мнению, является сложным и недостаточно наглядным, тем более, что во многих случаях решение дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами представляет значительные трудности.

Для того чтобы избежать этих трудностей, введем параметр линии $\rho = \frac{u}{i}$, который, так же как параметры z_1 и y_1 , не зависит от напряже-

ния u . При этом, если $z_1(x)$ есть погонное последовательное сопротивление линии, $y_1(x)$ — погонная параллельная проводимость, то $\rho(x)$ — эквивалентное сопротивление линии в точке x , с учетом граничных условий. Очевидно, что $\rho(0)$ есть сопротивление нагрузки, а $\rho(l)$ — входное сопротивление линии (l — длина линии).

Как будет показано ниже, параметры z_1 , y_1 и ρ достаточно полно характеризуют любую линию.

Уравнения (1) после подстановки $i = \frac{u}{\rho}$ и $u = \rho i$, запишем в виде:

$$\frac{du}{dx} - \frac{z_1}{\rho} u = 0,$$

$$\frac{di}{dx} - y_1 \rho i = 0.$$

Решение их:

$$u = u(0) e^{\int_0^x \frac{z_1}{\rho} dx}, \quad (2)$$

$$i = i(0) e^{\int_0^x y_1 \rho dx}. \quad (3)$$

Дифференцируя ρ , выраженное через (2) и (3), получим основное дифференциальное уравнение любой линии, дающее связь между ее параметрами:

$$\frac{d\rho}{dx} + y_1 \rho^2 - z_1 = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) есть уравнение Риккати. Оно интегрируется посредством квадратур, если известно одно его частное решение ρ_c . Полный интеграл в этом случае равен:

$$\rho = \rho_c + \frac{1}{\psi} = \rho_c + \frac{e^{-2 \int y_1 \rho_c dx}}{\psi_0 + \int y_1 e^{-2 \int y_1 \rho_c dx} dx}, \quad (5)$$

где ψ определяется из линейного дифференциального уравнения

$$\frac{d\psi}{dx} - 2y_1 \rho_c \psi - y_1 = 0,$$

полученного подстановкой $\rho = \rho_c + \frac{1}{\psi}$ в (4).

Полный интеграл уравнения (4) после определения ψ_0 из граничных условий, запишется в виде:

$$\rho = \rho_c + \frac{e^{-2 \int \gamma_l dx}}{\frac{1}{z_n - \rho_c(0)} + \int_0^x y_1 e^{-2 \int \gamma_l dx} dx}; \quad (6)$$

здесь $\gamma_l = \frac{1}{x} \int_0^x y_1 \rho_c dx$ — коэффициент распространения волны тока (см. ниже); в реально осуществляемых линиях $|\gamma_l| \neq 0$;

z_n — сопротивление нагрузки на конце линии;

$\rho_c(0)$ — значение частного интеграла ρ_c в конце линии ($x=0$).

Полный интеграл (6) является общим решением, справедливым для любой линии, при любых граничных условиях.

При холостом ходе линии ($z_n = \infty$)

$$\rho = \rho_c + \frac{e^{-2 \int \gamma_l dx}}{\int_0^x y_1 e^{-2 \int \gamma_l dx} dx}.$$

При к. з. линии ($z_n = 0$)

$$\rho = \rho_c + \frac{e^{-2 \int \gamma_l dx}}{\int_0^x y_1 e^{-2 \int \gamma_l dx} dx - \frac{1}{\rho_c(0)}}.$$

Известно, что с увеличением длины l в линиях с потерями уменьшается влияние сопротивления нагрузки на входное сопротивление линии $\rho(l)$, а также уменьшается влияние нагрузки на $\rho(x)$, если $(l-x) \ll l$. Для рассмотренного предельного случая бесконечно длинной линии формулу (6) запишем в виде:

$$\rho = \rho_c + \frac{[z_n - \rho_c(0)] e^{-2 \int \gamma_l dx}}{1 + [z_n - \rho_c(0)] \int_0^x y_1 e^{-2 \int \gamma_l dx} dx}.$$

Для линий, у которых γ_l имеет активную составляющую, второй член обращается в нуль

при $x = \infty$ ($e^{-2 \int \gamma_l dx} = 0$). Таким образом, второй член формулы, учитывающий влияние нагрузки для бесконечно длинной линии, равен нулю, т. е. $\rho(\infty) = \rho_c$.

Полный интеграл (6) равен частному интегралу $\rho = \rho_c$ при $z_n = \rho_c(0)$ независимо от длины линии. Из этого можно сделать следующие выводы:

1. Частный интеграл ρ_c совпадает с полным интегралом для линии бесконечной длины, т. е. ρ_c есть эквивалентное сопротивление для линии бесконечной длины.

2. Если в конце линии включена нагрузка $z_n = \rho_c(0)$, то данная линия обладает свойствами такой же линии бесконечной длины, т. е. у нее $\rho(x) = \rho_c(x)$ независимо от длины линии.

Эквивалентное сопротивление бесконечно длинной линии ρ_c является простейшим решением уравнения (4), не зависящим от сопротивления нагрузки z_n , характеризующим только структуру самой линии.

Эквивалентное сопротивление $\rho(x)$ в формуле (6) равно сумме двух членов. Первый член зависит только от структуры линии, а второй также и от нагрузочного сопротивления z_n , т. е. частное решение ρ_c с помощью второго члена приспособляется к граничному условию так, чтобы $\rho(0) = z_n$.

Для определения полного интеграла (6) функцию $\rho_c(x)$ достаточно задать в интервале $0 \leq x \leq l$, а не в интервале $0 \leq x \leq \infty$. Это становится более наглядным, если расстояние x измерять от начала, а не от конца линии. В этом случае

в (4) перед y_1 и z_1 знаки изменяются на обратные.

Для вычисления общего интеграла ρ произвольной линии по формуле (6) необходимо знать для такой же линии частный интеграл ρ_c , удовлетворяющий уравнению (4). Это может быть выполнено следующими путями:

1. На основании исследования свойств различных линий выбирается требуемый закон изменения $\rho_c(x)$ и закон изменения одного из двух остальных параметров $z_1(x)$ или $y_1(x)$. Тогда закон изменения третьего параметра $y_1(x)$ или $z_1(x)$ определяется из уравнения (4):

$$y_1 = \frac{z_1}{\rho_c^2} \left(1 - \frac{1}{z_1} \frac{d\rho_c}{dx} \right), \quad (9)$$

$$z_1 = y_1 \rho_c^2 \left(1 + \frac{1}{\rho_c^2 y_1} \frac{d\rho_c}{dx} \right). \quad (10)$$

Этот путь всегда приводит к требуемому результату, если $\rho_c(x)$ есть дифференцируемая функция, что обычно выполняется для реальных линий. Такой путь является эффективным методом исследования всевозможных длинных линий.

2. Определение $\rho_c(x)$ при заданных $z_1(x)$ и $y_1(x)$ интегрированием уравнения (4) посредством квадратур или методами приближенного интегрирования.

После того как выбран или определен частный интеграл ρ_c , вычисляется полный интеграл $\rho(x)$ по формуле (6).

Примеры линий с заданным $\rho_c(x)$. Классификация линий. Ограничимся более подробным рассмотрением однородной линии и экспоненциальной линии с постоянной скоростью распространения.

1. Однородная линия. Задано: $\rho_c = \rho_c(0) = \text{const}$ и, например, $z_1 = z_1(0)$; тогда из (9)

$$y_1 = \frac{z_1(0)}{\rho_c^2(0)} = y_1(0); \quad \rho_c(0) = w_1 = \sqrt{\frac{z_1}{y_1}};$$

$$\gamma_l = \gamma = \sqrt{z_1 y_1}.$$

Полный интеграл (6)

$$\rho = w_1 + \frac{e^{-2\gamma x}}{\frac{1}{z_n - w_1} + \frac{1}{2w_1} - \frac{1}{2w_1} e^{-2\gamma x}}.$$

Введя обозначение

$$p = \frac{z_n - w_1}{z_n + w_1}$$

(коэффициент отражения), после простых преобразований получим:

$$\rho = \frac{e^{2\gamma x} + p}{e^{2\gamma x} - p} w_1 = \frac{\text{ch } \gamma x + \frac{w_1}{z_n} \cdot \text{sh } \gamma x}{\frac{w_1}{z_n} \cdot \text{ch } \gamma x + \text{sh } \gamma x} w_1. \quad (11)$$

При холостом ходе ($p=1$)

$$\rho = w_1 \cdot \text{cth } \gamma x.$$

Закон изменения напряжения вдоль линии при ее холостом ходе определяется из (2)

$$u = u(0) e^{\gamma \int_0^x \text{th } \gamma x dx} = u(0) \text{ch } \gamma x.$$

Короткому замыканию линии соответствует $p=-1$; тогда

$$\rho = w_1 \text{th } \gamma x.$$

Ток в короткозамкнутой линии из (3)

$$i = i(0) e^{\gamma \int_0^x \text{th } \gamma x \cdot dx} = i(0) \cdot \text{ch } \gamma x.$$

Закон изменения напряжения вдоль короткозамкнутой линии из (2)

$$u = u(0) e^{\gamma \int_0^x \text{cth } \gamma x \cdot dx} = i(0) w_1 \text{sh } \gamma x.$$

Как видно, получены известные выражения для сопротивления, напряжения и тока в однородной линии более коротким и простым путем.

2. Экспоненциальная линия. Задано: $\rho_c = \rho_c(0) e^{\delta x}$ и, например, $y_1 = y_1(0) e^{-\delta x}$. По формуле (10):

$$z_1 = y_1(0) \rho_c^2(0) \left(1 + \frac{\delta}{y_1(0) \rho_c^2(0)} \right) e^{\delta x} = z_1(0) e^{\delta x}; \quad \gamma_l = y_1(0) \rho_c(0).$$

Полный интеграл (6)

$$\rho = \rho_c(0) e^{\delta x} + \frac{e^{-2\gamma_l x}}{\frac{1}{z_n - \rho_c(0)} + \frac{y(0)}{2\gamma_l + \delta} \left(1 - e^{-2\left(\gamma_l + \frac{\delta}{2}\right)x} \right)}. \quad (12)$$

Решение (12) при $|\delta| \ll |2\gamma_l|$ можно записать приближенно в виде:

$$\rho = \rho_c(0) e^{\delta x} \frac{\text{ch } \alpha_1 x + \frac{\rho_c(0)}{z_n} \text{sh } \alpha_1 x}{\frac{\rho_c(0)}{z_n} \text{ch } \alpha_1 x + \text{sh } \alpha_1 x} = \rho_c(0) e^{\delta x} \frac{e^{2\alpha_1 x} + p}{e^{2\alpha_1 x} - p}.$$

$$\text{Здесь } \alpha_1 = \gamma_l + \frac{\delta}{2}; \quad p = \frac{z_n - \rho_c(0)}{z_n + \rho_c(0)}.$$

Как легко убедиться, приближенное решение отличается от решения для однородной линии (11). Более сложным путем эти результаты получены М. С. Нейманом [Л. 5] и приводятся в отдельных руководствах [Л. 1].

В качестве иллюстрации на рис. 1 показано изменение эквивалентного сопротивления ρ , напряжения u и тока i с координатой x для холостого хода рассмотренной экспоненциальной линии.

Задаваясь законом изменения $\rho_c(x)$, можно построить большое число различных линий.

На основании вышеизложенного длинные линии рационально классифицировать по закону изменения $\rho_c(x)$, разделяя их на соответствующие классы: экспоненциальные, гиперболиче-

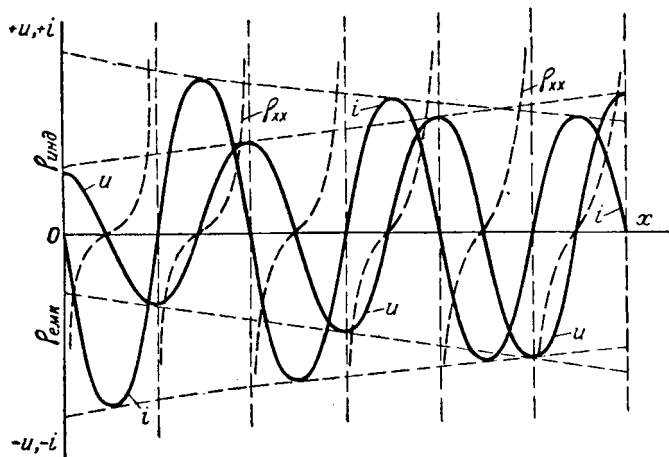


Рис. 1. Изменение напряжения, тока и эквивалентного сопротивления с координатой x для холостого хода экспоненциальной линии.

ские, параболические, логарифмические линии и т. д.

Кроме этого классы линий следует разбить на подклассы по другим характерным особенностям линий бесконечной длины. Так, например, могут быть экспоненциальные линии с постоянной скоростью распространения, экспоненциальные линии с постоянным $z_1(x) = z_1(0)$ и т. д.

Из бесконечного числа возможных линий практический интерес может представлять только ограниченное число. Поэтому задачей исследования длинных линий является обоснование и выбор рациональных классов и подклассов линий для решения тех или других практических задач.

В таблице приведено несколько примеров из целого ряда линий, рассмотренных автором статьи.

Как было показано выше, полный интеграл (6) учитывает граничное условие линии на ее конце, отличаясь этим от решения для линий бесконечной длины. Поэтому линия любого класса и подкласса может работать в различных режимах, обусловленных ее граничными условиями. В связи с этим для характеристики любой линии достаточно указать ее класс, подкласс и граничные условия, в которых работает данная линия.

Интегрирование уравнений линии в квадратурах. Уравнение длинной линии (4) в общем виде посредством квадратур не интегрируется. Однако, существует ряд частных случаев $z_1(x)$ и $y_1(x)$, когда уравнение может быть выражено в квадратурах. Так, например, для однородной линии уравнение (4) интегрируется путем простого разделения переменных.

Условия интегрируемости уравнения (4) в квадратурах даны в ряде работ и учебниках по дифференциальным уравнениям [Л. 10, 11].

Уравнение (4) двумя подстановками приводится к каноническому виду. Первой подстановкой $\rho = \xi Q_1(x)$, выбирая $Q_1 = \frac{1}{y_1}$, получим уравнение:

$$\frac{d\xi}{dx} + \xi^2 - \frac{dy_1}{dx} \frac{\xi}{y_1} - z_1 y_1 = 0.$$

После подстановки $\xi = y + \psi(x)$, выбирая $2\psi(x) = \frac{dy_1}{dx} \frac{1}{y_1}$, получим уравнение в каноническом виде:

$$\frac{dy}{dx} + y^2 - Q_1 = 0, \quad (13)$$

где

$$y = \rho y_1 - \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \ln y_1;$$

$$Q_1 = z_1 y_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{dx} \ln y_1 \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{d^2}{dx^2} \ln y_1$$

—инвариант уравнения (4).

Уравнение (13) было предметом рассмотрения Л. Эйлера [Л. 12]. Он показал, что это уравнение может быть проинтегрировано с помощью интегрирующего множителя

$$\frac{1}{p_1 y^2 + b_1 y + r_1},$$

в котором коэффициенты p_1 , b_1 и r_1 он определил, как функцию от Q_1 .

Уравнение Л. Эйлера (13) подстановкой $y = \ln \psi$ приводится к хорошо исследованному линейному уравнению второго порядка с переменным коэффициентом вида:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + Q_1 \psi = 0;$$

здесь Q_1 — тот же инвариант уравнения (4).

Методы приближенного интегрирования уравнения линии. Интеграл уравнения линии (4) может быть представлен в виде степенных рядов.

Решение с помощью степенных рядов обычно приводит к медленно сходящимся рядам, вычисление которых громоздко.

В случае медленно изменяющихся параметров $z_1(x)$ и $y_1(x)$, что представляет большой практический интерес, частный интеграл ρ_c значительно отличается от волнового сопротивления линии $w_1 = \sqrt{\frac{z_1}{y_1}}$, поэтому можно положить:

$$\rho_c = w_1 + \delta_1, \quad (14)$$

где $|\delta_1| < |w_1|$. Подставляя это значение ρ_c в (4) и пренебрегая малой величиной второго порядка δ_1^2 ($\delta_1^2 \ll |w_1^2|$), получим линейное дифференциальное уравнение для δ_1 :

$$\frac{d\delta_1}{dx} + 2\gamma\delta_1 + \frac{dw_1}{dx} = 0; \quad (15)$$

здесь $\gamma = \sqrt{z_1 y_1}$. Решая (15) и подставляя значение интеграла в (14), найдем приближенную формулу:

$$\rho_c \approx \rho_{c0} = w_1 + e^{-\int_0^x \gamma dx} \left[\delta_{10} - \int_0^x \frac{dw_1}{dx} e^{\int_0^x \gamma dx} dx \right]. \quad (16)$$

Подставляя значение ρ_{c0} в (4), можно видеть, что левая часть (4) отлична от нуля величину $y_1 \delta_1^2$.

Относительная ошибка при определении ρ_c найдется из (14) и (16) с учетом принятых приближенных в виде:

$$\Delta = \frac{\rho_c - \rho_{c0}}{\rho_c} = \frac{\sqrt{w_1^2 - 2w_1\delta_1 + \delta_1^2} - \sqrt{w_1^2 - 2w_1\delta_1}}{\sqrt{w_1^2 + 2w_1\delta_1 + \delta_1^2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta_1}{w_1} \right)^2; \quad (17)$$

здесь δ_1 определяется из (14).

Связь между волновым сопротивлением w_1 и ρ_c точно выражается формулой

$$\rho_c = w_1 \sqrt{1 - \frac{1}{z_1} \frac{d\rho_c}{dx}}. \quad (18)$$

По приближенной формуле (14), если принять, что $|\delta| \ll |w_1|$:

$$\rho_c = w_1 \left(1 + \frac{\delta_1}{w_1} \right) \approx w_1 \sqrt{1 + \frac{2\delta_1}{w_1}}. \quad (19)$$

Сопоставляя (19) и (18), получим приближенную формулу

$$\frac{d\rho_c}{dx} \approx -\frac{2\delta_1 z_1}{w_1}.$$

Описываемый метод приближенного интегрирования позволяет в случае необходимости увеличить точность вычислений путем последовательных приближений. Так, во втором приближении ρ_{c1} подобно (14) выразится в виде:

$$\rho_{c1} = \rho_{c0} + \delta_2. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (4), можно получить новое линейное дифференциальное уравнение, подобное (15). В результате решения этого уравнения получим формулу для определения ρ_{c1} .

Точно так же можно выполнить n приближений. В результате получим частное решение ρ_c в виде

$$\rho_c = \rho_{cn} = w_1 - \sum_{k=0}^n Q_k, \quad (21)$$

где

$$Q_0 = P_0 \int \frac{dw_1}{dx} \frac{dx}{P_0}; \quad Q_1 = P_1 \int y_1 \frac{Q_0^2}{P_1} dx;$$

$$Q_k = P_k \int y_1 \frac{Q_{k-1}^2}{P_k} dx; \quad P_0 = e^{-2 \int_0^x \gamma dx};$$

$$P_1 = e^{-2 \int_0^x y_1 (w_1 - Q_0) dx}; \quad P_k = e^{-2 \int_0^x y_1 (w_1 - Q_{k-1}) dx}.$$

(22)

Для иллюстрации точности приближенного метода на рис. 2 приведены кривые относительных ошибок $\Delta_n = \frac{\rho_c - \rho_{cn}}{\rho_c}$ для первого и второго приближений ρ_{c0} и ρ_{c1} в зависимости от $\frac{w_1 - \rho_c}{\rho_c}$.

Здесь ρ_c вычислено по точной формуле, а ρ_{c0} и ρ_{c1} — по формуле приближенного вычисления, при известных $z_1(x)$ и $y_1(x)$. Кривые построены для экспоненциальной линии $\rho_c = \rho_c(0) e^{\delta x}$ с постоянной скоростью распространения.

Коэффициент распространения и частотные свойства линии. В общем случае величина, характеризующая распространение волн в произвольной линии, является функцией

от x и различна для волны тока i и волны напряжения u . Эту величину, характеризующую вектор напряжения или вектор тока в любой точке линии, мы будем называть коэффициентом распространения. Коэффициенты распространения по току и напряжению в общем случае являются переменными комплексными величинами.

Понятие о коэффициенте распространения вводится по аналогии с понятием о постоянной распространения $\gamma = \sqrt{z_1 y_1}$ в однородной линии.

Рассмотрим выражение коэффициента распространения волны тока γ_i и волны напряжения γ_u для бесконечно длинной линии, что соответствует распространению бегущих волн напряжения и тока.

Для бегущей волны в любой линии должны выполняться равенства:

$$u = u(0) e^{\gamma_u x}; \quad i = i(0) e^{\gamma_i x},$$

где γ_u и γ_i определяются для бесконечно длинной линии из (2) и (3) заменой ρ на ρ_c :

$$\gamma_u = \frac{1}{x} \int_0^x \frac{z_1}{\rho_c} dx. \quad (23)$$

Соответственно

$$\gamma_i = \frac{1}{x} \int_0^x y_1 \rho_c dx. \quad (24)$$

Формулы (23) и (24) являются общими формулами для определения коэффициентов распространения в любой линии бесконечной длины.

Приведем два примера, рассмотренных выше.

1. Однородная линия. Подставляя значение $\rho_c = w_1 - \text{const}$ в (23) и (24), получим:

$$\gamma_u = \gamma_i = \sqrt{z_1 y_1}.$$

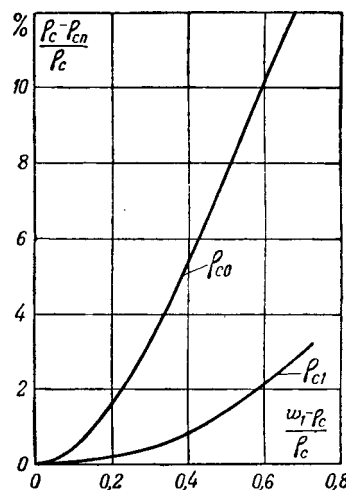


Рис. 2. Относительные ошибки определения ρ_c по формулам приближенного вычисления для первого и второго приближений (ρ_{c0} и ρ_{c1}).

Примеры различных линий

Класс линии	Подкласс линии	z_1	y_1	$w_1 = \sqrt{\frac{z_1}{y_1}} = \sqrt{\frac{\rho_c}{1 - \frac{1}{z_1} \frac{d\rho_c}{dx}}}$	$\gamma_u = \frac{1}{x} \int_0^x \frac{z_1}{\rho_c} dx$	$\gamma_l = \frac{1}{x} \int_0^x y_1 \rho_c dx$
Постоянного волнового сопротивления	Однородная $z_1 = z_1(0), y_1 = y_1(0)$ С переменной скоростью распространения	$\frac{y_1}{w_1^2} z_1(x)$	$\frac{z_1}{w_1^2} \frac{z_1(x)}{w_1^2(0)}$	$\rho_c(0)$ $\rho_c(0)$	$\frac{\sqrt{z_1 y_1}}{w_1(0) x} \int_0^x z_1(x) dx$	$\sqrt{z_1 y_1}$ γ_u
Экспоненциальные $\rho_c = \rho_c(0) e^{\delta x}$ $\delta = \text{const}$	С постоянной скоростью распространения $z_1 = z_1(0)$ $z_1 = z_1(0) e^{k\delta x}$	$z_1(0) e^{\delta x}$ $z_1(0)$ $z_1(0) e^{k\delta x}$	$y_1(0) e^{-\delta x}$ $y_1(0) = \frac{z_1(0)}{\rho_c^2(0)} \left(1 - \frac{\delta \rho_c(0)}{z_1(0)}\right)$ $\frac{z_1(0)}{\rho_c^2(0)} e^{\delta x} \left(1 - \frac{\delta \rho_c(0) e^{\delta x}}{z_1(0)}\right)$ $\frac{z_1(0)}{\rho_c^2(0)} e^{(k-\varepsilon)\delta x} \left(1 - \frac{\delta \rho_c(0) e^{(1-k)\delta x}}{z_1(0)}\right)$	$\sqrt{\frac{\rho_c}{1 - \frac{\delta \rho_c(0)}{z_1(0)}}}$ $\frac{\rho_c}{\sqrt{1 - \frac{\delta \rho_c(0) e^{\delta x}}{z_1(0)}}}$ $\frac{\rho_c}{\sqrt{1 - \frac{\delta \rho_c(0) e^{(1-k)\delta x}}{z_1(0)}}}$	$\frac{z_1(0)}{x \rho_c(0) \delta} (1 - e^{-\delta x})$ $\frac{z_1(0)}{(k-1)x \rho_c(0) \delta} \times$ $\times \left(e^{(k-1)\delta x} - 1 \right)$	$\gamma_u = \delta$ $\gamma_u = \delta$ $\gamma_u = \delta$
Линейно изменяющиеся $\rho_c = \rho_c(0) + ax$ $a = \text{const}$	$z_1 = z_1(0)$ $\gamma_l = \text{const}$	$z_1(0)$ $\gamma_l \rho_c \left(1 + \frac{a}{\gamma_l(\rho_c(0) + ax)}\right)$	$\frac{z_1(0)}{(\rho_c(0) + ax)^2} \left(1 - \frac{a}{z_1(0)}\right)$ $\frac{\gamma_l}{\rho_c(0) + ax}$	$\frac{\rho_c}{\sqrt{1 - \frac{a}{z_1(0)}}}$ $\frac{\rho_c}{1 + \frac{a}{\gamma_l(\rho_c(0) + ax)}}$	$\frac{z_1(0)}{ax} \ln \frac{\rho_c(0) + ax}{\rho_c(0)}$ $\gamma_l + \frac{1}{x} \ln \frac{\rho_c(0) + ax}{\rho_c(0)}$	$\gamma_u \left(1 - \frac{a}{x_1(0)}\right)$ $\rho_c(0) y_l(0)$
Логарифмические $\rho_c = \ln(a + bx)$ $1 \leq a = \text{const}$	$\gamma_u = \text{const}$	$\gamma_u \ln(a + bx)$	$\frac{\gamma_u}{\rho_c} \left(1 - \frac{1}{\gamma_u \left(x + \frac{a}{b}\right) \rho_c}\right)$	$\frac{\rho_c}{\sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_u \rho_c \left(x + \frac{a}{b}\right)}}}$	$\gamma_u = \text{const}$	$\gamma_u = \frac{1}{x} \left \int_0^x \frac{1}{t} \times \right.$ $\times (a + bx) \Big _0^x$
Косинусоидальные $\rho_c = \rho_c(0) \cos mx$	$\gamma_u = \text{const}$	$\gamma_u \rho_c(0) \cos mx$	$1 + \frac{m}{\gamma_u} \frac{\gamma_u \text{tg } mx}{\rho_c(0) \cos mx}$	$\frac{\rho_c(0)}{\sqrt{1 + \frac{m}{\gamma_u} \text{tg } mx}}$	$\gamma_u = \text{const}$	$\gamma_u = \frac{1}{x} \ln \cos mx$

2. Экспоненциальная линия с постоянной скоростью распространения. Задано $\rho_c = \rho_c(0)e^{\delta x}$; $y_1 = y_1(0)e^{-\delta x}$; $z_1 = z_1(0)e^{-\delta x}$,

где

$$z_1(0) = y_1(0)\rho_c^2(0)\left(1 + \frac{\delta}{y_1(0)\rho_c^2(0)}\right).$$

При этом

$$\gamma_u = y_1(0)\rho_c(0); \quad \gamma_i = \gamma_u\left(1 + \frac{\delta}{y_1(0)\rho_c^2(0)}\right).$$

Как легко показать, это соответствует дополнительному сдвигу фаз между бегущей волной напряжения и волной тока и дополнительному затуханию волны напряжения.

В таблице приведены γ_u и γ_i для некоторых типов линий.

В общем случае γ_u и γ_i являются комплексными величинами $\gamma_u = \beta_u + j\alpha_u$; $\gamma_i = \beta_i + j\alpha_i$, действительная и мнимая часть которых определяется из (23) и (24).

По аналогии с теорией однородных линий β является коэффициентом затухания, а $\alpha = \frac{\omega}{v}$ — фазовым коэффициентом; v есть скорость распространения гармонического колебания с угловой частотой ω ; α , β и v в общем случае являются переменными величинами, зависящими от координаты x .

Существенно важной характеристикой длинных линий является зависимость входного сопротивления линии от угловой частоты $z_{ex}(\omega)$ (в точке подключения генератора). Это сопротивление равно полному интегралу ρ_i (6) при $x=l$, где l — длина линии, т. е.

$$z_{ex}(\omega) = \rho_i(\omega).$$

Для получения этой зависимости в (6) подставляется $\rho_c(\omega)$; $z_{ex}(\omega)$, $y_1(\omega)$ и $x=l$.

В простейшем случае $z_1(\omega) = R_1 + j\omega L_1$; $y_1(\omega) = g_1 + j\omega C_1$, где R_1 , L_1 , g_1 и C_1 не зависят от угловой частоты ω .

В качестве примера напомним выражение $z_{ex}(\omega)$ для однородной линии без потерь, в режиме холостого хода ($z_1 = j\omega L_1$; $y_1 = j\omega C_1$). Из (11)

$$z_{ex}(\omega) = \rho_i(\omega) = -j\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \operatorname{ctg} \omega l \sqrt{L_1 C_1}.$$

Выводы. В данной теории произвольных линий основное дифференциальное уравнение первого, а не второго порядка, как это имеет место в обычной теории. При этом решение уравнения и формулы, полученные для определения основных величин, характеризующих процессы в линии (u , i , γ_u , γ_i и др.), имеют более простой и наглядный вид.

Дано общее решение дифференциального уравнения произвольной линии, которое позволяет выбрать рациональные линии для решения

конкретных практических задач. Для этого, например, в общий интеграл вводятся заданные условия, и решая полученные уравнения, может быть найден рациональный закон изменения параметров линии $\rho_c(x)$ и др. Так, например, по заданным условиям может быть выбрана рациональная линия для трансформации напряжений и сопротивлений в широком диапазоне частот.

В изложенной теории определение полного интеграла уравнения линии разделяется на предварительное определение частного интеграла, характеризующего специфику такой же линии бесконечной длины, и на определение полного интеграла, характеризующего линию при ее заданных граничных условиях. Такое разделение упрощает вычисления и приводит к более наглядным выражениям.

В данной теории могут быть эффективно использованы два противоположных метода исследования: метод анализа, заключающийся в определении ρ_c и ρ по заданным параметрам $z_1(x)$, $y_1(x)$ и граничным условиям, а также метод синтеза, в котором мы заранее задаем классом и подклассом линии, определяем неизвестные $z_1(x)$ или $y_1(x)$ и исследуем свойства линии. Метод синтеза позволяет составлять неограниченное количество типов линий, простыми средствами определять неизвестные параметры и исследовать свойства линий.

Предложенная классификация отражает специфику линий и в основном согласуется с известными названиями линий.

Описанный метод приближенного вычисления ρ_c отличается простотой и в случае медленно изменяющихся параметров $z_1(x)$ и $y_1(x)$ дает высокую точность при первом приближении. Этот метод одновременно позволяет вычислить ρ_c с любой степенью точности.

Литература

1. Г. З. Айзенберг. Антенны для магистральных радиосвязей. Связьиздат, 1948.
2. Л. Н. Лошаков и Е. Б. Ольденрогге. К теории коаксиальной спиральной линии. Радиотехника № 2, 1948.
3. И. Е. Средний. Волновые процессы в неоднородных линиях. Радиотехника, № 6, 1945.
4. В. И. Коваленков. Теория передачи по линиям электросвязи. Связьтехиздат, 1937.
5. М. С. Нейман. Неоднородные линии с распределенными постоянными. ИЭСТ, № 11, 1938.
6. C. Burrows. The Exponential Transmission Line. Bell System Technical Journal, т. 17, стр. 555, 1938.
7. И. И. Вольман. Алгебраический трансформатор в виде расходящейся линии. Электросвязь, № 2, 1939.
8. А. Р. Вольперт. Линии с неравномерно распределенными параметрами, Электросвязь, № 2, 1940.
9. Г. Эккарт. Реактансная четырехполюсная теория неоднородных идеальных проводов. Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, т. 55, № 6, 1940.
10. М. М. Куренский. Дифференциальные уравнения. Книга I. Артиллерийская академия, 1938.
11. В. В. Степанов. Курс дифференциальных уравнений. Гостехиздат, 1945.
12. Л. Эйлер. Institutiones calculi integralis Problema 68, 1792.

[26. 9. 1949]



Методика расчета пусковых характеристик явнополюсных синхронных двигателей

Кандидат техн. наук Б. Е. КОНИК

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Вопросу расчета пусковых характеристик явнополюсных синхронных двигателей, компенсаторов и пр. посвящено много работ. Все же

до сих пор нет достаточного простого, точного метода расчета пусковых характеристик. В работе дан анализ применяющихся методов и сделана попытка предложить рациональный метод расчета.

При решении этой задачи исходим из общепринятой методики [Л. 6, 7]. Будем рассматривать явнополюсную синхронную машину при асинхронном ходе как два эквивалентных многообмоточных трансформатора, один из которых жестко связан с продольной осью полюсов ротора, другой — с поперечной осью. Фазы пульсирующих потоков в обоих трансформаторах сдвинуты на $\frac{\pi}{2}$ электрических градусов; частота пульсаций потоков равна частоте скольжения ротора.

Основные допущения, которые положены в основу анализа, общепринятые: асинхронная машина включена на сеть бесконечной мощности; м. д. с. статора распределена синусоидаль-

Дается обобщение ряда существующих практических методов расчета пусковых характеристик явнополюсных синхронных двигателей. На основе анализа предлагаются наиболее рациональные методы расчета. Для иллюстрации приводится сравнение результатов расчета по всем методам с опытами.

но в пространстве; средняя магнитная проницаемость постоянна.

Рассмотрим трансформаторно-связанные контуры продольной оси

(рис. 1). Примем эквивалентный воздушный зазор под полюсом постоянным, соответствующим продольному индуктивному сопротивлению статора x_{ad} .

При принятых допущениях поток взаимной индукции обмотки статора с роторным контуром шага Y_n будет:

$$\Phi_{adn} = 2 \int_0^{Y_n} \Phi_{md} \cos \frac{\pi}{2} Y dY = \frac{4}{\pi} \Phi_{md} \sin \frac{\pi}{2} Y_n, \quad (1)$$

где Φ_{md} — амплитуда основной волны потока статора по продольной оси;

Y_n — шаг n -го контура в относительных единицах.

Назовем коэффициентом трансформации обмотки статора с n -ным контуром ротора отношение

$$c_n = \frac{\Phi_{ad}}{\Phi_{adn}},$$

где $\Phi_{ad} \equiv x_{ad}$ — поток статора по продольной оси

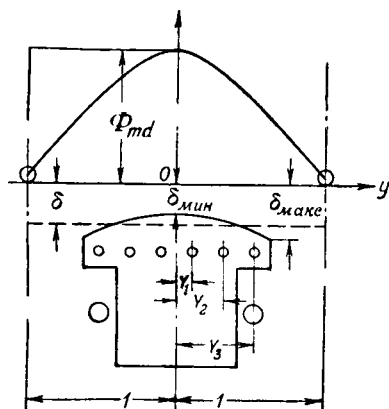


Рис. 1. Трансформаторно-связанные контуры продольной оси синхронной машины.

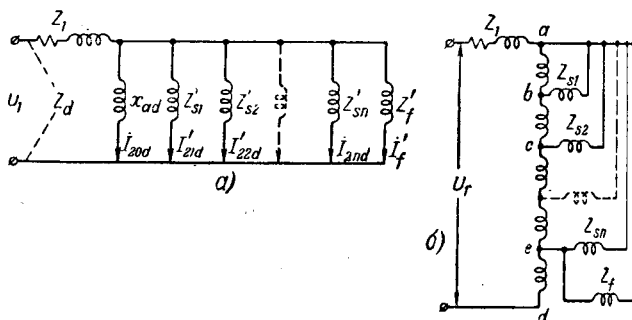


Рис. 2. Приведенная эквивалентная схема трансформаторно-связанных контуров продольной оси при демпферных стержнях с разными полными сопротивлениями.

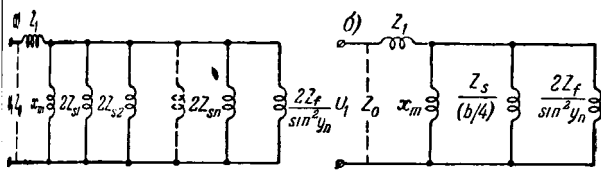


Рис. 4. Приближенные эквивалентные схемы синхронной машины.

а — при стержнях с разными полными сопротивлениями; б — при стержнях с одинаковыми полными сопротивлениями $x_m = \frac{2x_{ad} x_{aq}}{x_{ad} + x_{aq}}$.

где $\dot{E}_{ip}$ и $\dot{E}_{in}$ — прямо-и обратнотекущие э. д. с. воздушного зазора, прямо-и обратнотекущие составляющие тока ротора при стержнях с одинаковыми полными сопротивлениями определяются в виде:

$$\left. \begin{aligned} i'_{2p} &= \frac{\dot{E}_{ip}}{2Z_b} \cdot \frac{b}{2} + \frac{\dot{E}_{ip}}{2Z_f} \sin^2 Y_n - \\ &- \left[\frac{E_{in}}{2Z_b} \sum_1^{b/2} \cos 2Y_n - \frac{\dot{E}_{in}}{2Z_f} \sin^2 Y_n \right], \\ i'_{2n} &= \frac{\dot{E}_{in}}{2Z_b} \cdot \frac{b}{2} + \frac{\dot{E}_{in}}{2Z_f} \sin^2 Y_n - \\ &- \left[\frac{E_{ip}}{2Z_b} \sum_1^{b/2} \cos 2Y_n - \frac{\dot{E}_{ip}}{2Z_f} \sin^2 Y_n \right]. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В первом уравнении (12) первые два члена дают прямобегающую составляющую тока от прямобегающей э. д. с. воздушного зазора; вторые два члена — прямобегающую составляющую тока ротора от обратнотекущей э. д. с. воздушного зазора. Аналогично во втором уравнении (12) первые два члена дают обратнотекущую составляющую тока ротора от обратнотекущей э. д. с. воздушного зазора, а вторые два члена — обратнотекущую составляющую тока от прямобегающей э. д. с. воздушного зазора.

Сравнивая между собой амплитуды обратнотекущих и прямообращающихся составляющих тока демпферных контуров, вызванные прямобегающей э. д. с. воздушного зазора, находим отношение

$$k = \frac{\sum_1^{b/2} \cos 2Y_n}{b/2}. \quad (13)$$

Для обмотки возбуждения (вторые члены уравнений), как для однофазной, это отношение, естественно, равно единице.

Сравнивая между собой амплитуды прямо-и обратнотекущих составляющих тока, вызванные обратнотекущей э. д. с. воздушного зазора, получаем то же выражение (13).

Рассмотрим теперь, следуя Путману [Л. 7], случай бесконечного количества демпферных стержней, расположенных по дуге $2Y$. Тогда знаки Σ в уравнениях (11) превращаются в ин-

тегралы и составляющие тока ротора по продольной и поперечным осям приобретут вид:

$$\left. \begin{aligned} i'_{2d} &= \frac{\dot{E}_{id}}{Z_b} \int_0^Y \sin^2 Y d_y + \frac{\dot{E}_{id}}{Z_f} \sin^2 Y = \\ &= \frac{\dot{E}_{id}}{2Z_b} \left(Y - \frac{1}{2} \sin 2Y \right) + \frac{\dot{E}_{id}}{Z_f} \sin^2 Y, \\ i'_{2q} &= \frac{\dot{E}_{iq}}{Z_b} \int_0^Y \cos^2 Y d_y = \frac{\dot{E}_{iq}}{2Z_b} \left(Y + \frac{1}{2} \sin 2Y \right). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Из последних уравнений находим прямо-и обратнотекущие составляющие тока ротора:

$$\left. \begin{aligned} i'_{2p} &= \frac{\dot{E}_{ip}}{2Z_b} Y + \frac{\dot{E}_{ip}}{2Z_f} \sin^2 Y - \\ &- \left[\frac{\dot{E}_{in}}{4Z_b} \sin 2Y - \frac{\dot{E}_{in}}{2Z_f} \sin^2 Y \right], \\ i'_{2n} &= \frac{\dot{E}_{in}}{2Z_f} Y + \frac{\dot{E}_{in}}{2Z_f} \sin^2 Y - \\ &- \left[\frac{\dot{E}_{ip}}{4Z_b} \sin 2Y - \frac{\dot{E}_{ip}}{2Z_f} \sin^2 Y \right]. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Структура этих уравнений совершенно аналогична структуре уравнений (12).

Из уравнений (15) находим отношение амплитуд обратнотекущих составляющих тока ротора, вызванных прямобегающей э. д. с. в виде:

$$k_1 = \frac{\sin \Psi}{\Psi}, \quad (15)$$

где $\Psi = 2Y$.

Такое же соотношение получается и для прямо-и обратнотекущих составляющих тока ротора, вызванных обратнотекущей э. д. с. воздушного зазора.

Соотношение (16) соответствует аналогичному соотношению работы Путмана. Это показывает, что метод Путмана основан на тех же допущениях, что и предлагаемый метод расчета, и является, таким образом, частным случаем, вытекающим из полных эквивалентных схем синхронной машины.

Выражение (13) следует рассматривать как обобщение выражения (16) метода Путмана на случай конечного количества стержней, расположенных на той же полюсной дуге $\Psi = 2Y$.

Из уравнений (12) находим эквивалентные полные сопротивления демпферной клетки и обмотки возбуждения для прямобегающей составляющей тока

$$\left. \begin{aligned} Z'_b &= \frac{Z_b}{(b/4)} \\ Z'_f &= \frac{2Z_f}{\sin^2 Y} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

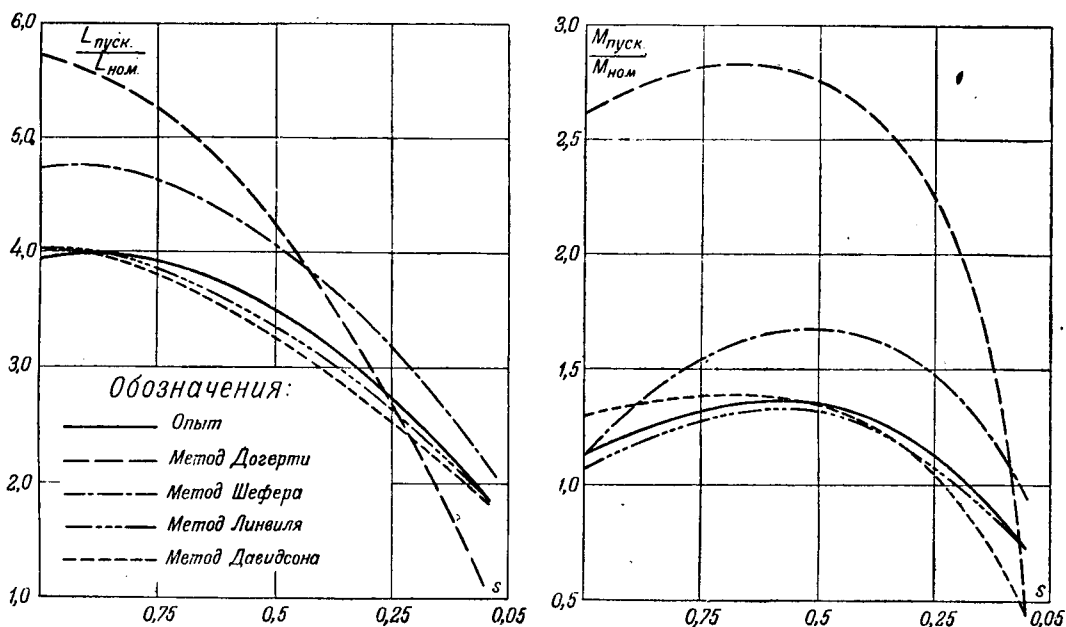


Рис. 5. Графическое сравнение пусковых характеристик синхронного двигателя, рассчитанных по методам: Линвиля, Давидсона, Догерти и Шефера.

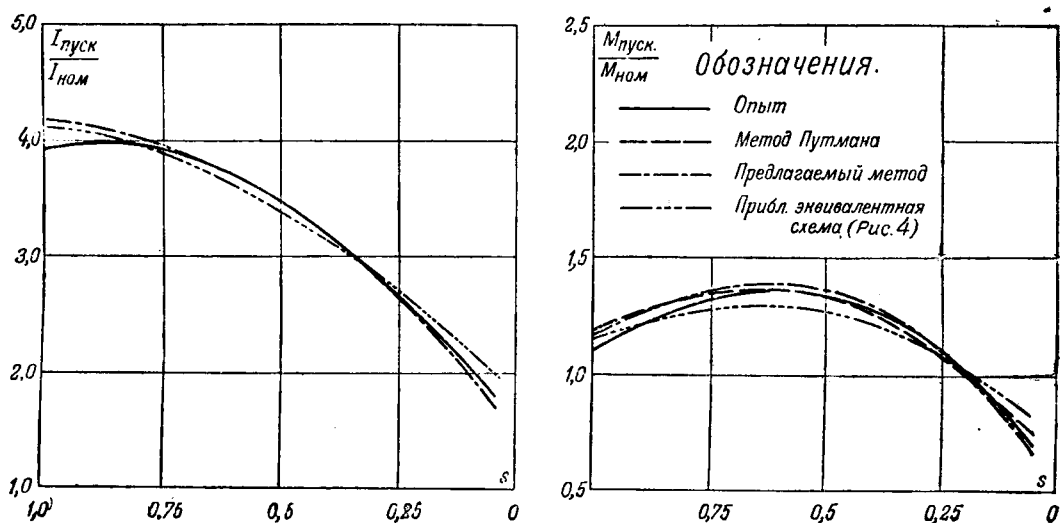


Рис. 6. Графическое сравнение пусковых характеристик синхронного двигателя, рассчитанных по методам Путмана, предлагаемому методу и приближенной эквивалентной схеме рис. 4.

Выражения (13) и (17) дают возможность применять метод Путмана при конечном числе стержней.

Следует отметить некоторую принципиальную неточность, допускаемую Путманом при определении намагничивающего тока статора. Путман считает, что прямобегущая составляющая намагничивающего тока вызывается только прямобегущей э. д. с. воздушного зазора, а левобегущая составляющая намагничивающего тока — левобегущей э. д. с. На самом деле это не точно. Действительно, из эквивалентных схем рис. 4 продольная и поперечная составляющие

намагничивающего тока статора определяются в виде:

$$I_{10d} = j \frac{\dot{E}_{id}}{x_{ad}}, \quad I_{10q} = j \frac{\dot{E}_{iq}}{x_{aq}},$$

откуда определяются прямо- и обратобегущие составляющие намагничивающего тока в виде:

$$\begin{aligned} I_{10p} &= j \dot{E}_{ip} \frac{x_{aq} + x_{ad}}{2x_{aq}x_{ad}} + j \dot{E}_{in} \frac{x_{aq} - x_{ad}}{2x_{aq}x_{ad}}, \\ I_{10n} &= j \dot{E}_{in} \frac{x_{aq} + x_{ad}}{2x_{aq}x_{ad}} + j \dot{E}_{ip} \frac{x_{aq} - x_{ad}}{2x_{aq}x_{ad}}. \end{aligned}$$

Как следует из последних уравнений, в создании прямобегущей составляющей намагничивающего тока статора участвует как прямо-, так и обратобегущие э. д. с. воздушного зазора. Аналогичный вывод следует и для обратобегущей составляющей намагничивающего тока.

Для иллюстрации всего вышеизложенного на рис. 5 и 6 дано сравнение результатов расчета по всем приведенным методам, а также по методу, известному под названием метода Догерти [Л. 5], с опытными кривыми, снятыми с двигателя мощностью $P = 5\,000$ л. с., $U = 2\,200$ в, $n = 240$ об/мин, $\cos \varphi = 0,85$.

Выводы. Проведенное исследование, а также сравнение с опытом результатов расчета по всем методам позволяет сделать следующие выводы:

1. Методы расчета пусковых характеристик Догерти и Шефера следует признать устаревшими и пользоваться ими не рекомендуется.

2. Методы Давидсона и Путмана являются частными случаями, вытекающими из полных эквивалентных схем синхронной машины, при пренебрежении высшими гармоническими полями роторных контуров и при стержнях с одинаковыми сопротивлениями рассеяния.

3. Метод Шефера является также частным случаем общих эквивалентных схем синхронной машины при пренебрежении высшими гармоническими полями роторных контуров при дополнительном допущении о пренебрежении обратобегущей э. д. с. воздушного зазора.

4. Предлагаемая эквивалентная схема для продольной оси полюсов (рис. 2) и подобная же схема для поперечной оси (рис. 4) дают хорошее

совпадение с опытом и пригодны при стержнях с разными полными сопротивлениями рассеяния.

5. Эквивалентная схема рис. 6 может быть рекомендована для быстрых предварительных расчетов, а также для определения пусковых характеристик неотчетливых приводов.

6. Пользуясь результатами анализа, нетрудно показать, что при изменении геометрического расположения стержней внутри полюсного наконечника будет оставаться неизменным пусковой момент и будет меняться входной момент. Это обстоятельство может быть использовано для обеспечения нужного входного момента.

Литература

1. И. С. Брук. Асинхронный пуск синхронных двигателей. Электричество, № 16, 1934.
2. Г. И. Штурман. Несимметрия вторичных цепей в асинхронных машинах. ОНТИ, 1935.
3. Д. А. Городский. Асинхронный ход синхронной машины. Электричество. № 1—2, 1944.
4. В. М. Матюхин. Основные соотношения при асинхронном пуске синхронных двигателей. Вестник электротехники, № 9—10, 1930.
5. Б. Е. Коник. Определение параметров в связи с расчетом пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин, диссертация на степень кандидата техн. наук, представленная в ЛПИ в 1947 г.
6. R. H. Park. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines, Transact. AIEE, т. 48, 1929.
7. T. M. Linville. Starting Performance of Salient-Pole Synchronous Machines, Transact. AIEE, т. 59, 1930.
8. H. V. Putman. Starting Performances of Synchronous Motors, Transact. AIEE, т. 46, 1927.

(10-9-1948)



Влияние параметров измерительной цепи и формы кривой намагничивания на работу измерительного трансформатора постоянного тока

Кандидат техн. наук В. Б. ПЕРЕТЦ

Свердловский филиал ВНИИМ им. Менделеева

Работа устройства для измерения больших постоянных токов, включающего насыщенный реактор и называемого часто трансформатором постоянного тока, определяется не только параметрами самого аппарата, но и в значительной

мере соотношением параметров измерительной цепи. В практике приходится иметь дело с подключением к этим аппаратам различных измерительных приборов и даже с заменой элементов измерительной цепи, являющихся составной частью самого аппарата, поэтому существенно знать имеющиеся взаимосвязи и граничные условия, влияющие на работу схемы в целом.

Как известно [Л. 1—6], трансформатор постоянного тока представляет собой систему из двух магнитопроводов, снабженных обмотками переменного и постоянного тока, схема включения которых показана на рис. 1.

Рассматривая действие схемы и полагая, что обмотки w_1 и w_2 не связаны с потоками рассеяния и что сопротивление и индуктивность измерительной цепи равны нулю, можно условно считать, что напряжение u_2 вызывает косинусоидальное изменение потока.

Фактически, в случае идеальной кривой намагничивания прямоугольной формы, когда $\gamma = 0$ и $\beta = 0$ (рис. 4), потоки в сердечниках I и II не могут быть косинусоидальными, так как оба сердечника насыщены и изменение потока в них может происходить только в ту часть периода, когда оно направлено противоположно подмагничивающему потоку, созданному измеряемым током. Вследствие того что обмотки постоянного тока включены последовательно согласованно (или сердечники надеты на одну и ту же шину), а обмотки переменного тока встречно, в течение одного полупериода будет происходить изменение потока только в сердечнике I, в течение другого — только в сердечнике II. В силу такого характера изменения магнитных потоков индуктив-

Кратко рассматриваются погрешности измерений трансформатора постоянного тока, вызываемые омическими и индуктивными сопротивлениями в измерительной цепи и отличием формы кривой намагничивания от идеальной. Устанавливаются граничные условия, обеспечивающие отсутствие одной из погрешностей при наличии омического сопротивления и намагничивающей составляющей вторичного тока. Даются формулы для определения погрешности, обусловленной рассеянием в трансформаторе и индуктивностью измерительной цепи.

ное сопротивление моток является функцией времени: в случае прямоугольной кривой намагничивания оно равно в течение одного полупериода и, конечно, в течение другого. Сердечники работают раздельно, каждый в соот-

ветствующую половину периода.

Используя высказанные соображения, можно получить представления о форме кривой тока, который, вообще говоря, можно рассматривать состоящим из двух составляющих: i'_2 — создающей размагничивающие ампервитки, выводящей магнитопровод из состояния насыщения (позвождающей возможность для изменения потока) и i''_2 — собственно намагничивающего тока, создающего переменную составляющую магнитного потока.

При замыкании измерительной цепи ток будет стремиться бесконечно расти, так как появление изменения потока (а следовательно, э. д. с. самоиндукции) необходимо, чтобы скомпенсировать ампервитки постоянного и переменного тока, равная нулю¹, т. е. чтобы размагничивающая составляющая достигла величины, определяемой равенством

$$i'_2 w_2 = I_1 w_1,$$

где I_1 — измеряемый постоянный ток;

w_1 — число витков в обмотке постоянного тока;

w_2 — число витков в обмотке переменного тока.

С момента начала изменения потока увеличение тока прекращается, так как индуктивное сопротивление измерительной цепи становится отличным от нуля — напряжение, приложенное к обмотке сердечника, уравнивается э. д. с.

¹ Величину коэрцитивной силы считаем исчезающе малой и в расчет не принимаем.

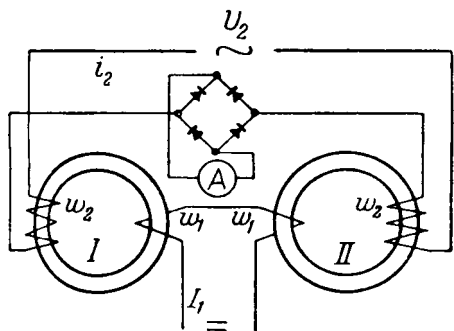


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного устройства.

самоиндукции. В случае прямоугольной формы кривой намагничивания намагничивающий ток равен нулю, а следовательно, в течение каждой половины периода ток в измерительной цепи будет неизменным и по величине равным размагничивающей составляющей i'_2 :

$$i_2 = i'_2 = \frac{w_1}{w_2} I_1.$$

В случае наличия ранее указанных условий кривая тока в измерительной цепи будет состоять из полуволн прямоугольной формы, что после выпрямления позволяет получить постоянный ток, по величине пропорциональный измеряемому.

Отличие кривой намагничивания материала сердечников от идеальной прямоугольной формы, наличие индуктивных и омических сопротивлений в измерительной цепи и рассеяния в магнитной системе влекут за собой изменение формы кривой тока i_2 , а следовательно, нарушение пропорциональности между I_1 и i_2 и появление погрешностей измерения. В частности, омическое сопротивление² вызывает изменение фазового сдвига между током и напряжением в измерительной цепи, а неравенство угла γ нулю — появление намагничивающей составляющей тока i_2 .

Обращаясь к случаю, когда $r_2 \neq 0$ и $\gamma \neq 0$, можно рассматривать процесс в одном из сердечников в два этапа: возрастание тока до величины $i_2 = i'_2$, когда э. д. с. самоиндукции отсутствует, и последующее его изменение, когда имеется намагничивающая составляющая. На первом этапе кривые тока и напряжения могут совпадать по фазе, что приводит к искажениям желательной формы кривой, в случае прямоугольной кривой намагничивания, подобным показанным на рис. 2.

Из линейной диаграммы рис. 3 видно, что наличие искажающего участка ab зависит от фазового сдвига α , определяемого в свою очередь величиной электромагнитной энергии, запасенной в поле, за счет расходования которой под-

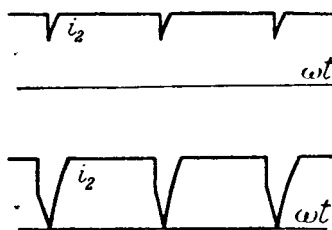
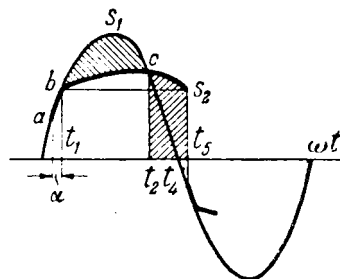


Рис. 2. Возможный вид кривой вторичного тока.



но так как

$$a\omega_2'' = \Phi_s \operatorname{tg} \gamma, \quad a\omega_2' = a\omega_1' - a\omega_{2n}'', \quad a\omega_1 = a\omega_2,$$

то

$$i_2 = \left(I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} - \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\omega_2} \Phi_s \right) + \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\omega_2} \Phi(t). \quad (4)$$

Выражение для функции $\Phi(t)$, определяющей изменение потока, создающего э. д. с. самоиндукции, обеспечивающую постоянство тока i_2' (аналогично случаю, когда $\gamma = 0$ и $i_2 = i_2'$), может быть найдено из дифференциального уравнения для измерительной цепи:

$$\omega_2 \frac{d\Phi_2'}{dt} = U \sin(\omega t + \alpha) - i_2' r_o.$$

решение которого при использовании начальных условий, что при $t = 0$, $\Phi_2' = 0$, будет выражение (5):

$$\Phi_2' = \frac{U \cdot 10^8}{\omega_2 \omega} [\cos \alpha - \cos(\omega t - \alpha)] - i_2' r_2 t 10^8. \quad (5)$$

Если в случае прямоугольной кривой намагничивания поддержание потока Φ_2' не требовало наличия намагничивающего тока, то в настоящем случае ток i_2'' и поток будут связаны между собой линейной зависимостью:

$$i_2'' = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\omega_2} \left\{ \frac{U \cdot 10^8}{\omega_2 \omega} [\cos \alpha - \cos(\omega t - \alpha)] - \left[I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} - \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\omega_2} \Phi_s \right] \frac{r_2 \cdot 10^8}{\omega_2^2} t \right\}. \quad (6)$$

Подставляя значение i_2'' в уравнение (2) и производя интегрирование в пределах от $t_1 = 0$ до $t_5 = \frac{\pi}{2}$, после преобразований, получим выражение для $\cos \alpha$, определяющего первое условие

$$\cos \alpha = i_2' r_2 \frac{\pi}{2U} \cdot \frac{1 + ak \operatorname{tg} \gamma}{1 - ak \operatorname{tg} \gamma}, \quad (7)$$

где

$$a = \frac{\pi r_2}{\omega_2^2 \omega}, \quad k = \frac{4 + \pi^2}{\pi^2}.$$

Используя второе условие, необходимое для получения кривой выпрямленного тока, не имеющей искажающего участка ab , а именно, что $i_2' r_2 = U \sin \alpha$, получим выражение для граничного значения величины косинуса угла сдвига

$$\cos \alpha_{zp} \geq \frac{\pi M^2}{\sqrt{4M^2 + \pi^2}}, \quad (8)$$

где

$$M = \frac{1 + ak \operatorname{tg} \gamma}{1 - ak \operatorname{tg} \gamma}.$$

Выражение (9) позволяет также, получив граничное значение для величины $i_2' r_2$, связать параметры измерительной цепи

$$(i_2' r_2)_{zp} \leq \frac{2UM^2}{\sqrt{4M^2 + \pi^2}}. \quad (9)$$

Нарушение неравенств (8) и (9) вследствие изменения U , r_2 , γ или других параметров, влечет за собой появление дополнительных искажений в кривой выпрямленного тока, восходящих искажения, вносимые намагничивающей составляющей. Следует заметить, что уменьшение угла γ сказывается в неравенстве

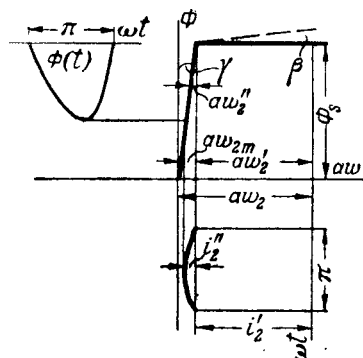


Рис. 4. Кривая намагничивания и кривые изменения тока и потока.

больше, чем уменьшение вторичного тока и сопротивления в измерительной цепи, так как в этом уменьшается левая и увеличивается правая часть неравенства.

В частном случае, когда $\gamma = 0$, граничные условия, даваемые неравенствами (8) и (9), приобретают более простой вид, так как $M = 1$.

Значение погрешности, вносимой трансформатором в случае, когда имеют место потери рассеяния, и кривая намагничивания может быть представлена рис. 4 при $\gamma = 0$, а также при наличии индуктивной нагрузки, можно установить, вновь рассматривая изменение тока в эквивалентной схеме в два этапа: до появления величины тока, достаточной для компенсации амплитуды вихревого постоянного тока, и после создания условий компенсации.

На первом этапе измерительная цепь выдает индуктивные сопротивления, обусловленные рассеянием, индуктивность измерительной цепи и омическое сопротивление. Обмотка трансформатора не оказывает сопротивления, так как изменение потока равно нулю.

После компенсации э. д. с. самоиндукции обеспечивает постоянство вторичного тока.

На первом этапе изменение тока определяется дифференциальным уравнением для измерительной цепи

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) + (2L_p + L_{en}) \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 + \omega_2 \Phi_2' = 0,$$

без последнего члена, так как

$$\frac{d\Phi_2'}{dt} = 0.$$

Решение уравнения при использовании начальных условий, что при $t = 0$, $i_2 = 0$ дает известное выражение

$$i_2 = \sqrt{\frac{U \sin \omega t}{r_2^2 + \omega^2 (L_{en} + c \operatorname{tg} \beta)^2}},$$

где c — коэффициент пропорциональности;
 β — угол наклона восходящей части кривой намагничивания;
 L_1 , $L_{\text{ан}}$ и r_2 — соответственно индуктивность рассеяния, внешняя индуктивность и омическое сопротивление измерительной цепи;
 ω — угловая частота.

Время t_1 , необходимое для достижения той величины, определяющей состояние коммутации, можно найти, положив $i_2 = I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2}$.

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \left[I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{\sqrt{r_2^2 + \omega^2 (L_{\text{ан}} + c \operatorname{tg} \beta)^2}}{U} \right].$$

Для оценки относительной погрешности, вносимой искажением кривой тока, можно обратиться к линейной диаграмме рис. 5, из которой следует, что

$$\delta_i = \frac{I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} - i_{2cp}}{I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2}},$$

где i_{2cp} — среднее значение вторичного тока, рассчитанное по магнитоэлектрическому прибору:

$$i_{2cp} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_2 dt = \frac{1}{\pi} \left\{ \pi I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} - 2 \left[I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \pi - (\pi - 2\omega t_1) I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} - 2 \int_0^{t_1} i_2 dt \right] \right\}.$$

Допуская некоторую ошибку в сторону увеличения погрешности, а именно, полагая площадь abc треугольником, можно значительно упростить выражение для δ_i :

$$t_1 = \frac{\omega t_1}{\pi} = \frac{1}{\pi} \arcsin \left[I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{\sqrt{r_2^2 + \omega^2 (L_{\text{ан}} + c \operatorname{tg} \beta)^2}}{U} \right]. \quad (11)$$

Полагая погрешность равной, например, величине, допускаемой для приборов класса 2,5, $=0,025$, можно убедиться, что величина арктангуса мала и можно без существенной ошибки рассматривать $\arcsin x = x$, тогда

$$\delta_i = I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{\sqrt{r_2^2 + \omega^2 (L_{\text{ан}} + c \operatorname{tg} \beta)^2}}{\pi \sqrt{2} U_{\text{эф}}}, \quad (12)$$

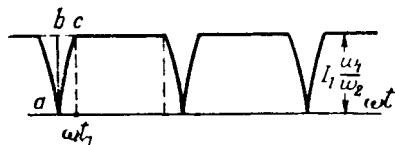


Рис. 5. Исканная кривая вторичного тока.

для приборов высших классов точности это тем более справедливо ($U_{\text{эф}}$ — эффективное значение напряжения).

Выражение для погрешности (11) и (12) выясняют влияние параметров электрической и магнитной цепей, в частности позволяют установить предельный допустимый угол наклона кривой намагничивания.

Желая получить определенную погрешность не большую, чем некоторая максимальная $\delta_{i \text{ макс}}$, можно при данном максимальном измеряемом токе и заданной кривой намагничивания установить предельно допустимые величины r_2 , $U_{\text{эф}}$ и $L_{\text{ан}}$. Действительная погрешность трансформатора будет меньше найденной по формуле (12) в силу принятых выше упрощений.

Как следует из полученных выражений, величина δ_i пропорциональна полному сопротивлению измерительной цепи; его можно уменьшить подключением емкости. Таким путем можно уменьшить погрешность при использовании магнитного материала с большим углом β или в случае большой индуктивности измерительной цепи. Остаточную погрешность можно устранить правильным подбором параметров измерительной цепи в соответствии с граничными условиями, рассмотренными выше.

Литература

1. Л. А. Бессонов. Применение дросселей насыщения в современной технике. Электричество, № 5, 1948.
2. В. О. Маркс и В. Д. Алесин. Изменение больших сил постоянного тока с помощью измерительных трансформаторов. Измерительная техника, № 3 и № 4—5, 1940.
3. Р. Б. Попов. Контроль расхода электроэнергии в электролизных цехах. ГОНТИ, 1945.
4. Ю. Г. Толстов. Работа измерительных трансформаторов постоянного тока при активной нагрузке. Известия академии наук СССР, ОН, № 4, 1948.
5. W. Krämer. Ein einfacher Gleichstromwandler mit echten Stromwandlereigenschaften. ETZ, № 49, 1937.
6. W. Krämer. Prüfung des Gleichstromwandlers und seine Fehlerkompensation. AEG Mitt., № 5, 1939.

[8. 2. 1940]



Открытое электрическое искрение в воспламеняющейся рудничной атмосфере

Кандидат техн. наук В. С. КРАВЧЕНКО

Институт горного дела Академии наук СССР

С появлением первых электрических установок в подземных выработках (80-е годы прошлого столетия) связаны катастрофы с людскими жертвами и материальным ущербом. Борьба со взрывами рудничного газа от электричества стала одним из важнейших направлений научных изысканий в горном деле.

Исследования в области взрывобезопасности рудничного электрооборудования получили особенный размах в Советском Союзе.

За годы сталинских пятилеток горная промышленность Советского Союза получила десятки тысяч электрических машин и электрических аппаратов, специально приспособленных для безопасной работы в воспламеняющейся атмосфере. Применение взрывонепроницаемых бронированных оболочек со специально рассчитанными фланцевыми зазорами в сочетании с хорошей вентиляцией рудника позволило полностью электрифицировать подземные выработки и осуществить механизацию горных работ на новом более высоком энергетическом уровне. Дальнейшая интенсификация процессов угледобычи неизбежно связана с ростом энерговооруженности забоев и применением автоматики и телемеханики.

Массовое применение в газовых шахтах технических средств связи, производственной сигнализации, дистанционного управления, телеконтроля и т. д. связано с необходимостью заключения во взрывонепроницаемые оболочки множества реле, кнопок, автоматов, сигналов и других электрических устройств. Простая и дешевая аппаратура значительно утяжеляется, становится громоздкой, дорогой и правила ухода и надзора за ней значительно усложняются.

Значительным достижением последнего времени, разрешающим указанные затруднения, можно считать появление искробезопасных систем. Малый вес, дешевизна, простота устрой-

В результате изучения природы воспламенения метана электрическими искрами выяснен вероятностный характер явления и установлена связь между значением воспламеняющего тока и вероятностью воспламенения. Разработан метод оценки искробезопасности, отличающийся определенностью заключения и высокой степенью надежности. Приведены экспериментальные характеристики, необходимые для расчета на искробезопасность индуктивных цепей, не защищенных и защищенных искрогасящими устройствами. Обоснована возможность широкого применения электрооборудования связи, автоматики и телемеханики (в рудниках, опасных по газу и пыли) в простом искробезопасном исполнении.

ства и эксплуатации хорошо отличаются искробезопасное электрооборудование от устройств взрывонепроницаемых оболочками.

Настоящее исследование, показавшее, что опасность открытого искрения в ряде случаев может быть обеспечена при передаче по линиям мощностей до 30÷60

кВт, доказало возможность выполнения почти всех электрических устройств слабого тока в малом рудничном исполнении.

Выбор простого и дешевого искробезопасного электрооборудования зависит от решения двух главных вопросов: 1) какова воспламеняющая способность электрической искры, возникающей в данной электрической цепи? 2) какие предохранительные устройства следует ввести в данную цепь, чтобы обеспечить ее искробезопасность?

Изучение природы воспламенения метана электрическими искрами, с одной стороны, экспериментальное построение характеристик искробезопасности различных электрических цепей, с другой, — позволило подойти к решению этих практически важных вопросов.

Природа воспламенения метана электрическими искрами и оценка искробезопасности электрических цепей. Явление воспламенения взрывчатых газовых смесей от электрического разряда представляет собой сложный физико-химический процесс. Согласно современным представлениям воспламенение метана относится к классу окислительных газовых реакций с медленно развивающимися, разветвляющимися цепями [Л. 1].

Предположение о цепном механизме воспламенения было развито Н. Н. Семеновым [Л. 2]. Исходные продукты — кислород воздуха и метан — из-за высоких энергетических барьеров, лежащих между ними, не могут вступить в единение друг с другом в нормальных температу-

турных и барометрических условиях. Для начала реакции необходимо образование в смеси некоторой концентрации активных центров — свободных атомов и радикалов (OH , CH_3 и др.). Возникшие в силу каких бы то ни было причин активные центры реагируют с исходными веществами и переводят их в конечные продукты реакции. Эти процессы требуют сравнительно малой энергии активации и идут поэтому с большой скоростью.

Для того чтобы реакция могла протекать и после удаления возбудителя активных центров (пламени, искры), необходимо, чтобы активные продукты регенерировались при реакции, т. е. чтобы при взаимодействии активных продуктов с исходными веществами получались не только стабильные конечные продукты реакции, но и новые молекулы активных промежуточных продуктов [Л. 3]. При окислении метана происходит регенерация активных промежуточных продуктов, что позволяет отнести эту реакцию к классу цепных. В ходе реакции происходит прогрессивное выделение новых активных центров и разветвление цепей.

Роль электрической искры в процессе воспламенения сводится к созданию высокой концентрации активных центров.

Механизм образования активных центров в электрическом разряде, повидимому, заключается в активирующих столкновениях теплового характера, а также в столкновениях между быстрыми электронами и нейтральными молекулами, в результате которых и происходят ионизация и диссоциация нейтральных молекул газовых смесей.

Предложенная схема явления воспламенения метана электрическими искрами не является единственной. Еще и теперь можно встретить объяснения, где зажигающий источник рассматривается лишь как источник тепла, роль которого сводится к повышению температуры некоторого минимального объема газа до «температуры воспламенения». Этой «термической теории» противопоставляется «ионная теория», приписывающая наибольшую реакционную способность ионам и рассматривающая электрический разряд только, как источник ионизации.

Цепная схема воспламенения является наиболее убедительной, так как объясняет все известные опытные данные, несмотря на их разный характер. Такова качественная характеристика явления. Количественное же описание явления воспламенения метана, в частности, весьма важное с точки зрения практики — теоретическое определение предела зажигания, — сопряжено с большими затруднениями. Поэтому, хотя и известно, что слабые искры не воспламеняют газовую смесь, величина минимальной воспламеняющей энергии до сего времени остается неизвестной.

Практически решение вопроса о воспламеняющей способности электрических искр, возникающих в электрических цепях, сводится к макетированию этих цепей, к их испытанию и к

построению опытных «характеристик искробезопасности». Характеристики искробезопасности даются обычно в функции так называемого минимального воспламеняющего тока. Это значение тока определяется как ток, обеспечивающий хотя бы один взрыв от искры размыкания и при уменьшении на 10% не дающий ни одного воспламенения при многократном повторении искрений (в среднем до 5 000 раз). Этот ток зависит от переменных параметров цепи — индуктивности, напряжения, емкости. Для определения тока также обязательно указывать условия испытаний: схема включения, род тока, форма и материал контактов, скорость их размыкания, внешние параметры (концентрация газовой смеси, давление, температура).

Однако, и такой метод оценки безопасности искрения также наталкивается на ряд затруднений, связанных с вероятностной природой взрыва.

Электрический разряд одних и тех же параметров, происходящий в газовой среде при одних и тех же внешних условиях, может зажечь, но может и не зажечь газовую смесь. Часто большая яркая искра не вызывает воспламенения, в то время как едва заметный концентрированный разряд вызывает взрыв с первого же размыкания. Наблюдая тысячи одинаковых разрядов, не приводящих к зажиганию, можно прийти к заключению о полной безопасности этого искрения. Между тем, часто продолжение опытов приводит к взрыву.

Такой неопределенный характер явления вселяет неуверенность в надежности обычных испытаний на искробезопасность. Было бы неосторожно полагаться, как это обычно делается, на результат нескольких тысяч искрений и считать, что найденный при этом минимальный воспламеняющий ток действительно является предельным воспламеняющим током. Опыт показывает, что при такой постановке испытаний всегда можно ожидать воспламенения при более низком значении тока.

Именно такая постановка испытаний приводит к противоречивым данным в определении минимального воспламеняющего тока. Так [Л. 6], для цепи с индуктивностью в 0,095 гн минимальный воспламеняющий ток был определен в 0,24 а; для тех же условий тот же воспламеняющий ток в других опытах оказался значительно ниже, а именно 0,165 а. Наконец, третье значение минимального тока — 0,185 а было определено как среднее значение двух токов — 0,18 и 0,19 а, из которых ток 0,19 а воспламенял один раз на 100 искрений, а ток 0,18 а не успевал воспламенить смесь при том же количестве опытов.

Результат зависит от числа искрений, принятых для статистических наблюдений. Чем большее число опытов принято во внимание, тем меньшее значение воспламеняющего тока удается обнаружить. Таким образом, возникает чисто практический вопрос о количестве искрений, достаточном для определения действительного граничного воспламеняющего тока, и о методике

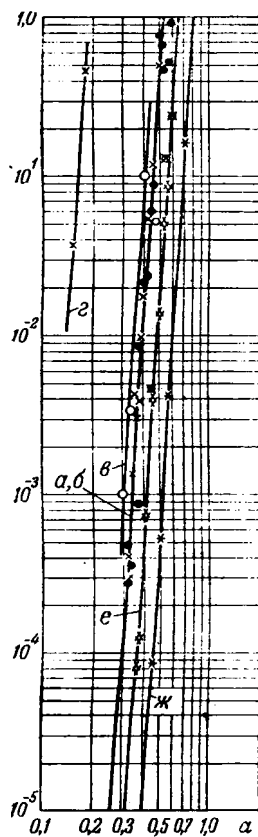


Рис. 1. Зависимость вероятности воспламенения (отложена по оси ординат) от воспламеняющего тока при различных условиях искрообразования.

общему большому числу искрений, является степенной функцией воспламеняющего тока.

Примеры полученных экспериментальных кривых показаны на рис. 1. Здесь в логарифмической сетке по оси ординат отложены вероятности (точнее — повторяемости) воспламенения. По оси абсцисс отложены значения воспламеняющих токов (в амперах). Кривая *а* снята при напряжении источника 10 в, индуктивности цепи 0,237 гн, контактах из платины, зашунтированных входным сопротивлением катодного осциллографа (2,5 мгом); кривые *б* и *в* — 30 и 200 в при тех же прочих условиях; *г* — 30 в при индуктивности 0,5 гн и контактах из платины без шунта; *д* — 200 в при индуктивности 0,005 гн, зашунтированной детектором, и при контактах из стали и платины; *е* — 200 в при индуктивности 0,22 гн, зашунтированной детектором, и при контактах из стали и платины; *ж* — 200 в при индуктив-

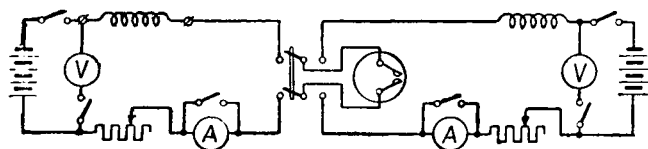


Рис. 2. Схема включения приборов при испытании на искробезопасность.

испытаний, гарантирующей определение этого тока.

На воспламеняющую способность электрического разряда влияют: напряжение и величина тока искры; продолжительность искры; форма, размер, материал и качество поверхностей искровых контактов; концентрация, давление, температура и влажность газовой смеси, наличие примесей и другие факторы (местные вихровые потоки и конвекции, непрерывно меняющие характер молекулярных столкновений, и условия образования реакционных цепей; условия ионизации в искровом промежутке и т. д.).

Наиболее продуктивным оказывается статистический метод исследования. Наблюдая десятки тысяч электрических искр размыкания во взрывчатой смеси метана и воздуха, удалось обнаружить вполне определенную закономерную связь между вероятностью воспламенения и воспламеняющим током. Оказалось, что для самых разнообразных условий искрообразования вероятность воспламенения, определенная, как отношение числа взрывов к

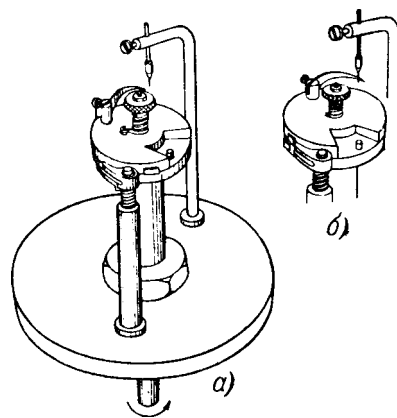


Рис. 3. Искропроизводящее устройство.

а — контакты разомкнуты; *б* — замкнуты.

ности 2,01 гн, зашунтированной детектором, при контактах из стали и платины. Все опыты производились во взрывной камере, наполненной смесью воздуха и метана концентрации 8,3 (по объему), давлении 760 мм рт. ст. и температуре 18°С. Искра, зажигающая смесь, получалась при размыкании цепи, показанной на рис. 3. Левая часть схемы была составлена из неизменяемых элементов и служила для контроля. Элементами правой части схемы (индуктивность, число аккумуляторов, сопротивление) изменялись.

Искропроизводящее устройство (рис. 3), помещенное во взрывной камере, обеспечивало многократное размыкание между тонким платиновым стержнем и остро заточенной платиновой или стальной пластинкой. Скорость размыкания регулировалась натяжением пружины и поддерживалась выше 0,1 м/сек. Устройство обеспечивало небольшую задержку времени замыкания контактов, достаточную для нарастания тока установившегося значения.

Найденная закономерность позволяет прийти к заключению, что резкой границы между опасным и безопасным значением тока не существует. Всегда имеется плавный переход от больших токов, при размыкании которых происходит 100% воспламенений (вероятность p на единицу), к малым токам, при которых воспламенения случайны и даже мало вероятны. Создается впечатление, что вообще размыкание любого тока приводит к взрыву, но только с различной степенью вероятности воспламенения. Повидимому, существует величина I_0 , практически не дающая воспламенения, однако точное ее определение встречает большие экспериментальные затруднения. Для того чтобы получить одно зажигание при малых вероятностях воспламенения (10^{-4} — 10^{-5}), необходимо выполнить весьма большое количество искр. Связанное же с этим затупление контактов и большее понижение вероятности воспламенения.

Нам не удалось получить воспламенения при токах, которым по вероятностной кривой соответствуют вероятности воспламенения 10^{-4} и ниже. Лежит ли именно здесь предел воспламенения (нулевая вероятность) или же факт

существования взрыва объясняется несовершенством опытов (затуплением контактов), еще не установлено. В связи с этим интересно отметить, что величина воспламеняющей энергии в 0,002 дж, еще не так давно считавшаяся предельной, в настоящее время оказалась только промежуточным значением, так как удалось получить воспламенение при искре в 0,0005 дж.

Некоторые теоретические основания, аналогия с вероятностной кривой при зажигании от пламени, проникающем через фланцевые зазоры взрывонепроницаемых оболочек [Л. 5], и общий ход кривой позволяют предполагать, что «идеальная» зависимость между воспламеняющим током и вероятностью воспламенения определяется продолжением экспериментальной линии.

В то же время большое число опытов, выполненное при токах, близких к вероятности воспламенения 10^{-5} , не дало ни одного взрыва. Поэтому нижняя часть кривой (без экспериментальных точек) могла бы считаться условной. Только тщательное изучение хода кривой в ее нижней части позволит сделать более определенные заключения. Пока же нет прямых экспериментальных оснований для утверждения, что предельный невоспламеняющий ток имеет меньшее значение, чем то, которое определяется «условной» вероятностью воспламенения 10^{-5} .

В производственных условиях вероятность возникновения взрыва газа меньше, чем в испытательной камере, где обычно создаются самые тяжелые условия. Малая вероятность скопления газа именно около искрящего контакта при наиболее легко воспламеняющейся концентрации метана (8,5%); чаще одиночное (редкое), а не массовое искрение; обычно тупые контакты, — все это настолько снижает вероятность воспламенения, что «лабораторная» искра, соответствующая условной вероятности воспламенения $10^{-5} \div 10^{-6}$ (по кривым рис. 1), в условиях рудника могла бы считаться практически безопасной (обоснование приемлемых нормативов, очевидно, должно быть предметом специального исследования). Поэтому все характеристики искробезопасности, построенные нами, в дальнейшем даются для вероятности воспламенения 10^{-5} .

Обнаруженная закономерность в распределении вероятностей воспламенения позволяет на основании относительно небольшого числа искрений определить такое значение воспламеняющего тока, какое получилось бы при выполнении нескольких сотен тысяч искрений.

Предлагаемый ниже статистический метод оценки искробезопасности основан на том факте, что вероятностные кривые, построенные для различных случаев искрообразования, оказались параллельными друг другу (рис. 1). Благодаря этому появилась возможность рассчитывать весь ход вероятностной кривой по координатам одной опытной точки и по известному общему углу наклона.

Обозначив координаты опытной точки через I_0 (воспламеняющий ток) и W_0 (вероятность воспламенения), нетрудно рассчитать воспламе-

няющий ток I_n , соответствующий любой, заранее заданной, вероятности воспламенения W_n , в исследованных пределах по формуле

$$I_n = I_0 \left(\frac{W_n}{W_0} \right)^{0,0312}. \quad (1)$$

При определении опытной величины вероятности воспламенения W_0 очень важно знать то минимальное число искрений, которое необходимо выполнить, чтобы получить достаточно точное значение вероятности. Это число легко определить в процессе самих испытаний. По мере увеличения числа искрений колебания статистической вероятности воспламенения уменьшаются, и ее величина приближается к истинному значению вероятности воспламенения. При воспламеняющих токах, обеспечивающих вероятность воспламенения порядка 10^{-1} , обычно достаточно около 30 опытов (по 10 — 40 искрений в каждом), чтобы получить достаточно точное значение вероятности воспламенения. Таким образом, достаточно выполнить около тысячи искрений для того, чтобы затем по формуле (1) определить такое значение воспламеняющего тока, какое получилось бы в результате нескольких сотен тысяч искрений.

Характеристики искробезопасности индуктивных цепей с искрогасящими шунтами и без них. Наибольший интерес представляют характеристики искробезопасности для индуктивных цепей. В этих цепях энергия, рассеиваемая в искре размыкания, определяется не только энергией, поступившей от источника тока, но и энергией исчезающего магнитного поля индуктивности. Поэтому индуктивная нагрузка менее благоприятна в отношении искробезопасности, чем чисто активное сопротивление, и обычно допускает передачу по линии значительно меньших мощностей (единицы ватт вместо десятков ватт).

Различные искрогасящие схемы улучшают искробезопасность индуктивных цепей [Л. 4]. К числу таких схем относятся схемы с шунтами из различных сопротивлений: проволочных, карбидкремниевых (нелинейных) сопротивлений, детекторных шунтов и др.

Схемы с детекторными шунтами (рис. 4, а, б и в) выгодно отличаются от других тем, что они не загружают линию дополнительной нагрузкой, как это происходит при проволочных и частично при карбидкремниевых шунтах. В момент же размыкания линии индуктивность и шунт образуют замкнутый контур, в котором гасится магнитная энергия катушки. К недостаткам схем с детекторными шунтами следует отнести их демпфирующее действие, проявляющееся в цепях с колеблющимися якорями. Введение добавочного сопротивления (рис. 4, в) уменьшает демпфирующее действие шунта, но вместе с тем ухудшает его искрогасящее свойство.

Ниже приводится ряд экспериментальных характеристик искробезопасности, полученных автором для индуктивных цепей с различными искрогасящими шунтами и без них. Характеристики, приведенные на рис. 5, относятся к чисто-

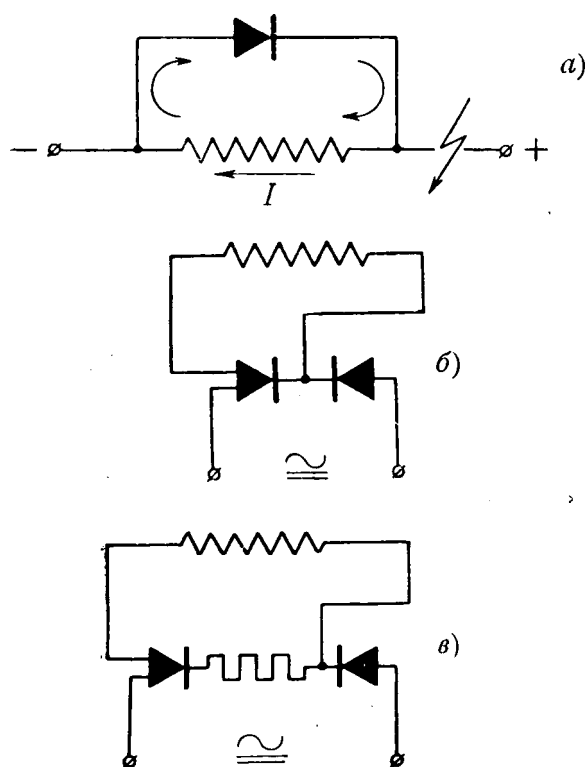


Рис. 4. Схемы включения детекторных шунтов для искрогашения.

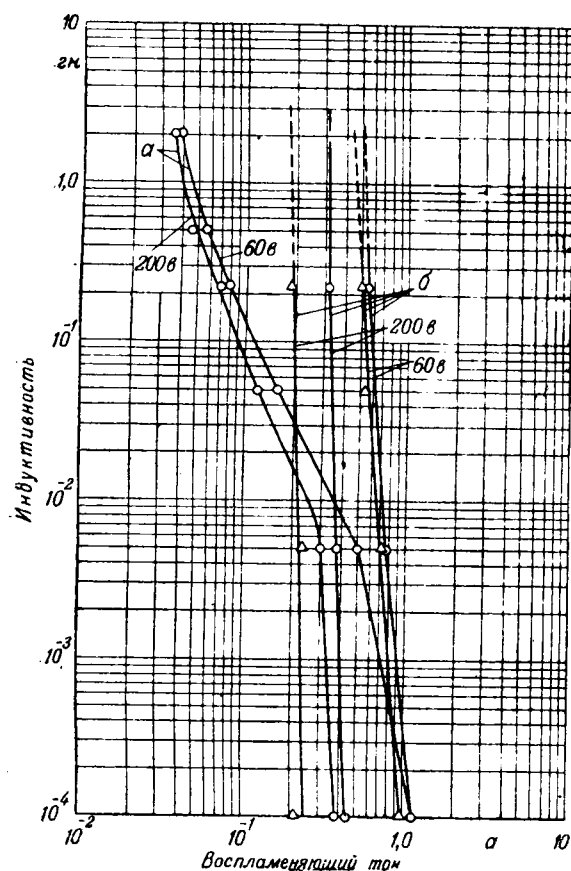


Рис. 5. Характеристики искробезопасности. Концентрация метана в воздухе 8,5%; давление 760 мм рт. ст., температура 18°C; контакты из стали и платины, условная вероятность воспламенения 10^{-5} , напряжение 60 и 200 в.

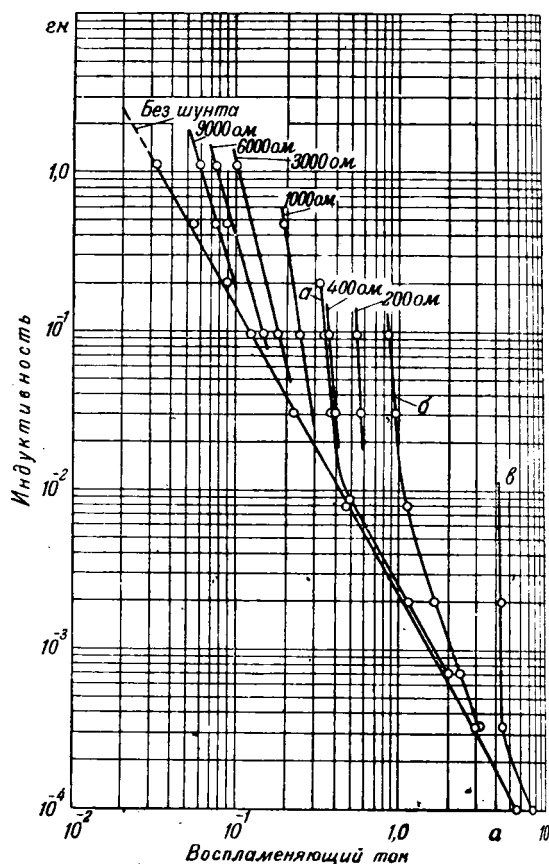


Рис. 6. Характеристики искробезопасности. Концентрация метана в воздухе 8,3—8,35%; платиновые контакты; скорость размыкания более 0,1 м/сек; пересчет данных [Л.1] к условной вероятности воспламенения $10^{-5} \div 10^{-6}$; напряжение 24 в.

индуктивным цепям без стального сердечника и к индуктивным цепям с детекторными шунтами из селена б при напряжении источника постоянного тока 60 и 200 в при высоких (кружки) и низких (треугольники) скоростях размыкания. Характеристики, приведенные на рис. 6, относятся к индуктивным цепям без шунта и к индуктивным цепям с проволочными шунтами (200; 400; 1 000; 3 000; 6 000; 9 000 ом), с шунтами из карбид-кремниевых сопротивлений (кривая а) и с детекторными шунтами (кривая б — купрокс, в — селеновый детектор) при высоких скоростях размыкания. Данные рис. 6 получены пересчетом экспериментальных результатов [Л.1] применительно к принятым вероятностям воспламенения.

Характеристики рис. 5 и 6 показывают, что наибольшее увеличение мощности, безопасно передаваемой по линии, может быть достигнуто с помощью детекторных шунтов из селена. Менее эффективны купроксные шунты, и шунты из проволочных и нелинейных сопротивлений.

Эффект от применения шунтов тем выше, чем выше индуктивность цепи. Так, например, безопасно передаваемая по линии мощность при индуктивности в 2,01 Гн и напряжении 200 в составляет 7,2 вт. При подключении детекторного шунта мощность увеличивается в 9 раз. При

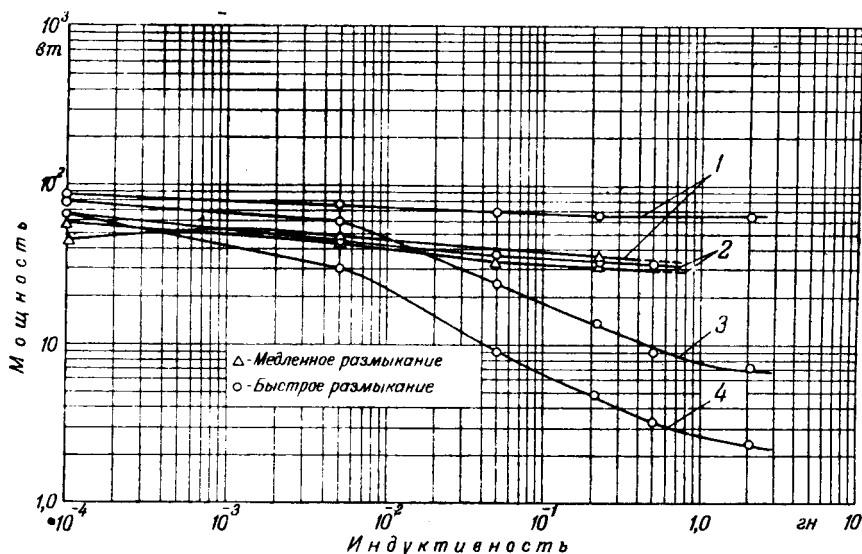


Рис. 7. Мощности, безопасно передаваемые по линии с индуктивной нагрузкой при детекторной защите и без нее.

Кривые 1—напряжение 200 в, селеновый детектор; 2—60 в, селеновый детектор; 3—200 в, без шунта; 4—60 в, без шунта. Кружки — быстрое размыкание, треугольники — медленное.

индуктивности 0,049 Гн безопасно передаваемая мощность увеличивается только в 2,8 раза — с 24 до 68 Вт.

Полученные характеристики искробезопасности позволяют установить, что максимальные мощности (рис. 7), которые можно безопасно передавать по линии, перекрывают в ряде случаев потребности цепей рудничной производственной сигнализации, связи, блокировок и т. д. Этот вывод имеет большое практическое значение, так как доказывает, что почти все рудничные цепи слабых токов могут применяться в простом и экономичном искробезопасном исполнении.

Приведенные характеристики искробезопасности могут быть использованы для предварительных расчетов электрических цепей на искробезопасность. При пользовании кривыми для практических расчетов необходимо внести поправку на материал контактов (медь, алюминий и т. д.).

Можно надеяться, что детекторная защита наряду с другими устройствами искрогашения

найдет весьма широкое применение в шахтах, опасных по газу и пыли, для достижения искробезопасности в цепях слабых токов. Тем самым будут открыты пути для применения более дешевой, простой и в то же время значительно облегченной и безопасной аппаратуры.

Литература

1. Г. Гиммельман и М. Нейман. ДАН, т. 4, № 1—2, 1934.
2. Н. Н. Семенов. Теория цепных реакций. Успехи химии, т. 5, № 3. 1936.
3. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Изд-во Академии наук СССР, 1947.
4. В. С. Кравченко. Обеспечение искробезопасности электрических цепей слабого тока. Углетехиздат, 1948.
5. С. Е. R. Bruce, N. L. Johnson. JIEE, ч. II, т. 95, № 43, 1948.
6. G. Allsop, F. J. Hartwell, E. M. Guenault, A. R. Baker. Safety in Mines Research, № 106, 1947.

[1. 9. 1949]



Схема электрического сдвига начала прохождения тока

Инж. В. В. КАПЛАН и инж. В. М. НАШАТЫРЬ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

При постановке ряда экспериментальных работ в области техники высоких напряжений встречается необходимость сдвига во времени начала процесса в нескольких контурах. В отдельных случаях время сдвига может колебаться от долей полупериода до нескольких периодов промышленной частоты, причем разброс не должен превышать нескольких десятков микросекунд, что исключает возможность использования механических устройств. При ограниченных величинах тока и напряжения электрический сдвиг, как и другие типы синхронизации, достаточно просто и с большой степенью точности осуществляется с помощью управляемых ионных приборов, но для высоких напряжений и значительных токов их использование также практически исключено.

Ниже дается описание «схемы электрического сдвига», разработанной в лаборатории Техники высоких напряжений ЛПИ, позволяющей в широких пределах сдвигать начало рабочего процесса в контурах при достаточно широком диапазоне напряжений и токов.

Два электрических контура (рис. 1), источником э. д. с. которых являются генераторы постоянного тока, заряженные конденсаторы и

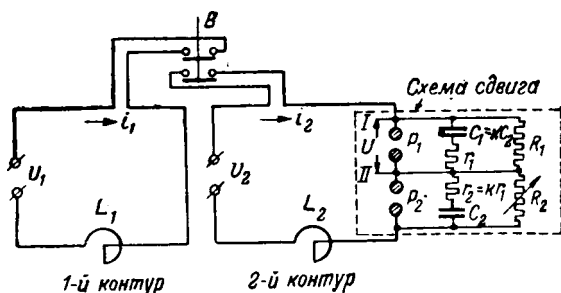


Рис. 1. Схема электрического сдвига во времени начала прохождения тока в двух контурах.

B — включающее устройство; U_1 , U_2 , L_1 , L_2 — напряжения и индуктивности рабочих контуров. Элементы схемы сдвига: P_1 , P_2 — разрядники; C_1 , C_2 — конденсаторы; r_1 , r_2 — демпфирующие сопротивления; R_1 , R_2 — шунтирующие сопротивления.

Описывается разработанная в лаборатории Техники высоких напряжений ЛПИ электрическая схема, дающая возможность в широких пределах сдвигать во времени начало прохождения тока в двух или более контурах и пригодная для работы при высоких напряжениях и значительных токах в управляемых контурах.

т. п., замыкаются некоторым устройством B , гарантирующим требуемую одновременность включения¹. В первом контуре начинает протекать рабочий ток i_1 , а рабочий режим

во втором контуре начнется лишь через предварительно выбранный интервал времени τ , когда сработают разрядники P_1 и P_2 . Сдвиг во времени их срабатывания достигается путем соответствующего перераспределения напряжений, приходящихся на разрядники, в течение зарядного переходного процесса, протекающего во втором контуре после замыкания выключателя B . Первоначально напряжения на плечах схемы сдвига распределяются в основном по емкостям, а в дальнейшем — по шунтирующим сопротивлениям. При соответствующем выборе параметров схемы с достаточной степенью точности можно допустить, что действительный переходный процесс в контуре протекает как бы в две ступени: 1) заряд емкостей C_1 и C_2 в последовательном контуре при пренебрежении влиянием сопротивлений R_1 и R_2 ; 2) перераспределение напряжений между плечами I—II и II—III схемы сдвига из-за наличия сопротивлений R_1 и R_2 . При этом можно пренебречь падением напряжения на индуктивности L_2 . Обычно каждый контур содержит некоторую индуктивность. Для предотвращения колебательного характера заряда, обусловленного индуктивностью цепи и емкостью схемы сдвига, и появления на разрядниках течение первой стадии переходного процесса напряжений, которые могут вызвать их преждевременное срабатывание, в цепь включают демпфирующее сопротивление $r_1 + r_2$, несколько большее критического сопротивления цепи. В рабочем режиме все элементы схемы сдвига исключаются из основного контура, так как

¹ Вопросы, связанные с обеспечением одновременного включения нескольких контуров, в данной статье не рассматриваются. В каждом конкретном случае это может быть осуществлено с помощью соответствующих электрических средств.

шунтируются при срабатывании разрядников. При выборе указанных соотношений между параметрами схемы сдвига в первой стадии переходного процесса на разряднике P_1 установится напряжение, несколько превышающее $\frac{1}{k+1} U_2$, а на разряднике P_2 напряжение, несколько превышающее $\frac{k}{1+k} U_2$. Некоторое превышение напряжений на P_1 и P_2 соответствующих частей напряжения источника э. д. с. второго контура объясняется тем, что при апериодическом зарядном режиме после максимума зарядного тока на индуктивности L_2 устанавливается отрицательное падение напряжения, обуславливающее лобовое падение напряжения на сопротивлениях r_1 и r_2 . Разрядники не должны срабатывать в первой стадии переходного процесса, и их пробивные напряжения должны превышать соответствующие напряжения, появляющиеся на плечах I—II и II—III схемы сдвига. Во второй стадии переходного процесса напряжение на плече II—III схемы начнет постепенно уменьшаться, а на плече I—II возрастать, если принять, что $R_1 > R_2$.

В некоторый момент времени в зависимости от величины пробивного напряжения разрядник P_1 срабатывает; тогда напряжение U_2 ложится целиком на разрядник P_2 , который при этом также пробивается, начиная тем самым рабочий процесс во втором контуре. Варьируя соотношения между величинами шунтирующих сопротивлений R_1 и R_2 , можно достигнуть срабатывания разрядника через любой промежуток времени τ от начала переходного процесса. В отдельных случаях оказывается целесообразным регулировать величину сдвига изменением одновременно двух параметров — сопротивления R_2 и пробивного напряжения разрядника P_1 .

Коэффициент k кратности величин емкостей C_1 и C_2 схемы сдвига целесообразно принимать существенно большим единицы.

При этом в течение второй стадии переходного процесса напряжение на разряднике P_1 должно возрасти в большее число раз. Поэтому легче добиться того, чтобы при данном времени сдвига τ пробивное напряжение этого разрядника достигалось на более круто возрастающей части экспоненциальной кривой напряжения. Это заметно снизит погрешность величины τ при данном разбросе в величине пробивного напряжения разрядника P_1 . При необходимости осуществления сдвига тока более чем в двух контурах, в каждый из них помещается аналогичная схема, настроенная на соответствующие времена сдвига $\tau_1, \tau_2 \dots$ и т. д.

Осциллограммы рис. 2 иллюстрируют работу схемы электрического сдвига в двух колебательных контурах с частотами собственных колебаний порядка 150 гц. Кроме токов i_1 и i_2 , протекающих в каждом из контуров, на осциллограммах показано напряжение u , записываемое шлейфом, включенным последовательно с сопро-

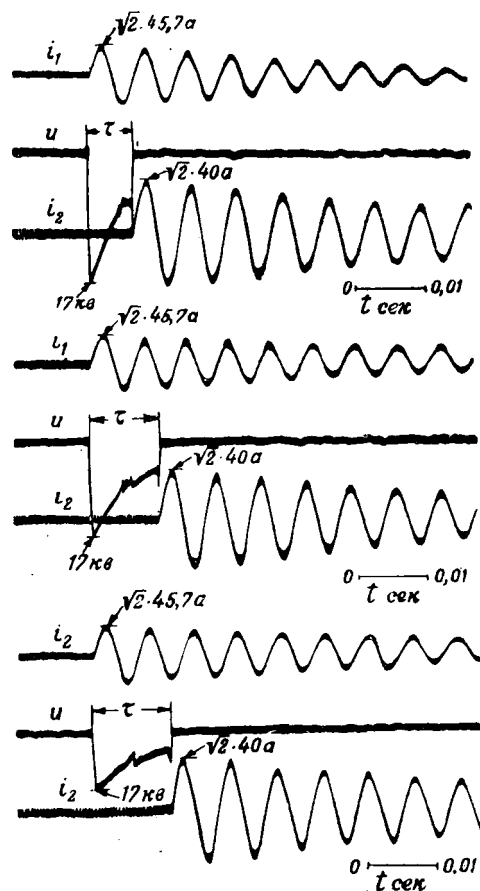


Рис. 2. Осциллограммы электрического сдвига тока в двух контурах.

i_1, i_2 — рабочие токи в первом и втором контурах; u — напряжение на разряднике P_1 ; τ — время сдвига.

тивлением R_2 . Все осциллограммы сняты при одном и том же начальном напряжении U_2 , но при различных величинах R_2 , поэтому масштабы напряжения на разряднике P_2 различны во всех трех случаях. Как видно из осциллограмм, при начале прохождения тока i_1 в первом контуре ток i_2 во втором контуре не проходит, а на разряднике появляется напряжение u , равное в данном случае примерно половине напряжения, действующего в контуре, так как емкость C_1 была принята равной емкости C_2 . Затем напряжение на разряднике P_2 начинает убывать, и в момент времени, несколько меньший τ , пробивается разрядник P_1 . При этом напряжение на разряднике P_2 , фиксируемое на осциллограмме, резко возрастает и разрядник P_2 пробивается; напряжение на нем падает до нуля и начинается рабочий режим во втором контуре (ток i_2). Фактическая величина всплеска напряжения значительно выше, чем это представляется по осциллограмме и превосходит первоначальное напряжение на разряднике P_2 , но так как напряжение весьма быстро падает до нуля, то шлейф электромагнитного осциллографа не может записать этот процесс. Опыты показали, что схема работает весьма стабильно, а угол сдвига регулируется плавно и в широких пределах.

[2. 10. 1948]



Тепловозы с электрической передачей

Кандидат техн. наук, доц. Е. Я. ГАККЕЛЬ

Ленинград

7 ноября 1924 г. на рельсы Октябрьской железной дороги со станции Ленинград вышел первый в мире мощный тепловоз с электрической передачей. Накануне тепловоз пришел по железнодорожной ветке из Ленинградского порта, куда он был передан по частям 200-тонным плавучим краном с Балтийского завода.

Весной 1921 г. Госплан направил полученный от инженера Якова Модестовича Гаккеля эскизный проект дизель-электровоза мощностью 600 л. с. на заключение профессорам — Г. О. Графтио и Б. М. Ошуркову. В июне того же года в заседании Госплана были заслушаны доклады обоих специалистов, которые дали вполне благоприятные отзывы по проекту. Госпланом была учреждена при Главметалле ВСНХ «Комиссия по изучению и проектированию дизель-электровозов». Руководителем комиссии был назначен автор проекта Я. М. Гаккель; в число членов комиссии вошли: Г. О. Графтио, В. Ф. Миткевич, Н. Л. Шукин, А. С. Раевский и ряд ведущих специалистов ленинградских заводов, на которых была предложена постройка опытного «тепловоза».

К январю был закончен эскизный проект опытного тепловоза большей мощности, чем предполагалось первоначальным проектом, так как в качестве основного двигателя было решено использовать 1000-сильный дизель, снятый с подводной лодки «Лебедь», который военное ведомство согласилось безвозмездно предоставить для опытного локомотива.

По этому проекту председатель Госплана Г. М. Кржижановский сделал доклад Владимиру Ильичу Ленину и 4 января 1922 г. состоялось постановление Совета Труда и Оборона, которым отмечалось «особо важное значение введения тепловозов для оздоровления железных дорог и разрешения топливного вопроса» и указывались конкретные мероприятия по организации проектирования и постройки тепловозов.

Во исполнение одного из пунктов этого постановления при Теплотехническом институте ВСНХ было учреждено «Бюро постройки тепловозов системы Я. М. Гаккеля». В марте того же года постановлением СТО были утверждены кредиты и организационная структура Бюро. Одновременно было вынесено поста-

новление о заказе трех тепловозов различных типов за границей.

«Бюро постройки тепловозов системы Я. М. Гаккеля» было организовано в Ленинграде. Уже в марте 1922 г. оно приступило к разработке технического проекта опытного тепловоза Г³-1, имея в своем составе восемь штатных сотрудников во главе с автором проекта. Для решения принципиальных технических вопросов а также в качестве органа, контролирующего работу «Бюро» в целом, при нем был организован постоянный Технический совет под председательством проф. Н. Л. Шукина. В состав совета вошли ученые различных специальностей: профессора; А. В. Вульф, В. В. Дмитриев, А. С. Раевский, Л. К. Рамзин и др. Некоторые ученые и специалисты, в числе которых были Г. О. Графтио, В. Ф. Миткевич, М. А. Шателен, А. Е. Алексеев и В. А. Шевалин, привлекались к разрешению отдельных вопросов.

Работа коллектива электриков, теплотехников и механиков обеспечила возможность создания локомотива, в проектировании и строительстве которого не было и не могло быть опыта. К концу 1922 г. были выданы заказы на выполнение некоторых деталей и узлов тепловоза ленинградские заводы «Электросила», «Электрик», «Красный Путиловец» и «Балтийский судостроительный».

Работники заводов отнеслись к этой, совершенно новой работе с подлинным творческим энтузиазмом, что обеспечило успех постройки тепловоза, несмотря на все трудности освоения нового производства.

В соответствии с указанием СТО в целях ускорения и удешевления постройки опытного тепловоза было желательным использовать готовое оборудование; к имевшемуся дизелю мощностью 1000 л. с. необходимо было подобрать генератор постоянного тока. За отсутствием в наличии достаточно мощной машины было решено применить два генератора по 500 квт, снятых с подводных лодок.

Тяговые двигатели для тепловоза, получившие название ПТ-100, были спроектированы А. Е. Алексеевым и построены в количестве 10 шт. под его же руководством на заводе «Электрик». Так зародилось отечественное тя-

ное электромашиностроение, перешедшее затем на завод «Электросила», а позднее на завод «Динамо» в Москве.

Большое количество тяговых двигателей, а также значительный вес располагаемого на раме тепловоза силового оборудования потребовали большого количества осей. Задача конструирования ходовых частей была блестяще решена А. С. Раевским, выполнившим их в виде трех тележек, т. е. в совершенно новом для локомотива виде. Такое выполнение позволило осуществить весьма совершенное тройное подвешивание тепловоза и обеспечило благодаря малой величине жесткой базы превосходные условия вписывания тепловоза в кривые, что получило первую практическую проверку на рельсовых путях Волховстроя.

Первый пробег тепловоза Г^э-1 по путям Балтийского завода с автором нового локомотива на посту машиниста произошел 5 августа 1924 г., а в день празднования 7-й годовщины Великой Октябрьской социалистической революции тепловоз, на кузове которого стояла почетная надпись «В память В. И. Ленина», официально вышел на железнодорожную сеть (рис. 1).

16 января 1925 г. тепловоз прибыл с составом в Москву, где встретившая его правительственная комиссия отметила в приветственной речи «мировое значение практического решения проблемы мощного тепловоза, осуществленного впервые не в Европе и не в Америке, а в Советской России».

Через несколько дней в Москву был доставлен тепловоз с электрической передачей, построенный по заказу нашего правительства в Германии, и на дорогах Московского узла начались испытания обоих тепловозов. Испытания полностью подтвердили все преимущества электрической передачи: высокий коэффициент сцепления тепловоза, гибкую тяговую характеристику, легкость управления и благоприятные динамические качества. Все это наряду с достоинствами тепловоза, как локомотива с двигателем внутреннего сгорания, высоким к. п. д. (24—25%), малым расходом топлива (60—70 кг на 10 000 т·км брутто), отсутствием расхода воды, культурными условиями работы локомотивной бригады практически доказало, насколько своевременно и верно была поставлена и решена в СССР задача создания этого нового вида локомотива.

Испытания выявили также частные свойства каждого из тепловозов, причем к чести отечественного производства Г^э-1 оказался по целому ряду показателей более совершенным, чем тепловоз, построенный за границей. Так, например, при заданном весе состава 1000 т Г^э-1 оказался способным водить составы весом 1500 т, обеспечивая при этом трогание с места на подъеме 60/100. Второй тепловоз, имевший двигатель на 20% более мощный, брал составы не более 1300 т. Система охлаждения второго — затренированного — тепловоза была рассчитана настолько неудачно, что холодильники и двигатель, требовавшийся для обслуживания их работы, пришлось поместить на специальном тендере,

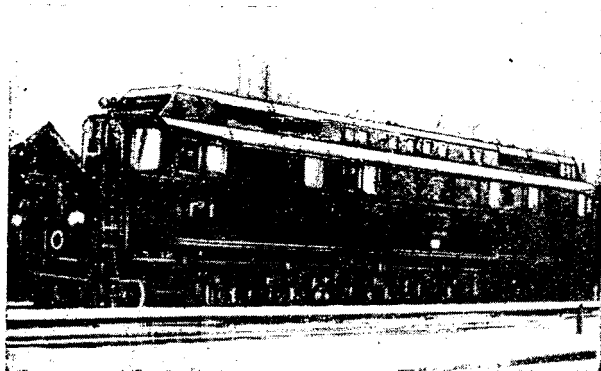


Рис. 1.

что вызвало ряд эксплуатационных неудобств. По окончании испытаний оба тепловоза были приняты в инвентарь НКПС, причем им были даны названия по установленной для тепловозов номенклатуре — первому — Щ-ЭЛ-1, второму — Э-ЭЛ-2.

За истекшие 25 лет в СССР и за границей, где по почину нашей страны возникла и развилась тепловозная тяга, создано много типов тепловозов с электрической передачей.

В подавляющем большинстве типов дизель-электровозов электрическая часть энергетической цепи тепловоза представлена генератором постоянного тока с независимым возбуждением и тяговыми двигателями с последовательным возбуждением. Наибольшее применение имеет индивидуальный привод тяговых двигателей и трамвайная их подвеска. Основное принципиальное различие электрических схем обусловлено системой и способами регулирования напряжения на зажимах генератора. Приводим краткий обзор некоторых электрических схем отечественных тепловозов, интересных с точки зрения направлений развития электрической передачи.

Схема Г^э-1 (Щ-ЭЛ-1) до некоторой степени вынужденная, так как общая электрическая мощность была разделена по условиям возможностей промышленности между двумя генераторами. Наличие двух генераторов использовано, однако, авторами схемы Я. М. Гаккелем и В. Ф. Миткевичем в целях увеличения регулировочных возможностей тепловоза. Генераторы работают в параллельном и в последовательном соединении, при постоянном параллельном соединении тяговых двигателей. Предусмотрена возможность работы одного генератора при питании им пяти двигателей. Регулирование напряжения на зажимах генераторов производится посредством реостата в цепи тока возбуждения. Один из генераторов используется, как двигатель для запуска двигателя внутреннего сгорания. При этом питание производится от аккумуляторной батареи.

Схема тепловоза Э-ЭЛ-2 в отличие от Щ-ЭЛ-1 была осуществлена как квадратичная система генератор-двигатель. Это позволило при небольших размерах и весе контроллера, иметь 26 ступеней регулирования напряжения, что, од-

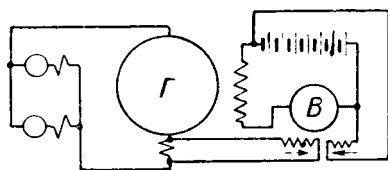


Рис. 2.

нако, все же не обеспечило такой плавности разгона тепловоза, какую имел Щ-ЭЛ-1, благодаря переключению генераторов. Использование генератора как стартерного двигателя не предусмотрено. Группа возбуждителей приводится от отдельного, вспомогательного двигателя внутреннего сгорания. Как видно, количество элементов энергетического оборудования этого тепловоза больше, чем у Щ-ЭЛ-1, без какого-либо выигрыша в регулировочных возможностях локомотива и при меньшем использовании преимуществ электрической передачи. Пять тяговых двигателей тепловоза Э-ЭЛ-2 находятся в постоянном параллельном соединении, подвеска их — трамвайная.

Первой в мире схемой с автоматическим регулированием мощного тепловоза является схема тепловоза Г⁹-19 (рис. 2), первого тепловоза с групповым приводом тяговых двигателей. Изменение напряжения на зажимах генератора в отличие от предыдущих схем осуществляется изменением скорости дизеля. Постоянство мощности при данной скорости дизеля, при изменении тока нагрузки генератора, поддерживается автоматически работой возбuditеля, как вольтопонижающей машины при питании одной из обмоток возбуждения возбuditеля ответвленным током нагрузки генератора. Автору схемы — проф. Я. М. Гаккелю — в 1928 г. был выдан патент¹ на автоматическое регулирование генераторов постоянного тока с целью поддержания постоянной мощности, в который вошли три варианта схемы. Это не помешало некоторым иностранным фирмам, предложившим аналогичные схемы более чем 10 лет спустя, претендовать на мировое первенство в этом отношении.

Проект тепловоза Г⁹-19, разработанный «Бюро постройки тепловозов системы Я. М. Гаккеля», был утвержден НКПС к постройке под названием Э-ЭЛ-4. К сожалению, этот тепловоз построен не был, вследствие прекращения в 1928 г. локомотивостроения на заводе «Красный Путиловец», принявшем тепловоз к постройке.

Интересна схема (рис. 3) и вся компоновка электрической передачи тепловоза «ДЭГАТ»² мощностью 1 900 л. с., проект которого получил первое место на Международном конкурсе проектов тепловозов, состоявшемся в 1928 г.

¹ Патент № 6396, опубликованный 19. 9. 1928 г. по заявленному свидетельству № 9012 от 11. 6. 1926 г.

² «ДЭГАТ» — условное наименование, составленное из первых букв слов: «Дизель», «Электросила», Гаккель, Алексеев, тепловоз.

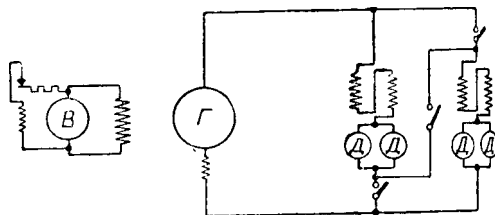


Рис. 3.

в Москве. По проекту, разработанному Я. Гаккелем, А. Е. Алексеевым и инженерами водов «Электросила» и «Русский Дизель», в этом тепловозе применены вертикальные, сдвоенные опорно-рамные тяговые двигатели, расположенные на двух концах рамы тепловоза с дровым приводом к трем из шести сцепных осей от каждого сдвоенного двигателя. Изменение напряжения на зажимах генератора производится реостатом в цепи возбуждения возбuditеля. Нормальным соединением тяговых двигателей является параллельное. Возможность последовательного соединения пар двигателей предусмотрена только в варианте товарного тепловоза во избежание перегрева генератора при движении тяжеловесных составов на затяжных подъемах.

Тепловозы постройки Коломенского завода 1929—1937 гг. — серийные поездные Э-ЭЛ мощностью 1 050 л. с. и опытные маневровые ЭЭ мощностью 600 л. с., а также первый сочлененный тепловоз ВМ мощностью 2×1 050 л. с. имеют принципиально одну и ту же схему. Различия имеются, главным образом, в цепи нагрузки генератора, так как число тяговых двигателей разных типов тепловозов различно. Од из двух тепловозов О-ЭЛ имеет групповой привод от одного опорно-рамного двигателя, остальные — индивидуальный привод при трамвайной подвеске двигателей. В системе управления тепловозов Коломенского завода имеется некоторый сдвиг в направлении объединения управления всей энергетической цепью тепловоза. Управление производится посредством двух контроллеров — ездового, назначением которого является изменение напряжения на зажимах генератора путем введения реостата в цепь его возбуждения, и контроллера возбуждения, предназначенного для поддержания постоянного напряжения на зажимах возбuditеля. Вал контроллера возбуждения механически связан с приводом топливного регулятора. При вращении вала одновременно происходит увеличение подачи топлива в цилиндры двигателя и увеличение сопротивления в цепи возбуждения возбuditеля. Благодаря этому напряжение на зажимах возбuditеля сохраняется постоянным при любой скорости дизеля.

С 1947 г. Харьковским тепловозостроительным заводом в объединении с ХЭМЗ и завод «Динамо» производится серийная постройка тепловозов ТЭ-1 мощностью 1 000 л. с. (рис. 4). На этих тепловозах впервые практически осуществлено широкое регулирование напряжения

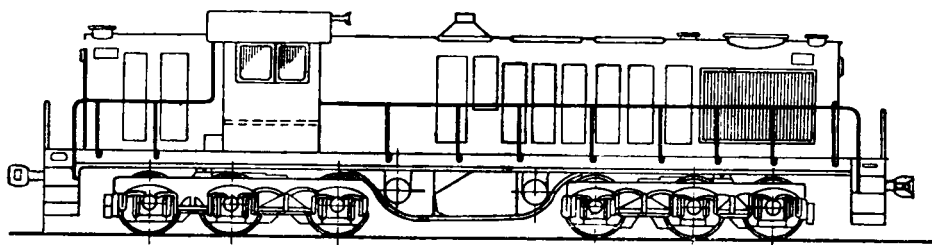


Рис. 4.

генератора изменением скорости дизеля. Управление производится с поста машиниста через электропневматическую систему, связанную с топливной аппаратурой. Контроллер управления тепловоза ТЭ-1 имеет восемь ходовых позиций, соответствующих различной скорости дизеля от 270 до 740 об/мин, а следовательно, и различной величины напряжения на зажимах генератора. Саморегулирование генератора, имеющее целью сохранение при данной его скорости постоянной мощности при изменении тока нагрузки, осуществляется посредством противокомпаундного возбуждения возбуждения током нагрузки генератора. Для увеличения регулировочных возможностей тепловоза (рис. 5) предусмотрено последовательное и последовательно-параллельное соединение тяговых двигателей и ослабление их возбуждения. Соответствующие переключения происходят автоматически при достижении тепловозом определенных скоростей движения. Большое внимание уделено автоматической защите — на тепловозе имеются реле максимального тока, реле боксования, реле для прекращения подачи топлива дизелю при недостаточной его смазке и другие. При рассмотрении устройства тепловоза ТЭ-1 можно заметить, что он имеет ряд черт первого тепловоза Ш-ЭЛ-1. К таковым относятся — использование генератора, как стартерного двигателя для запуска дизеля, индивидуальный привод тяговых двигателей, тележечный тип ходовых частей, плоскотрубчатые холодильники. Это подтверждает правильность направления, принятого отечественной техникой с самого начала тепловозостроения, и подчеркивает то обстоятельство, что появление множества разновидностей тепловозов с электрической передачей за границей, в частности в США, вызвано в ряде случаев

не нахождением лучших систем, а соображениями личного обогащения предпринимателей — держателей патентов.

Закономерное развитие всех отраслей отечественной техники нашло свое отражение в ряде усовершенствований тепловоза. Дизель тепловоза ТЭ-1 работает с наддувом, для которого используется энергия выхлопных газов. Это увеличивает мощность дизеля более чем на 25%. Кроме того, дизель обладает высокой эластичностью, что наряду с применением всережимного регулятора позволяет осуществлять регулирование напряжения генератора изменением скорости дизеля. Дизель-генераторная группа имеет общий вал, благодаря чему повышается общий к. п. д. агрегата. Тяговые двигатели охлаждаются принудительно, что повышает их перегрузочную способность. Широкое использование современной аппаратуры — реле и контакторов — обеспечивает защиту элементов силовой цепи и автоматизацию переключений в ее электрической схеме. Автоматическое регулирование генератора имеет огромное значение в отношении наиболее выгоднейшего использования всех элементов энергетической цепи тепловоза, т. е. дизеля, генератора и тяговых двигателей. В результате всех усовершенствований к. п. д. тепловоза достиг уже значения 29—30%, расход топлива снизился до 40—45 кг на 10 000 т·км брутто.

В начале 1949 г. Харьковским заводом выпущен первый новый сочлененный тепловоз ТЭ-2 (рис. 6), представляющий собой соединение двух единиц мощностью по 1 000 л. с., управляемых с одного поста по системе многих единиц.

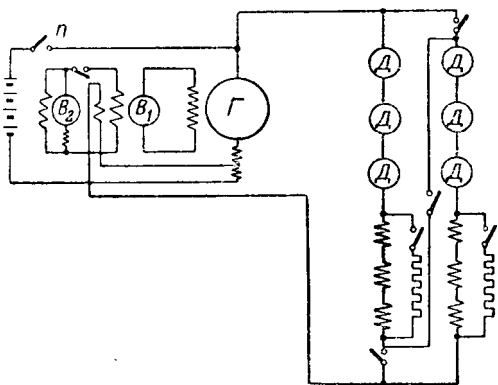


Рис. 5.

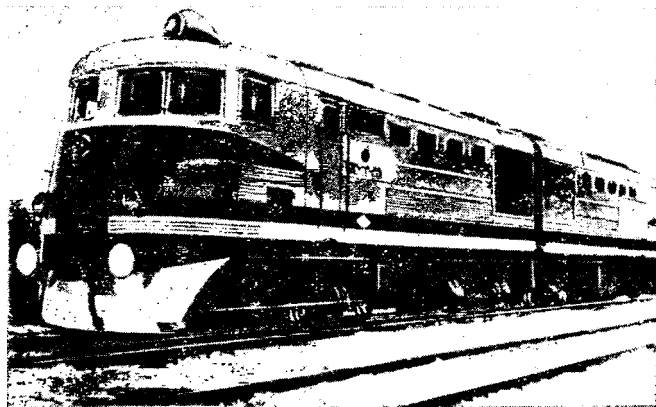


Рис. 6.

Силовое оборудование каждой единицы подобно оборудованию тепловоза ТЭ-1. В цепи тяговых двигателей имеется различие: вместо шести двигателей каждая единица ТЭ-2 имеет лишь четыре двигателя. С уменьшением числа тяговых двигателей уменьшено и число осей тепловоза, что потребовало, в целях сохранения допу-

стимой нагрузки на ось, облегчения конструкции. В результате всех изменений достиг очень малый вес тепловоза — 84 кг/л. с.

Возникший 25 лет назад новый вид успешно развивается и полностью оправдывает все предпосылки, положенные в основу создания.



К. И. Константинов—пионер электроавтоматики

Кандидат техн. наук А. В. ХРАМОЙ

Москва

Константин Иванович Константинов (1817—1871 гг.)— крупнейший деятель в области ракетной техники и воздухоплавания мало известен как электротехник и, в частности, как создатель первой электроавтоматической системы.

В конце тридцатых годов прошлого столетия К. И. Константинов под влиянием работ русских ученых П. Л. Шиллинга, Б. С. Якоби и Э. Х. Ленца поставил перед собой задачу применить электричество к определению скорости полета ядра. В течение 5 лет Константин Иванович упорно работал над созданием своей электробаллистической установки, с которой собственно и начинается история электроавтоматики. Первый вариант установки, изготовленной по идее и техническим условиям К. И. Константинова в мастерской Уитстона (Лондон) в 1842 г., оказался неудачным. Второй вариант, выполненный через год в мастерской Бреге (Париж), был несколько лучше, но все же нуждался в значительном усовершенствовании. Вернувшись из-за границы в Петербург, Константин Иванович коренным образом переработал схему и дополнил ее рядом приборов. Осенью 1844 г. он демонстрировал свой электробаллистический прибор (такое официальное название установки) в действии на Волковом поле.

Константинов свел задачу к определению промежуточных времени, необходимых ядру, чтобы преодолеть расстояния между щитами, поставленными на пути полета ядра (имелись в виду гладкоствольные пушки). Для решения этой задачи он разработал схему и ряд приборов и устройств, которые мы теперь называем техническими средствами автоматики. Эти средства, как мы увидим из дальнейшего изложения, позволили ему, во-первых, получать автоматически сигнал о моменте прохождения ядра

сквозь щит и, во-вторых, автоматически регистрировать эти сигналы на миллиметровой сетке, нанесенной на поверхность равномерно вращающегося цилиндра.

На рис. 1 показан общий вид электробаллистической установки К. И. Константинова на Волковом поле в Петербурге. На этом рисунке мы видим гладкоствольную пушку и четыре щита, проволочные сетки которых являются ядром, скорость полета которого замеряется помощью прибора, установленного в домике.

На рис. 2 дана общая схема установки: проволочные сетки 1-го и 3-го щитов соединены с электромагнитом G и H (рис. 3) и с источником питания (гальванический столб); проволочные сетки 2-го и 4-го щитов соединены с электромагнитом G' и своим источником питания gg — цепь, прерывающаяся при ударе снаряда в щит h — металлическая пластинка, которая притягивается электромагнитом K и падает в чашку с ртутью i в тот момент, когда вследствие разрыва проволоки в цепи gg ток прерывается; i — чашечка с ртутью; ll — цепь 3-го щита, которая получает питание, когда пластинка h упадет в чашку с ртутью. Подобным образом осуществлена связь между 2-м и 4-м щитами: $g'g'$ — цепь 2-го щита; ll' — цепь 4-го щита; эти цепи соединены с электромагнитом K лежки основного прибора (рис. 3).

На рис. 3 показан общий вид основного прибора К. И. Константинова:

A — металлический цилиндр, разделенный на 1000 частей;

B — крылья, регулирующие скорость вращения цилиндра;

E — трехколесная тележка с двумя шпильками, приводится в движение гирькой F , привешенной к блоку, который проходит через блок и прикреплен к тележке.

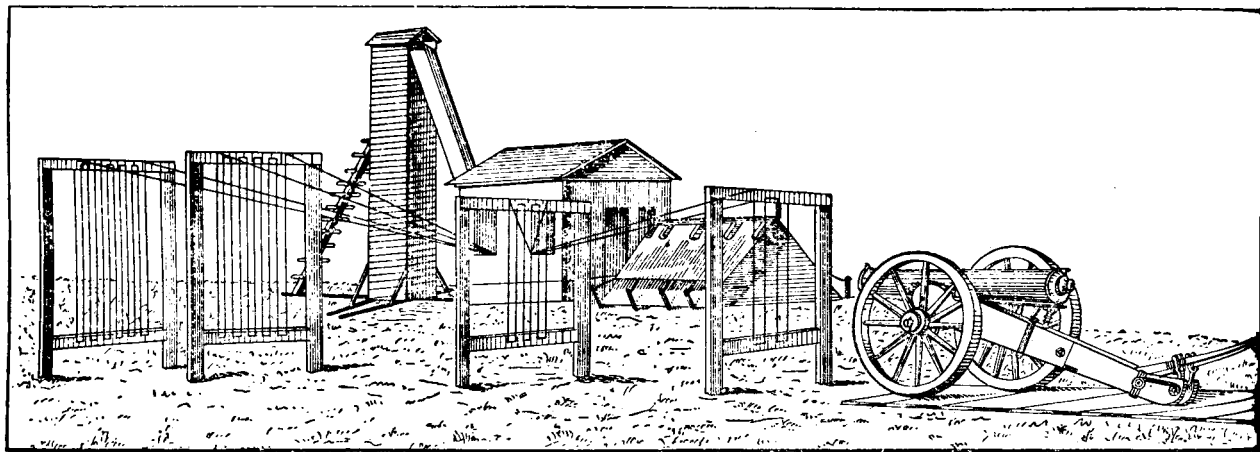


Рис. 1.

С и С' — два электромагнита, которые будучи возбуждены, притягивают пластинки СС';

а и в — шпильки, прикрепленные к пластинкам СС';

Н — электромагнит, соединенный с электромагнитом G, удерживает неподвижной тележку E до тех пор, пока шпилька а не упадет на цилиндр А;

l — маятник, dd и ee — электромагниты, храповое колесо Q, железная пластинка R — составные элементы маятникового реле, служащего для того, чтобы связать движение тележки E с движением цилиндра А, таким образом, чтобы при каждом обороте цилиндра «тележка уходила на постоянную величину»;

K — шестерня в системе колес DD;

M — рельсы, по которым движется тележка E;

0—0, P—P — винты, при помощи которых электромагниты G и G' и dd и ee соединяются с источниками питания во время действия установки.

Тележка E передвигается при помощи груза, который в виде поплавка плавает в параболическом сосуде с выгнутым краем на дне его (на рис. не показан). Вот как описывает К. И. Константинов действие этого приспособления. «С открытием крана вода вытекает из сосуда и начинается понижение поплавка. По начертанию сосуда, имеющего вид, напоминающий сахарную голову, обращенную вершиной вниз, уровень в нем воды понижается равномерно, для этого площади горизонтальных сечений сосуда, состоящие из кругов, убывают сверху донизу как корни квадратные из высот напоров воды над отверстием истечения, ...большим или меньшим открытием крана производится более или менее быстрое перемещение саней, соответствующее скорости вращения самого цилиндра. Скорость вращения цилиндра... указывается непрерывно... автоматически контрольным секундомером и для соответственного ей открытия крана кран снабжен указательной стрелкой и делениями, расположенными вокруг стрелки, — на циферблате, утвержденном на кране, — определяющими различные скорости падения поплавка, а поэтому и различные скорости перемещения саней (тележки с электромагнитами)» [Л. 1].

Большой интерес представляет контрольный секундомер, изобретенный К. И. Константиновым. Акад. Э. Х. Ленц, написавший специальную работу об электробаллистической установке Константинова [Л. 2], уделяет описанию этого автоматического контрольного устройства особое внимание.

Существенно важным условием, определявшим качество работы всей установки К. И. Константинова, было достижение равномерности скорости вращения цилиндра. Эта равномерность была осуществлена при помощи маховика с крыльями, имеющими особые «цилиндрические поверхности, производящие которых параллельны оси вращения маховика».

Э. Х. Ленц в своем отзыве писал, что «действие регулятора полковник Константинов усиливал тем, что придавал его крыльям особенную, им в первый раз употребленную кривизну, между тем как прежде они делались плоскими. Сопротивление воздуха на такие крылья значительно больше, так что равномерность движения достигается весьма скоро».

Тщательно разработанная К. И. Константиновым схема позволяла автоматически регистрировать весьма малые промежутки времени с точностью до 0,00006 сек., что по тем временам было непревзойденным рекордом.

При нормальной скорости вращения цилиндра — 2,5 об/сек цилиндр передвигается на одно деление (окружность цилиндра равна 1 м и разделена линиями, параллельными оси цилиндра, на 1000 частей) в 0,0004 сек. Но каждое деление, замечает Э. Х. Ленц, может быть разделено глазом на 4 равные части, т. е. погрешность в определении времени может быть снижена до 0,0001 сек. Если же, прибавляет Э. Х. Ленц, цилиндр будет делать 4 об/сек, чего действительно достигли, то точность в определении времени дойдет до 0,00006 сек.

Академик А. Я. Купфер писал в своем заключении от 6 октября 1844 г., адресованном на имя начальника Главного штаба, что новый метод измерения времени, предложенный

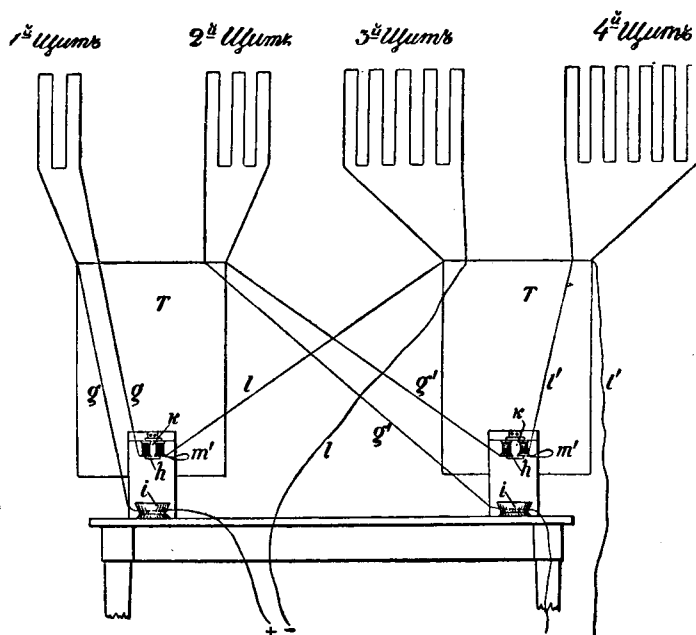


Рис. 2.

К. И. Константиновым, «превосходит по своей точности все, что можно себе представить в настоящее время».

Осуществив указанную схему, К. И. Константинов в скором времени разрешил другой, более сложный вопрос: определил скорость ядра в произвольном количестве точек путем введения в схему нового, изобретенного им в 1846 г. устройства, *электромеханического переключателя цепей*. В варианте схемы с четырьмя щитами в качестве переключателя использовано релейное устройство, состоящее из электромагнита с якорем и чашечки с ртутью.

В варианте схемы с 32 щитами роль переключателя играет устройство, названное Константиновым «вспомогательным прибором». Этот последний состоит из вертикально поставленного деревянного круга, по окружности которого врезаны заподлицо 16 медных контактных пластин, изолированных между собой деревом доски. В центре этого круга врезана медная пластина с установленным на ней «указателем», который, вращаясь на горизонтальной оси, касается попеременно всех контактных пластин. «Указатель» приводится в движение падающим грузом.

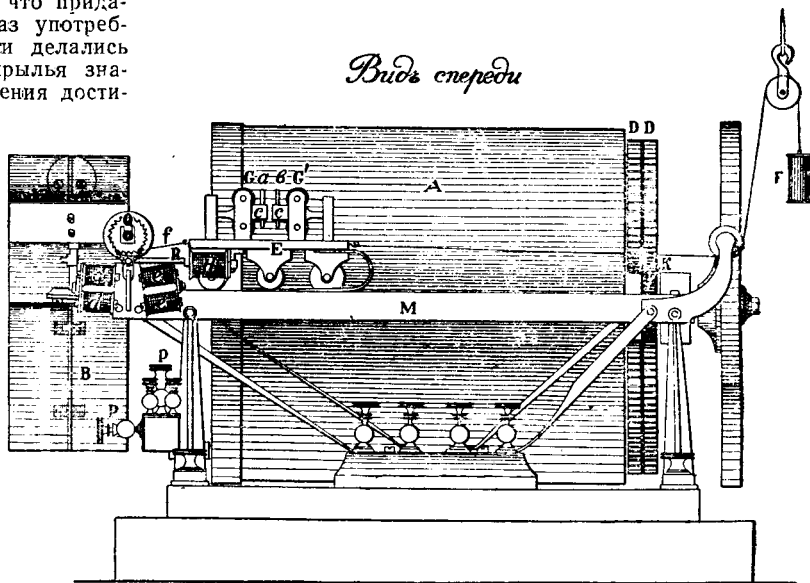


Рис. 3.

Остановка указателя на каждой ламели обеспечивается специальной релейной схемой.

Э. Х. Ленц, который совместно с Б. С. Якоби много работал в области построения различных коммутаторов, высоко оценил изобретенный К. И. Константиновым переключатель. Этот последний явился прототипом весьма распространенных в настоящее время элементов электроавтоматики, как-то: переключателей, распределителей, искателей.

Впоследствии в 1848 г. К. И. Константинов ввел в схему своей электробаллистической установки *электромагнитный телеграф* оригинальной конструкции. Необходимо было создать такие условия «дабы сотрясения от выстрелов не производил вредных явлений на строение, в котором установлен прибор, и на самый прибор»... Это побудило меня к устройству в числе принадлежностей электробаллистического прибора электромагнитного телеграфа..., отличного от известных доныне электромагнитных телеграфов и которому, как я полагал, можно было сделать более общее применение, чем предназначенное мною первоначально» [Л. 3].

В процессе работы над созданием электробаллистической установки К. И. Константинов изобрел, разработал конструкции и построил следующие технические средства автоматики: а) две модификации электромагнитных реле, причем одной из них положено начало применению в технике маятниковых электромагнитных реле; б) автоматическое контрольное устройство для наблюдения за равномерностью скорости вращения цилиндра; в) автоматическое устройство, обеспечивающее равномерность поступательного перемещения тележки с электромагнитами; г) устройство для регулирования скорости вращения цилиндра; д) электромеханический переключатель релейного действия.

Многое из того, что сделал К. И. Константинов, несправедливо приписывалось Уитстону, в мастерской которого, как уже указывалось выше, изготовлялся первый вариант электромагнитного хроноскопа К. И. Константинова, и Л. Бреге, который по заданию К. И. Константинова изготовил в своей мастерской второй вариант прибора. Обе эти конструкции оказались непригодными. К. И. Константинов, введя ряд новых оригинальных элементов, в конце концов, добился весьма хороших по тому времени результатов. Когда в 1845 г. Бреге представил в Парижскую Академию наук сообщение о приборе, выполненном для Константинова, К. И. Константинов решил восстановить свой приоритет. При посредстве члена Парижской Академии наук Реньо был составлен акт, подписанный Бреге, в котором устанавливался приоритет К. И. Константинова. Такого же рода акт за подписью Уитстона и акад. Струве при содействии астронома Эти был составлен в Лондоне. Однако, в литературе продолжали называть электробаллистические приборы К. И. Константинова приборами Уитстона и Бреге.

Повторилась история с так называемым мостом Уитстона. Как известно, Уитстон выполнил в своей мастер-

ской заказ инженера Вульвичского арсенала Краузе предложившего компенсационный метод измерения индукции моста. Однако, в литературе этот мост известен под названием моста Уитстона, который, будучи владельцем мастерской и ловким предпринимателем, нередко присваивал себе приоритет, принадлежавший по праву заказчикам.

К. И. Константинов продолжал работать над применением электричества к артиллерийским изысканиям. Он разработал и осуществил в 1853 г. схему применения электромагнитов в изобретенном им ранее ракетном баллистическом маятнике и др.

К. И. Константинов изобрел также «электромагнитный регулятор для уравнивания вращательного движения порожденного от рук или какой бы то ни было механической силой» [Л. 1].

За изобретение электробаллистического прибора К. И. Константинов был награжден двумя денежными премиями (одна из них была так называемая Милловская).

За изобретение акустического и электромагнитных регуляторов К. И. Константинову была объявлена благодарность инспектора Артиллерии.

В 1856 г. К. И. Константинов, бывший тогда главным распорядителем фейерверка по случаю коронации Александра II в Москве, изобрел и изготовил электромеханическое устройство для дистанционного управления стрельбой из пушек на расстоянии более 1 км. Нажимая на клавиши этого устройства, главный дирижер огромного оркестра и хора, исполнявших гимн во время коронационных торжеств, производил выстрелы из пушек в таком порядке и темпе, что выстрелы заменяли звуки барабана в оркестре.

Основное значение электротехнических работ К. И. Константинова и, в частности, его электробаллистической установки, для истории развития техники заключается во-первых, в том, что они являются первыми автоматическими системами на электрической основе и, во-вторых, что для их выполнения К. И. Константинов изобрел ряд новых оригинальных технических средств автоматики.

Труды К. И. Константинова оказали значительное влияние на ряд последующих работ в области применения методов и средств электроавтоматики.

Литература

1. К. И. Константинов. Материалы для истории применения электричества к баллистическим изысканиям. 1868.
2. Э. Х. Ленц. Об электробаллистическом приборе полковника Константинова. Артиллерийский журнал, № 5, 1850.
3. К. И. Константинов. Электромагнитный телеграф электробаллистического прибора. Артиллерийский журнал, № 2, 1850.



К ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ СОВЕТСКОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Статья заканчивается словами: «творческая мысль советских изобретателей и конструкторов в области электропривода развивается своим оригинальным путем и стоит на вершинах мировой техники». В весьма сжатом обзоре дан материал, который действительно приводит к изложенному выводу.

Рассмотрены: 1) электропривод в дореволюционной России; 2) промышленный электропривод в период восстановления и индустриализации народного хозяйства СССР; 3) развитие теории электропривода; 4) отечественная техника электропривода.

Убедительно показано, что родиной электропривода является Россия (1834—1838 гг.). Основа для зарождения и развития электропривода была создана трудами и изобретениями русских академиков Б. С. Якоби и Э. Х. Ленца. «Все последующие работы, вплоть до открытия принципа самовозбуждения в 1854 г. Сореном Хиротом были только развитием идей Б. С. Якоби. Большинство иностранных ученых и изобретателей того периода или заимствовали схему Якоби, или делали шаг назад к принципу возвратно-поступательного движения.

Д. А. Лачинов, являющийся основоположником теории электропривода (1880 г.) дал толчок дальнейшему развитию электропривода в работах В. Н. Чиколева, А. Давыдова, М. О. Доливо-Добровольского и др.

Невиданный расцвет промышленного электропривода относится к периоду индустриализации народного хозяйства СССР. Огромное значение для развития теории и техники электропривода в первые годы советской власти имели исторический план ГОЭЛРО, а также создание по указанию В. И. Ленина в 1921 г. крупнейшего научно-исследовательского и экспериментального института, ныне ВЭИ им. Ленина. За годы сталинских пятилеток размах электрификации страны и бурные темпы роста советского электропривода оставили далеко позади самые передовые в техническом отношении капиталистические страны.

Многие десятки фамилий советских ученых, исследователей и изобретателей перечисляются в главах, посвященных развитию отечественной техники и теории электропривода. Весьма показательно, что примеры, иллюстрирующие более совершенные в техническом и производственном отношении решения, принятые в советских конструкциях и системах электропривода в сравнении с зарубежными (США и др.).

В важнейшей области создания электроорудия, в котором электродвигатель органически сращивается с инструментом в единое целое, советская научная мысль, остроумно используя принцип бегущего магнитного поля, создала оригинальное направление, перспективы которого трудно переоценить. Примеры передового характера советской технической мысли приведены также из области автоматического управления и регулирования электроприводов.

Исключительное значение имели работы академика К. И. Шенфера, предложившего электрическую машину поперечного поля (метадина) для целей автоматического управления, и работы проф. Е. К. Попова по автоматическому регулированию.

(Автоматика и телемеханика, т. 10, № 5, 1949, А. А. Булгаков)

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

В связи с опубликованными за последнее время рядом авторов описаниями измерительных приборов — «емкостный коммутатор», «динамический электрометр», «вращающийся вольтметр» и пр., — предназначенных для измерения различных электрических величин, но основанных на одном и том же принципе электростатического генера-

тора, И. М. Имянитов (Главная геофизическая обсерватория, Ленинград) выполнил ряд исследований для обобщения особенностей и возможностей приборов этого класса и создания теории этих приборов. Автор нашел, что универсальность принципа, положенная в основу данной группы высокочувствительных приборов, обеспечит им большое распространение в лабораторной практике и в технике.

В выполнявшихся с указанной выше целью исследованиях — измерения напряженности электрического поля, величины заряда и др. проводились с помощью разработанного автором прибора «электрический флюксметр». Этот прибор, основанный на сочетании электростатического генератора и лампового усилителя, обладает максимальной чувствительностью 0,01 в/см на деление, с площадью измерительной пластины 225 см² и минимальным входным сопротивлением 15 мгом.

(Журнал техн. физики, т. 19, № 9, 1949, И. М. Имянитов)

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ СПЛАВА ВИСМУТА С НАТРИЕМ

Явления сверхпроводимости, обнаруживаемые в сплавах двух несверхпроводящих металлов, представляют интерес.

В ряде сплавов висмута с несверхпроводящими металлами удалось обнаружить явление сверхпроводимости. О новом сверхпроводящем сплаве висмута с натрием состава BiNa сообщает Н. Е. Алексеевский (Институт физ. проблем Академии наук СССР). Приготовление сплава производилось плавкой в отпаянной кварцевой ампуле с последующим отжигом в течение 48 час. при 400° С. Для определения сверхпроводимости образца измерялись его сопротивление и магнитный момент. Температура, при которой сплав становится сверхпроводимым равна 2,25° К.

(Журнал эксперим. и теорет. физики, т. 19, вып. 7, 1949, Н. Е. Алексеевский)

НОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕЛЕ НАПЯЖЕНИЯ

Дано описание двух реле напряжения: трехпозиционного и двухпозиционного. Оба новых реле разработаны

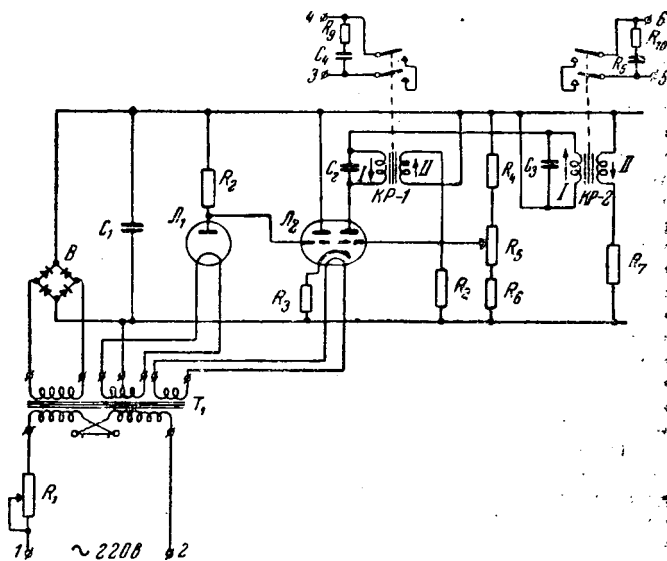


Рис. 1. Схема трехпозиционного электронного реле напряжения.

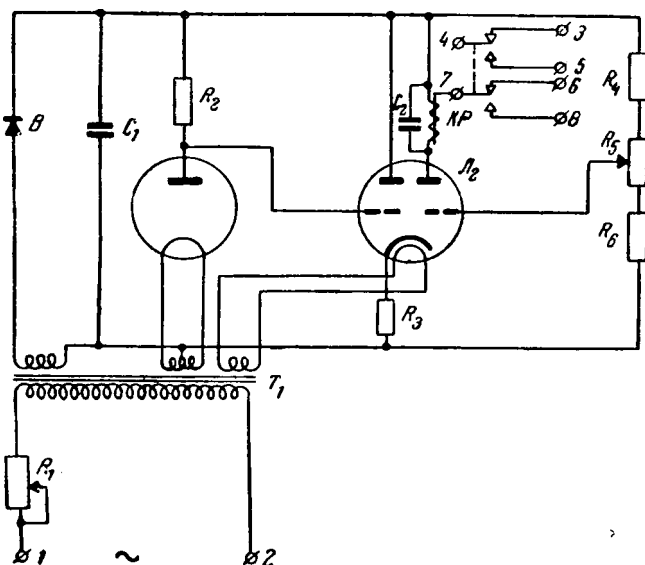


Рис. 2. Схема двухпозиционного электронного реле.

ВЭИ. Приведены принципиальные схемы и даны фотографии. Измерительным элементом в обоих реле является диод 4Ц1М.

В трехпозиционном реле параметры схемы выбраны таким образом, чтобы характеристика реле соответствовала условиям регулирования напряжения трансформатора с величиной ступени напряжения 2,5%. Напряжение срабатывания может изменяться в пределах $\pm 10\%$. Потребление реле со стороны переменного тока равно 30 ватт.

Двухпозиционное реле имеет коэффициент возврата, близкий к единице (0,98 ÷ 0,99). При напряжении срабатывания и включении на 220 в реле потребляет ток 0,1 а.

Реле обоих типов серийно изготавливает завод Энерго-ремстреста МЭП.

(Вестник электропромышленности, № 8, 1949, В. Б. Прокунин)

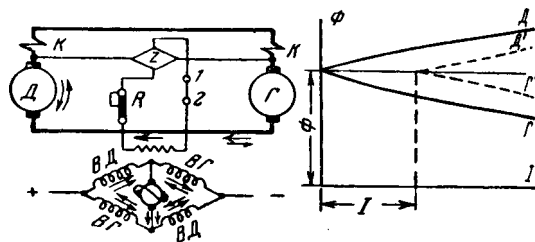
О ВОЗМОЖНОСТИ КОМПАУНДИРОВАНИЯ ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ В РЕВЕРСИВНОЙ СИСТЕМЕ ЛЕОНАРДА

В описываемой схеме возможность компаундирования создается введением в цепь возбуждения двигателя напряжения от машинного усилителя, обмотка возбуждения которого подключена к шунту в главной цепи. Обмотка подключается к шунту через выпрямительный мост, что обеспечивает неизменное направление ампервитков во всех режимах.

При отсутствии тока в главной цепи начальная м. д. с. F_0 определяется напряжением питания. С появлением тока в главной цепи напряжение возбуждения двигателя под воздействием компаундирующего устройства увеличивается на величину напряжения усилителя U_a , также возрастет м. д. с. на величину F_a . Для некоторых реверсивных приводов, работающих в тяжелых переменных режимах (металлургические приводы, шахтные и рудничные подъемные машины, экскаваторы и пр.), применение компаундирования способствует повышению перегрузочной способности привода, увеличению производительности механизмов вследствие возрастания скорости в режимах холостых ходов и малых нагрузок и дает ряд других преимуществ. Компаундирование, в частности, открывает возможность создания ряда специальных характеристик.

После несложного графического анализа основной схемы рассматривается схема двойного компаундирования, в которой осуществляется одновременно компаундирование приводного двигателя и противокомпаундирование генератора, что позволяет достичь наиболее гибкого сочетания приводных и скоростных характеристик.

Описываемые схемы дают возможность получать ступенчатое компаундирование, т. е. такие характеристики, где компаундирование начинается лишь при опреде-



ленным значением тока в главной цепи. На рисунке показана подобная характеристика для случая двойного компаундирования, осуществляемого путем соединения обмоток возбуждения двигателя и генератора в мостовую схему, в одну диагональ которой подключен источник питания обмоток возбуждения, а в другую — машинный усилитель, ток от которого, появляющийся одновременно с возникновением нагрузки, ослабляет возбуждение от одной из машин и увеличивает возбуждение другой. Включение в этой схеме эталонного напряжения в точках 1 и 2 можно обеспечить переход на компаундную характеристику в избранной точке. Приводятся еще несколько примеров характеристик с изломом и указывается на возможность осуществления программного компаундирования, при котором степень компаундирования, жесткость характеристик и начало их излома могут быть в процессе эксплуатации различным образом изменены.

Рассматриваются схемы выравнивания нагрузки между двумя машинами постоянного тока.

В целях обеспечения быстродействия схем компаундирования могут быть применены различные способы формирования усилителя. Например, ампервитки возбуждения усилителя могут быть получены как разность ампервитков, создаваемых напряжением выхода усилителя, и напряжением компенсационной обмотки двигателя.

(Вестник электропромышленности, № 7, 1949, С. 3. Баренц)

ЗА РУБЕЖОМ

ЗАЩИТА ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На французских железных дорогах опробована схема защиты от токов короткого замыкания, называемая в нашей литературе баллистической, т. е. реагирующей на скачок тока при коротком замыкании. Аппаратура защиты включает специальный трансформатор типа трансформатора тока и реле, питаемые от вторичной обмотки этого трансформатора.

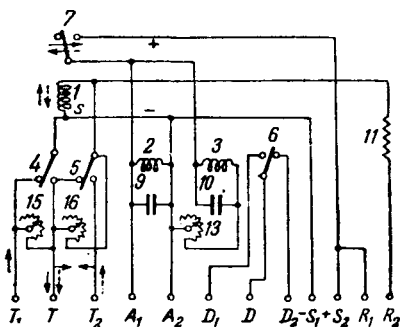
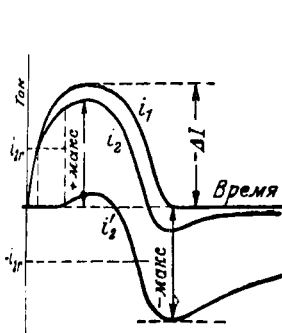
Разбор работы такой схемы показывает, что при прекращении короткого замыкания немедленно после его возникновения отрицательный вторичный ток не достигает величины, достаточной для блокировки реле. Для устранения этого недостатка схема усложнена добавлением второго трансформатора, по конструкции одинакового с первым. Нормально вторичная цепь второго трансформатора разомкнута и замыкается только во время короткого замыкания.

На рис. 1 показаны изменения тока i_1 в первичной обмотке, тока i_2 — во вторичной цепи первого трансформатора и тока i_2' — во вторичной цепи второго трансформатора. Как видно из диаграммы, ток i достигает абсолютной величины значения большего, чем ток регулировки i_{2r} , что и обеспечивает необходимые включения.

Специальный трансформатор состоит из подковообразного сердечника и 2 катушек весьма малого сопротивления, соединяемых последовательно или параллельно и представляющих вторичную его обмотку. Первичный обмоткой является шина, на которую надевается сердечник.

Разработано две схемы защиты, основанной на применении специального трансформатора. В первой, более простой, применяется один трансформатор и одно подковообразное реле. Во второй схеме по соображениям, изложенным выше, применены 2 трансформатора и для большей гибкости включено несколько реле (рис. 2).

Схема работает в следующем порядке. В начальном положении трансформатор T_1 присоединен к поляризован-



кату реле 1 и обмотка трансформатора T_2 разомкнута. Когда происходит короткое замыкание контакт 7, вследствие чего: начинается действовать сигнал, подключенный к жазимам A_1 и A_2 , включается реле замедленного действия 3 и срабатывает вспомогательное реле 2, которое в свою очередь перекидывает контакты 4 и 5, чем отключает поляризованное реле от трансформатора T_1 , и подключает его к трансформатору T_2 . Если короткое замыкание продолжается, реле 3 (контакт 6) вызовет срабатывание выключателя. Уменьшение тока короткого замыкания после его отключения вызовет автоматическое возвращение поляризованного реле в начальное состояние. Возвращение контакта 7 в начальное положение разрывает цепь сигнализации и отключает реле 2 и 3, при этом контакты 4 и 5 возвращаются в начальное положение. Если короткое замыкание исчезает до отключения выключателя, реле 3 (контакт 6) вызовет срабатывание выключателя.

питать
митель.

чателя, контакт 7 возвращается в начальное положение, питание катушек реле 2 и 3 прекращается и контакты 4 и 5 возвращаются в начальное положение ранее, чем контакт 6 вызовет размыкание выключателя.

От перенапряжений, могущих возникнуть при значительных токах на зажимах трансформатора T_2 , реле защищены разрядником. Настройка реле производится по току i_{2r} , который должен быть меньше максимального значения вторичного тока $i_{2\text{макс}}$.

Вся аппаратура устанавливается на тяговой подстанции или на посту секционирования. Схема может применяться в самых разнообразных условиях. Эта же схема может быть применена и для железных дорог переменного тока. Для этого специальный трансформатор следует измерительного трансформатора через выпря-

питать от измерительного трансформатора через выпрямитель.

Схема была испытана на электрифицированных участках французских железных дорог, на парижском метрополитене, на одной из троллейбусных линий.

Испытания показали, что теоретические кривые изменения токов, подобные кривым рис. 1, полностью совпали со снятыми осциллограммами. Во всех случаях защита работала хорошо и при отключении токов самых удаленных коротких замыканий еще имелся запас в пределах регулировки реле.

[Rev. Gen. de l'Electricité, № 3, 1949, P. Branchu]

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЕВРОПЕЙСКИХ СТРАН НАРОДНОЙ ДЕМОКРАТИИ
(ОБЗОР)

Европейские страны народной демократии — Чехословакия, Польша, Румыния, Болгария, Венгрия и Албания — за исторически-короткий отрезок времени достигли больших успехов в строительстве фундамента социалистической экономики. Путь к социализму стран народной демократии в значительной степени облегчен наличием такого фактора, как существование великого Советского Союза Социалистических Республик.

Ленин и Сталин учат, что материальной основой социализма, основой строительства социалистической экономики является рост и развитие тяжелой промышленности и одного из ее важнейших звеньев — энергетики. С этой точки зрения необходимо отметить, что даже в такой индустриально-развитой стране, как Чехословакия, мы видим наследие ее капиталистического прошлого: преимущественное развитие легкой промышленности, развитие производства предметов потребления и в то же время отставание развития производства средств производства. Развитие промышленности в Чехословакии ориентировалось на импорт сырья и экспорт готовых изделий. А это ставило Чехословакию в зависимость от ряда капиталистических стран, с которыми она торговала.

Ликвидация технико-экономической отсталости стран восточной демократии и преодоление пережитков периода капиталистической экономики возможны лишь путем социалистической индустриализации.

Важное значение для осуществления социалистической индустриализации стран народной демократии имеет бесспорная материальная, техническая и культурная помощь со стороны Советского Союза.

Построение фундамента социалистической экономики — такова главная экономическая задача ближайшего этапа развития всех стран народной демократии.

Настоящий статистико-экономический обзор освещает состояние, рост и развитие в этих странах энергетической промышленности, — одного из важнейших звеньев социалистической индустриализации. Обзор составлен на базе опубликованных в странах народной демократии материалов по вопросу о состоянии и развитии энергетических ресурсов,

производства электроэнергии, энергомашиностроения и электротехнической промышленности.

В обзоре приводятся сведения по следующим странам:
1) Чехословакия; 2) Польша; 3) Румыния; 4) Болга-
рия; 5) Венгрия; 6) Албания¹.

Круг освещаемых вопросов по каждой из стран более или менее отвечает следующему плану:

1. Энергетические ресурсы и их использование.
2. Производство электроэнергии, технико-экономические показатели, планы и перспективы развития электрификации.

3. Энергомашиностроение и электротехническая промышленность.

ЧЕХОСЛОВАКИЯ

Энергоресурсы и их использование. Основными энергетическими ресурсами Чехословакии являются: каменный и бурый угли и гидроэнергия. Каменный и бурый угли используются для получения энергии как непосредственно, так и посредством предварительной их газификации. Запасы каменного угля оцениваются [Л. 1] в 6,5 млрд. т, в том числе в Остравско-Карвинском бассейне — 6,1 млрд. т. Запасы бурого угля исчисляются свыше чем 12 млрд. т., в том числе в Северо-Чешском бассейне — 11,5 млрд. т.

Добыча каменного и бурого угля, а также и производство газа из угля представлены [Л. 2, 3] в табл. 1.

Гидроэнергоресурсы до последнего времени используются в очень незначительной степени. Выработка электроэнергии гидростанциями составляла всего 583,7 млн. *квтч* в 1946 г. [Л. 4], или 8,75% всей выработки электроэнергии в стране. Начиная с 1947 г., развернулось большое строительство гидроэлектростанций. Уже закончено или находится в стадии строительства более 16 гидроэлектростанций [Л. 5].

Производство электроэнергии. Ниже в табл. 2 представлена выработка электроэнергии в целом по стране, по

¹ Ниже приведен раздел, посвященный Чехословакии; в следующих номерах журнала опубликование обзора будет продолжено (Ред.).

Добыча	Годы	1929	1935	1936	1937	1945	1946	1946
Каменный уголь, тыс. т		16 522	10 895	12 233	16 778	11 716	14 168	1772
Бурий уголь, тыс. т		22 561	15 114	15 949	17 895	15 356	19 459	2332
Газ, млн. м ³		—	—	—	136,3	174,9	232,5	611,3

Таблица 2

	1937	1946	1947	1948	1950 (план)
Выработка электроэнергии, всего млн. кВтч	4 115	5 622	6 663	7 515	8 880
В том числе:					
Станциями общего пользования	1 534	2 378	2 753		
Промышленными станциями	2 581	3 244	3 910		
В общей выработке — гидростанциями . . .		584	446		
Выработка на 1 жителя, кВтч	285	432	542	616	

видам станций (общего пользования и промышленные) и на душу населения, за ряд лет [Л. 2, 4, 6, 14].

За первые 20 лет существования Чехословацкой республики с 1918 по 1938 гг. мощность ее электростанций увеличилась в три раза, а выработка электроэнергии, также почти утроившись, достигла четырех с лишним миллиардов киловаттчасов. 6 лет немецко-фашистской оккупации Чехословакии гибельно отразились на темпах выработки электроэнергии. За последние же четыре года в народно-демократической Чехословакии выработка электроэнергии снова стала увеличиваться быстрыми темпами: по сравнению с 1937 г. имеется рост на 82,5% и по сравнению с 1918 г. — в 5 раз. Таким образом, прирост выработки электроэнергии за последние 4 года (приблизительно 3,4 млрд. кВтч) превысил прирост выработки к концу 20-летнего хозяйничанья буржуазии. Дальнейший рост производства электроэнергии, предусмотренный пятилетним планом развития Чехословацкой народнодемократической республики идет также ускоренными темпами. Выработка электроэнергии в 1953 г. по плану должна составить 11 200 млн. кВтч, а прирост за пятилетие — приблизительно 3,7 млрд. кВтч.

В народнодемократической Чехословакии все крупные, средние и большинство мелких электростанций являются государственными и частный сектор в этой отрасли промышленности почти полностью ликвидирован.

На 1 января 1949 г. [Л. 7] энергетическая промышленность (производство электроэнергии и газа) насчитывала 1180 предприятий с 43 391 чел. занятых. Распределение этих предприятий по формам собственности представлено ниже:

	Число предприятий	Число работающих на предприятиях
Социалистические предприятия	1 159	43 345
В том числе:		
государственные	1 151	43 283
кооперативные	8	62
Частнокапиталистические предприятия	8	33
Предприятия мелкотоварного сектора	13	13
Всего	1 180	43 391

На 1 декабря 1945 г. в стране насчитывалось [Л. 8] 1 643 электростанции, включая сюда и промышленные. В 1947 г. только в чешских землях (Чехия, Моравия, Си-

лезия) находилось в эксплуатации 992 электростанции, в том числе 720 — промышленных [Л. 9]. Большая часть этих электростанций являются тепловыми, работающими на угольном топливе.

С начала 1946 г. начали разрабатываться проекты расширения и реконструкции ряда станций — в Штернбергах, Эрвеницах, Ославянах, Колине, Поржичи, Тржебичах, а также строительства новых станций в Словакии. В 1946 г. было приступлено к расширению электростанций Эрвеницкого энергокомбината (Северо-Чешский район): Эрвеницкой, мощность которой после расширения достигает 140 тыс. кВт [Л. 8], и Коморжанской, мощностью в 220 тыс. кВт. Этот комбинат будет обеспечивать электроэнергией всю потребность Северо-Чешского промышленного района.

Чехословакия имеет высоковольтную связь с Польшей, Венгрией и Австрией и, следовательно, имеет возможность экспортировать и импортировать электроэнергию. В 1946 г. было импортировано 102 млн. кВтч, а экспортировано — 3 млн. кВтч. В 1947 г. соответственно 116,6 млн. кВтч и 2,7 млн. кВтч [Л. 4].

Технико-экономические показатели работы электрических станций в Чехословакии еще недостаточно высоки, свидетельствуют о наличии значительных резервов. На табл. 3 представлены технико-экономические показатели [Л. 10] по всем тепловым электростанциям общего пользования всей Чехословакии и тепловым промышленным электростанциям чешских земель (сгруппированы по удельному потреблению тепла).

Таблица

Среднее удельное потребление тепла		Число электростанций	Удельный вес данной группы электростанций в		Использование установленной мощности, тыс. кВтч
калорий на выработанный киловаттчас	грамм условного топлива 1 кВтч		установленной мощности, %	производстве электроэнергии, %	
3 304	472	2	8,6	9,01	3 330,30
4 527	646	8	42,35	44,38	3 610,38
5 483	783	6	12,47	10,57	2 700,15
6 309	901	10	31,93	33,78	3 355,24
7 235	1 033	5	2,89	1,76	1 930,41
8 245	1 179	2	0,68	0,24	1 150,24
10 608	1 516	3	0,21	0,05	732,05
12 600	1 800	1	0,19	0,07	1 200,13
13 520	1 932	3	0,23	0,09	1 195,09
14 168	2 024	1	0,08	0,02	675,02
18 190	2 600	7	0,34	0,03	1 830,03

а) Станции общего пользования

3 304	472	2	8,6	9,01	3 330,30
4 527	646	8	42,35	44,38	3 610,38
5 483	783	6	12,47	10,57	2 700,15
6 309	901	10	31,93	33,78	3 355,24
7 235	1 033	5	2,89	1,76	1 930,41
8 245	1 179	2	0,68	0,24	1 150,24
10 608	1 516	3	0,21	0,05	732,05
12 600	1 800	1	0,19	0,07	1 200,13
13 520	1 932	3	0,23	0,09	1 195,09
14 168	2 024	1	0,08	0,02	675,02
18 190	2 600	7	0,34	0,03	1 830,03

Всего в среднем

5 199	743	48	100,00	100,00	3 160,15
-------	-----	----	--------	--------	----------

б) Промышленные станции

3 590	513	51	22,51	30,32	3 600,51
4 250	607	44	4,43	4,19	2 410,19
5 870	839	56	9,30	4,97	1 370,2
6 120	875	178	51,89	55,84	2 770,3
8 430	1 204	192	10,20	3,57	910
10 580	1 512	63	1,62	0,95	1 470
14 900	2 178	5	0,08	0,16	725

Всего в среднем

5 483	784	589	100,00	100,00	2 580,2
-------	-----	-----	--------	--------	---------

Степень электрификации страны ярко характеризуют данные табл. 4 [Л. 6].

Таблица 4

	Электрифицировано					
	на 1/I 1938 г.		на 1/I 1947 г.		на 1/I 1949 г.	
	общин	%	общин	%	общин	%
Чехословакия . .	9 173	59,9	11 311	74,7	12 434	82,6
Чешские земли . .	8 321	73,1	9 963	40,2	10 690	91,4
Словакия	852	24,4	1 348	84,6	1 744	51,9

Энергомашиностроение и электротехническая промышленность. Современная энергомашиностроительная и электротехническая промышленность Чехословакии являются важной отраслью народного хозяйства, снабжающей страной и экспортирующей за границу значительные количества машин, электроматериалов и электроприборов бытового потребления.

В настоящее время в Чехословакии насчитывается 111 электротехнической промышленности 37 объединений (народных предприятий, по терминологии принятой в Чехословакии) с числом трудящихся 51 000. В 14 наиболее крупных из этих объединений входит 194 завода. Производство важнейших видов продукции электротехнической промышленности приводится в табл. 5 [Л. 3, 6, 12, 13].

Таблица 5

	1937	1946	1947	1948	1953 план
Электродвигатели 0,5 до 25 квт тыс. шт.	81,6	н.	222,1	276,2	390
Электродвигатели от 0,5 квт, тыс. шт.				171,8	
Радиоприемники, тыс. шт.	282,8	104,5	162,8	267,7	300
Телефонные аппараты тыс. шт.	32,7	40,3	72,8	84,2	150
Экстролампы, млн. шт.	6,09	8,13	12,46	14,01	
Радиолампы, тыс. шт.			1 652,4	2 388,8	

Кроме того, в 1947 г. заводами электротехнической промышленности выпускались трамвайные вагоны и троллейбусы.

К концу 1948 г. электротехническая промышленность значительно превысила довоенный уровень производства, о чем свидетельствуют [Л. 11] данные табл. 6 (в %).

Таблица 6

	1937	1946	1948
Валовая продукция	100	104	240
Численность работающих	100	136	167
Выработка на 1 работающего	100	76	144

Первый двухлетний государственный план восстановления и развития народного хозяйства на 1947—1948 гг. по важнейшим видам продукции электротехнической промышленности был выполнен следующим образом:

Электродвигатели до 0,5 квт	95,0%
Электродвигатели от 0,5 до 25 квт	106,0%
Радиоприемники	128,1%
Телефонные аппараты	110,2%
Экстролампы	92,9%
Радиолампы	104,0%
Электрооборудование самолетов и автомобилей	105,0%

Высоких темпов роста достигла механизация и электрификация промышленности и сельского хозяйства Чехо-

словакии; быстро увеличивается производство насосов, станков, текстильных и сельскохозяйственных машин, оснащенных электрооборудованием, производство десятков тысяч доильных, стиральных, холодильных и других машин с электроприводом.

В 1948 г. 35% всех выпущенных электродвигателей были переданы непосредственно для монтажа оборудования в капитальном строительстве, 44% — объединениям металлопромышленности, 15% — сельскому хозяйству, и 6% — ремесленным и торговым предприятиям.

Задачи, поставленные перед электромашиностроением в первом пятилетнем плане, перемещают центр тяжести его производства в область тяжелого оборудования (турбины, генераторы и т. д.).

Организационно электромашиностроение Чехословакии объединено в 19 отраслей, распределенных в 3 группы.

1-я группа — инвестиционного оборудования (тяжелое электромашиностроение, легкое электромашиностроение, измерительная аппаратура, кабели и провода, оборудование связи и электролечебное).

2-я группа — смесанное оборудование (установочные материалы и светильники, аккумуляторы и сухие батареи, электрооборудование самолетов и автомобилей).

3-я группа — товары широкого потребления (электролампы, радиолампы, домашние бытовые приборы и радиоприемники).

К концу первой пятилетки сравнительно с 1948 г. производство тяжелого электромашиностроения вырастет в 3,25 раза, легкое электромашиностроения — в 1,93 раза, оборудования связи — в 3,25 раза, кабелей и проводов — в 1,6 раза, установочных материалов и светильников — в 2,38 раза, остальных отраслей — примерно в 1,56 раза или в среднем по электромашиностроению — в 2,05 раза. Уровень производства (в стоимостном выражении) достигнет в 1953 г. 492% уровня производства 1937 — предвоенного года. Численность рабочих в электротехнической промышленности вырастет против 1937 г. на 253%. Производительность труда вырастет против 1937 г. на 195%, а против 1948 г. — на 135,5%. Валовая продукция электротехнической промышленности достигнет 18,3 млрд. крон в ценах 1948 г.

Для характеристики освоения и внедрения в производство новой техники можно отметить следующие достижения чехословацкой электромашиностроительной промышленности.

На заводе Тесла в Глоубетене изготовлен образец новой машины «Трафомат». Новая машина производит автоматический монтаж внутренних частей трансформаторов. За 10 сек. она выполняет работу, на которую затрачивается 60 рабочих часов. За один рабочий день машина перерабатывает 4,5 т железа. На электротехническом заводе Шкода в Пильзене выпущен высоковольтный выключатель нового типа ВВ100/600 для АПВ. Выключатель производится серийно и предназначен для электросети — 100 кв. Он приводится в действие сжатым воздухом (20 ат).

Литература

1. Чехословакия, изд. Орбис, Прага, стр. 28—29, 1947.
2. Statisticka přiručka, стр. 56—59.
3. Чехословацкий еженедельный экономический справочник, № 165, 1949.
4. Чехословацкий еженедельный экономический справочник, № 138, 1948.
5. Rude pravo, № 241, 1947.
6. Statisticky spravodaj, № 3, 1949.
7. Statisticky spravodaj, № 5—6, 1949.
8. Электрические станции, № 2, 1947.
9. Чехословацкий еженедельный экономический справочник, № 156, 1948.
10. Electrotechnicky Obsor, № 6—7, 1949.
11. Electrotechnicky Obsor, № 4—5, 1949.
12. Сборник законов Чехословацкой республики, № 90, закон № 241, 2 ноября 1948.
13. Statisticky spravodaj, № 2, 1947.
14. Electrotechnik, № 10, 1949.

Н. И. РОМАШКИН



Организации ВНИТОЭ в движении за содружество ученых и производственников

Обсудив на VII пленуме правления ВНИТОЭ доклад проф. В. М. Андреева о содружестве работников промышленности и деятелей науки и техники Ленинграда и Ленинградской области, правление ВНИТОЭ обратилось в истекшем году к членам Общества с предложением включиться в творческую работу для разрешения и внедрения на основе содружества целого ряда серьезных вопросов, имеющих практическое значение для предприятий электропромышленности, энергосистем и электростанций для успешного завершения пятилетки в 4 года.

Организации Общества проводят соответствующую работу среди членов Общества; появились сообразительности о содружестве между организациями Общества, членами Общества в проектно-конструкторских, строительных, монтажных организациях и между членами Общества и рабочими-стахановцами.

Приведем некоторые примеры.

Отделение ВНИТОЭ при заводе «Севкабель» организовало бригаду содружества в составе: рабочего-стахановца А. С. Захарова, инженера-конструктора И. К. Михайлова и инженера-технолога А. А. Кашина для освоения производства жилы с новой изоляционной композицией. До последнего времени жилы глубоководных кабелей связи изолировались особой массой, заменявшей свинцовую оболочку. Масса эта была дорога. Разработанная композиция, заменяющая дорогую изоляционную массу, вполне отвечает предъявляемым требованиям. Однако, внедрение композиции представляло сложную задачу, связанную с установлением новой технологии и с модернизацией оборудования. Бригада содружества разрешила имевшиеся затруднения. На этом заводе заключены договоры содружества по внедрению новейших методов технологии и разрешению других вопросов производства; в договорах участвует 25 членов Общества.

Отделение ВНИТОЭ при ЛЕНГИДЭП заключило договор о содружестве с членом правления Киевского отделения ВНИТОЭ, действительным членом Академии наук СССР, проф. С. А. Лебедевым и кандидатом техн. наук (Институт электротехники Академии наук СССР) Л. В. Цукерником по разработке и внедрению рекомендованного научно-технической сессией по автоматике и телемеханике, организованной ВНИТОЭ, компандирования и коррекции напряжения синхронных генераторов.

Члены Общества А. Н. Черепанов, П. Н. Мицеловский, А. А. Тимофеева и В. В. Дмитриевский заключили договор с инж. Н. В. Хильтовым и др. на внедрение нового типа комплектных распределительных устройств собственных нужд гЭС.

Первичная организация ЛОНИТОЭ при ЛКС Ленэнерго выступила в местной многотиражной газете со статьей по вопросу о формах содружества в ленинградской кабельной сети, наметила ряд вопросов, которые необходимо разрешить для повышения технико-экономических показателей предприятия.

По инициативе организаций ВНИТОЭ заключен 31 договор содружества между инженерами и рабочими-стахановцами сети, ТЭРЗ, Физико-технического института Академии наук СССР, ЛИЭИ им. Молотова, ЦНИЭЛ, МЭС, НИИ МЭП, ЛПИ им. Калинина, заводов «Севкабель» «Электроаппарат» и др.

Первичная организация управления Ленэнерго заключила три договора о содружестве работников энерголаборатории Ленэнерго, V гЭС и завода «Электросила».

Первичная организация Севзапэлектромонтажа на общем собрании организации обсудила вопрос о содружестве инженеров и стахановцев. С докладами выступили А. С. Либерман, А. Н. Гордеев, К. И. Яшук, Ф. И. Успенский, В. А. Вильниц, П. Д. Корольков и др. Обсудив доклад и сообщения, общее собрание членов Общества рекомендовало темы, по которым целесообразно заключить договоры. Кроме того, было решено провести совещание инженерно-технических работников и рабочих, участвующих в содру-

жестве. Решения собрания нашли отражение в заключении 27 договоров содружества между 30 ИТР и 44 рабочими. Договоры реализуются.

Первичная организация ЛОТЭП обсудила вопросы развертывания работы по содружеству инженеров и рабочих проектных и заводских организаций и наметила тем путем разработку типовой компоновки машинного цеха совместно с ЛМЗ им. Сталина. Заключены договоры содружества с рабочими-строителями ТЭП, с членами Общества организации при заводе «Электроаппарат».

Первичная организация ВНИТОЭ Кировского завода оказывать помощь в реализации обязательств энергетиков завода и работниками кафедр промышленного использования электроэнергии и паровых котлов ЛПИ им. Калинина.

Отделение ВНИТОЭ при заводе «Электроаппарат» правило творческую инициативу членов Общества по разработке новой техники. В этой работе участвуют Н. И. Бачурин, В. В. Каплан, А. И. Добрусин, Г. Б. Вельцель, А. М. Залесский, М. И. Коган, К. Е. Булгаков, Л. К. Грейнер, В. В. Гурвич, И. К. Медведский, И. С. Менделеев, П. Я. Яновский, М. М. Зархин и др. Путем содружества ищутся наилучшие технические решения конструкций ГМ единой серии малогабаритных опорных изоляторов, максимальных реле и др.

Одесское отделение ВНИТОЭ выделило 16 бригад числа членов Общества (по одному теплотехнику и одного электрика), которые, подробно ознакомившись с предприятиями, выработали конкретные мероприятия содружества между членами Общества и работниками обследованных предприятий.

На ХЭМЗ — С. Я. Коган и А. П. Горожанкин — разрабатывают новую конструкцию взрывобезопасных и двигателей (с производственными и эксплуатационными показателями, превосходящими существующую на МА-140) и методику расчета асинхронных машин. И. Кравцов разрабатывает более совершенную конструкцию коробчатых вентиляторов для машин А-6 — А-7 — А-8. А. Р. Греков разрабатывает регулируемый электродвигатель переменного тока с магнитной муфтой скольжения.

Творческий коллектив членов ВНИТОЭ на заводе «ЗИС» в составе М. И. Трехова, М. М. Смирнова, Н. Ферапонтова, В. В. Анке и М. С. Ползова в порядке содружества разрабатывают и внедряют схему автоматизации работы токоприемников покрасочных камер в зависимости от количества проходящих через камеру изделий.

На заводе «Серп и молот» в содружестве участвуют члены Общества: кандидат техн. наук М. Н. Старо И. С. Жилин, М. М. Минская, З. И. Слесарев, С. Б. Ионов, Н. П. Иконостасов и Н. Е. Никодимов совместно с работниками отдела главного энергетика и цехов.

Члены Киевского отделения ВНИТОЭ, работающие на заводе им. Димитрова, взяли обязательство путем коллективного творческого содружества внедрить в эксплуатацию высокочастотную установку для термообработки деталей и сушилки леса (регуляторы производительности вентиляторов направляющих аппаратов), а в ряде цехов вода анодно-механическую резку и заточку металлов.

Татарское отделение популяризирует для широкого внедрения новый телеизмерительный прибор, сконструированный и изготовленный в порядке сообразительности членом общества т. Ю. Целоусовым.

Члены Общества на заводе им. Молотова в составе 47 чел. взяли обязательства по внедрению в технологию для определения твердости стали нового прибора калибра 10 мм, для измерения вакуума при регенерации электрических ламп нового прибора — электрического вакуумметра и др.

12 членов общества в Новосибирске на базе содружества внедряют анодно-механическую резку и электрические установки на предприятиях города.

Проведено шесть кустовых совещаний отделов ВНИТОЭ (в Ярославле, Казани, Риге, Запорожье, Омске, Свердловске), посвященных развертыванию кол-

тикого участия членов Общества в творческом содружестве ученых инженеров и производственников.

Организации Общества устанавливают контакт с техническими советами предприятий. Так, Техсовет завода им. Сталина (председатель Техсовета — член президиума ВНИТОЭ М. Н. Бушуев) посвятил специальное заседание Техсовета обсуждению работы заводской организации ВНИТОЭ. Техсовет наметил для совместной работы целый ряд научно-технических вопросов. Сейчас отделение Общества на заводе им. Сталина выносит на обсуждение Техсовета ряд принципиальных технических вопросов.

Связь с техсоветами предприятий первичные органи-

зации Общества должны всемерно расширять. Совместная работа техсоветов с научно-техническим обществом представляет перспективную форму творческого содружества работников науки с промышленностью.

Отделения Общества должны выявлять и подхватывать ценные начинания новаторов производства, оказывать им всемерную помощь в осуществлении рационализаторских и изобретательских предложений, в освоении новых методов труда.

*Зам. председателя правления ВНИТОЭ
А. С. РУМЯНЦЕВ*

Научно-техническое совещание по газоочистке

В октябре 1949 г. в Ленинграде состоялось научно-техническое совещание по вопросу очистки отходящих промышленных газов и производственных выбросов в атмосферу. Совещание было созвано Ленинградским отделением ВНИТОЭ и Комитетом газоочистки ВНИТОЭ с целью объединения инженерной и медицинской общественностью, вытекающих из постановления Совета Министров СССР от 29 мая 1949 г. «О мерах борьбы с загрязнением атмосферного воздуха и об улучшении санитарно-гигиенических условий населенных мест».

В работах совещания приняло участие 222 чел.: представители ряда союзных и республиканских министерств, работники различных научно-исследовательских, проектных, производственных и санитарно-гигиенических коллективов Советского Союза.

Во вступительном слове доктор техн. наук, проф. В. Н. Петер (ЛПИ) указал на историческое значение постановления Совета Министров СССР, которое служит ярким выражением заботы партии и правительства о здоровье населения Советского Союза.

От Министерства здравоохранения СССР выступил кандидат медицинских наук К. Г. Берюшев.

Представители Всесоюзного треста «Газоочистка», на который правительством возложены основные задачи по проектированию, научно-исследовательской работе, монтажу и инспектированию всех газоочистительных установок, поделились на совещании сведениями о той работе, которая проделана трестом, в целях реализации указанного постановления. В докладах инж. В. Н. Ужова «Электрическая очистка дымовых газов в СССР», инж. М. М. Зайцева «Успехи в области разработки конструкции циклонов и мультициклонов», инж. И. П. Востокова «Тонкая очистка газов электростатическими осадителями с раздельной ионизацией и осаждением» и инж. А. П. Андрианова «Состояние проблемы очистки дымовых газов от сернистого ангидрида» участники совещания услышали о новейших исследованиях в этой области, на основе которых трест «Газоочистка» разработал новые, более совершенные аппараты.

Эти и ряд других заслушанных докладов вызвали оживленный обмен мнениями. Совещанием была принята резолюция, в которой намечены мероприятия, рекомендуемые совещанием для дальнейшего улучшения электрической газоочистки.

Инж. В. А. КОЗЛОВ

Сибирское совещание по электрической изоляции

Всесоюзное бюро электрической изоляции и Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете организовали Сибирское межобластное совещание по вопросам электрической изоляции, которое происходило в г. Томске 15—17 ноября 1949 г. В работе совещания приняло участие свыше 100 делегатов — инженерно-технические работники электропромышленности, ученые вузов и научно-исследовательских институтов Сибири.

На совещании было заслушано и обсуждено 13 докладов, причем 9 из них были сделаны инженерами электрических заводов Сибири. С вступительным словом выступил ректор Томского государственного университета профессор-доктор В. Т. Макаров.

Доцент Томского государственного университета А. М. Вендерович выступил с докладом «Достижения советских ученых в области физики диэлектриков и практической электроизоляции». В вопросах повышения качества электроизоляции в электрических машинах были представлены доклады инж. Н. П. Кронберг «Технические особенности применения электроизоляции в синхронных двигателях», инж. Н. А. Зотова «Эффективный пропиточный процесс обмоток якорей открытых и защищенных электрических машин постоянного тока», инж. Б. Б. Пахряева «Применение стеклянной изоляции для изолирования динамомашинной проволоки».

О новых видах электроизоляции проводились доклады выступили: инж. Л. З. Реут «Эмальновое покрытие с карбамидной изоляцией», инж. А. А. Самойлов «Новые изоляционные материалы в кабельной технике», инж. Б. Р. Остроух «Применение дегидро-хлорированного продукта взамен растительных масел при изготовлении электроизоляционных лаков».

Доцент Томского политехнического института А. К. Потужный сделал доклад «Нагревостойкость лаковых пленок». Доцент К. А. Водопьянов (Сибирский физико-технический институт) в своем докладе «Электрические свойства слюды Восточно-Сибирского месторождения» привел экспериментальный материал, характеризующий слюду в зависимости от частоты электрического поля, температуры и толщины образцов. На основании полученных данных даются практические указания о рациональном использовании слюды.

С большими и интересными докладами на совещании выступил инж. Ю. Б. Новодворский «Технология изготовления вакуумной керамики» и «Вакуумно-плотные спай керамики с металлом».

О освещении новых методов испытания и контроля электроизоляции выступили: научный сотрудник Сибирского физико-технического института В. А. Преснов «Новый метод определения дефектов в электроизоляции кабеля» и кандидат физ.-матем. наук М. С. Мецник (трест «Союзслюда») «Измерение диэлектрических потерь на высокой частоте видоизмененным резонансным методом».

Совещание приняло решение об организации Сибирского отделения Всесоюзного бюро электрической изоляции, которое будет в районе своей деятельности координировать научные исследования по вопросам электрической изоляции, организовывать совещания по отдельным вопросам и устраивать лекции и доклады.

В состав бюро Сибирского отделения избраны: доктор техн. наук, проф. А. А. Воробьев, доценты К. А. Водопьянов, А. М. Вендерович, А. К. Потужный и инженеры Ю. К. Шокальский, Н. А. Быков, Ю. Б. Новодворский, Н. А. Зотов, Е. Н. Зикеев, Л. З. Реут и В. П. Бочкарев.

*Доц. К. А. ВОДОПЬЯНОВ
Член Всесоюзного бюро электрической изоляции*

Пленум ВНИТОЭ

В конце 1949 г. состоялся VIII расширенный пленум правления ВНИТОЭ. Пленум рассмотрел основные вопросы организационно-массовых и научно-технических мероприятий общества на 1950 г., в частности, об участии членов общества: в создании новых более совершенных машин, механизмов и приборов и в модернизации существующего фонда оборудования, в развитии механизации трудоемких работ и в сокращении расходных норм производственного сырья, материалов, топлива и электроэнергии.

Пленум отметил, что широко развернувшееся в 1949 г. тесное творческое содружество работников науки и работников производства должно в 1950 г. содействовать успеш-

ному решению ряда задач, поставленных перед нашей промышленностью и электростанциями Советского Союза.

Пленум признал необходимым создать в обществе комиссии для разработки особо ценных, имеющих практическое значение, творческих идей членов общества и для содействия внедрению в производство новых научных достижений и изобретений членов ВНИТОЭ.

В плане предусмотрены также общественные смотры учебников, монографий и литературы по технике, проведение читательских конференций журналов «Электричество», «Электрические станции» и др.



Заметки и письма

ЕЩЕ О СПОСОБЕ УЧЕТА РЕАКЦИИ ЯКОРА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Л. М. Шильдинер в статье «Аналитический метод намагничивающего действия поперечной реакции якоря при больших перегрузках» (Электричество, № 10, 1949, стр. 46), касаясь на стр. 48 вопроса о реакции добавочных полюсов, считает ошибочным способ ее учета, изложенный в моей статье «Реакция якоря машин постоянного тока» (ВЭП, № 2, 1940). Он приводит цитату: «ампервитки, эквивалентные реакции поперечной м. д. с. добавочных полюсов, определяются аналогично формуле (2)», добавив от себя подчеркнутые нами слова «поперечной м. д. с.», которых нет в статье.

Вводя это «уточнение», изменяющее смысл фразы, Л. М. Шильдинер делает вывод, что, следовательно, реакция добавочных полюсов должна определяться по тому же принципу, как и поперечная реакция якоря. Этот вывод действительно является ошибочным.

Между тем, в моей статье сказано совсем другое. Там подробно описано, как при сдвиге щеток с оси добавочных полюсов разностный поток добавочных полюсов $\Delta\Phi_w$, пропорциональный удвоенному сдвигу щеток, наводит в обмотке якоря добавочную э. д. с. вращения положительного или отрицательного знака в зависимости от направления сдвига щеток (в отличие от действия поперечной реакции якоря, которое всегда имеет отрицатель-

ный знак). Для компенсации этой э. д. с. в обмотке якоря должна быть наведена потоком главных полюсов, а и противоположно направленная э. д. с. Для этой обмотки возбуждения должна создать добавочные ампервитки AW_w , определяемые по кривой намагничивания и с помощью приближенной формулы (10), аналогичной формуле (2). Суммарная реакция якоря вычисляется по формулам (13) и (15).

К сказанному следует добавить, что реакция главных полюсов и способ ее учета, кратко описанные в упомянутой статье, рассмотрены более полно в другой статье «Сварочный генератор с самовозбуждением» (Электричество, стр. 591, № 14, 1930). В ней показано, каковая величина рабочего тока генератора регулируется сдвигом щеток. Возможность такой регуляции ущерба для коммутации обеспечивается соответствующим увеличением ширины добавочных полюсов. Добавочная э. д. с., наводимая в обмотке якоря разностным потоком добавочных полюсов, достигает $\pm 6\%$, иначе говоря, 15—20% результирующей э. д. с. генератора.

Доктор техн. наук, проф. В. Т. КАСЬЯ
Ленинградский электротехнический институт им. Ленина

НЕ ОТКАЗЫВАТЬСЯ ОТ „УСЛОВНЫХ ТЕРМИНОВ“!

В связи с ведущейся работой по русской технической терминологии и задачей очищения последней от иностранных терминов необходимо обратить внимание на возможность выбора одного из двух путей в качестве основных, а именно: вводить либо «условные термины», либо «термины-описания». О. И. Золотарев (Электричество, № 9, 1949) становится на второй путь, мне же представляется необходимым выступить в защиту первого пути.

Лица, работающие в области терминологии, знают, как трудно построить определение того или иного термина отчасти потому, что всякое определение должно удовлетворять требованиям однозначности. Все понятия, объединяемые термином, должны быть охвачены определением, и в то же время под данное определение не должны подходить понятия, которые к нему не относятся. Я не говорю здесь о ряде других требований, предъявляемых к определению.

С этой точки зрения и следует возражать против «терминов-описаний». Все ли роторы, например, являются «усилителями с комбинированным возбуждением»? Все! Но разве нельзя допустить, что в будущем появится усилитель с комбинированным возбуждением, который, однако, не будет ротором в том смысле, как это представляется сейчас? Несомненно, можно! И так с любым

термином. Вводя же «условные термины», мы не можем получить более короткие названия, но зато точно обуславливаем, что мы имеем в виду под термином, устраняя возможные впоследствии изменения. Конечно, «условные термины» только выйдут, если они будут не случайными наборами букв, а составлены из частей тех или иных слов.

Приведу пример: до сих пор конкурируют выражения «распределение силы света» источников и «тораспределение» источников. Не говоря о том, что последний «условный» термин короче, он ценен тем, вводя его, мы четко уславливаемся понимать по характеристике распределения силы света по различным направлениям пространства; что, если сказать «распределения силы света», то этому определению можно приписать и иное значение, например, распределение силы света между отдельными элементами или установки в целом.

Не составит, я полагаю, труда предложить четкие удобные русские термины и для новых типов электрических машин.

Инж. Г. М. КНОМ
Ленинград, «Связьэлектромашин»



Г. В. ДОБРОВОЛЬСКИЙ. УСТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.

100 стр., ц. 7 руб. 50 коп. Изд-во Академии наук СССР, 1948.

В современной радиотехнике и в технике проводной двойной интеграл Фурье используется в качестве одного из методов исследования переходных процессов в электрических цепях. В СССР указанный метод используется во многих научно-исследовательских и практических работах; вопросу о применении интеграла Фурье посвящена обширная учебная и журнальная литература. Метод математического анализа вошел в СССР в качестве составной части целого ряда электротехнических дисциплин: Теоретические основы электротехники, Теория цепей по проводам, Теоретические основы радиотехники, Электроакустические аппараты и т. д.

Этому же методу посвящена в основном рецензируемая книга доктора техн. наук, проф. Г. В. Добровольского «Устанавливающиеся процессы в электрических цепях». Автором сделана попытка свести расчеты устанавливающихся процессов к оперированию табулированными функциями с использованием преимущественно вторичных измерений четырехполюсников.

Книга рассчитана на квалифицированных читателей — инженеров и научных работников; она состоит из четырех глав и приложений к ним.

Глава первая, посвященная включению постоянной э. д. с., касается переходных процессов в цепях с сосредоточенными параметрами, в четырехполюсниках с сосредоточенными параметрами и в электрических фильтрах нижних частот. В этой главе подвергнут рассмотрению вопрос о фазовой скорости распространения сигналов. В связи с тем, что в четырехполюсниках с сосредоточенными параметрами время распространения сигналов равно нулю, подчеркивается принципиальная невозможность построения искусственной линии, точно воспроизводящей процесс распространения и установления тока в действительной линии. В этом отмечена специфика расчета переходных процессов в четырехполюсниках, имеющих в своем составе элементы с распределенными параметрами. Кроме того, сделан вывод о том, что время практического установления тока на выходе фильтра зависит не только от ширины пропускания фильтра, но и от числа звеньев фильтра, характеристик его выходного сопротивления и нагрузки на выходе.

Автор справедливо обращает внимание читателей на опасность, получающуюся при идеализации фильтров, связанной на упрощении их характеристик и предположении, что фильтр нагружен согласованно во всем диапазоне частот. Практически сопротивление нагрузки может существенно отличаться от характеристического сопротивления фильтра. В частности, на стр. 20 для сравнения приведены кривые нарастания тока на выходе «идеального» фильтра нижних частот и однозвенного Т-образного фильтра, нагруженного постоянным активным сопротивлением. Здесь уделено специальное внимание вопросу о пользе собственных и вносимых затуханиях.

Глава вторая, посвященная включению синусоидальной э. д. с., касается переходных процессов в полосовых фильтрах. Здесь автор также разбирает вопрос о времени распространения сигналов в цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами и об установившейся жестко фиксированной связи между шириной пропускания фильтра и временем устанавливания амплитуды напряжения в выходной цепи фильтра.

Глава третья трактует о методике исследования переходных процессов в цепях с изменяющимися во времени параметрами — замыкание и размыкание цепей, переменные сопротивления.

Наконец, глава четвертая, написанная инж. И. А. Овсеевичем, посвящена вопросу о применении преобразования Лапласа к исследованию переходных процессов в четырехполюсниках.

Изложение начинается с применения двойного интеграла Фурье к выводу известной интегральной формулы для скачкообразной функции, не удовлетворяющей условию абсолютной интегрируемости в бесконечных пределах. В таких случаях, учитывая, что $f(t) = 0$ при $t < 0$, обычно пользуются односторонним преобразованием Фурье [Л. 1, стр. 37; Л. 3, стр. 129] применительно к функции вида

$$f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} e^{-st} f(t) \quad \begin{matrix} t > 0 \\ s > 0 \end{matrix}$$

Этот удобный прием лежит также в основе операторного представления функций, не являющихся абсолютно интегрируемыми в пределах $0, \infty$ [Л. 2, стр. 42].

Вместо этого в рецензируемом труде применено искусственно усложненное условие вида:

$$f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \begin{cases} \frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-st} & t > 0 \\ \frac{E}{2} - \frac{E}{2} e^{st} & t < 0 \end{cases}$$

в результате чего нахождение общезвестных выражений излишне усложнено.

Приведенная далее на стр. 10 проверка правильности полученного результата дает повод считать, что

$$\frac{E}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\omega t}}{\omega} d\omega = \begin{cases} \frac{E}{2} & t > 0 \\ -\frac{E}{2} & t < 0 \end{cases}$$

Между тем, при рассмотрении этого же интеграла в качестве контурного легко показать, что он равен E при $t > 0$ и нулю при $t < 0$. Таким образом, проверочное вычисление автора, имеющее силу только при исключении из рассмотрения особой точки ($\omega = 0$), носит, по существу, чисто условный характер.

Рассматривая выражение спектральной характеристики $C(\omega)$ при предельном значении $s = 0$ автор, к сожалению, не уделяет внимания существующей связи между операторными изображениями и комплексными значениями спектральных характеристик функций

$$C(\omega) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{F(p)}{p} \right]_{p=j\omega}$$

Между тем, именно эта связь дает возможность на практике сильно облегчить нахождение спектральных характеристик, сведя его к непосредственному пользованию таблицами оригиналов и изображений, широко распространенными в существующей учебной литературе [Л. 1, стр. 331; Л. 3 и др.].

Рецензируемый труд не свободен от излишних повторений и выводов. Так, например, приведенный на стр. 43 вывод выражений (45) фактически излишен, так как формулы эти непосредственно вытекают из формул (41) в результате замены входных проводимостей — взаимными, т. е. замены одних буквенных обозначений другими, аналогично формулам (14) и (20).

Обращает также на себя внимание нецелесообразность выводов выражений (67) и (87) на стр. 60, 53—54. Не

говоря уже о том, что сами по себе эти формулы неправильны (см ниже, п. 2), они фактически никакого применения в книге не находят.

Наряду со всем этим в рецензируемой книге имеются некоторые погрешности и неточности. Ниже перечислены основные из них:

1. На протяжении всей книги автором допускается погрешность, заключающаяся в том, что синусоидальная э. д. с., записанная в тригонометрической форме, умножается на комплексный коэффициент распространения $g=d+ja$ или делится на комплексное сопротивление $Z=R+jX$. В свою очередь синусоидальный ток, представленный в тригонометрической форме, умножается на комплексное сопротивление Z и т. д.

В результате такого смешения метода комплексных амплитуд с тригонометрическим методом получаются выражения, лишенные смысла (стр. 11, 12, 14, 17, 18, 43, 59, 60—65), как-то:

$$e^{-g} \frac{E}{\pi \omega} \sin \omega t d\omega, \quad \frac{E \sin \omega t d\omega}{\pi \omega Z},$$

$$Z \frac{I \sin \omega t d\omega}{\pi \omega} \text{ и т. д.}$$

В общей сложности такого рода погрешности встречаются в 23 различных дифференциальных выражениях, написанных автором.

2. Значительная часть формул, выведенных автором, содержит неправильные знаки. Так, например, при $Z=R+jX$ (стр. 59—60) напряжение du получено отставшим от тока di [выражения (65) и (85) на стр. 60 и 63], в то время как оно является опережающим. В связи с этим конечные выражения (66), (67), (86) и (87) неправильны.

При распределении токов между двумя параллельными ветвями, содержащими Z_A и Z_B , допущена ошибка в знаках выражений (72) — (77), (89), (90) и др. Поскольку величины a, b, p, q , входящие в выражения (71') и (88), являются алгебраическими, то токи di_A и di_B должны опережать di на углы $\arctg \frac{b}{a}$ и $\arctg \frac{q}{p}$. Следовательно, квадратные скобки выражений (72) и (73) должны содержать суммы, а не разности соответствующих величин. Эта ошибка неизбежно отражается на конечных выражениях, полученных автором.

Неправильные знаки содержат также выражения (81) — (83), (93), (94) и др.

3. Предлагаемый автором метод расчета устанавливающегося процесса в цепи, содержащей переменное сопротивление (стр. 65—67), неприемлем. Ток $I_1=I_0+I_1$, входящий в выражение (97), является функцией времени и при $t>\theta$ не остается постоянным даже при неизменных в дальнейшем параметрах цепи. Между тем, весь последующий расчет базируется в конечном итоге на формулах вида (63) и (76), справедливых только при постоянстве тока I [роль которого в выражении (97) выполняет ток I_1]. Поэтому формулы (97) — (100), вообще говоря, неправильны.

4. Из общего числа 5 исправлений, приведенных в списке опечаток (приложенном в книге), 3 исправления неверны. На стр. 39 (строка 1 снизу) вместо $\frac{E}{\pi}$ должно

быть $\frac{E}{2\pi}$, а не $\frac{E}{2}$, как указано в опечатках. На стр. 63

(строка 1 снизу) знак минус перед $\frac{I}{2}$ должен быть сохранен. Наконец, на стр. 73 (строка 7 снизу) вместо A_{13} должно быть A_{21} , а не A_{23} , как это указано в опечатках.

В книге содержится также большое число других опечаток. Так, например, на стр. 13 в выражении (19) вместо $\frac{E}{\pi} c(0)$ должно быть $\frac{E}{2} c(0)$; на стр. 15 в выражении (15') пропущено $d\omega$; на стр. 40 (строка 3 сверху) в двух местах вместо $\frac{E}{\pi}$ должно быть $\frac{E}{2\pi}$ и т. д.

5. Выражение di , приведенное на стр. 11, так же, и di' на стр. 12, соответствует той части выражения э. д. с., которая зависит от частоты; оно не учитывает постоянной составляющей. Поэтому при выводе выражения (13) вместо $i = \int_0^\infty di$ (стр. 11) следовало писать $i =$

$+\int_0^\infty di$. Сказанное в равной мере относится и к выражениям (39) и (44) на стр. 42 и 43, где di не учитывают установившейся функции от ω_0 .

Наряду с этим при выводе выражений (13) автором допущены погрешности, аналогичные тем, которые были указаны выше (в п. 1). Так например, приведен на стр. 12 выражения для э. д. с. и тока

$$de' = \frac{E}{\pi} \frac{e^{-g(\omega)}}{\omega} \sin \omega t d\omega$$

и

$$di' = \frac{de'}{Z(\omega)} = \frac{E e^{-g(\omega)} \sin \omega t d\omega}{\pi Z(\omega) \omega}$$

фактически лишены смысла.

Несмотря на все эти погрешности, конечный результат выражений (13) и (39) правилен, поскольку они уже опубликованы в литературе [Л. 6, стр. 220; Л. 4, стр. 1 и др.]. Применение формул (14) и (41) к исследованию переходных процессов на входе фильтра нижних частот полосового фильтра так же, как и вывод выражений (24), (51) и (52) на базе этих расчетных формул, даны в [Л. 5]. Повторяя эти выводы с внесением указанных выше погрешностей, автор книги при этом отметить следующие моменты:

а) Выражения (14) и (41) имеют силу только при $t \geq 0$.

б) При выводе выражения (51) достаточно использовать из условия $b(\omega_0)=0$ [Л. 5, стр. 77], не накладывая на характеристику $b(\omega)$ никаких других ограничений (стр. 45).

При имеющемся в современной литературе обилии материалов, посвященных переходным процессам в электрических цепях и методу интеграла Фурье, читатель не ожидает от труда, изданного в 1948 г. Академией СССР, изложения современной трактовки данного вопроса и результатов новых исследований в этой области.

К сожалению, книга Г. В. Добровольского этим требованиям в должной мере не отвечает. Она не отражает фактического состояния вопроса о применении интеграла Фурье в электротехнике. В ней не только отсутствуют новые методы исследований, как, например, между частотными характеристиками четырехполюсника и его реакцией на импульс, но и не даны более совершенные методы решения практических задач.

Наряду с этим весьма досадным является наличие погрешностей, допущенных автором, с которыми читателю приходится довольно часто сталкиваться при чтении книги. Эти недостатки снижают общую ценность рецензируемого труда.

Литература

1. К. А. Круг. Переходные процессы в электрических цепях. Госэнергоиздат, 1948.
2. А. И. Лурье. Операционное исчисление и приложения к задачам механики. ОНТИ, 1938.
3. М. Ф. Гарднер, Дж. Л. Бэрнс. Переходные процессы в линейных системах. Госэнергоиздат, 1948.
4. А. А. Харкевич. Теория электроакустических аппаратов. Связьиздат, 1940.
5. Г. И. Атабеков. О методике исследования устанавливающегося процесса на входе электрического фильтра. Сборник трудов Ленинградского электротехнического института связи им. Бонч-Бруевича, вып. 2.
6. Д. Р. Карсон. Электрические нестационарные явления и операционное исчисление. ОНТИ, 1934.

Доктор техн. наук, проф. Г. И. АТАБЕКОВ



И. А. СЫРОМЯТНИКОВ. ВОПРОСЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ.

191 стр., ц. 8 р. 50 к. Госэнергоиздат, 1948.

Книга И. А. Сыромятникова «Вопросы эксплуатации синхронных генераторов», изданная в качестве учебного пособия для слушателей факультета усовершенствования дипломированных инженеров Всесоюзного энергетического института, представляет собой интересную и оригинальную работу. В книге рассмотрена физика процессов, протекающих в машине при различных ее режимах.

Изложение ведется на достаточно высоком теоретическом уровне. Теоретические выкладки подкреплены большим количеством экспериментального материала, основная часть которого получена самим автором.

Автор остановился только на некоторых вопросах эксплуатации, связанных с наиболее новыми и неясными проблемами, возникающими на электростанциях. Ни по количеству рассмотренных вопросов, ни по объему, ни по методике изложения книга не может служить инструкцией по эксплуатации генераторов. Практические выводы для работников электростанций могут быть сделаны уже в результате изучения теоретического материала, изложенного в работе И. А. Сыромятникова.

Глава I книги рассматривает вопросы испытаний генераторов; II — автоматическую форсировку возбуждения генераторов; III — вопросы гашения поля; IV — асинхронный режим турбогенераторов с цилиндрическим ротором после потери возбуждения; V — несимметричная нагрузка синхронных генераторов и VI — сушка генераторов. Уже этот перечень названий глав свидетельствует о большом количестве затронутых в книге самых разнохарактерных вопросов.

Книга представляет собой монографию на основе работ, произведенных самим автором. Подбор материала в книге сделан по принципу объединения только тех работ, которыми занимался сам автор. Благодаря этому материал имеет ярко выраженный индивидуальный характер. Все рассмотренные вопросы решены по-новому, и эти решения подтверждены новым экспериментальным материалом. Те вопросы, которыми автор не занимался, не нашли отражения в работе.

В первой главе, где изложены широко известные методы измерений при испытании генераторов, описаны только приборы и методы, проработанные и критически освоенные автором. Например, мосту Томсона уделено 8 страниц, в то время как другие измерительные схемы и методы не рассматриваются. Почему в этой главе отсутствует, например, мост Шеринга? Только потому, что по данному вопросу автор не имеет сказать ничего нового.

Неравномерность изложения материала является характерной особенностью книги. Материал, изложенный в

гл. IV «Асинхронный режим турбогенераторов с цилиндрическим ротором после потери возбуждения», представляет значительный интерес. Автор, несмотря на спорность некоторых положений, смело и по-новому решает поставленную задачу. Одним из спорных положений автора является предположение, что реактивность ротора не зависит от скольжения. Это недоказанное положение, повидимому, не соответствует истине. Однако, несмотря на отдельные неточности, выводы, к которым пришел автор, совершенно правильны, и в выводах этой главы (стр. 105) автор дает совершенно правильные рекомендации. Интересно и оригинально изложена глава V, где теоретически и практически рассмотрены вопросы несимметричной нагрузки синхронных генераторов. Особый интерес представляет экспериментальный материал, приведенный в табл. 4. Этот материал может быть широко использован для целого ряда теоретических и практических работ. Необоснованно смелыми являются выводы автора о повреждениях турбогенераторов, вызванных несимметричной нагрузкой. Автор не придает большого значения перегревам капп в месте их посадки на бочку ротора. Однако, известно, что большое количество повреждений капп — выламывание кусков и даже их разрывы — связано с местными перегревами бандажей и перерождением немагнитной стали. Поэтому выводы автора в конце гл. V следует пользоваться с осторожностью.

Интересны, хотя и дискуссионны, положения гл. VI, где автор подробно рассматривает старые и новые методы сушки машин.

С другой стороны, отдельные вопросы изложены недостаточно полно. Например, испытанию охладителей (стр. 46) уделено только несколько строк, хотя это испытание имеет не меньшее значение, чем измерение сопротивлений, которому посвящено несколько страниц. Также недостаточно полно рассмотрен вопрос перенапряжений, возникающих на контактных кольцах (стр. 82); сделаны только намеки на решение этого сложнейшего теоретического вопроса.

Несмотря на отмеченные недостатки, книга И. А. Сыромятникова представляет собой интересную работу с критическим освоением всего глубоко и серьезно проработанного им материала и безусловно может быть рекомендована всем, кто серьезно интересуется физикой процессов, протекающих в генераторах на электростанциях.

Кандидат техн. наук Е. Г. КОМАР



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(Издания 1949 г.)

БРОЙДЕ А. И. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА (об-м. курс). Допущено в качестве учебника для техникумов. 232 стр., ц. 12 руб. 60 коп. Госэнергоиздат.

ВАЙНШТЕЙН С. С. ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОСКОП. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга, вып. 35). 1 стр., ц. 2 руб. Госэнергоиздат.

ГИНЗБУРГ З. Б., ТАРАСОВ Ф. И. КНИГА НАЧИНАЮЩЕГО РАДИОЛЮБИТЕЛЯ. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга, вып. 38). 114 стр., ц. 3 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

ГИНЗБУРГ З. Б., ТАРАСОВ Ф. И. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ РАДИОЛЮБИТЕЛЯ. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга, вып. 36). 90 стр., ц. 2 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

КОРОБЕЙНИКОВ И. М. (знатный электропищик Удмуртской АССР) МОЙ ОПЫТ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПИЛАМИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ. 32 стр., ц. 1 руб. 90 коп. Гослесбумиздат.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается появление рецензий.

КОГОЛЬКОВ В. Г. МАГНИТНАЯ ЗАПИСЬ ЗВУКА. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга, вып. 39). 90 стр., ц. 2 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

ОСИПОВ А. И., ПАВЛОВ Э. А., УВАРОВ Н. В. ОБЛЕГЧЕННАЯ ЭЛЕКТРОПИЛА ЦНИИМЭ-К-5. 40 стр., ц. 2 руб. 70 коп. Гослесбумиздат.

ПАЦИОРА П. П., БАБУШКИН И. Н. ПЕРЕДВИЖНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ПЭС-12 И КАБЕЛЬНАЯ СЕТЬ. 157 стр., ц. 11 руб. Гослесбумиздат.

ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (МЭС СССР, Технический отдел). 320 стр., ц. 18 руб. Госэнергоиздат.

РАДОВСКИЙ М. И. БОРИС СЕМЕНОВИЧ ЯКОБИ. 136 стр., ц. 4 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

САМОЙЛОВ В. А. ВИБРАЦИЯ АГРЕГАТОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И БАЛАНСИРОВКА РОТОРОВ. Под ред. О. Н. Давидовского. 160 стр., ц. 6 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СЕССИИ ПО ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. (Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетики, Московское отделение. Секция промэлектротехники). Вып. II, 139 стр., бесплатно. Изд. МОНИТОЭ.

Во II выпуске сборника напечатаны доклады А. А. Тайца «Методика нормирования удельных расходов электроэнергии», Б. А. Левитанского «Экономия и нормирование потребления электроэнергии в прокатных цехах», Г. Ф. Никулина «Экономия электроэнергии в прокатных цехах завода «Серп и молот», М. В. Сторожева «Экономия электроэнергии в кузнечно-штамповочных цехах», Л. И. Аронова «Экономия электроэнергии в дуговых электроплавильных печах», А. Д. Свенчанского «Экономия энергии в электрических термических печах», А. Я. Лернера «Автоматическое регулирование температуры в электротермических печах», Ю. Е. Ефроймовича «Автоматическое регулирование дуговых печей», Г. И. Бабата «Высокочастотная закалка», К. З. Шенеляковского «Опыт работы высокочастотных установок на автомобильном заводе им. Сталина», Н. Л. Каганова «Пути экономии электрической энергии при электросварочных работах», В. П. Либера «Экономия электроэнергии в гальванических цехах» и В. Н. Овечкина «Экономия электроэнергии на I ГПЗ им. Кагановича». В помещении в начале книги оглавления названия докладов не соответствуют перечисленным выше заголовкам докладов в тексте. Информация о выпуске I «Сборника» была уже дана в журнале «Электричество» (№ 10, стр. 96, 1949).

ТАРАЩАНСКИЙ М. М. ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ СИЛЫ НАГРУЗКИ НА МАШИНАХ. 65 стр., цена не указана. Харьковский электротехнический институт.

ТЕПЛИЦКИЙ Я. С. СЕЛЬСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ. 103 стр., ц. 1 руб. 75 коп. Сельхозгиз.

ТЕРЕЗА Г. П. ЗАВОДСКИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТАНЦИИ НИЗКОВОЛЬТНОЙ АППАРАТУРЫ. 159 стр. — вклейки, ц. 1 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ НА САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ. I. Перевод под ред. Г. А. Ремеза. 516 стр., ц. 18 руб. 90 коп. Изд-во «Советское радио».

ШАМПУР В. И. РАДИОЛОКАЦИЯ (Массовая радиофизика под общей редакцией А. И. Берга, вып. 37). 81 стр., ц. 1 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

ШПОЛЬСКИЙ Э. В. АТОМНАЯ ФИЗИКА, т. I — Введение в атомную физику. Изд. 2-е, переработанное. Допущено МВФ в качестве учебного пособия для высших учебных заведений. Ц. 14 руб. 45 коп. Гостехиздат.



ОТ МОНИТОЭ

Правление Московского отделения Всесоюзного научно-технического общества энергетики (МСННТОЭ) проводит в Москве в начале 1950 г. общественное обсуждение выпущенного в свет Госэнергоиздатом «Справочника по электрической изоляции», под редакцией Ю. В. КОРИЦКОГО и Б. М. ТАРЕЕВА, составленного по инициативе Всесоюзного Бюро электрической изоляции.

В связи с этим Правление МОНИТОЭ обращается к читателям с просьбой сообщить конкретные замечания о качестве Справочника и, в частности, осветить следующие вопросы:

1. В какой мере составителям Справочника удалось удовлетворить запросы широкого круга читателей (инженеров, техников и мастеров различных отраслей народного хозяйства)?

2. Правильны ли положенные в основу составления Справочника принципы освещения, главным образом, свойств готовых электроизоляционных материалов и изделий при весьма кратком, схематическом ознакомлении с их технологией?

3. Правильно ли выбрано соотношение между объемами чисто справочного (табличного, каталожного и т. п.) материала и текстовой частью Справочника?

4. Целесообразно ли включение в Справочник разделов о применении электроизоляционных материалов (разделы XIX—XXIII) и достаточно ли исчерпывающая номенклатура этих разделов?

5. Целесообразно ли включение в Справочник различных справочных сведений общего характера (раздел XXIV) и правильно ли выбрано содержание этого раздела?

6. Какие вопросы (по всему материалу Справочника) освещены недостаточно подробно?

7. Целесообразно ли переиздание Справочника после внесения в него необходимых уточнений и дополнений?

Замечания просьба направлять по адресу: Москва, проезд Владимирова, д. 6, I-й подъезд, 4-й этаж, комн. 8, МОНИТОЭ.

ПОПРАВКА

В статье П. И. Богдашкина (Электричество, № 10, 1949) строку 15 сверху, на стр. 9, в левой колонке, следует читать: «10 000 колхозов, 2 500 машино-тракторных станций»

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА

на **1950** год

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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 будет выслан 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	"