

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Лауреаты Сталинских премий за 1951 г.	3
С. М. Брагин — Уточненный метод теплового расчета кабеля	5
А. А. Глазунов, А. А. Глазунов и Г. М. Розанов — Экономически целесообразное отношение сечений алюминия и стали в сталеалюминиевых проводах	10
В. В. Гусев — Обобщенная операторная проводимость для расчета переходных процессов в сетях при АПВ	15
Г. И. Атабеков — Влияние трансформации звезда—треугольник на работу дистанционных реле	20
Е. М. Синельников — К вопросу о коммутации машин постоянного тока	24
К. В. Урнов — Выбор мощности электродвигателей по нагреву	29
Г. Т. Адонц — Исследование режимов самозапуска и автоматического повторного пуска под нагрузкой асинхронных двигателей	31
С. М. Лившиц — О расчетах и исследовании электрических промышленных нагрузок	40
С. М. Кацнельсон — Катодный осциллограф со ждущей разверткой времени для исследования ионных вентилях и высоковольтных выключателей	48
<b>ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ</b>	
К. И. Скоркин — Синхронизация асинхронных электродвигателей на шахтах комбината „Сталинуголь“	51
О. П. Шишкин — Итоги внедрения синхронизации на нефтяных промыслах Грозного	55
А. Ф. Киселев и М. Я. Бесков — Синхронизация асинхронных двигателей по схеме ДАГ в асбестовой промышленности	56
А. М. Оржеховский, С. Г. Эмма и И. М. Рабинович — Повышение коэффициента мощности на предприятиях мукомольной промышленности	57
Г. М. Бердичевский — О формуле для определения рентабельности синхронизации асинхронных двигателей	60
М. В. Грейсх — Передача и распределение электроэнергии при помощи шин	62
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
В. А. Говорков — Работы академика М. В. Шулейкина по электрическим машинам	64
Н. А. Смольков — Ферромагнитный резонанс—русское открытие	70
<b>СТАНДАРТЫ И НОРМЫ</b>	
И. И. Иванов — Новые методы испытания лакотканей	72
<b>ДИСКУССИИ</b>	
Книга Л. М. Пиотровского и Е. А. Паля „Испытание электрических машин“ А. Я. Бергер, Ф. И. Чернявский, В. Я. Якубовский, Д. А. Завалишин, В. Н. Левин, Н. Г. Гаврилова, Б. И. Архангельский, Г. С. Мавромати, А. И. Вольдек. Секция электрических машин научно-технического общества МЭИ им. Молотова Правила устройства электротехнических установок О. Г. Вексельман. Тарифные мероприятия в борьбе за повышение $\cos \varphi$ М. Д. Горенштейн.	74
<b>ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА</b>	
К статье И. М. Постникова „Универсальная машинная постоянная“ Н. А. Поляк, И. М. Постников	80
<b>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</b>	
Металлический ртутный выпрямитель для питания шахтных электровозных сетей. Электрическое освещение погружных площадок и трелевочных волоков. Балансирная подвеска для электроинструмента. Электротопор для обрубки сучьев со сваленных деревьев. Электробур для шпуров в мерзлых грунтах. Измерение температуры поверхностей. Измерения сопротивлений различных типов заземлителей в Швеции. Новые электровозы однофазного тока 50 гц.	82
<b>ХРОНИКА</b>	
Золотая медаль им. А. С. Попова. Профессор Н. П. Богородицкий <b>Л. И. Иванов</b>	88
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
Д. Р. — К 150-летию со дня смерти выдающегося физика XVIII в., исследователя электричества и магнетизма, русского академика Ф. У. Т. Эпинуса. Избранные труды по теории электричества и магнетизма	90
В. Ф. Бренев — Михаил Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству	93
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	95
Нограмма для определения двух комплексов (на третьей полосе обложки)	

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

Адрес для телеграмм: Москва Электричество.

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

**Да здравствует 1 Мая — день международной солидарности трудящихся, день братства рабочих всех стран!**

**Под знаменем Ленина, под водительством Сталина — вперед, к победе коммунизма!**

*(Из призывов ЦК ВКП(б) к 1 Мая 1952 года)*

**Труды, удостоенные Сталинских премий, знаменуют новый шаг советской жизни на пути ее творческого развития. Вдохновляемые гением великого Сталина, советские ученые оправдают веру народа, будут и впредь идти в первых рядах строителей коммунизма.**

*(Из передовой „Правды“ 13 марта 1952 года)*

## **Лауреаты Сталинских премий за 1951 год**

Совет Министров Союза ССР постановил присудить Сталинские премии за выдающиеся научные труды, изобретения и коренные усовершенствования методов производственной работы и

за выдающиеся произведения в области литературы и искусства за 1951 год.

Сталинскими премиями за 1951 год отмечен также ряд работ в области науки об электричестве и магнетизме и в области электротехники.

### **ЗА ВЫДАЮЩИЕСЯ НАУЧНЫЕ РАБОТЫ**

**СТАЛИНСКИЕ ПРЕМИИ ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ В РАЗМЕРЕ 200 000 рублей ПРИСУЖДЕНЫ:**

авилову Сергею Ивановичу, академику, — за научные труды «Микроструктура света» и «Глаз и Солнце», опубликованные в 1950 году.

**СТАЛИНСКИЕ ПРЕМИИ ТРЕТЬЕЙ СТЕПЕНИ В РАЗМЕРЕ 50 000 рублей ПРИСУЖДЕНЫ:**

Иванцеву Александру Николаевичу, профессору, старшему научному сотруднику Секции по научной разработке радиотехники Академии Наук СССР, Игумнову Юрию Ивановичу, инженер-подполковнику, — за научные исследования в области радиосвязи, законченные в 1950 году.

Ивану Михаилу Самойловичу, профессору Московского авиационного института имени Серго Орджоникидзе,

— за научную работу «Триодные и тетродные генераторы сверхвысоких частот», опубликованную в 1950 году.

Ваграмяну Ашоту Тиграновичу, заведующему лабораторией Института физической химии Академии Наук СССР, — за исследования по электроосаждению металлов, изложенные в монографии «Электроосаждение металлов», опубликованной в 1950 году.

**СТАЛИНСКИЕ ПРЕМИИ ТРЕТЬЕЙ СТЕПЕНИ В РАЗМЕРЕ 25 000 рублей ПРИСУЖДЕНЫ:**

Морозовскому Николаю Пегровичу, профессору Ленинского электротехнического института имени Ульянова (Ленина), Пасынкову Владимиру Васильевичу, профессору того же института, Тарееву Борису Михайловичу, профессору Всесоюзного заочного энергетического института, — за учебник «Электротехнические материалы», вышедший вторым переработанным изданием в 1950 году.

Евтянову Сергею Ивановичу, профессору Московского энергетического института имени В. М. Молотова, — за учебник «Радиопередающие устройства», опубликованный в 1950 году.

Соловьеву Ивану Ивановичу, профессору Московского энергетического института имени В. М. Молотова, — за учебное пособие «Автоматизация энергетических систем», опубликованное в 1950 году.

### **ВЫДАЮЩИЕСЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ И КОРЕННЫЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ РАБОТЫ**

**СТАЛИНСКИЕ ПРЕМИИ ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ В РАЗМЕРЕ 150 000 рублей ПРИСУЖДЕНЫ:**

Иванову Ивану Ивановичу, руководителю работы, Иванову Алексею Павловичу, Ермолову Николаю Ивановичу, Жданову Валерию Сергеевичу, Комарову Сергею Ивановичу, Малиевскому Александру Петровичу, Некрасову Леониду Владимировичу, Перову Георгию Артамоновичу, Соловьеву Льву Николаевичу, Черных Федору Никаноровичу, инженерам, — за создание новых образцов радиоаппаратуры.

Иванову Ивану Ивановичу, руководителю работы, Иванову Алексею Павловичу, Ермолову Николаю Ивановичу, Жданову Валерию Сергеевичу, Комарову Сергею Ивановичу, Малиевскому Александру Петровичу, Некрасову Леониду Владимировичу, Перову Георгию Артамоновичу, Соловьеву Льву Николаевичу, Черных Федору Никаноровичу, инженерам, — за создание новых образцов радиоаппаратуры.

## СТАЛИНСКИЕ ПРЕМИИ ВТОРОЙ СТЕПЕНИ В РАЗМЕРЕ 100 000 РУБЛЕЙ ПРИСУЖДЕНЫ:

Бочкареву Борису Александровичу, руководителю работы, Бочкаревой Валерии Александровне, Яковлеву Борису Ивановичу, инженерам, Горбунову Николаю Давы-

довичу, директору института, — за разработку отечественной конструкции деталей для радиоаппаратуры.

## СТАЛИНСКИЕ ПРЕМИИ ТРЕТЬЕЙ СТЕПЕНИ В РАЗМЕРЕ 50 000 РУБЛЕЙ ПРИСУЖДЕНЫ:

Грибовскому Петру Оскаровичу, руководителю работы, Воронкову Георгию Николаевичу, Тахер Екатерине Ароновне, Токаревой Людмиле Африкановне, Степанову Глебу Александровичу, Войцовой Валентине Николаевне, инженерам, Богоделову Анатолию Дмитриевичу, токарю-механику, Ножарову Павлу Дмитриевичу, слесарю-механику, — за разработку и внедрение нового способа производства электроизоляционных изделий.

Крапивину Вадиму Константиновичу, руководителю работы, Клячкину Льву Михайловичу, начальнику отдела, Фалееву Ивану Николаевичу, начальнику конструкторского бюро, Иванову Василию Михайловичу, начальнику участка цеха, Балонову Александру Петровичу, Самойленко Якову Захаровичу, Терновцеву Василию Ивановичу, инженерам треста, — за разработку конструкции и внедрение в производство мощных ртутных выпрямителей.

Колобову Александру Филипповичу, директору завода «Электроцит», Зайцеву Борису Николаевичу, начальнику технического отдела, Ящину Михаилу Павловичу, главному технологу, Максину Михаилу Семеновичу, начальнику цеха, Шилову Анатолию Дмитриевичу, бригадиру, работникам того же завода, коллективу авторов, — за создание и внедрение комплекстных распределительных устройств высокого напряжения.

Лашеву Евгению Константиновичу, руководителю работы, старшему научному сотруднику Всесоюзного электротехнического института имени В. И. Ленина, Кузнецову Александру Павловичу, начальнику цеха, Эпштейну Льву Абрамовичу, руководителю группы, работникам того же института, Корицкому Юрию Владимировичу, директору института, Желтовой Вере Николаевне, начальнику цеха завода, — за усовершенствование технологии производства электрической изоляции.

Найфельду Марку Романовичу, Сербиновскому Георгию Викторовичу, Матюшину Георгию Семеновичу, Ключеву Сергею Александровичу, Брострему Алексею Александровичу, Боголюбову Андрею Владимировичу, Чадову Ивану Ивановичу, Макарову Александру Ивановичу, Воронину Николаю Васильевичу, коллективу авторов, — за разработку и осуществление системы электроснабжения высокой надежности.

Петрову Георгию Николаевичу, руководителю работы, профессору Московского энергетического института имени В. М. Молотова, Окуню Сигизмунду Семеновичу, доценту, Пряткову Владимиру Тихоновичу, кандидату технических наук, сотрудникам того же института, Найденову Ивану Алексеевичу, управляющему Государственным Всесоюзным трестом «Энергоремтрест», Слониму Нисиму Моисеевичу, главному инженеру того же треста, Кашкаевой Екатерине Семеновне, начальнику цеха, Пышкиной Софии Дмитриевне, начальнику лаборатории завода «Электроаппарат», — за создание и внедрение в промышленность трансформаторов тока с новой системой компенсации.

Курбатову Гавриилу Петровичу, руководителю работы, главному инженеру завода «Динамо» им. С. М. Кирова, Баталову Николаю Михайловичу, ведущему инженеру, Власову Ивану Николаевичу, сварщику, Дмитриеву Павлу Григорьевичу, мастеру литейного цеха, Иванову Андрею Николаевичу, заместителю главного инженера, Парамонову Неону Федоровичу, начальнику цеха, Петраковскому Виктору Михайловичу, старшему инженеру, работникам того же завода, — за разработку конструкций и внедрение в производство серии крановых и металлургических электродвигателей переменного тока

Богородицкому Николаю Петровичу, профессору, Куржелевскому Борису Станиславовичу, директору завода, Рабиновичу Абраму Ефимовичу, главному инженеру завода, Сканави Георгию Ивановичу, профессору, Фридбергу Илларию Дмитриевичу, Орфинской Ольге Константиновне,

начальникам лабораторий, коллективу авторов, — за разработку и организацию массового производства деталей для радиоаппаратуры.

Бороздюк Георгию Георгиевичу, руководителю работы, начальнику лаборатории Научно-исследовательского института Министерства промышленности средств связи, Бабенко Ивану Анисимовичу, главному инженеру этого завода, Белецкому Александру Федоровичу, старшему научному сотруднику, Дриацкому Николаю Михайловичу, Сטיפакову Иосифу Симховичу, младшим научным сотрудниками, Степанову Георгию Николаевичу, начальнику лаборатории, сотрудникам того же института, Николаю Георгию Александровичу, инженеру завода, Халезову Иосифу Васильевичу, заместителю начальника Центрального научно-исследовательского института Министерства связи, Блохину Александру Степановичу, начальнику лаборатории, Басику Илье Васильевичу, старшему научному сотруднику, Великину Якову Иосифовичу, начальнику лаборатории, сотрудникам того же института, Акимову Сергею Артемьевичу, главному инженеру Центрального управления Министерства связи, — за разработку канальной системы высокочастотного телефонирования.

Бухвалову Евгению Васильевичу, руководителю работы, Ложкареву Владимиру Семеновичу, Овсяннику Василию Ивановичу, Щербаковскому Илье Ароновичу, инженерам, Белову Валентину Федоровичу, слесарю-механику, Елизарову Михаилу Афанасьевичу, начальнику цеха, — за разработку новой радиостанции.

Валееву Хады Сабировичу, руководителю работы, Пономаренко Василию Дмитриевичу, Поповой Вере Тимофеевне, Турскому Георгию Ричардовичу, научным сотрудникам Научно-исследовательского института, Терновой Татьяне Игоревне, инженеру завода, — за разработку и освоение в производстве конденсаторов нового типа.

Великовскому Владимиру Львовичу, руководителю работы, Вартаняну Вартгесу Агароновичу, Гринберг Иосифу Осеевну, Ефимову Константину Алексеевичу, Королеву Михаилу Ивановичу, Лебедеву Николаю Ивановичу, Стеренко Александру Емельяновичу, Хитревскому Михаилу Лаврентьевичу, инженерам, — за разработку радиоаппаратуры.

Златкину Ефиму Львовичу, руководителю работы, Быстрову Георгию Николаевичу, Голованову Сергею Михайловичу, Лошакову Ростиславу Петровичу, Репину Павлу Тихоновичу, Соколову Владимиру Васильевичу, Шишагину Алексею Александровичу, инженерам, Хлыбину Алексею Васильевичу, старшему мастеру, — за разработку радиостанции.

Любченко Ивану Ульяновичу, руководителю работы, Замешаеву Ивану Алексеевичу, Кейлину Рувиму Шварцмановичу, Масленникову Виктору Михайловичу, Толстополю Дмитрию Михайловичу, Файнштейну Ною Давидовичу, инженерам, Шевелько Юрию Андреевичу, механику, — за разработку радиоаппаратуры.

Наумову Андрею Владимировичу, руководителю работы, Островскому Иосифу Вениаминовичу, Рахманову Владимиру Федоровичу, Шейнману Григоргию Яковлевичу, Шкрабаку Илье Дмитриевичу, Лебедеву Борису Николаевичу, Казистову Ивану Васильевичу, Семенову Сергею Дмитриевичу, — за разработку и организацию серийного производства радиоаппаратуры.

Сидорову Константину Васильевичу, руководителю работы, Лакернику Рафаилу Моисеевичу, Козыревой Марии Николаевне, Рыбаку Сергею Кирилловичу, инженерам, Виноградову Гродневу Игорю Измаиловичу, Сониному Валентину Павловичу, Климову Михаилу Александровичу, инженерам, Кулешову Василию Николаевичу, старшему научному сотруднику, — за работу в области кабельной теле-

**Рабочие и работники, инженеры и техники электростанций! Быстрее вводите в строй новые энергетические мощности! Шире внедряйте передовую технику! Бесперебойно снабжайте электроэнергией народное хозяйство!**

(Из призывов ЦК ВКП (б) к 1 Мая 1952 года)

## Уточненный метод теплового расчета кабеля

Проф. С. М. БРАГИН

Московский энергетический институт им. Молотова

Расчет теплового состояния силового кабеля и установившемся тепловом режиме производится, исходя из следующего соотношения между количеством генерируемого в проводе тепла и нагреванием провода над окружающей средой:

$$W = \frac{\Theta}{S}, \quad (1)$$

где  $S$  — тепловое сопротивление окружающей среды, например воздуха.

Для вычисления нагревания кабеля нужно знать не только количество выделяющегося в нем тепла ( $W$ ), но и величину теплового сопротивления окружающей среду. Величина тепловой теплоотдачи провода, подвешенного в воздухе, в окружающую среду ( $h$ ) определяет величину эквивалентного теплового сопротивления последней.

В соответствии с законом Ньютона имеем:

$$Fh\Theta = W$$

$$\frac{\Theta}{W} = \frac{1}{\pi Dh} = S; \quad (2)$$

где  $F$  — поверхность, с которой производится теплоотдача и которая на единицу длины провода, имеющего наружный диаметр  $D$ , равна  $\pi D$ . Наибольшее затруднение при расчете представляет выбор величины коэффициента теплоотдачи  $h$ , который по определению равен количеству тепла, рассеиваемого в окружающую среду единицей ( $1 \text{ см}^2$ ) теплоотдающей поверхности при превышении температуры провода над окружающей средой. Обычно эта величина принимается постоянной, не зависящей ни от диаметра провода и количества рассеиваемой тепловой энергии, ни от нагрева провода над окружающей средой. Принимается во внимание только характер теплоотдающей поверхности, например свинцовая оболочка, резиновый шланг. Исходя из основных физических представлений, можно считать, что отвод тепла от провода может происходить за счет тепловой радиации, конвекции газа, окружающего провод, за счет теплопроводности окружающей среды. Теплопроводность воздуха по сравнению с теплоотдачей и конвекцией весьма незначительна,

поэтому в случае проводов, подвешенных в воздухе, ей можно пренебречь.

Полная теплоотдача от поверхности провода в окружающую среду (воздух) может быть выражена следующей формулой:

$$H = H_1 + H_2 = \pi D [\sigma(T^4 - T_0^4) + \alpha\Theta^{5/4}], \quad (3)$$

где  $T$  и  $T_0$  — абсолютная температура соответственно провода и окружающей среды;

$\Theta = T - T_0$  — нагрев провода над окружающей средой;

$\alpha$  и  $\sigma$  — константы конвекции и теплоизлучения.

Из формулы (3) следует, что коэффициент теплоотдачи должен зависеть от температуры провода, от количества рассеиваемой энергии (выделяющегося тепла) и диаметра провода.

С целью определения зависимости коэффициента теплоотдачи ( $h$ ) от температуры и диаметра провода нами было произведено экспериментальное исследование нагревания проводов и оболочек разных металлов при разной величине рассеиваемой мощности ( $W$ ) и разным диаметре провода. Для испытаний были взяты однопроволочные провода из меди и алюминия, а также латунный пруток и свинцовая оболочка. Испытываемый образец нагревался пропусканием через него тока определенной величины ( $I$ ). В процессе нагревания отмечалось возрастание температуры со временем и определялась максимально достигаемая при нагреве температура провода. Нагреваемый образец располагался в большой комнате на расстоянии около метра от пола, вдали от окон.

**Установившийся тепловой режим.** Максимально достигаемый нагрев провода определялся по формуле

$$\Theta_{\text{макс}} = \frac{W_0}{\pi Dh - \alpha W_0} = \vartheta - \vartheta_0, \quad (4)$$

где

$$W_0 = I^2 R_0 = I^2 \frac{\rho_0}{q};$$

$\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления провода;

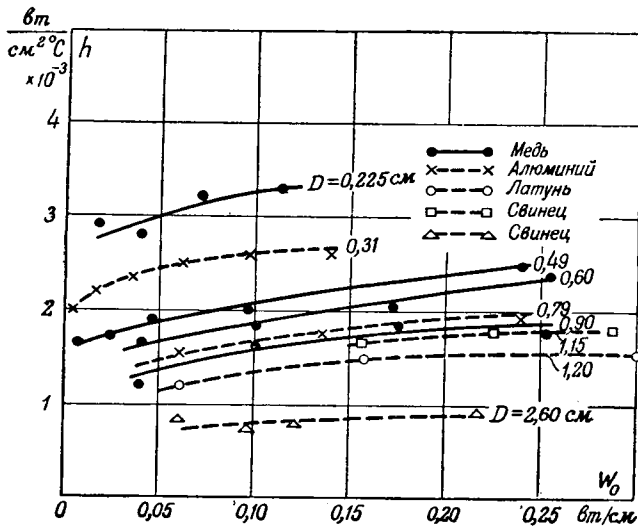


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи ( $h$ ) от количества выделяющегося в проводе тепла ( $W_0$ ) и диаметра провода ( $D$ ).

$\rho_0$  — удельное электрическое сопротивление провода при температуре  $\theta_0$ ;  
 $q$  — сечение провода, мм<sup>2</sup>;  
 $D$  — диаметр провода, см.

В формулу (4) входит коэффициент теплоотдачи  $h$ , который определялся из условий опыта по формуле

$$h = \frac{W_0(1 + \alpha\theta_{\max})}{\pi D \theta_{\max}} \quad [\text{Вт сек}/\text{см}^2 \text{ } ^\circ\text{С}]. \quad (5)$$

Полученные при испытании результаты приведены в таблицах приложения 1 и на рис. 1 в виде зависимости  $h$  от количества выделяющегося в проводе тепла  $W_0$  и диаметра провода  $D$ .

На рис. 2 представлена зависимость нагрева  $\theta$  от диаметра  $D$  и количества выделяемого тепла  $W_0$ . Как видно из рис. 2, наблюдается определенная зависимость нагрева провода от его диаметра и количества выделяющегося в проводе тепла. Отношение нагрева к выделяющемуся в проводе теплу, т. е. тангенс угла наклона кривых рис. 2, представляет величину эквивалентного теплового сопротивления окружающего провод воздуха, которое принимается равным:

$$S = \frac{1}{\pi D h}.$$

Из рис. 2 также следует, что нагрев провода при одном и том же количестве выделяющегося в проводе тепла зависит от диаметра, а именно: с увеличением диаметра теплоотдающей поверхности нагрев понижается. Отсюда следует, что коэффициент теплоотдачи  $h$  должен зависеть еще и от диаметра провода. Нашей задачей явилось нахождение этой зависимости, так как она дает возможность более точно определять коэффициент  $h$  для различных случаев нагревания проводов и кабелей. Для решения задачи применим метод анализа размерностей.

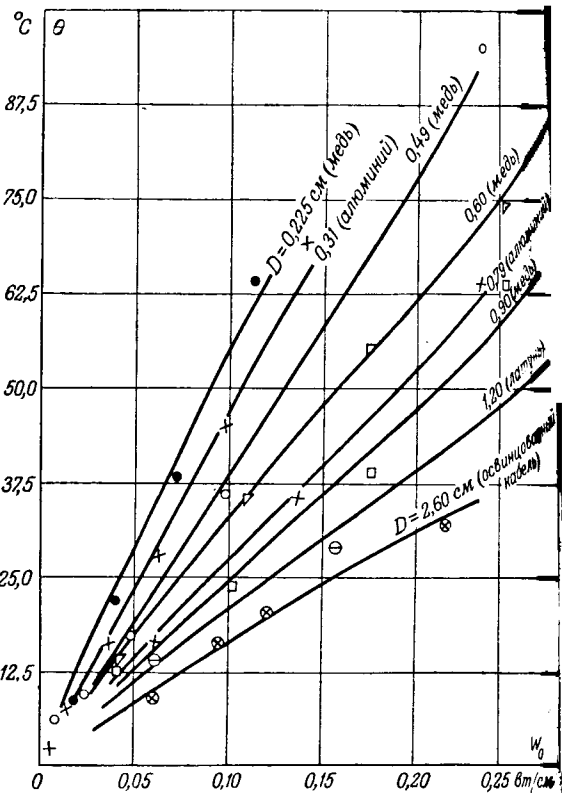


Рис. 2. Зависимость нагрева провода ( $\theta$ ) от количества выделяемого тепла ( $W_0$ ) и диаметра ( $D$ ).

Размерности всех физических величин и основных размеров, от которых зависит коэффициент теплоотдачи, приведены в таблице.

Физические величины и размеры	Обозначение	Размерность
Коэффициент теплоотдачи . . . . .	$h$	$ML^{-2}T^{-1}$
Количество выделяющегося тепла . . . . .	$W$	$ML^2T^{-3}$
Диаметр провода . . . . .	$D$	$L$
Кинематическая вязкость среды . . . . .	$\nu = \frac{\mu g}{\gamma}$	$L^2T^{-1}$
Теплоемкость среды (воздуха)	$C_v$	$ML^{-3}$

Соотношение между приведенными в табл. 1 размерностями находим из уравнения

$$[ML^{-2}T^{-1}] = [ML^2T^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L^2T^{-1}]^\gamma [ML^{-3}]^\delta.$$

Приравнявая показатели степени однородных величин, находим следующие уравнения для показателей степени:

$$2\alpha + \beta + 2\gamma - 3\delta = -2,$$

$$3\alpha + \gamma = 1,$$

$$\alpha + \delta = 1.$$

Полагая  $\delta = x$ , получаем  $\alpha = 1 - x$ ;  $\beta = -1$ ;  $\gamma = 3x - 2$ . Получается следующая зависимость коэффициента теплоотдачи от  $W$  и  $D$ :

$$h = W^\alpha D^\beta \nu^\gamma C_v^\delta.$$

Подставим найденные значения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  и введем некоторую пока неизвестную нам функцию  $X$ , тогда

$$h = \frac{WD}{\sqrt[3]{D}} f\left(\frac{\sqrt[3]{C_v}}{WD}\right). \quad (6)$$

Для воздуха величины  $\nu$  и  $C_v$  можно считать постоянными, тогда

$$h = \frac{A}{XD} f(BX), \quad (7)$$

где  $A = \frac{1}{\sqrt[3]{\nu}}$ ;  $B = \sqrt[3]{C_v}$  и  $X = \frac{1}{WD}$ .

Полученные нами экспериментальные данные, приведенные в таблицах приложения I, нанесены на график рис. 3, из которого видно, что зависимость  $Af(BX) = hXD$  может быть довольно точно выражена степенной функцией и представлена некоторой кривой, показанной на рис. 3, являющейся наибольшими значениями  $h$ .

Путем проб находим, что

$$Af(BX) \approx 2,7 \cdot 10^{-3} X^{0,75}.$$

Следовательно,

$$h = \frac{2,7 \cdot 10^{-3} X^{0,75}}{DX} = \frac{2,2 \cdot 10^{-3}}{D \sqrt[4]{X}}.$$

Подставляя

$$X = \frac{1}{W_0 D (1 + \alpha \Theta)},$$

получим приближенное выражение для коэффициента теплоотдачи

$$h = 2,7 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{W_0 (1 + \alpha \Theta)}{D^3}}. \quad (8)$$

При  $(1 + \alpha \Theta) \leq 1,24$ , т. е. для нагрева до  $60^\circ$ , выражение  $\sqrt[4]{1 + \alpha \Theta}$  можно заменить на 1. Тогда коэффициент теплоотдачи получим простое выражение в зависимости от  $W_0$  и  $D$ :

$$h = a \sqrt[4]{\frac{W_0}{D^3}}. \quad (9)$$

Как показали дальнейшие эксперименты, коэффициент  $a$  для свинцовых оболочек старого цвета (темного цвета) лежит в пределах от  $2,7 \cdot 10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$ , для проводов с резиновой изоляцией — в пределах от 4 до  $5 \cdot 10^{-3}$ . Установленная зависимость коэффициента теплоотдачи от количества рассеиваемого тепла и метра теплоотдающей поверхности позволяет не только точно вычислять внешнее тепловое сопротивление кабелей и труб и, стало быть, позволяет лучше использовать провода и кабели, расположенные в воздухе, нагрузка которых определяется в зависимости от диаметра и величины  $W_0$ .

Установившийся тепловой режим (нагрев и охлаждение). Дифференциальное уравнение для нагревания однородного провода диаметром  $D$  под действием выделяющегося в нем  $W_0$ , как известно, имеет следующий вид:

$$C \frac{d\Theta}{dt} + (\pi Dh - a W_0) \Theta = W_0, \quad (10)$$

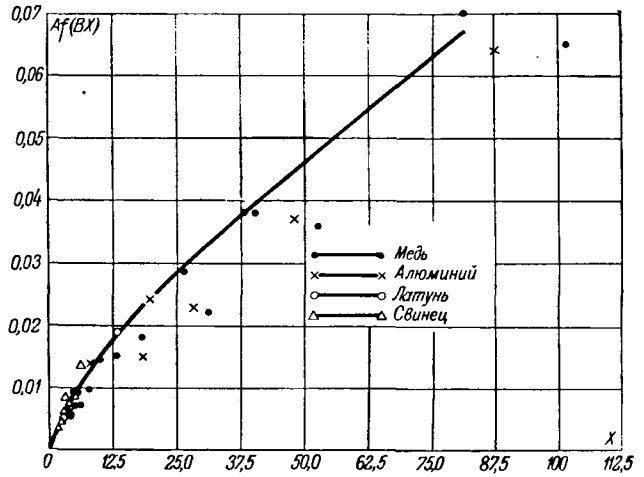


Рис. 3.

где  $C$  — теплоемкость провода на единицу длины, равная:

$$C = 0,01 q \gamma C_g;$$

здесь  $q$  — сечение провода,  $мм^2$ ;

$\gamma$  — удельный вес металла провода;

$C_g$  — теплоемкость, отнесенная к 1 г металла.

С помощью уравнения (10) величину теплоотдачи можно выразить в функции температуры, а именно:

$$h = \frac{W_0}{\pi D} \frac{1 + \alpha \Theta}{\Theta} - \frac{C}{\pi D} \frac{d\Theta}{dt}. \quad (11)$$

Проинтегрировав выражение (11) в некоторых пределах изменения времени от  $t_1$  до  $t_2$  и соответствующего изменения температуры от  $\Theta_1$  до  $\Theta_2$ , оцениваемого средним значением температуры  $\Theta_{cp} = \frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2}$ , получим следующее выражение:

$$h = \frac{W_0}{\pi D} \frac{1 + \alpha \Theta_{cp}}{\Theta_{cp}} - \frac{C_k}{\pi D (t_2 - t_1)} \ln \frac{\Theta_2}{\Theta_1}. \quad (12)$$

Разбив полученную экспериментальным путем кривую нагрева провода на ряд участков через промежутки времени  $t_2 - t_1$ , равные, например, 1 мин в начале процесса и 10 мин в конце процесса, можем вычислить изменение коэффициента теплоотдачи  $h$  во времени и, следовательно, в функции температуры. Такое вычисление было сделано для медного провода диаметром 0,9 см, нагреваемого током 250 а, т. е. при  $W_0 = 0,175 \text{ вт сек/см}$  и теплоемкости  $C_k = 2,22 \text{ вт сек/см}^\circ\text{C}$ . Полученная таким образом кривая  $h \approx f(t)$  представлена на рис. 4.

Примем приближенно зависимость коэффициента теплоотдачи  $h$  от температуры в виде:

$$h = A - B\Theta,$$

где

$$A = h_m + \Delta h, \quad B = \frac{\Delta h}{\Theta_m},$$



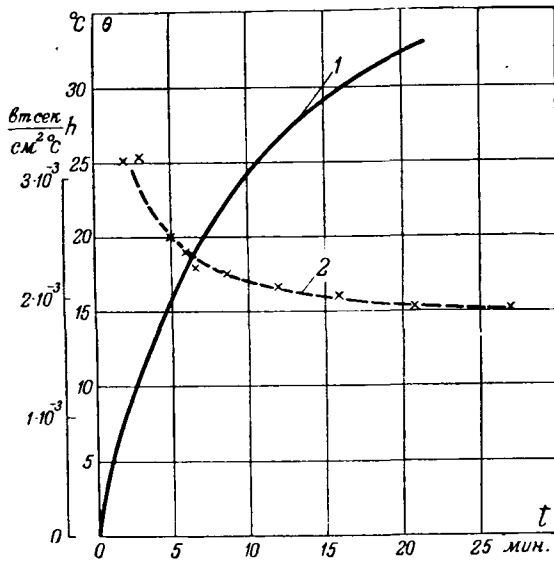


Рис. 4.

1 — кривая нагрева провода; 2 — кривая коэффициента теплоотдачи (вычисленная).

$h_m$  — значение коэффициента теплоотдачи в установившемся тепловом режиме, вычисленное по формуле (9);

$\Delta h$  — приращение коэффициента теплоотдачи в начальный период нагрева провода. Обозначив  $\Delta h$  через  $h_0 - h_m = kh_m$ , получим  $A = h_m(1+k)$  и  $B = \frac{kh_m}{\theta_m}$ .

Окончательно для коэффициента теплоотдачи в процессе нагревания провода будем иметь следующее выражение:

$$h = h_m \left[ 1 + k \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_m} \right) \right], \quad (13)$$

из которого видно, что коэффициент теплоотдачи с увеличением температуры уменьшается до  $h_m = \frac{W_0}{\pi D} \frac{1 + \alpha \theta_m}{\theta_m}$ . При очень малых значениях

$\frac{\theta}{\theta_m}$  коэффициент теплоотдачи имеет наибольшее значение, равное:

$$h_0 = h_m + \Delta h = h_m(1+k).$$

Если, как показано в приложении II, найденное нами выражение для коэффициента теплоотдачи (12) подставить в основное дифференциальное уравнение нагревания провода (10), то получим зависимость температуры от времени в процессе нагрева:

$$\frac{\theta}{\theta_m} = \frac{1 - e^{-\frac{t}{T_0}}}{1 - k(1 - \alpha \theta_m) e^{-\frac{t}{T_0}}}, \quad (14)$$

где постоянная времени определяется из условия

$$T_0 = \frac{C \theta_m}{W_0 [1 - k(1 + \alpha \theta_m)]}.$$

При отсутствии температурной зависимости коэффициента теплоотдачи, т. е. при  $h = h_m = \text{const}$  и  $k = 0$  формула (13) обращается общеизвестную, а именно:

$$\frac{\theta}{\theta_m} = 1 - e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (15)$$

где

$$T_0 = \frac{C \theta_m}{W_0}.$$

По опытным данным и некоторым теоретическим соображениям значение  $k$  можно принять равным примерно 0,3. При этом, как показывает приведенный ниже пример, получается хорошее совпадение между результатами вычислений экспериментальными данными.

Пример. Голый медный провод диаметром  $D = 0,9$  см нагревается током 250 а. Теплоемкость при нагревании воды  $C_k = 2,22$  вт сек/см<sup>3</sup> °C,  $W_0 = 0,175$  вт сек,  $\alpha W_0 = 0,7 \cdot 10^{-3}$  вт сек, максимальный нагрев  $\theta_m = 38^\circ$  С достаточно.

$$h_m = \frac{0,175}{\pi \cdot 0,9} \frac{1 + 0,004 \cdot 38}{38} = 1,88 \cdot 10^{-3} \text{ вт сек/см}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Зависимость  $h_m$  от количества тепла, выделяемого в воде, и диаметра провода находим из уравнения (9).

Вычислим величину постоянной времени по нагреву

$$T_0 = \frac{2,22 \cdot 38}{0,175 [1 - 0,3 \cdot (1 + 0,004 \cdot 38)]} = 737 \text{ сек} = 12,3 \text{ мин.}$$

По обычной формуле получили бы

$$T_0 = 481 \text{ сек} = 8 \text{ мин.}$$

Зависимость температуры провода от длительности нагрева вычисляем по формуле (14)

$$\theta = \frac{38 \cdot (1 - e^{-0,082t})}{1 - 0,346 e^{-0,082t}}.$$

Результаты вычислений приведены в виде кривой на рис. 5.

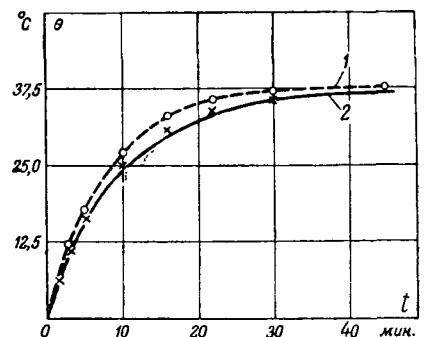


Рис. 5. Зависимость температуры провода от длительности нагрева. 1 — по обычной формуле; 2 — по уточненной формуле.

ПРИЛОЖЕНИЕ I  
Таблица 1

Нагревание однопроволочных медных проводов  
Температура окружающего воздуха  $\theta_0 = 25^\circ$ ;  $\rho_0 = 1,8 \cdot 10^{-4}$  Ом·мм<sup>2</sup>/см;  $\alpha = 0,004$

	Диаметр 0,225 см Сечение 4 мм <sup>2</sup>				Диаметр 0,49 см Сечение 19 мм <sup>2</sup>				
	20	30	40	50	30,2	50,2	70,6	101	159
$I, a$	20	30	40	50	30,2	50,2	70,6	101	159
$\theta_m, ^\circ C$	9	22	38,5	64	3,6	9,2	17,3	36	95
$1 + \alpha \theta_m$	1,036	1,088	1,154	1,256	1,014	1,037	1,07	1,145	1,38
$W_0, \text{вт сек/см}$	0,018	0,040	0,072	0,113	0,0085	0,024	0,047	0,097	0,24
$\text{вт сек/см}^2 \text{ } ^\circ C$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

	Диаметр 0,6 см Сечение 28,2 мм <sup>2</sup>					Диаметр 0,9 см Сечение 64 мм <sup>2</sup>				
	80	130	165	200	241	120	190	250	300	330
$I, a$	80	130	165	200	241	120	190	250	300	330
$\theta_m, ^\circ C$	14	35,5	55	74	99	12,5	24	39	64	82
$1 + \alpha \theta_m$	1,056	1,14	1,22	1,30	1,4	1,05	1,096	1,156	1,256	1,33
$W_0, \text{вт сек/см}$	0,041	0,108	0,173	0,255	0,37	0,04	0,101	0,175	0,253	0,307
$\text{вт сек/см}^2 \text{ } ^\circ C$	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$2,05 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

Нагревание разных проводов и свинцовых оболочек

Однопроволочные алюминиевые провода  $\theta_0 = 25^\circ$ ;  $\rho_0 = 2,95 \cdot 10^{-4}$  Ом·мм<sup>2</sup>/см;  $\alpha = 0,0037$

	Диаметр 0,79 см Сечение 49 мм <sup>2</sup>				Диаметр 0,31 см Сечение 7,65 мм <sup>2</sup>					
	100	150	200	10	20	30	40	50	60	
$I, a$	100	150	200	10	20	30	40	50	60	
$\theta_m, ^\circ C$	45,5	64,5	93	31	36,5	45	56,5	74	98,5	
$\theta_m, ^\circ C$	16,5	35,5	64	2	7,5	16	27,5	45	69,5	
$1 + \alpha \theta_m$	1,06	1,13	1,24	1,007	1,028	1,06	1,10	1,17	1,26	
$W_0, \text{вт сек/см}$	0,06	0,136	0,24	0,004	0,0154	0,0347	0,0616	0,0965	0,139	
$\text{вт сек/см}^2 \text{ } ^\circ C$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	

	Латунный прут			Свинцовая труба			Свинцовая оболочка			
	Диаметр 1,2 см Сечение 113 мм <sup>2</sup>			Диаметр 1,15 см Сечение 33 мм <sup>2</sup>			Диаметр 2,6 см			
$I, a$	100	160	220	50	60	68	210	264	300	400
$\theta_m, ^\circ C$	44	59	84,5	60,5	73,5	89,5	24	31	35	47
$1 + \alpha \theta_m$	1,019	1,039	1,074	1,16	1,235	1,323	1,036	1,064	1,08	1,13
$W_0, \text{вт сек/см}$	0,061	0,157	0,30	0,155	0,224	0,287	0,06	0,095	0,121	0,216
$\text{вт сек/см}^2 \text{ } ^\circ C$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$0,85 \cdot 10^{-3}$	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,80 \cdot 10^{-3}$	$0,93 \cdot 10^{-3}$

Примечание. При вычислениях были приняты следующие значения постоянных: температура окружающего воздуха для латунного прутка  $35^\circ$ , для свинцовой оболочки  $31^\circ$  и для кабеля  $15^\circ$ ; удельное сопротивление — для латунного прутка  $6,95 \cdot 10^{-4}$ , для свинцовой оболочки  $2,2 \cdot 10^{-4}$ ; температурный коэффициент сопротивления — для латуни 0,00135, для свинца 0,00556.

Приложение II. Вывод уточненной формулы для температуры нагрева однородного провода. Подставив

получим:

$$C \frac{d\theta}{dt} = -\pi D h_m (1+k) \theta + \pi D h_m k \frac{\theta^2}{\theta_m} + \alpha W_0 \theta + W_0 \quad (II,1)$$

Согласно определению можно написать, что

$$h_m = \frac{W_0}{\pi D} \frac{1 + \alpha \theta_m}{\theta_m}$$

дифференциальное уравнение

$$C \frac{d\theta}{dt} + (\pi D h - \alpha W_0) \theta = W_0$$

Подставив значение  $h_m$  в уравнение (II,1), получим: или

$$\frac{C\theta_m}{W_0} \frac{d\theta}{\theta_m dt} = (1 + \alpha\theta_m) k \frac{\theta^2}{\theta_m^2} -$$

$$- [1 + k(1 + \alpha\theta_m)] \frac{\theta}{\theta_m} + 1. \quad (II,2)$$

Введя обозначения

$$\frac{\theta}{\theta_m} = z, \quad k(1 + \alpha\theta_m) = a, \quad 1 + k(1 + \alpha\theta_m) = b$$

и разделив переменные, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dz}{az^2 - bz + 1} = \frac{W_0}{C\theta_m} dt. \quad (II,3)$$

После интегрирования получим:

$$\frac{1}{a(p-q)} \ln \left( \frac{z-p}{z-q} \right) = \frac{W_0}{C\theta_m} t + \text{const}$$

$$\frac{z-q}{z-p} = \frac{q}{p} e^{-\frac{W_0 [1 - k(1 + \alpha\theta_m)]}{C\theta_m} t};$$

здесь  $p$  и  $q$  — корни уравнения  $az^2 - bz + 1 = 0$

$$p = \frac{1}{k(1 + \alpha\theta_m)} \quad \text{и} \quad q = 1.$$

Окончательно получаем:

$$\frac{\theta}{\theta_m} = \frac{1 - e^{-\frac{t}{T_0}}}{1 - k(1 + \alpha\theta_m) e^{-\frac{t}{T_0}}},$$

где

$$T_0 = \frac{C\theta_m}{W_0 [1 - k(1 + \alpha\theta_m)]}.$$

[24, 12]



## Экономически целесообразное отношение сечений алюминия и стали в сталеалюминиевых проводах

Доктор техн. наук, проф. А. А. ГЛАЗУНОВ, кандидат техн. наук А. А. ГЛАЗУНОВ и кандидат техн. наук Г. М. РОЗАНОВ

Московский энергетический институт им. М. Г. Волкова

Первоначально наши заводы выпускали сталеалюминиевые провода марки СА, имевшие сечение алюминиевой части от 62,5 до 422,8 мм<sup>2</sup>. Отношение сечений алюминия и стали находилось в пределах 5,80...6,15. Развитие электрификации в Советском Союзе и все возрастающее применение сталеалюминиевых проводов заставили пересмотреть и расширить шкалу изготавливаемых сталеалюминиевых проводов.

ГОСТ 839-41 нормирует изготовление проводов с сечениями алюминиевой части от 34,9 до 413,6 мм<sup>2</sup>. Кроме проводов нормальной прочности (АС) предусматриваются сталеалюминиевые провода усиленной прочности (АСУ), имеющие увеличенный стальной сердечник. Отношение сечений алюминия и стали в проводах, предусмотренных ГОСТ, различно. Для проводов марок от АС-35 до АС-70 оно находится в пределах 7,60...8,73, для проводов от АС-95 до АС-400 — 5,33...5,60 и для проводов усиленной прочности — 4,09...4,48. Обоснований целесообразности принятых величин отношения сечений алюминия и стали не имеется. Возникает естественный вопрос, правильно ли выбрано это отношение.

Многолетняя практика строительства воздушных линий со сталеалюминиевыми проводами

Указывается, что конструкция сталеалюминиевых проводов, изготовленных на основании ГОСТ 839-41, экономически не обоснована. Предлагается новая конструкция сталеалюминиевых проводов с увеличенным отношением сечений алюминия и стали. Дается экономическое обоснование новой конструкции сталеалюминиевых проводов. Вносится предложение о замене ГОСТ 839-41 новым стандартом на сталеалюминиевые провода. Печатается в порядке обсуждения.

с очевидностью указывает на одну ошибку в действующем стандарте.

Сталеалюминиевые провода нормальной прочности полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым эксплуатацией. Поэтому нет необходи-

мости применять провода марки АСУ с увеличенным стальным сердечником и они на линиях Советского Союза не применяются, за исключением проводов АСУ-400 и АСУ-300. Линии с проводами усиленной прочности получают более дорогими и требуют значительного дополнительного расхода высококачественной оцинкованной стальной проволоки.

Провода АСУ-400 подвешиваются на линии 220 кв. Но и этим проводам отдается предпочтение перед проводами АС-400 только из-за большего их диаметра и, следовательно, несколько меньших потерь на корону.

Необоснованность принятой конструкции сталеалюминиевых проводов побудила авторов известить работу, позволяющую установить экономически целесообразное отношение сечений алюминия и стали в сталеалюминиевых проводах. При решении этого вопроса определяющими положениями являются: механическая прочность проводов, а также стоимость сооружения и эксплуатации линий.



Правильное представление о запасах прочности медного и алюминиевого проводов дает формула (1), предложенная проф. А. А. Глазуновым. Расчеты по ней для тех же условий дают эксплуатационный коэффициент запаса прочности для медного провода 4,5, а для алюминиевого — 3,1. Медный провод может выдержать предельную нагрузку, в 1,5 раза большую, чем алюминиевый.

Разрывающая провод предельная нагрузка  $g'_7$

$$g'_7 = \frac{\sigma_8 \sqrt{24 \left( \Delta l_* - \beta \sigma_7 + \frac{l^2 g_7^2}{24 \sigma_7^2} \right) + \alpha (t_1 - t_2)}}{l}, \quad (3)$$

где  $\sigma_8$  — временное сопротивление материала провода, кг/мм<sup>2</sup>;

$\Delta l_*$  — относительное удлинение провода, соответствующее его предельной нагрузке;

$\sigma_7$  — напряжение материала провода, кг/мм<sup>2</sup>, при наибольшей расчетной нагрузке;

$l$  — длина пролета, м;

$\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения провода в целом;

$\beta$  — коэффициент удлинения провода в целом;

$t_1$  — температура провода при расчетных гололеде и ветре;

$t_2$  — температура провода при предельной нагрузке.

Обозначив относительное удлинение провода, получившееся в результате увеличения напряжения материала провода с  $\sigma_7$  до  $\sigma_8$ , через  $\Delta l'_* = \Delta l_* - \beta \sigma_7$  и приняв  $t_1 = t_2$ , можно формулу (3) привести к виду:

$$g'_7 = \sigma_8 \sqrt{\frac{24 \Delta l'_*}{l^2} + \frac{g_7^2}{\sigma_7^2}}. \quad (4)$$

Установим, какие величины должны быть взяты для временных сопротивлений проводов.

Определение эксплуатационных коэффициентов запаса прочности проводов по временным сопротивлениям, полученным в лабораторных условиях, было бы неправильно. Подвешенные на линиях провода заделаны в соединительные, промежуточные и оттяжные зажимы. Правила устройства электротехнических установок допускают применение таких зажимов, в которых временное сопротивление проводов снижается не более чем на 10%. Эта величина и была принята во всех последующих расчетах.

На основании приведенных соображений и испытаний ЛПИ были приняты следующие величины временных сопротивлений подвешенных на линии проводов: медные провода — 35 кг/мм<sup>2</sup>; алюминиевые провода — 13,5 кг/мм<sup>2</sup>, сталеалюминиевые провода с отношением сечений алюминия и стали 4,0...4,5 — 28 кг/мм<sup>2</sup>, сталеалюминиевые провода с отношением сечений алюминия и стали около 5,5 — 25 кг/мм<sup>2</sup>, сталеалюминиевые провода с отношением сечений алюминия и стали 7,5...8,5 — 21 кг/мм<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Технические условия для воздушных линий сильного тока в районах с особо сильными гололедами, МЭИ, 1938.

Эксплуатационные коэффициенты запаса прочности для проводов различных марок приведены в табл. 2. Пролеты линий при вычислении для табл. 2 приняты равными пролетам линий новых опор.

Табл. 2

Марки проводов	Эксплуатационный коэффициент запаса прочности проводов		Марки проводов	Эксплуатационный коэффициент запаса прочности проводов		Эксплуатационный коэффициент запаса прочности проводов
	II район гололеда	IV район гололеда		II район гололеда	IV район гололеда	
M-70	4,50	2,70	M-95	6,10	3,35	—
A-120	3,10	2,30	A-150	3,40	2,35	A-400 3,40
AC-120	7,25	4,30	AC-150	8,25	4,60	AC-400 7,55
—	—	—	—	—	—	ACV-400 9,40
ACI-120	5,70	3,50	ACI-150	6,35	3,75	ACI-400 6,00
ACII-120	5,80	3,6	ACII-155	6,50	3,80	ACII-410 6,10

В каждой вертикальной колонке табл. 2 приведены провода, имеющие примерно одинаковую проводимость. Провода первой колонки по проводимости эквивалентны проводу AC-120. Учитывая, что провода марок от AC-35 до AC-150, имеющие отношение сечений алюминия и стали в пределах 7,60...8,73, не подлежат изменению, можно считать, что данные, относящиеся к проводам первой колонки, будут характеризовать работу линий с новыми сталеалюминиевыми проводами наименьших сечений. Данные проводов второй колонки, имеющих проводимость, близкую к проводимости провода AC-150, характеризуют работу проводов средних марок, подвешиваемых на линиях Советского Союза напряжением 110 кв. Наконец, данные проводов третьей колонки дают представление о запасах прочности на линиях с наиболее крупными сечениями проводов.

Цифры, приведенные в табл. 2, показывают что:

1) эксплуатационные запасы прочности сталеалюминиевых проводов новых марок ACI и ACII в 1,5...1,7 раза больше, чем запасы прочности алюминиевых проводов;

2) эксплуатационные коэффициенты запаса прочности новых проводов составляют 0,76...0,82 той же величины для проводов AC, изготовляемых по ГОСТ 839-41;

3) сталеалюминиевые провода новых марок ACI и ACII имеют эксплуатационные запасы прочности в 1,1...1,3 раза больше, чем медные провода.

Таким образом, эксплуатационные запасы прочности сталеалюминиевых проводов новых марок ACI и ACII обеспечивают высокую степень надежности работы воздушных линий. Наиболее убедительным доказательством этого является то, что провода марок ACI и ACII имеют более высокие эксплуатационные запасы прочности, чем

едные провода. Большой опыт эксплуатации стальных проводов в СССР показал их высокую механическую прочность и высокую степень надежности линий с этими проводами.

Для более полного представления об эксплуатационной надежности новых проводов найдем размеры гололедно-изморозевых отложений, при которых произойдет обрыв проводов. Размеры отложений определим для IV района климатических условий. В этом случае провода имеют наименьший коэффициент запаса прочности, расчетные нагрузки, как правило, принимаются же действительных. Диаметры найденных разрывающих гололедно-изморозевых отложений на проводах АСИ-120 и АСИИ-400 приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Разрушающие провода гололедно-изморозевые отложения

Марки проводов	Удельный вес гололедно-изморозевых отложений	Диаметр гололедно-изморозевых отложений (включая диаметр провода), мм
АСИ-120	0,9	100
	0,4	155
	0,15	250
АСИ-400	0,9	125
	0,4	185
	0,15	310

Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что сталеалюминиевые провода АСИ и АСИИ могут выдержать большие гололедно-изморозевые отложения. Сопоставление этих данных с наибольшими отложениями, наблюдавшимися в СССР<sup>3</sup>, приводит к убеждению, что эксплуатационные запасы прочности проводов АСИ и АСИИ обеспечивают необходимую надежность линий даже в районах с очень интенсивным гололедообразованием.

Линии в районах с исключительно тяжелыми климатическими условиями целесообразно строить с повышенными эксплуатационными запасами прочности. Эти запасы наиболее целесообразно учитывать, как показано в работе МЭИ «Технические условия для воздушных линий сильного тока в районах с особо сильными гололедами», некоторым снижением допускаемых напряжений герниала проводов. Приведенные данные о механической прочности проводов марок АСИ и АСИИ вызывают, что дальнейшее увеличение отношения сечений алюминия и стали в сталеалюминиевых проводах нецелесообразно. Увеличение отношения сечений алюминия и стали приведет к тому, что механические характеристики сталеалюминиевых проводов будут близки к характеристикам алюминиевых проводов и, следовательно, не будут иметь никаких преимуществ перед ними.

Увеличение отношения сечений алюминия и стали в проводах АСИ и АСИИ по сравнению с проводами марки АС приведет к уменьшению допускаемых тяжений по проводам и увеличению их стрел провеса, что может повлечь за собой удорожание линий с проводами АСИ и АСИИ. Для выяснения этого очень важного экономического вопроса были определены расчетные пролеты линий с проводами АСИ-120, АСИ-185 и АСИИ-400. При этом принималось, что наибольшие стрелы провеса проводов АСИ-120 и АСИ-185 не должны превышать стрелы провеса проводов АС-120 и АС-185, подвешиваемых на типовых деревянных опорах. Провод АСИИ-400 не должен иметь стрелу провеса большую, чем провод АСУ-400 на линиях с пролетом 450 м во II районе климатических условий и 350 м в IV районе. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 4

Марки проводов	Районы гололедности	Расчетные длины пролетов, м	Разницы в длинах пролетов	
			м	%
АС-120	II	205	5	2,5
АСИ-120	II	200		
АС-120	IV	145	5	3,6
АСИ-120	IV	140		
АС-185	II	218	3	1,4
АСИ-185	II	215		
АС-185	IV	165	5	3,1
АСИ-185	IV	160		
АСУ-400	II	450	8	1,8
АСИИ-400	II	442		
АСУ-400	IV	350	9	2,6
АСИИ-400	IV	341		

Данные табл. 4 с очевидностью показывают, что говорить об уменьшении пролета на действительных линиях с проводами марок АСИ и АСИИ не приходится. Расчетное уменьшение пролета составляет 1,5...3,5% в то время как коэффициент использования расчетного пролета на построенных линиях обычно не превышает 90%. Действительные пролеты на линиях из-за местных условий (углы поворотов, пересечения шоссе, железных дорог и т. п.) меньше расчетных в среднем на 10%.

Определим экономию, которую даст применение на линиях проводов АСИ взамен проводов АС, изготавливаемых по ГОСТ 839-41. При исчислении экономии стоимость стальной проволоки в проводе примем равной 5 руб/кг. Результаты расчетов, отнесенные к 1 км линии, даны в табл. 5, из которой видно, что кроме экономии высококачественной оцинкованной стальной проволоки получается значительная экономия капиталовложений при строительстве линий. При сооружении в 1 год 1 000 км линий со сталеалюминиевыми проводами АСИ-95 ежегодная экономия составит около 650 тыс. руб. Экономия от применения новых проводов на линии 220 кв, длиной 200 км составит около 500 тыс. руб.

Для сравнения проводов АСИ и АСИИ были сопоставлены первоначальные и эксплуатационные

В. В. Бургсдорф. Сооружение и эксплуатация электропередачи в сильно гололедных районах, изд. МЭИ, 1947. Н. С. Муретов, Гололедные обаны на воздушных линиях связи и электропередачи, метеоздат, 1945.

Таблица 5

## Уменьшение стоимости сооружения 1 км линии с проводами АСИ

Марки проводов	АСИ-95	АСИ-120	АСИ-150	АСИ-185	АСИ-240	АСИ-300	АСИ-400
Уменьшение сечения стального сердечника, мм <sup>2</sup> . . . . .	5,4	6,1	6,8	10,2	11,5	13,2	20,4
Уменьшение стоимости 1 км линии, руб.	642	726	810	1 220	1 370	1 570	2 430

расходы по линиям с этими проводами. Механические характеристики проводов АСИ и АСИИ, как следует из табл. 2, практически одинаковы. Провода АСИИ, имеющие большее сечение алюминия, будут стоить дороже, чем провода АСИ. В то же время в линиях с проводами АСИИ потери электроэнергии и мощности будут меньше. Последнее обусловит меньшую мощность, которую придется установить на электростанциях для покрытия этих потерь, а следовательно, и меньшие капиталовложения.

При расчетах были приняты следующие исходные условия: 1) наибольший ток нагрузки линии определялся как произведение экономической плотности тока, рекомендованной Правилами устройства электротехнических установок, на номинальное сечение алюминия проводов АСИ; 2) стоимость 1 квт установленной на станции мощности принималась равной 1 500 руб.; 3) стоимость 1 квтч потерянной электроэнергии — 12 коп.; 4) отчисления на амортизацию и ремонт брались в размере 5% от разницы в стоимости алюминия и стали, необходимых для изготовления проводов различных марок. Отчисления с сумм, затрачиваемых на мощности, устанавливаемые на электростанциях для покрытия потерь в линиях, не учитывались, так как они вошли в стоимость 1 квтч потерянной энергии. Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Данные, приведенные в табл. 6, показывают, что применение проводов АСИИ несколько выгоднее, чем проводов АСИ. Исключение составляют лишь провода АСИИ-400, строительство линий с которыми обходится дороже на 1 400 руб/км. Однако эти результаты, по нашему мнению, не позволяют сделать вывод о целесообразности принятия в качестве стандартных проводов марки АСИИ, а не АСИ.

Капиталовложения на строительство 1 км линии с проводами марки АСИИ меньше на 500...1 000 руб., эксплуатационные расходы — на 250...750 руб/год. Полные капиталовложения на сооружение линий со сталеалюминиевыми проводами составляют 70...250 тыс. руб., чему соответствуют ежегодные отчисления на амортизацию и ремонт 1 км линии в размере 8...17 тыс. руб. Следовательно, экономия, получаемая от применения проводов марки АСИИ, мала по сравнению с полными капиталовложениями и эксплуатационными расходами.

Таблица

## Сравнение капиталовложений и эксплуатационных расходов на 1 км с проводами АСИ и АСИИ

Марки проводов	АСИ-120 и АСИИ-120			АСИ-240 и АСИИ-240		
	Продолжительность использования наибольшей нагрузки в год, час . . . . .	3 000	4 500	5 500	4 500	5 500
Наибольшая нагрузка, а . . . . .	180	120	90	240	180	150
Разница капиталовложений на 1 км линии, руб/км . . . . .	+1 320	+420	-30	+700	-50	-100
Разница ежегодных эксплуатационных расходов, руб/км . . . . .	+264	+192	+120	+423	+173	+50

Примечание. Знак (+) означает, что меньший расход относится к линиям с проводами АСИИ, а знак (-) — к линиям с проводами АСИ.

Учитывая некоторую условность произведенных расчетов, можно утверждать, что полученная экономия лежит в пределах точности расчетов, т. е. линии с проводами АСИ и АСИИ будут иметь примерно одинаковые экономические характеристики. Провода марки АСИИ требуют дополнительного расхода алюминия, поэтому в качестве стандартных следует принять провода марки АСИ.

На большинстве линий 220 кв применяются провода АСУ-400, имеющие внешний диаметр 29,3 мм. Выбор этого провода обосновывается почти полным отсутствием при нем потерь на корону. Применение провода АСИ-400 с внешним диаметром 27,1 мм увеличит потери на корону.

Расчеты, произведенные для выяснения этого вопроса, показали, что потери на корону на 1 км линии 220 кв с проводами АСУ-400 в хорошую погоду составляют 0,24 квт, а на 1 км той же линии с проводами АСИ-400—0,30 квт. В плохую погоду, если принять произведение коэффициентов шероховатости и погоды равным 0,55, потери на корону на линии с проводами АСУ-400 составляют 17 квт/км, а с проводами АСИ-400—примерно 25 квт/км. Следовательно, с точки зрения потерь на корону провода АСУ-400 и АСИ-400 практически одинаковы. В то же время сечение стального сердечника провода АСУ-400 составляет 93,3 мм<sup>2</sup>, а провода АСИ-400 только 53,8 мм<sup>2</sup>, что дает большую экономию при строительстве линий 220 кв с проводами новой марки.

**Выводы.** 1. Существующая конструкция сталеалюминиевых проводов АС и АСУ принята в качестве экономически обоснованной.

2. Применение конструкции сталеалюминиевых проводов типа АСИ с увеличенным отпуском сечений алюминия и стали, разработанной кафедрой электрических сетей и систем МЭИ,

зволит сократить на 25...30% расход высококачественной стальной оцинкованной проволоки, идущей на изготовление проводов.

3. Провода марки АСІ удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым эксплуатацией воздушным линиям Советского Союза.

4. Замена проводов действующего стандарта

сталеалюминиевыми проводами АСІ даст экономию, исчисляемую сотнями тысяч рублей в год.

5. Действующий ГОСТ 839-41 на сталеалюминиевые провода должен быть заменен новым стандартом, предусматривающим изготовление проводов типа АСІ.

[14.12.1951]



# Обобщенная операторная проводимость для расчета переходных процессов в сетях при АПВ

Кандидат техн. наук доц. В. В. ГУСЕВ

Харьковский политехнический институт им. Ленина

При расчете переходных процессов в линейных цепях сложной конфигурации трудоемким является определение операторной проводимости и сопротивления. Выражение для операторной проводимости или сопротивления для случая выключения одного однополюсного выключателя в трехфазной системе, имеющей последовательное или параллельное повреждение, возможно представить в обобщенном виде при помощи матричной алгебры.

В дальнейшем нами приняты обычные допущения. Это же следует сказать и относительно означений [Л. 1].

Воспроизведем основные уравнения, которые используются для определения переходной проводимости по методу симметричных составляющих.

Токи участка *m*, на котором установлен однополюсный выключатель, могут быть выражены:

$$\left. \begin{aligned} i_0^1 &= Y_0^{11} \cdot \dot{E}_{10} - Y_0^{12} \dot{E}_{20}, \\ i_1^1 &= Y_1^{11} \cdot \dot{E}_{11} - Y_1^{12} \dot{E}_{21}, \\ i_2^1 &= Y_2^{11} \cdot \dot{E}_{12} - Y_2^{12} \dot{E}_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Токи в точке короткого замыкания *k*:

$$\left. \begin{aligned} i_0^2 &= Y_0^{21} \dot{E}_{10} - Y_0^{22} \dot{E}_{20}, \\ i_1^2 &= Y_1^{21} \dot{E}_{11} - Y_1^{22} \dot{E}_{21}, \\ i_2^2 &= Y_2^{21} \dot{E}_{12} - Y_2^{22} \dot{E}_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для решения задачи к этим шести уравнениям необходимо добавить еще два: 1) уравнение, характеризующее повреждение; 2) уравнение, характеризующее разрыв цепи однополюсного выключателя в точке *m*.

Совместное решение всех этих уравнений дает возможность найти зависимость

$$i_a^m = \dot{E}_{ABa} \cdot Y_{ABa},$$

Дано общее выражение операторной проводимости в матричной форме при помощи метода симметричных составляющих для анализа переходных процессов при включении и выключении однополюсного выключателя в трехфазной сети, имеющей параллельное или последовательное повреждение. Это выражение может быть использовано для исследования переходных процессов при АПВ.

в которой  $Y_{ABa}$  выражается комбинацией проводимостей разных последовательностей. Представив это выражение в форме операторного  $Y_{ABa} \times (p)$ , мы решим поставленную

задачу при помощи обычных приемов операторного исчисления.

Пользуясь матричной символикой, можно три четырехполюсника трех разных последовательностей, составленных по методу симметричных составляющих, рассматривать как один обобщенный четырехполюсник, состоящий из проводимостей или сопротивлений, выраженных соответствующими матрицами.

В эквивалентных схемах начальные зажимы трех четырехполюсников соединены в соответствии с условиями разрыва провода в точке *m* (рис. 1), а концевые — с условиями поврежденный в точке *k*. Эти соединения можно учесть соответствующими матрицами.

Используем для решения задачи соотношения проводимостей для четырехполюсников.

Первые шесть уравнений можно рассматривать как уравнения, связывающие проводимости, токи и напряжения на входных и выходных за-

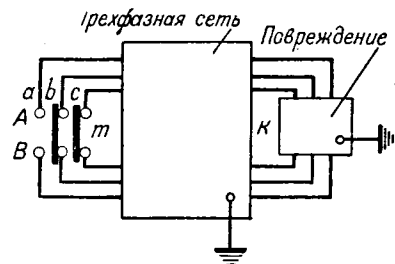


Рис. 1.

жимами четырехполюсников трех разных последовательностей (рис. 2).

Эти уравнения в матричной форме могут быть изображены следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} i^1 &= Y^{11} \dot{E}_1 - Y^{12} \dot{E}_2, \\ i^2 &= Y^{21} \dot{E}_1 - Y^{22} \dot{E}_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



Здесь  $\dot{E}_1$  и  $\dot{I}^1$  — напряжение и ток на входе;  $\dot{E}_2$  и  $\dot{I}^2$  — напряжение и ток на выходе. Все входящие в уравнения величины являются матрицами. Например, величины  $\dot{I}^1$ ,  $Y^{11}$  и  $\dot{E}_1$  являются матрицами вида:

$$\dot{I}^1 = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{vmatrix} \dot{I}_0^1 \\ \dot{I}_1^1 \\ \dot{I}_2^1 \end{vmatrix}; Y^{11} = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{vmatrix} Y_0^{11} & & \\ & Y_1^{11} & \\ & & Y_2^{11} \end{vmatrix};$$

$$\dot{E}_1 = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{vmatrix} \dot{E}_{10} \\ \dot{E}_{11} \\ \dot{E}_{12} \end{vmatrix}$$

Индексы 0, 1 и 2 относятся соответственно к четырехполюсникам нулевой, положительной и отрицательной последовательностей.

Изобразим уравнения (3) в матричной форме:

$$\begin{vmatrix} \dot{I}^1 \\ \dot{I}^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y^{11} & Y^{12} \\ Y^{21} & Y^{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} +\dot{E}_1 \\ -\dot{E}_2 \end{vmatrix}$$

или соответственно

$$\dot{I} = Y \cdot \dot{E}. \quad (4)$$

В выражении (4)  $\dot{I}$ ,  $Y$  и  $\dot{E}$  также матрицы. Таким образом, уравнение (4) следует рассматривать как выражение в общем виде шести исходных уравнений. Оно составлено по закону Ома в общем виде.

Вместо уравнений (3) для четырехполюсников разных последовательностей можно использовать уравнения в следующем известном виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_2 &= A \cdot \dot{E}_1 + B \dot{I}^1, \\ \dot{I}^2 &= C \dot{E}_1 + D \dot{I}^1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В уравнениях (5)  $A = (Y^{12})^{(-1)} Y^{11}$ ;  $B = -(Y^{12})^{(-1)}$ ;  $C = Y^{21} - Y^{22} (Y^{12})^{(-1)} Y^{11}$ ;  $D = Y^{22} (Y^{12})^{(-1)}$ .

Таким образом,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  — константы четырехполюсников разных последовательностей, выраженные матрицами. Например:

$$A = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{vmatrix} A_0 & & \\ & A_1 & \\ & & A_2 \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad B = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{vmatrix} B_0 & & \\ & B_1 & \\ & & B_2 \end{vmatrix}.$$

Матрицы  $\dot{E}_1$ ,  $\dot{E}_2$ ,  $\dot{I}^1$  и  $\dot{I}^2$  выражаются так же, как и для уравнений (3).

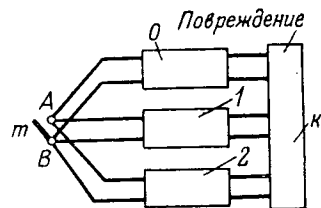


Рис. 2.

Для выражения условий соединения начал (входных) зажимов четырехполюсников трех последовательностей необходимо найти соответствующие матрицы, которые мы обозначим  $C_g$  (рис. 3).

Если разрыв трехфазной цепи осуществляется однополюсным выключателем в «особенной» фазе  $a$ , то условия разрыва в точке  $m$  выражаются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_0^1 + \dot{I}_1^1 + \dot{I}_2^1 &= \dot{I}^m, \\ \dot{E}_{10} = \dot{E}_{11} = \dot{E}_{12} &= \frac{1}{3} \dot{E}_{AB} \end{aligned} \right\}$$

или соответственно

$$C_g \dot{I}^1 = \dot{I}^m \quad \text{и} \quad \dot{E}_1 = \frac{1}{3} \dot{E}_{AB} C_d. \quad (6)$$

В уравнениях (7)

$$C_g = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad C_d = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix}.$$

Если разрыв трехфазной цепи осуществляется однополюсным выключателем в «неособенной» фазе  $b$ , то условия разрыва в точке  $m$  выражаются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_0^1 + a^2 \dot{I}_1^1 + a \dot{I}_2^1 &= \dot{I}^m, \\ \dot{E}_{10} = \frac{1}{3} \dot{E}_{AB}; \quad \dot{E}_{11} = \frac{1}{3} a \dot{E}_{AB}; \quad \dot{E}_{12} = \frac{1}{3} a^2 \dot{E}_{AB} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

или, как в предыдущем случае,

$$C_g \cdot \dot{I}^1 = \dot{I}^m \quad \text{и} \quad \dot{E}_1 = \frac{1}{3} \dot{E}_{AB} \cdot C_d,$$

где

$$C_g = \begin{vmatrix} 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad C_d = \begin{vmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{vmatrix}.$$

На рис. 3 схема соединений входных зажимов четырехполюсников всех последовательностей, которая характеризуется матрицами  $C_g$  и  $C_d$ , обозначена символически прямоугольником  $P$ . Прямоугольник  $Q$  означает обобщенный четырехполюсник всех последовательностей.

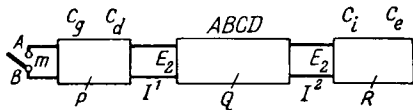


Рис. 3.

Для выражения условий соединения выходных полюсов четырехполюсников трех последовательных необходимо найти для каждого вида короткого замыкания (повреждения) матрицы, которые обозначим  $C_i$  и  $C_e$ . На рис. 3 схема соединений выходных зажимов четырехполюсников и последовательностей, которая определяется комом короткого замыкания и соответствующими матрицами  $C_i$  и  $C_e$ , обозначена символически прямоугольником  $R$ .

Рассмотрим основные виды параллельных повреждений.

**Однополюсное замыкание провода a на землю в точке k.**

Уравнения, характеризующие повреждение:

$$\left. \begin{aligned} I_0^2 = I_1^2 = I_2^2, \\ E_{20} + E_{21} + E_{22} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Уравнение (9) для токов можно изобразить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} I_0^2 - I_1^2 = 0, \\ I_1^2 - I_2^2 = 0, \\ I_2^2 - I_0^2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Матрицы  $C_i$  и  $C_e$  можно определить, исходя из уравнений (9) и условий

$$C_i I^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ и } C_e \cdot E_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

данные два условия необходимы для решения уравнений в матричной форме, что будет ясно из следующего.

В рассматриваемом виде короткого замыкания матрицы  $C_i$  и  $C_e$  будут иметь вид:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & -1 & \\ & 1 & -1 \\ -1 & & 1 \end{bmatrix}, C_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Замыкание между проводами b и c в точке k**  
Условия повреждения:

$$\left. \begin{aligned} I_2^2 = -I_1^2, \\ E_{21} = E_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Матрицы повреждения:

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & & \\ 2 & & \end{bmatrix}, C_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & & \\ 2 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Замыкание на землю проводов b и c в точке k.**

Условия повреждения:

$$\left. \begin{aligned} I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 = 0, \\ E_{20} = E_{21} = E_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Матрицы повреждения:

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}, C_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & -1 & \\ & 1 & -1 \\ -1 & & 1 \end{bmatrix}.$$

**Замыкание проводов b и c между собой и провода a на землю в точке k.**

Условия повреждения:

$$\left. \begin{aligned} 2I_0^2 - I_1^2 - I_2^2 = 0, \\ E_{21} = E_{22} = -\frac{1}{2} E_{20}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Матрицы повреждения:

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 2 & -2 & 1 \end{bmatrix} \text{ и } C_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & \\ & 1 & -1 \\ \frac{1}{2} & & 1 \end{bmatrix}.$$

Для определения в общем виде переходной проводимости используем уравнения (5). Первое уравнение умножим на  $C_e$  слева и второе — на  $C_i$  также слева, тогда получим:

$$\left. \begin{aligned} C_e E_2 = C_e A E_1 + C_e B I^1, \\ C_i \cdot I^2 = C_i \cdot C E_1 + C_i D I^1. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Левые части уравнений (15) имеют матрицы

$$C_e E_2 = C_i I^2 = C_0, \text{ где } C_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

поэтому

$$C_e A \dot{E}_1 + C_e B \dot{I}^1 = C_i C \dot{E}_1 + C_i D \dot{I}^1$$

или

$$(C_e B - C_i D) \dot{I}^1 = (C_i C - C_e A) \dot{E}_1,$$

откуда

$$I \cdot \dot{I}^1 = (C_e B - C_i D)^{-1} (C_i C - C_e A) \dot{E}_1. \quad (16)$$

Исследования произведений рассмотренных выше матриц показали, что произведения  $C_e B$  и  $C_i D$  являются вырожденными матрицами, поэтому обратной матрицы для них получить нельзя. Однако разность произведений матриц этого типа  $(C_e B - C_i D)$  является невырожденной матрицей и поэтому имеет обратную матрицу.

Умножив левую и правую части уравнения (16) на  $C_g$  и подставив вместо  $\dot{E}_1$  выражение (7), получим:

$$C_g \dot{I}^1 = \frac{1}{3} C_g (C_e B - C_i D)^{-1} (C_i C - C_e A) C_d \dot{E}_{AB}.$$

Так как  $C_g \dot{I}^1 = \dot{I}^m$ , то искомая переходная проводимость в общей форме для всех рассмотренных повреждений будет иметь вид:

$$Y = \frac{1}{3} C_g (C_e B - C_i D)^{-1} (C_i C - C_e A) C_d. \quad (17)$$

Все входящие в выражение буквенные символы являются сложными матрицами.

Чтобы определить общее выражение проводимости с учетом включенного в месте повреж-

дения полного сопротивления (например, сопротивления электрической дуги) для случая полюсного замыкания на землю или двухполюсного короткого замыкания без замыкания на землю можно следующим образом преобразовать уравнения (15):

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_2 - Z_p \dot{I}^2 &= A_1 \dot{E}_1 + B \dot{I}^1 - Z_p \dot{I}^2, \\ \dot{I}^2 &= C \dot{E}_1 + D \dot{I}^1. \end{aligned} \right\}$$

Умножая первое уравнение слева на  $C_e$ , а второе слева на  $C_i$ , получим:

$$C_i C \dot{E}_1 + C_i D \dot{I}^1 = C_e A_1 \dot{E}_1 + C_e B \dot{I}^1 - Z_p C_e \dot{I}^2.$$

Подставив в это уравнение вместо  $\dot{I}^2$  его значение из второго уравнения (18), после преобразования получим:

$$Y = \frac{1}{3} C_g (C_e B - C_i D - Z_p C_e D)^{-1} \times \\ \times (C_i C - C_e A + Z_p C_e C) \cdot C_d.$$

Заменив в полученном выражении  $\dot{I}^m$  на  $\dot{I}^k$  получим операторную проводимость между зажимами  $A-B$  в трехфазной сети при наличии повреждения в точке  $k$ . Эту проводимость можно использовать для определения по известным токам включения при замыкании с помощью выключателя зажимов  $A-B$  на одной фазе напряжения при выключении выключателя между зажимами  $A-B$  на одной фазе.

**Пример.** Пользуясь общей формулой для переходной проводимости (17), определим проводимость для случая полюсного замыкания провода  $a$  на землю в точке  $k$ . Однополюсный выключатель, включение или выключение которого вызывает переходный процесс в трехфазной сети, расположен в точке  $m$  в фазе  $a$ .

Вычислим обратную матрицу, входящую в выражение (17):

$$C_e B - C_i D = -C_e (Y^{12})^{-1} - C_i Y^{22} (Y^{12})^{-1} = F$$

или

$$F = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \frac{1}{Y_0^{12}} & & \\ & \frac{1}{Y_1^{12}} & \\ & & \frac{1}{Y_2^{12}} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & -1 & \\ & 1 & -1 \\ -1 & & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} Y_0^{22} & & \\ & Y_1^{22} & \\ & & Y_2^{22} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \frac{1}{Y_0^{12}} & & \\ & \frac{1}{Y_1^{12}} & \\ & & \frac{1}{Y_2^{12}} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

После преобразования получим:

$$F = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \frac{1 + Y_0^{22}}{Y_0^{12}} & \frac{1 - Y_1^{22}}{Y_1^{12}} & \frac{1}{Y_2^{12}} \\ \frac{1}{Y_0^{12}} & \frac{1 + Y_1^{22}}{Y_1^{12}} & \frac{1 - Y_2^{22}}{Y_2^{12}} \\ \frac{1 - Y_0^{22}}{Y_0^{12}} & \frac{1}{Y_1^{12}} & \frac{1 + Y_2^{22}}{Y_2^{12}} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Для полученной матрицы найдем обратную ей, т. е. определим  $(C_e B - C_i D)^{-1}$ . Транспонируем исходную матрицу, а затем подставим в транспонированную матрицу вместо элементов их алгебраическое дополнение и разделим каждый элемент на определитель:

$$F^{-1} = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline \frac{(1+Y_1^{22})(1+Y_2^{22})}{Y_1^{12}Y_2^{12}} - \frac{1-Y_2^{22}}{Y_1^{12}Y_2^{12}} & \frac{(1-Y_1^{22})(1+Y_2^{22})}{Y_1^{12}Y_2^{12}} - \frac{1}{Y_1^{12}Y_2^{12}} & \frac{(1-Y_1^{22})(1-Y_2^{22})}{Y_1^{12}Y_2^{12}} - \frac{1+Y_1^{22}}{Y_1^{12}Y_2^{12}} \\ \hline \frac{1+Y_2^{22}}{Y_0^{12}Y_2^{12}} - \frac{(1-Y_0^{22})(1-Y_2^{22})}{Y_0^{12}Y_2^{12}} & \frac{(1+Y_0^{22})(1+Y_2^{22})}{Y_0^{12}Y_2^{12}} - \frac{1-Y_0^{22}}{Y_0^{12}Y_2^{12}} & \frac{(1+Y_0^{22})(1-Y_2^{22})}{Y_0^{12}Y_2^{12}} - \frac{1}{Y_0^{12}Y_2^{12}} \\ \hline \frac{1}{Y_0^{12}Y_1^{12}} - \frac{(1-Y_0^{22})(1+Y_1^{22})}{Y_0^{12}Y_1^{12}} & \frac{1+Y_0^{22}}{Y_0^{12}Y_1^{12}} - \frac{(1-Y_0^{22})(1-Y_1^{22})}{Y_0^{12}Y_1^{12}} & \frac{(1+Y_0^{22})(1+Y_1^{22})}{Y_0^{12}Y_1^{12}} - \frac{1-Y_1^{22}}{Y_0^{12}Y_1^{12}} \\ \hline \end{array} \end{matrix}$$

$$F^{-1} = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{matrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{matrix}$$

Найдем определитель матрицы  $F$ :

$$\Delta = -3 \left( \frac{1}{Y_0^{22}} + \frac{1}{Y_1^{22}} + \frac{1}{Y_2^{22}} \right).$$

Вычислим теперь разность произведений матриц:  $C_i C - C_e A$ . Найдем предварительно матрицы  $C$  и  $A$ :

$$= \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_0^{21} & & \\ \hline & Y_1^{21} & \\ \hline & & Y_2^{21} \\ \hline \end{array} \end{matrix} - \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_0^{22} & & \\ \hline & Y_1^{22} & \\ \hline & & Y_2^{22} \\ \hline \end{array} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline \frac{1}{Y_0^{12}} & & \\ \hline & \frac{1}{Y_1^{12}} & \\ \hline & & \frac{1}{Y_2^{12}} \\ \hline \end{array} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_0^{11} & & \\ \hline & Y_1^{11} & \\ \hline & & Y_2^{11} \\ \hline \end{array} \end{matrix}; A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline \frac{Y_0^{11}}{Y_0^{12}} & & \\ \hline & \frac{Y_1^{11}}{Y_1^{12}} & \\ \hline & & \frac{Y_2^{11}}{Y_2^{12}} \\ \hline \end{array} \end{matrix}$$

Тогда  $C_i C - C_e A =$

$$= \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_0^{21} - \frac{Y_0^{22}Y_0^{11}}{Y_0^{12}} - \frac{Y_0^{11}}{Y_0^{12}} & -Y_1^{21} + \frac{Y_1^{22}Y_1^{11}}{Y_1^{12}} - \frac{Y_1^{11}}{Y_1^{12}} & -\frac{Y_2^{11}}{Y_2^{12}} \\ \hline -\frac{Y_0^{11}}{Y_0^{12}} & Y_1^{21} - \frac{Y_1^{22}Y_1^{11}}{Y_1^{12}} - \frac{Y_1^{11}}{Y_1^{12}} & -Y_2^{21} + \frac{Y_2^{22}Y_2^{11}}{Y_2^{12}} - \frac{Y_2^{11}}{Y_2^{12}} \\ \hline -Y_0^{21} + \frac{Y_0^{22}Y_0^{11}}{Y_0^{12}} - \frac{Y_0^{11}}{Y_0^{12}} & -\frac{Y_1^{11}}{Y_1^{12}} & Y_2^{21} - \frac{Y_2^{22}Y_2^{11}}{Y_2^{12}} - \frac{Y_2^{11}}{Y_2^{12}} \\ \hline \end{array} \end{matrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline k & l & m \\ \hline n & o & p \\ \hline q & r & s \\ \hline \end{array} \end{matrix}$$

Найдем проводимость:

$$Y = \frac{1}{3} \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \end{matrix} \cdot \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{matrix} a & b & e \\ d & e & f \\ g & h & i \end{matrix} \cdot \begin{matrix} k & l & m \\ n & o & p \\ q & r & s \end{matrix} \cdot \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix}$$

После преобразований получим:

$$Y = \frac{1}{3\Delta} [(a+d+g)(k+l+m) + (b+l+h)(n+o+p) + (l+f+i)(g+r+s)].$$

Подставив в полученное выражение проводимости разных последовательностей  $Y^{11}$ ,  $Y^{12}$ ,  $Y^{21}$  и  $Y^{22}$ , найдем:

$$Y = \frac{1}{3} \left[ Y_0^{11} + 2Y_1^{11} + 2 \frac{Y_1^{21} - Y_0^{21}}{Y_1^{22} + 2Y_0^{22}} (Y_0^{12} - Y_1^{12}) \right].$$



## Влияние трансформации звезда-треугольник на работу дистанционных реле

Доктор техн. наук, проф. Г. И. АТАБЕКОВ

Москва

В связи с широким применением дистанционных реле для защиты современных высоковольтных линий электропередачи возникла потребность в практической методике исследования поведения этих реле при двухфазных замыканиях за трансформаторами, соединенными по схеме звезда-треугольник, с учетом возможно-го расхождения по фазе э. д. с. генераторов по концам линии электропередачи.

В ранее опубликованных работах [Л. 2, 3, 4], посвященных анализам замеров дистанционных реле с учетом трансформации звезда-треугольник, задача рассматривалась только для случая одностороннего питания места повреждения в предположении, что трансформатор до короткого замыкания не был нагружен.

В работе С. С. Рафили [Л. 7] показано, что направленные дистанционные реле, будучи настроены на первую зону (примерно на 80% длины защищаемой линии), могут приближаться к условиям, близким к срабатыванию, при двухфазных замыканиях за трансформаторами электропередачи, имеющими соединение обмоток звезда-треугольник. Это может явиться причиной возникновения системной аварии.

Разработанная автором методика исследования поведения дистанционных реле при двухфазных замыканиях за трансформатором, обмотки которого соединены по схеме  $Y/\Delta$ , в отличие от методов, изложенных в Л. 2, 3, 4, учитывает двустороннее питание, а также неравенство и расхождение по фазе э. д. с. генераторов на концах электропередачи. Используемый для этой цели графоаналитический метод основан на работе автора [Л. 6] и применим для дистанционных реле любого типа, имеющих в комплексной плоскости при всех видах коротких замыканий определенную характеристику срабатывания.

Такое же выражение проводимости при однополюсном замыкании на землю фазы  $a$  в точке  $k$  в случае включения или выключения однополюсного выключателя на фазе  $a$  в точке  $m$  нами получено было ранее [Л. 1].

### Литература

1. В. В. Гусев. К расчету переходных процессов в сетях при пофазном АПВ, Электричество, № 2, 1951.
2. Б. В. Булгаков. Колебания, т. I, ГИТТЛ, 1949.

[20.]

*Изложена методика анализа поведения современных дистанционных реле при двухфазных замыканиях за трансформаторами, обмотки которых соединены по схеме  $Y/\Delta$ , с учетом расхождения по фазе э. д. с. генераторов на концах электропередачи. Приведен числовой пример, из которого следует, что в этих случаях необходимо считаться с возможностью неправильного действия направленных дистанционных реле с характеристиками в виде окружностей, проходящих через начало координат, в первой ступени.*

Предлагаемая методика анализа поведения дистанционных реле при двухфазном замыкании за трансформатором при емного конца электропередачи изложена в примере схемы рис. 1. Обмотки трансформатора соединены по схеме  $Y/\Delta$ -11. Предполагается, что реле может быть включено на любое определенное напряжение и разность токов соответствующих фаз ( $U_{AB}$  и  $I_A - I_B$  и т. д.)

В работе автора [Л. 6] было показано, что анализ поведения дистанционного реле может быть произведен путем сопоставления характеристики реле, вычерченной в комплексной плоскости проводимостей ( $Y$ ), с круговыми диаграммами полных проводимостей на зажимах реле. При этом характеристика реле в плоскости  $Y$  и круговые диаграммы чертятся в предположении, что к реле подведена э. д. с. эквивалентного источника. Характеристика реле в плоскости  $Y$  получается в результате обращения характеристики реле, вычерченной в плоскости сопротивления ( $Z$ ) и сдвинутой относительно начала координат на величину полного сопротивления эквивалентного источника.

Применительно к рассматриваемому случаю двухфазного замыкания за трансформатором обмотки которого соединены по схеме  $Y/\Delta$  следует учесть, что линейным напряжениям разностям фазных токов на стороне звезды соответствуют определенные фазные напряжения; линейные токи на стороне треугольника [Л. 1, 3, 4]. Если считать, что линейные напряжения, токи и соответственно сопротивления по всей схеме электропередачи приведены к одной ступени напряжения и если не учитывать составляющую нулевой последовательности на стороне треугольника, то на основании известных [Л. 3, стр. 24]

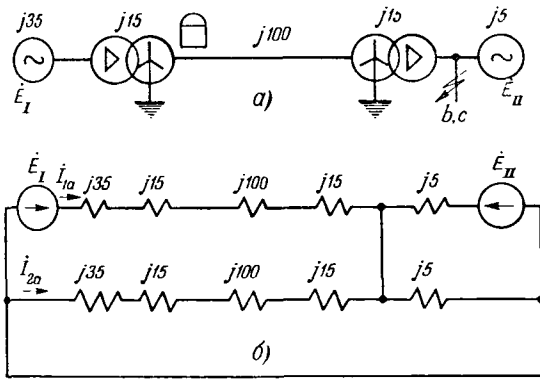


Рис. 1.

а — расчетная схема электропередачи; б — комплексная схема замещения для случая двухфазного короткого замыкания между фазами *b* и *c* за трансформатором с группой соединений  $Y/\Delta=11$ .

Л. 4, стр. 53] соотношений получим выражение полного сопротивления на зажимах реле фаз АВ:

$$Z_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{i}_{AB}} = \frac{\dot{U}_a - \dot{i}_a Z_1}{\dot{i}_a} = Z_a - Z_1,$$

откуда

$$Z_a = Z_{AB} + Z_1.$$

аналогично

$$Z_b = Z_{BC} + Z_1,$$

$$Z_c = Z_{CA} + Z_1.$$

Здесь  $Z_1$  — сумма сопротивлений прямой последовательности трансформатора и эквивалентного генератора (сопротивление прямой и обратной последовательностей генератора предполагаются одинаковыми). Индексы *A, B, C* относятся к стороне, соединенной звездой, а индексы *a, b, c* — стороне, соединенной треугольником.

Таким образом, применительно к дистанционному реле, включенным на напряжения и токи  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{i}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{i}_{BC}$ ,  $\dot{U}_{CA}$  и  $\dot{i}_{CA}$ , приводимый выше анализ ведется в предположении, что реле перенесено за сопротивление источника эквивалентной э. д. с.  $E_I$  и включено на напряжения токи  $\dot{E}_a$  и  $\dot{i}_a$ ,  $\dot{E}_b$  и  $\dot{i}_b$ ,  $\dot{E}_c$  и  $\dot{i}_c$ . При этом характеристика реле в плоскости полных сопротивлений мыслится смещенной относительно начала координат на величину сопротивления  $Z_1$ . На рис. 2 в качестве примера изображены смещенные таким образом характеристики дистанционных реле: направленного реле полного сопротивления (характеристика *M*) и ненаправленных реле полного и реактивного сопротивлений (характеристики *z* и *x*), а также соответствующие характеристики в плоскости проводимости. Наклон характеристики направленного дистанционного реле принят равным  $70^\circ$ . Области характеристик реле, соответствующие срабатыванию, заштрихованы.

Сопротивление  $Z_1 = j50 \text{ ом}$ , на которое смещены характеристики реле с комплексной плоскости сопротивления, равно в данном случае

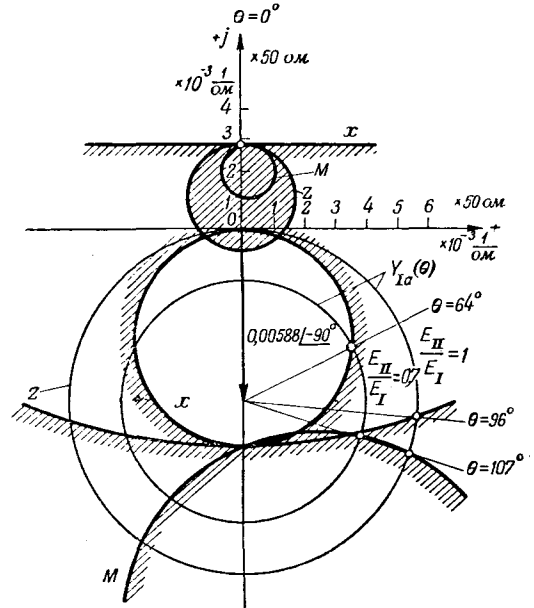


Рис. 2. Проверка работы дистанционного реле фаз АВ на передающем конце при коротком замыкании между фазами *b* и *c* за трансформатором приемного конца электропередачи с группой соединений  $Y/\Delta=11$ .

сумме сопротивлений трансформатора (15 ом) и эквивалентного генератора (35 ом) передающего конца, имеющего э. д. с.  $E_I$ .

Сопротивление зоны, защищаемой дистанционными реле, для примера принято равным  $j 85 \text{ ом}$ , что составляет 85% сопротивления прямой последовательности линии или 74% сопротивления электропередачи, включая трансформатор приемного конца<sup>1</sup>.

Поскольку между источником эквивалентной э. д. с. и местом короткого замыкания последовательно включены два трансформатора — повышающий и понижающий, имеющие одинаковую группу соединений ( $Y/\Delta=11$ ), симметричные составляющие каждой последовательности претерпевают дважды фазные сдвиги, которые взаимно компенсируются. Поэтому при расчете напряжений и токов со стороны треугольника передающего конца электропередачи (рис. 1,а) достаточно ограничиться учетом сопротивлений повышающего и понижающего трансформаторов и не требуется учитывать фазные повороты симметричных составляющих, обуславливаемые каждым из трансформаторов в отдельности. В связи с этим комплексная схема замещения для нахождения токов  $\dot{i}_{1a}$  и  $\dot{i}_{2a}$  при двухфазном коротком замыкании между фазами *b* и *c* может быть изображена так, как это сделано на рис. 1,б.

На рис. 2, 3 и 4 изображены круговые диаграммы полных проводимостей на зажимах реле в фазах *a, b, c* при соотношениях э. д. с. источников  $\frac{E_{II}}{E_I} = 1$  и  $\frac{E_{II}}{E_I} = 0,7$ . Точки пересечения

<sup>1</sup> Сопротивления элементов электропередачи указаны на схеме рис. 1 в омх и в данном числовом примере приняты реактивными. Предлагаемая методика допускает учет полных сопротивлений и сопротивлений в месте к. з.

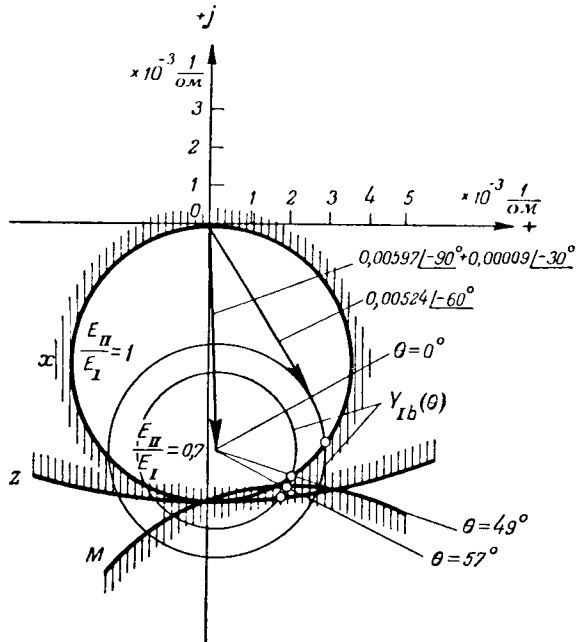


Рис. 3. Проверка работы дистанционного реле фаз BC на передающем конце при коротком замыкании между фазами b и c за трансформатором приемного конца электропередачи с группой соединений Y/Δ-11.

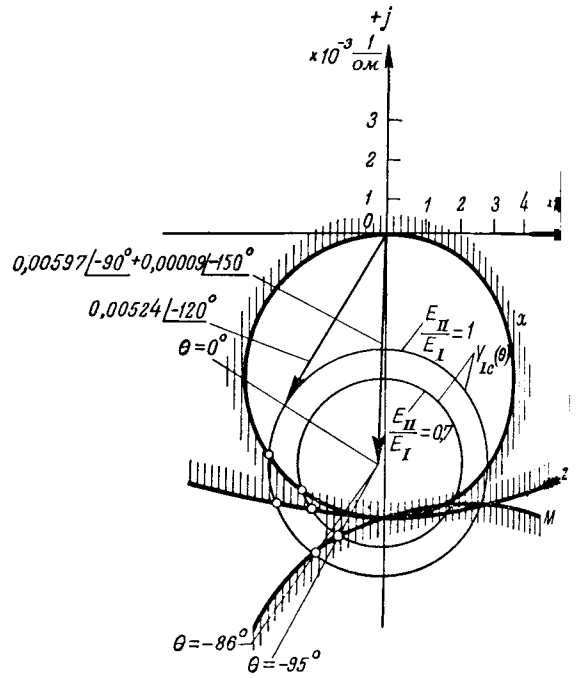


Рис. 4. Проверка работы дистанционного реле фаз CA на передающем конце при коротком замыкании между фазами b и c за трансформатором приемного конца электропередачи с группой соединений Y/Δ-11.

круговых диаграмм с характеристикой реле, вычерченной в плоскости Y, определяют углы расхождения э. д. с. источников  $\theta$ , при которых срабатывают реле. Характеристики дистанционных реле на рис. 3 и 4 те же, что и на рис. 2, но даны они лишь в плоскости Y.

Круговые диаграммы построены по формулам, справедливым для передающего конца при любом виде короткого замыкания за трансформатором приемного конца электропередачи, обмотки которого соединены по схеме Y/Δ. Эти формулы следующие:

$$Y_{Ia} = Y_{Ia(E_{II} = 0)} + [Y_{Ia(\dot{E}_1 = \dot{E}_{II})} - Y_{Ia(E_{II} = 0)}] \frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_1}, \quad (1)$$

$$Y_{Ib} = Y_{Ib(E_{II} = 0)} + [Y_{Ib(\dot{E}_1 = \dot{E}_{II})} - Y_{Ib(E_{II} = 0)}] \frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_1}, \quad (2)$$

$$Y_{Ic} = Y_{Ic(E_{II} = 0)} + [Y_{Ic(\dot{E}_1 = \dot{E}_{II})} - Y_{Ic(E_{II} = 0)}] \frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_1}. \quad (3)$$

Полные проводимости  $Y_{(E_{II} = 0)}$  и  $Y_{(\dot{E}_1 = \dot{E}_{II})}$  для фаз a, b, c на стороне треугольника определяются при помощи выражений, приведенных в табл. 1.

Результаты расчета для случаев  $\dot{E}_{II} = 0$  и  $\dot{E}_1 = \dot{E}_{II}$  применительно к расчетной схеме рис. 1, б приведены в табл. 2.

Таблица 1

Проводимости	Расчетные выражения
$Y_a$	$\frac{\dot{I}_a}{\dot{E}_a} = \frac{\dot{I}_{1a} + \dot{I}_{2a}}{\dot{E}_a}$
$Y_b$	$\frac{\dot{I}_b}{\dot{E}_b} = \frac{\dot{I}_{1a} + a^2 \dot{I}_{2a}}{\dot{E}_a}$
$Y_c$	$\frac{\dot{I}_c}{\dot{E}_c} = \frac{\dot{I}_{1a} + a \dot{I}_{2a}}{\dot{E}_a}$

Таблица 2

Искомые величины	$\dot{E}_{II} = 0$	$\dot{E}_1 = \dot{E}_{II}$
	$\frac{\dot{I}_{1a}}{\dot{E}_{1a}}$	0,00597   -90°
$\frac{\dot{I}_{2a}}{\dot{E}_{1a}}$	-0,00009   -90°	-0,00303   -90°
$Y_{Ia}$	0,00588   -90°	0
$Y_{Ib}$	0,00597   -90° + 0,00009   -30°	0,00524   -60°
$Y_{Ic}$	0,00597   -90° + 0,00009   -150°	0,00524   -120°

Ввиду того, что при  $\dot{E}_1 = \dot{E}_{II}$  и равенстве сопротивлений прямой и обратной последовательностей  $\dot{I}_a = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{2a} = 0$  и  $Y_{Ia(\dot{E}_1 = \dot{E}_{II})} = 0$ , расчетная формула (1) применительно к случаю двух

фазного короткого замыкания между фазами  $b$  и  $c$  принимает вид:

$$Y_{Ia} = Y_{Ia(E_{II}=0)} \left[ 1 - \frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I} \right]. \quad (4)$$

Формула аналогичного вида была получена автором ранее [Л. 6] для случая качания, не сопровождаемого коротким замыканием.

Круговые диаграммы проводимости  $Y_{Ia}$  при  $\frac{E_{II}}{E_I} = 1$  и  $\frac{E_{II}}{E_I} = 0,7$  изображены на рис. 2. Они представляют собой концентрические окружности, смещенные относительно начала координат на величину  $Y_{Ia(E_{II}=0)} = \frac{1}{Z_{III}} = 0,00588 \angle -90^\circ$ , где  $Z_{III} = j170 \text{ Ом}$  — сопротивление прямой последовательности электропередачи. При  $\frac{E_{II}}{E_I} = 1$  окружность проходит через начало координат. Круговая диаграмма, соответствующая  $\frac{E_{II}}{E_I} = 0,7$  имеет радиус  $0,7 \cdot 0,00588 = 0,00412 \frac{1}{\text{Ом}}$ .

На рис. 3 и 4 представлены круговые диаграммы проводимостей  $Y_{Ib}$  и  $Y_{Ic}$ . Так же как в предыдущем случае, центр круга определяется концом вектора  $Y_{(E_{II}=0)}$ . Радиус круга при  $\dot{E}_{II}$  определяется геометрической разностью векторов  $Y_{(\dot{E}_I = \dot{E}_{II})}$  и  $Y_{(E_{II}=0)}$ . Круговые диаграммы, соответствующие  $E_I \neq E_{II}$ , представляют окружности с радиусами

$$\left| Y_{(\dot{E}_I = \dot{E}_{II})} - Y_{(E_{II}=0)} \right| \frac{E_{II}}{E_I}.$$

Ввиду того, что  $\frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_I} = \frac{E_{II}}{E_I} e^{-j\theta}$ , отсчет положительных углов  $\theta$  ведется по ходу часовой стрелки от вектора  $Y_{(\dot{E}_I = \dot{E}_{II})} - Y_{(E_{II}=0)}$ , направление которого совпадает с лучом, соответствующим  $\theta = 0$ .

Из рассмотрения диаграмм рис. 2, 3 и 4 следует, что на передающем конце линии электропередачи при  $\theta = 49^\circ$  ( $\frac{E_{II}}{E_I} = 1$ ) и  $\theta = 57^\circ$  ( $\frac{E_{II}}{E_I} = 0,7$ ) может неправильно действовать направленное дистанционное реле, включенное на напряжение и ток  $I_{BC}$ , что соответствует реле фазы  $b$  стороне треугольника.

Следует заметить, что угол  $\theta$ , при котором наступает срабатывание направленного дистанционного реле, установленного на передающем конце, уменьшается по мере уменьшения угла наклона характеристики направленного дистанционного реле в плоскости  $Z$ . Иначе говоря, реле с тем же наклоном характеристики, равным, например,  $60^\circ$ , сработает при меньшем угле  $\theta$ , чем реле с тем же наклоном характеристики  $70^\circ$ .

Применительно к защите приемного конца при коротком замыкании на передающем конце расчетные формулы имеют вид:

$$Y_{IIa} = Y_{IIa(E_I=0)} + \left[ Y_{IIa(\dot{E}_I = \dot{E}_{II})} - Y_{IIa(E_I=0)} \right] \frac{\dot{E}_I}{\dot{E}_{II}}, \quad (5)$$

$$Y_{IIb} = Y_{IIb(E_I=0)} + \left[ Y_{IIb(\dot{E}_I = \dot{E}_{II})} - Y_{IIb(E_I=0)} \right] \frac{\dot{E}_I}{\dot{E}_{II}}, \quad (6)$$

$$Y_{IIc} = Y_{IIc(E_I=0)} + \left[ Y_{IIc(\dot{E}_I = \dot{E}_{II})} - Y_{IIc(E_I=0)} \right] \frac{\dot{E}_I}{\dot{E}_{II}}. \quad (7)$$

Положительные углы  $\theta$  отсчитываются в направлении против хода часовой стрелки, так как  $\frac{\dot{E}_I}{\dot{E}_{II}} = \frac{E_I}{E_{II}} e^{j\theta}$ .

При двухфазном замыкании фаз  $b$  и  $c$  на передающем конце электропередачи (на стороне треугольника) наименьших положительных значений угла  $\theta$ , соответствующих условию срабатывания, следует ожидать для реле, установленного в фазах  $CA$  на приемном конце защищаемой линии, чему соответствует включение на  $\dot{E}_c$  и  $\dot{I}_c$  со стороны треугольника приемного конца.

Рассмотренный выше числовой пример показывает, что направленные дистанционные реле первой ступени могут в некоторых случаях срабатывать при двухфазных замыканиях за трансформатором, имеющим схему соединений обмоток  $Y/\Delta$ , при меньших углах фазного сдвига между э. д. с.  $\dot{E}_I$  и  $\dot{E}_{II}$  эквивалентных источников, чем ненаправленные реле полного сопротивления.

Как известно, значительные расхождения э. д. с. по фазе возможны при коротких замыканиях, сопровождаемых качаниями. В современных высоковольтных системах замедленные отключения коротких замыканий вблизи шин станций и подстанций мало вероятны и поэтому особо значительных сдвигов э. д. с. генераторов по фазе при коротких замыканиях за трансформаторами практически ожидать не приходится. Тем не менее, выводить из действия первую ступень дистанционной защиты (от пусковых органов) спустя некоторое время, достаточное для срабатывания защиты в первой ступени, желательно при всех схемах дистанционной защиты<sup>2</sup>.

Вместе с тем приведенный выше пример свидетельствует о том, что выбор зон и самих характеристик дистанционных реле целесообразно на практике производить с учетом результатов анализа работы реле при коротких замыканиях

<sup>2</sup> В схемах, основанных на переключении дистанционных реле с первой зоны на вторую, выведение первой ступени из действия достигается само собой в результате переключений.



за трансформаторами, имеющими схему соединенный обмоток  $Y/\Delta$ . Применение блокирующих дистанционных реле типа «шор» [Л. 3] улучшает работу защиты при коротких замыканиях за трансформаторами с соединением обмоток по схеме  $Y/\Delta$ .

Что касается новых отечественных однонаправленных дистанционных реле системы А. М. Бреслера, предназначенных для защиты от двухфазных коротких замыканий, то, как было показано в статье автора [Л. 5], трансформация звезда — треугольник на работу этих реле влияния не оказывает.

#### Литература

1. Руководящие указания по релейной защите. ОНТИ, 1937.
2. Поведение дистанционных реле при коротких замы-

каниях за трансформатором (реферат). Энергетическое зрение, электротехнический выпуск, 11, 1936.

3. Г. И. Атабеков. Релейная защита высоковольтных сетей, Госэнергоиздат, 1949.

4. А. Б. Чернин. Анализ замеров омметров дистанционных защит при несимметричных коротких замыканиях за трансформатором  $Y/\Delta$ -11. Релейная защита и система автоматика (сборник статей), Госэнергоиздат, 1948.

5. Г. И. Атабеков. Новый принцип построения направленной дистанционной защиты, Электричество, № 1950.

6. Г. И. Атабеков. Графоаналитический метод следования работы дистанционных реле, Электричество, № 2, 1952.

7. С. С. Рафили. Анализ замеров омметров на линиях большой протяженности. Электричество, № 6, 1951.



## К вопросу о коммутации машин постоянного тока

Доктор техн. наук **Е. М. СИНЕЛЬНИКОВ**

Сталинградгидрострой

**Введение.** При экспериментальных исследованиях коммутации машин постоянного тока до сих пор основное внимание уделялось процессам, происходящим до момента разрыва контакта между щеткой и коллекторной пластиной. Однако искрообразование, причины которого составляют узловую вопрос теории коммутации, происходит именно во время разрыва контактов.

Явления при разрыве контактов протекают в миллионные доли секунды и для их изучения необходимы соответствующая аппаратура и методика.

Первые серьезные исследования в этом направлении были сделаны в СССР М. Ф. Карасевым, работы которого начали появляться в печати более десяти лет назад. Серия статей М. Ф. Карасева и др. в журнале «Электричество» за 1948—1950 гг. [Л. 1...4] прочно закрепляет приоритет советской науки. Дальнейшее развитие работ М. Ф. Карасева привело к необходимости усовершенствования измерительной аппаратуры, в частности к необходимости разработки специальных импульсных вольтметров.

Экспериментальное изучение перенапряжений, возникающих при коммутации, выполненное при помощи специального импульсного вольтметра, раскрыло новые, весьма интересные особенности коммутационного процесса.

При экспериментальном исследовании одна из пластин коллектора исследуемой машины присоединяется к изолированному металлическому кольцу, посаженному на коллектор. Контакт между вращающимся кольцом и выводом к из-

*Излагается теория искрообразования при коммутации, в которой дается количественное объяснение перенапряжениям и устанавливается критерий безискровой коммутации.*

мерительной схеме получается при помощи скользящей по кольцу пружинной щетки. Когда коллекторная пластина выходит из-под щетки генератора, контакт между щеткой и пластиной раздается, резкое изменение тока вызывает перенапряжение. Получающийся импульс перенапряжения фиксируется специальным прибором, позволяющим измерять пиковое напряжение отдельных импульсов. Измерение этим способом коммутационных перенапряжений на генераторе постоянного тока показывает, что:

1) величина перенапряжения при постоянной скорости вращения генератора является функцией тока нагрузки и почти не зависит от напряжения до которого возбужден генератор;

2) перенапряжение при некотором токе начинает быстро расти вместе с током приблизительно до 150...170 в, после чего остается постоянным независимо от дальнейшего увеличения тока;

3) шлифовка щеток и действие дополнительных полюсов изменяют крутизну и навал подъема кривой перенапряжений, оставляя без изменения характер кривой и высоту горизонтальной части;

4) искрение машины, как правило, начинается наблюдаться при выходе перенапряжения на горизонтальную часть кривой.

Совокупность перечисленных экспериментальных фактов требует для своего объяснения теории искрообразования, в которой учитывались бы явления, сопровождающие разрывы контак-

между щеткой и выходящей из-под нее коллекторной пластиной. Неожиданно высокие перенапряжения при коммутации, обнаруженные измерениями, побуждают считать именно эти перенапряжения причиной искрообразования.

**Общие условия искрообразования.** Процесс коммутации машин постоянного тока сводится к переключению секций якорной обмотки из одной параллельной ветви в другую и состоит из двух последовательных фаз: первой — замыкания щеткой рядом лежащих коллекторных пластин; второй — разрыва контакта при выходе пластины разрабатываемого коллектора из-под щетки.

В первой фазе ток секции постепенно меняет свое значение до величины, приближающейся к току ветви, в которую секция переключается. Во второй фазе происходит разрыв контура, иначе говоря, резкое изменение условий, определяющих ток в секции. Вследствие стремления электромагнитной системы сохранить значение тока, процессу разрыва сопутствует освобождение части электрокинетической энергии, накопленной в поле индуктивности якорной обмотки. Освобожденная энергия переходит в потенциальную форму, что связано с резким возрастанием разности потенциалов между разрывающимися контактами, что при определенных условиях может вызвать искрение на коллекторе. Объяснение условий возникновения искрения является целью предлагаемой теории.

Существующая теория коммутации обходит трудности, возникающие в связи с необходимостью объяснения процессов, происходящих при разрыве контактов, введением представления о постепенном изменении переходного сопротивления между щеткой и двигающейся под ней коллекторной пластиной. Но прямые опыты и экспериментальная практика в общем не подтверждают этой гипотезы и вытекающих из нее следствий. Скорее всего, при коммутации имеют место разрывы контактов. Только они и могут вызвать столь высокие перенапряжения. Теория коммутации должна опираться прежде всего на ясное представление о процессах, происходящих при разрыве.

Начнем с изложения сведений, имеющих по этому вопросу.

Экспериментальное изучение процессов, происходящих между разрывающимися контактами [5] показало, что в этом явлении можно различить несколько этапов.

Если раздвинуть контакты на расстояние между ближайшими точками  $10^{-4} \dots 10^{-6}$  см (рис. а) и медленно повышать разность потенциалов между ними, то напряжение, приложенное к контактам, при его возрастании до достаточной величины создает градиент  $E_{кр}$ , являющийся в этом смысле критическим. Установлено, что при сближении градиента  $E_{кр}$  происходит скачкообразное падение контактного сопротивления почти до нуля.

Предполагают, что это явление вызывается электронной эмиссией, которая создает местное нагревание и размягчение металла. Металл

же, деформируясь под действием значительных электростатических сил, создает перемычки, восстанавливающие контакт, нарушенный разъединением контактных поверхностей. Никакого искрения при этом восстановлении контактов не наблюдается.

Градиент  $E_{кр}$  зависит от рода металла контактов. Например, для золотых контактов он равен  $16 \cdot 10^6$  в/см, для контактов сталь — уголь  $5 \cdot 10^6$  в/см.

При увеличении расстояния между контактами в течение всего первого этапа градиент  $E_{кр}$  остается постоянным. Это продолжается до тех пор, пока расстояние между ближайшими точками не возрастет до  $S_{кр} = \frac{U_{кр}}{E_{кр}}$ ;  $U_{кр}$ , в свою очередь, зависит от давления и температуры окружающей контактные среды. В воздухе при атмосферном давлении и  $20^\circ \text{C}$   $U_{кр} \approx 350$  в.

Когда наикратчайшее расстояние между контактами становится больше  $S_{кр}$ , тогда кончается первый и начинается второй этап. Безискровое восстановление контактов при этом прекращается и начинается искровой пробой.

Второй этап характеризуется тем, что искровой пробой происходит не между ближайшими точками контактов, а между точками, находящимися на расстоянии  $S_{мин} = 6 \cdot 10^{-4}$  см (рис. 1, б), где  $S_{мин}$  — минимальное расстояние, при котором может образоваться искра. При меньших расстояниях невозможна лавинная ионизация и, следовательно, образование искры.

На втором этапе, который длится до тех пор, пока ближайшее расстояние между контактами не будет равно  $S_{мин} = 6 \cdot 10^{-4}$  см (рис. 1, в), напряжение пробоя независимо от расстояния между ближайшими точками остается постоянным, так как пробой происходит через постоянный промежуток  $S_{мин} = 6 \cdot 10^{-4}$  см, отнесенный к другим, не ближайшим точкам контактов (рис. 1, б).

Когда расстояние между ближайшими точками возрастает до  $S > S_{мин}$  (рис. 1, в), кончается второй и начинается третий этап. На этом этапе с увеличением расстояния  $S$  растет также и напряжение пробоя.

Зависимость потенциала пробоя от расстояния и давления газовой среды для этого случая хорошо известна.

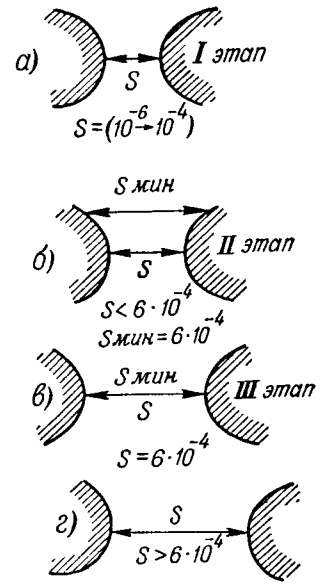


Рис. 1.

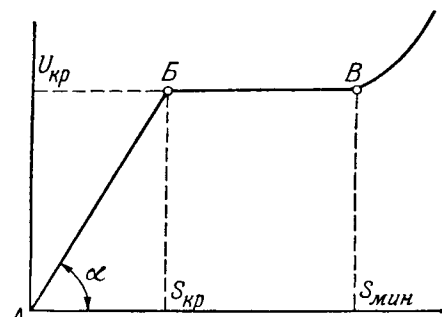


Рис. 2.

На рис. 2 изображена зависимость потенциала, вызывающего восстановление контакта или искровой пробой, от расстояния между ближайшими точками контактных поверхностей.

Участок  $AB$  соответствует первому этапу, когда происходит безискровое восстановление контактов под влиянием критического градиента

$$E_{кр} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_{кр}}{S_{кр}}.$$

Участок  $BB'$  соответствует второму этапу, когда искровой пробой происходит при постоянном потенциале независимо от расстояния между ближайшими точками. Здесь пробой происходит между теми точками контактов, между которыми расстояние равно  $S_{мин} = 6 \cdot 10^{-4}$  см (рис. 1, в).

Вправо от точки  $B'$  начинается третий этап. Здесь напряжение пробоя зависит от расстояния между ближайшими точками.

### Теория искрообразования при коммутации.

Опираясь на изложенное представление о природе разрывающегося контакта, проведем рассмотрение процесса коммутации.

В противоположность допущениям старой теории коммутации, опираясь на экспериментальные данные, будем считать, что сопротивление контакта не зависит от поверхности соприкосновения щетки с коллектором. Контакт либо имеется, либо, когда ближайшие точки щетки и приложенный потенциал дают на координатной плоскости  $U, S$  (рис. 2) точки, лежащие под кривой  $ABB'$ , контакт оборван.

С этой точки зрения скользящий безискровый контакт следует рассматривать как результат множества разрушающихся и быстро восстанавливающихся под действием критического градиента  $E_{кр}$  точечных контактов. Восстановление происходит без искры, так как расстояние до ближайших точек  $S < S_{кр}$  и, следовательно, потенциал восстановления  $U < U_{кр}$ .

Рассмотрим теперь подробно явления, происходящие при разрыве контактов, в схеме, которая отражает процесс коммутации, и определим необходимые условия прохождения процесса без появления искры.

На рис. 3 дана электрическая схема, отображающая процесс коммутации во второй фазе, в момент, когда обрывается контакт между щеткой и выходящей из-под нее коллекторной пластиной.

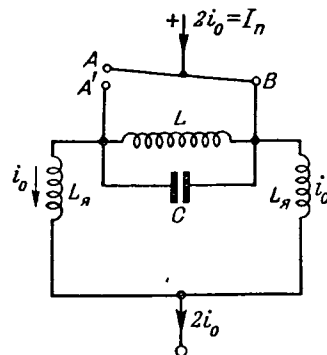


Рис. 3.

Работа схемы характеризуется следующими условиями:

1)  $L$  — полная индуктивность секции, которая до разрыва контакта была перемкнута щеткой (на схеме проводником  $AB$ ); для реальных машин, у которых в момент разрыва всегда имеются другие секции, замкнутые накоротко,  $L$  равна индуктивности рассеяния  $L_s$ , так как поток общий с другими короткозамкнутыми секциями при разрыве остается неизменным вследствие возникновения дополнительного тока в этих секциях;

2)  $C$  — емкость между рядом лежащими коллекторными пластинами и распределенная емкость секции;

3)  $L_x$  — индуктивность параллельных цепей машины; принимаем ее столь большой, что ток через эти цепи  $i_0$  остается постоянным на всех фазах процесса коммутации;

4)  $R$  — активное сопротивление секции, которым при расчете процессов, происходящих во второй фазе, т. е. при разрыве контактов мы пренебрегаем, так как его влияние в связи с кратковременностью явлений ничтожно; ниже мы это покажем более подробно;

5)  $i_L$  — ток в короткозамкнутой секции в момент разрыва контакта. Принимаем его равным нулю. Если этот ток не равен нулю, то это учитывается уменьшением на его значение конечного тока  $i_0$ . В этом случае ток при разрыве изменяется не от нуля до  $i_0$ , а от  $i_L$  до  $i_0$ , т. е. и величину  $i_{раз} = i_0 - i_L$ .

На основании этих пяти условий и схемы рис. 3 можно написать:

$$i_L + i_C = i_0, \quad (1)$$

$$C \frac{du}{dt} = i_C, \quad (2)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = u. \quad (3)$$

При  $t=0$  имеем:  $i_L = 0$ ;  $i_C = i_0$ ;  $\frac{du}{dt} = \frac{i_0}{C}$ ;

$u = 0$ .

Из (1) и (2)

$$C \frac{du}{dt} = i_0 - i_L; \quad LC \frac{d^2u}{dt^2} = -L \frac{di_L}{dt}. \quad (4)$$

(3) и (4)

$$LC \frac{d^2 u}{dt^2} = -u; \quad \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{1}{LC} u = 0. \quad (5)$$

Учитывая, что при  $t=0$   $u=0$ , решение (5) имеет вид:

$$u = A \sin \frac{1}{\sqrt{LC}} t. \quad (6)$$

Из условий для  $t=0$

$$C \frac{du}{dt} \Big|_{t=0} = i_0 = C \frac{A}{\sqrt{LC}} \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t = \sqrt{\frac{C}{L}} A; \quad (7)$$

$$A = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Подставляя (7) в (6), получим:

$$u = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \frac{1}{\sqrt{LC}} t, \quad (8)$$

$$U_{\max} = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (9)$$

В начальной части

$$u_{t \rightarrow 0} = \frac{du}{dt} t = \frac{i_0}{C} t. \quad (10)$$

Крутизна подъема напряжения в начальной части

$$\frac{du}{dt} \Big|_{t \rightarrow 0} = k_0 = \frac{i_0}{C} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{LC}}. \quad (11)$$

Из (3) получаем, что ток

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t u dt. \quad (12)$$

Из того, что если имеется график  $u=f(t)$  и

$\int u dt = F_t$  — площадь на графике, то

$$i_L = \frac{F_t}{L}. \quad (13)$$

Рассмотрим полученный результат.

Из дифференциальных уравнений, характеризующих переходный процесс в параллельном индуктивно-емкостном контуре, и соответствующих начальных условий мы получили, что во время фазы коммутационного процесса при разрыве контакта между щеткой и выходящей от нее коллекторной пластиной возникает разность потенциалов, которая возрастает по мере отрыва от нуля до некоторого максимального значения  $U_{\max} = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Подсчет  $U_{\max}$  для ряда отключающих машин, если принять за  $i_0$  номинальный ток параллельной ветви, дает значения от 50 до 5000 в.

Длительность одной четверти периода изменения  $u$  — времени достижения  $U_{\max}$  — для того ряда машин составляет:

$$\frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC} \approx 10^{-6} \text{ [сек].}$$

Отмеченная высокая разность потенциалов, однако, никогда не достигается. В действительности, процесс происходит так: при разрыве напряжения быстро растет, и так как расстояние между контактными поверхностями еще очень мало, оно создает градиент  $E_{кр}$ , при котором происходит восстановление контактов. Вследствие этого потенциал тотчас же падает. Перемещение коллекторной пластины относительно щетки снова приводит к разрыву контактов и росту разности потенциалов, в результате чего контакт снова восстанавливается и т. д.

Одновременно под влиянием импульсов напряжения, воздействующих на выходящую из короткого замыкания секцию, в ней происходит изменение тока до значения, равного току в параллельной цепи машины.

Из количественных соотношений, к которым мы сейчас обратимся, будет видно, что если весь процесс изменения тока в секции под влиянием указанных выше импульсов заканчивается до того, как отрывающаяся пластина отошла от щетки на расстояние  $S_{кр} = \frac{U_{кр}}{E_{кр}}$ , то возможен безискровый разрыв контакта.

Перейдем к количественным соотношениям. Пусть коллектор перемещается относительно щеток со скоростью  $v$  [см/сек]. Тогда, изменив масштаб абсцисс на рис. 2, а именно, введя вместо  $S$  переменную  $t = \frac{S}{v}$ , получим график напряжений, необходимых для восстановления контакта в функции времени, прошедшего с момента отрыва пластины коллектора от щетки (рис. 4).

Крутизна роста потенциала, восстанавливающего контакт на таком графике,

$$\frac{U_{кр}}{t_{кр}} = v E_{кр}.$$

С другой стороны, разность потенциалов в месте разрыва контактов будет расти в первый момент с крутизной  $k_0 = \frac{i_0}{C}$  [формула (11)], если же  $i_L \neq 0$ , то с крутизной  $k_0 = \frac{i_0 - i_L}{C}$ .

Примем, что потенциал между разрывающимися контактами в первый момент растет с крутизной (рис. 4):

$$k_0 = \frac{u_1}{t_1 - t_0} > \frac{U_{кр}}{t_{кр}}. \quad (14)$$

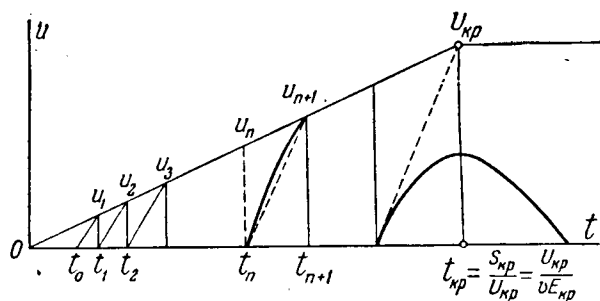


Рис. 4.

Когда растущий потенциал пересечет прямую, произойдет восстановление контактов и потенциал упадет до нуля. Но так как тотчас же наступит снова разрыв, то потенциал начнет расти снова. Вместе с этим за время  $t_1 - t_0$ , которое прошло с момента первого разрыва до момента восстановления контакта, на секцию действовало напряжение, благодаря чему через секцию стал протекать ток

$$i_1 = \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_1} \frac{i_0}{C} t dt = \frac{i_0}{LC} \frac{(t_1 - t_0)^2}{2},$$

величина которого на основании формулы (13) характеризуется также площадью треугольника

$$\Delta t_0 u_1 t_1 = F_1$$

и равна

$$i_1 = \frac{F_1}{L}.$$

В точке  $t_1$  произойдет снова разрыв и начнется рост напряжения между контактами.

Оставляя прежние условия  $i_0 = \text{const}$ , ток  $i_0$  в уравнении (1), следует изменить, так как через секцию  $L$  уже до начала второго разрыва проходит ток  $i_1$ .

Поэтому вместо уравнения (1) получим:

$$i_L + i_C = i_0 - i_1, \quad (15)$$

а крутизна роста напряжения в момент  $t = t_1$  будет:

$$k_1 = \frac{i_0 - i_1}{C}. \quad (16)$$

Крутизна роста напряжения после  $n$ -го разрыва

$$k_n = \frac{i_0 - \Sigma i_n}{C}. \quad (17)$$

Если эта крутизна ко времени  $t = t_{кр} = \frac{S_{кр}}{v}$  будет:

$$k_n \leq k_{кр} = \frac{U_{кр}}{\sqrt{LC}}, \quad (18)$$

то искрового разряда не может быть, так как крутизна  $\frac{U_{кр}}{\sqrt{LC}}$  соответствует по формуле (11) синусоиду, максимум которой равен  $U_{кр}$ .

Из соотношений (17) и (18) следует, что для безискровой коммутации необходимо, чтобы

$$\frac{i_0 - \Sigma i_n}{C} \leq \frac{U_{кр}}{\sqrt{LC}} \quad (19)$$

или

$$i_0 \leq \frac{U_{кр}}{\sqrt{\frac{L}{C}}} + \Sigma i_n, \quad (20)$$

где

$$\Sigma i_n = \frac{1}{L} F_n, \quad (21)$$

а  $F_n$  — сумма площадей, образованных отрезками синусоид  $t_n u_{n+1}$  и вертикальными прямыми  $u_{n+1}$  на отрезке от  $t_0$  до  $t_{кр}$ .

Далее, площадь треугольника  $o U_{кр} t_{кр}$ , равная  $\frac{U_{кр} t_{кр}}{2}$ , состоит из суммы трапеций  $t_n U_n; U_{n+1}$ , но так как площадь каждой такой трапеции меньше  $2F_n$ , то

$$\frac{U_{кр} t_{кр}}{4} < \Sigma F_n.$$

Подставляя значения из (22) и (21) в получим критерий безискровой коммутации

$$i_0 \leq \frac{U_{кр}}{\sqrt{\frac{L}{C}}} + \frac{U_{кр} t_{кр}}{4L},$$

или, подставляя значение

$$t_{кр} = \frac{S_{кр}}{v_{кр}} = \frac{U_{кр}}{v E_{кр}}$$

в (23), получим:

$$i_0 \leq \frac{U_{кр}}{\sqrt{\frac{L}{C}}} + \frac{U_{кр}^2}{4E_{кр}Lv}$$

или

$$Lvi_0 \leq U_{кр} v \sqrt{LC} + \frac{U_{кр}^2}{4E_{кр}}, \quad (24)$$

где, повторяем:  $i_0 = i_{разр}$  — разность между током параллельной ветви, в которую ток не проходит, и током секции в момент разрыва.

При установлении указанного критерия предполагалось, что начальная крутизна роста напряжения [формула (14)]

$$\frac{i_0}{C} > \frac{U_{кр}}{t_{кр}} = v E_{кр};$$

$$v < \frac{i_0}{C} \cdot \frac{1}{E_{кр}}.$$

Если же

$$v \geq \frac{i_0}{C} \cdot \frac{1}{E_{кр}},$$

то описанного восстановления на контактах не произойдет. Синусоида перенапряжения пересечет впервые граничную кривую на горизонтальной части за точкой  $U$  (рис. 4), и искры будут иметь место почти неизбежно.

Как ясно из изложенного, с физической стороны процесс коммутации, относящийся к этой фазе, к фазе разрыва контактов, мы рассматриваем как ряд быстрых толчков напряжения под влиянием которых ток секции, протекавший в момент отрыва коллекторной пластины щетки, непрерывно изменяется, пока значение его не станет равным значению тока в соответствующей параллельной ветви машины.

Мы пренебрегаем при рассмотрении этой фазы коммутации влиянием активных потерь в секции, ибо весь процесс происходит так быстро, что ток в короткозамкнутой секции не успевает во

янием потерь до окончания процесса сколько-нибудь существенно спасть.

Например, при скорости коллектора

$$v = 10^3 \text{ см/сек} \text{ и } S_{кр} \approx 10^{-4} \text{ см.}$$

$$t_{кр} = \frac{10^{-4}}{10^3} = 10^{-7} \text{ сек.}$$

), по крайней мере, в  $10^4$  раз меньше постоянной времени короткозамкнутых секций практически встречающихся машин.

Как было указано в начале статьи, при экспериментальном изучении перенапряжений при коммутации было получено, что горизонтальный исток кривой перенапряжений в функции тока нагрузки для машин, работающих в нормальных условиях, колеблется в пределах 150...170 в. Однако, как указывалось, известно, что электрическое искрение в воздухе при атмосферном давлении и  $20^\circ\text{C}$  возможно только при мини-

мальном напряжении 350 в. Следует думать, что эта разница вызывается местным повышением температуры в области точечного контакта между коллектором и щеткой, благодаря которому  $U_{кр}$  и снижается с 350 до измеренного значения 150—170 в.

#### Литература

1. М. Ф. Карасев. Экспериментальное исследование процесса коммутации электрических машин постоянного тока на специальной модели, *Электричество*, № 7, 1948.
2. М. Ф. Карасев. Природа щеточного контакта электрических машин постоянного тока, *Электричество*, № 10, 1948.
3. М. Ф. Карасев. К вопросу о расчете коммутации машин постоянного тока, *Электричество*, № 7, 1949.
4. М. Ф. Карасев, В. А. Фалеев и В. П. Убеев. К вопросу существования инверсии электрических разрядов в установках с вибрирующими контактами, *Электричество*, № 9, 1950.
5. G. L. Pearson. Образование металлических мостиков между раздвинутыми контактами, *Phys. Rev.* 56, стр. 471, 1939.

[23.10.1951]



## Выбор мощности электродвигателей по нагреву

Кандидат техн. наук, доц. К. В. УРНОВ

Центральное проектно-экспериментальное бюро Центр-электромонтажа

Маркировка электродвигателя по мощности и длительном режиме работы основана на величине установившейся температуры перегрева.

Определяются значения температур перегрева, определяющие срок службы двигателей.

При повторно-кратковременном режиме работы температура перегрева двигателей монотонно повышается.

Номинальной мощности двигателя, показанной для длительного режима работы, соответствуют определенные потери, которые могут быть приняты номинальными. Если такой двигатель будет выбран для работы в повторно-кратковременном режиме, то средние потери не могут быть выше номинальных, так как даже при равенстве потерь вследствие температурных перегрузок срок службы двигателя снизится.

Выбор мощности для повторно-кратковременного режима работы осложняется неоднородностью нагрева обмотки и стали, на что обращено внимание Р. Л. Ароновым [Л. 1].

Выше отмечено, что величина допустимой температуры перегрева определяется сроком службы двигателя. Назовем эту температуру номинальной. Если двигатель, рассчитанный для длительного режима работы, будет работать в повторно-кратковременном режиме, то при неизменном сроке службы средняя температура перегрева должна быть ниже номинальной. На это обстоятельство обращено внимание В. И. Петровым и И. И. Петровым, которые рекомендуют

Указывается, что выбор мощности двигателей для повторно-кратковременного режима должен быть основан на допустимых температурных перегрузках, которые и необходимо установить.

ввести в расчеты понятие об эквивалентной температуре [Л. 2].

В современных условиях едва ли возможно с достаточной полнотой оценить достоинства или недостатки того или иного способа выбора мощности для повторно-кратковременного режима работы, так как все способы должны быть основаны на нормах по нагреву, которые давно не пересматривались.

Небезинтересно отметить, что если практически не отрываться от существующих норм, то уже может стоять вопрос о недопустимости снижения мощности двигателей против мощности производственных машин, если они даже и работают в повторно-кратковременном режиме.

Р. Л. Аронов пишет [Л. 1]: «Для взятой в качестве примера хорошо использованной короткой открытой машины с аксиальной вентиляцией только при длительности цикла 10 сек метод средних потерь дает удовлетворительные результаты». Выше было отмечено, что для циклического графика нельзя выбрать двигатель с номинальными потерями, меньше средних. Следовательно, можно сделать вывод, что двигатель МА 200 мощностью 15,8 квт, который взят Р. Л. Ароновым в примерном расчете, должен быть выбран как для длительного режима работы, если время цикла больше 10 сек. Время, равное 10 сек, весьма мало, и если это время считать предельным временем цикла для повторно-кратковременного режима работы, то практически такое решение исключает возможность снижения мощности рассматриваемого двигателя против мощ-

ности производственной машины, работающей прерывисто. С этим согласиться нельзя, так как недопустимо столь щедро идти на завышение мощности.

Приведенный пример лишь подтверждает правильность постановки вопроса о необходимости пересмотра норм.

Пользуясь случаем, остановимся и на вопросе о методе расчета мощности двигателей по средним потерям, хотя сейчас не это является главным; тревогу вызывает не судьба того или иного метода расчета, а температурные пики в отдельных частях двигателя при повторно-кратковременном режиме работы.

Существующее правило о том, что при времени цикла более 10 мин мощность двигателя должна быть взята равной мощности производственной машины, фактически предопределяет некоторое снижение срока службы двигателя при работе его в повторно-кратковременном режиме работы. В самом деле, это правило разрешает при времени цикла меньше 10 мин выбрать двигатель по эквивалентной мощности или, более точно, по средним потерям. Следовательно, выбранный таким образом двигатель будет работать с температурными пиками большими, чем номинальная температура. Это обстоятельство, резюмируя, обуславливает снижение срока службы, но в свое время, очевидно, предполагалось, что при времени цикла не более 10 мин температурные пики невелики и снижение срока службы будет мало заметным.

Едва ли такое решение следует признать неразумным, так как предельная простота метода расчета по средним потерям окупает незначительное снижение срока службы против срока службы его при длительном режиме работы, тем более, что расчет по построению графика нагрузки производственной машины обычно далек от скрупулезной точности.

Однако правило, предусматривающее единое предельное время цикла для всех разнообразных типов двигателей, приводит к тому, что температурные перегрузки их оказываются крайне различными. При одном и том же времени цикла температурные перегрузки зависят от теплоемкости и теплоотдачи частей электродвигателя, а эти величины для всех серий и всех типов двигателей весьма неодинаковы.

Если сохранить простой метод расчета по средним потерям и оставить постоянной времени

нагрева в качестве характеристики особенно двигателя, то существующее, несомненно, вершенное правило о едином времени цикла всех двигателей может быть улучшено и изменено правилом, учитывающим их индивидуальные особенности. Например, может быть установлено что предельное время цикла может быть больше одной пятой постоянной времени нагрева [Л. 3].

Для более совершенного учета нагрева отдельных частей при повторно-кратковременном режиме работы может быть введено понятие расчетной постоянной времени нагрева, но хранение постоянной времени нагрева в качестве характеристики особенностей электродвигателя будет способствовать развитию аналитических методов построения кривых нагрева.

Пересмотр правил о выборе мощности по нагреву для прерывистой работы не может исчерпывать вопроса об установлении допустимых температурных перегрузок, так как эти величины в более доступны опытному определению при испытаниях. Кроме того, независимо от износостойкости в функции температуры и времени золотой удовлетворительной работе двигателя, вероятно, должен связываться и с абсолютными значениями, максимальных кратковременных температурных перегрузок.

Учитывая, что вопрос о правильных методах выбора мощности для циклической нагрузки не делим от вопроса о номинальных температурах перегрева и практических температурных перегрузках электродвигателей и что эти вопросы могут быть самостоятельно установлены отдельными специалистами, необходимо, чтобы Министерство электропромышленности СССР поручило заводам, научно-исследовательским институтам и проектно-конструкторским организациям представить рекомендации по проекту прав выбора мощности электродвигателей по нагреву.

#### Литература

1. Р. Л. Аронов. Нагревание электродвигателей при повторно-кратковременной работе, Электричество, стр. 1 № 10, 1950.
2. В. И. Петров и И. И. Петров. О методах определения мощности электродвигателей при переменных нагрузках, Электричество, стр. 30, № 4, 1946.
3. К. В. Урнов. Электропривод полиграфических машин, Гизлегпром, учебное пособие, стр. 151, 1950.



*Работники научных учреждений и высшей школы! Обогащайте науку и технику новыми исследованиями, открытиями и изобретениями! Смелее развивайте творческую критику и самокритику в научной работе! Расширяйте и укрепляйте содружество с работниками производства! Улучшайте подготовку специалистов для народного хозяйства!*

*(Из призывов ЦК ВКП(б) к 1 Мая 1952 года)*

## Исследование режимов самозапуска и автоматического повторного пуска под нагрузкой асинхронных двигателей

*Кандидат техн. наук Г. Т. АДОНЦ*

*Энергетический институт им. Есмаи Академии наук Азербайджанской ССР*

**Введение.** Анализ аварий в энергетических системах показывает, что в ряде случаев при посадках напряжения вследствие коротких замыканий или других причин происходят массовые отключения двигателей [Л. 1]. Отключения наносят боль-

шой ущерб народному хозяйству. Задача разработки новых мероприятий, направленных к повышению динамической устойчивости узла нагрузок энергосистемы, продолжает оставаться весьма актуальной.

В ряде энергосистем в результате реконструкции защиты сетей и потребителей, внедрения режимов самозапуска асинхронных двигателей и других мероприятий число аварийных отключений потребителей снизилось. Однако даже и в их энергосистемах [Л. 2] в узлах нагрузок системы со значительным числом нагруженных асинхронных двигателей, приводящих в движение механизмы с постоянным моментом статического сопротивления, все же наблюдаются сбросы мощных нагрузок, что обусловлено трудностью разгрузки двигателей с больших скольжений вследствие понижения напряжения при их самозапуске. Согласно применяемым в энергосистемах схемам защиты двигателей отключение при самозапуске происходит ступенями через различные промежутки времени (например, 3, 6 и сек) после начала самозапуска, если продолжительность переходного процесса превосходит время уставки максимальной защиты [Л. 3]. Это показывает, что в ряде случаев самозапуск двигатели, имеющие уставку защиты в 3 сек, отключаются в 6 сек, отключаются от сети. Отключения так называемых неответственных потребителей для обеспечения успешного самозапуска нагрузок первой категории не дает желаемых результатов, так как мощность их составляет незначительную долю в общем балансе нагрузок системы. Отсутствие достаточно универсальной аналитической методики расчетов режимов самозапуска асинхронных двигателей с переменными

*Даны результаты теоретических и экспериментальных исследований режимов самозапуска асинхронных двигателей с переменными параметрами. Предложен метод автоматического повторного пуска (АПП) с выдержкой времени под нагрузкой этих двигателей, как средство повышения устойчивости узлов нагрузок энергосистем при различных аварийных режимах в системе. Предложена также методика расчета по определению числа двигателей, подлежащих оборудованию устройствами по АПП.*

параметрами  $r$  и  $x$  также является одной из причин неправильного построения схем защиты сетей двигателей потребителей, призванных обеспечить устойчивую работу узлов нагрузок энергосистемы.

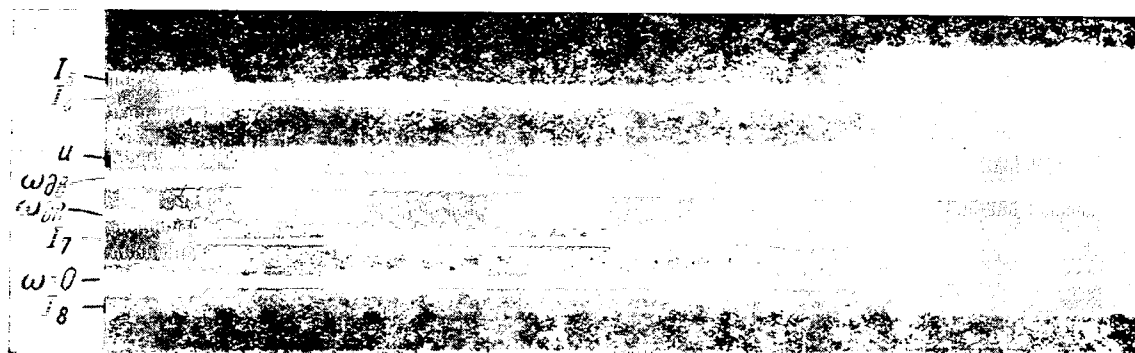
**Экспериментальные исследования режимов са-**

**мозапуска.** В двух узлах нагрузок энергосистемы с преобладанием асинхронных двигателей (типов БАМТ-138-8; АМО-138-8; БАМСО-147-8 и др.) мощностью 180—200 квт, напряжением 2 и 6 кв, приводящих в движение механизмы с постоянным моментом статического сопротивления, были проведены экспериментальные исследования режимов самозапуска с целью разработки мероприятий по предотвращению сбросов нагрузок при аварийных режимах в энергосистеме.

**Методика.** Электроснабжение двигателей 2 кв производилось через два трансформатора по 3 200 кВА, 20/2 кв,  $u_{\kappa} = 7\%$ , в свою очередь подключенных к трансформатору 5 000 кВА, 35/20 кв,  $u_{\kappa} = 17\%$  с регулировкой напряжения под нагрузкой. Напряжение устанавливалось в пределах 0,7...1,05  $U_{ном}$ . При этих уровнях напряжения осуществлялись перерывы электроснабжения для отдельных групп двигателей (до 6). Продолжительность перерыва электроснабжения изменялась в пределах от 0,5 до 7 сек при времени выбега агрегатов в пределах 5...6 сек и коэффициентах их загрузки от 0,68 до 0,9. Опыты проводились также и в другом узле нагрузок с двигателями 6 кв при уровнях напряжения 0,95...1  $U_{ном}$ . Осциллографировались ток статора, скорость валов двигателя и механизма, а также напряжения на зажимах двигателей и трансформатора.

Режимы самозапуска двигателей при перерывах электроснабжения различной длительности являются наиболее показательными среди разнотипных режимов, имеющих место при различного рода авариях и срабатывании автоматических устройств в энергосистеме. Предполагается, что кривые изменения напряжения, записываемые





Продолжение

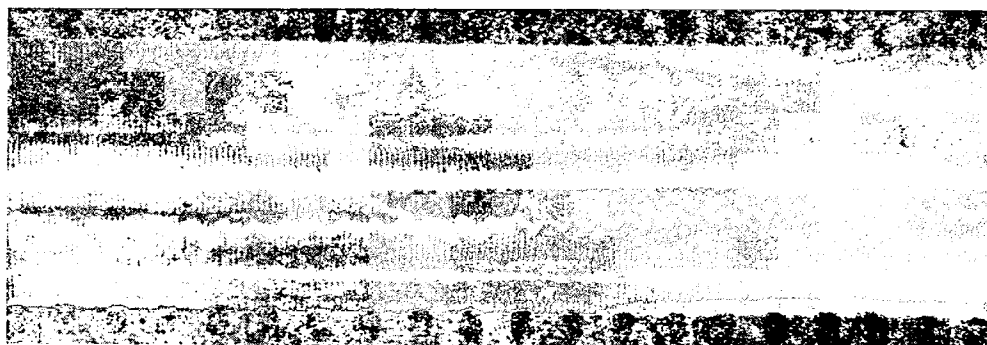


Рис. 1. Токи  $I_5, I_6, I_7, I_8$  статоров двигателей 5, 6, 7, 8;  $\omega_{05}, \omega_{06}$  — угловые скорости двигателей 5 и 6;  
 $u$  — напряжение на шинах трансформатора 5 000 квт, 110/35/6 кв.

вольтметрами в узлах нагрузок при аварийных режимах, можно заменить эквивалентным прямоугольником изменения напряжения для разрывов трех фаз линии электроснабжения.

Опыты с перерывом электроснабжения длительностью, превосходящей время выбега агрегатов, преследовали цель выявить возможность автоматического повторного пуска крупных, загруженных асинхронных двигателей без предварительной разгрузки приводимых механизмов (в частности, поршневых компрессоров, обладающих постоянным моментом статического сопротивления).

**Результаты опытов.** Было установлено, что короткозамкнутые асинхронные двигатели с переменными параметрами  $r$  и  $x$  мощностью по 180...200 квт, приводящие в движение механизмы с постоянным моментом  $M_c = (0,7...0,9) M_{ном}$ , при перерывах электроснабжения различной продолжительности и уровнях напряжения на зажимах двигателя (0,7...0,9)  $U_{ном}$  вполне успешно разворачиваются до нормальной скорости. Время самозапуска в большинстве имеющих практическое значение случаев не превосходит 10 сек, иначе говоря, лежит в пределе, допускаемом по условиям тепловой перегрузки обмотки от пусковых токов. Законы изменения скольжения двигателей в режимах выбега и разбега оказались линейными. Зависимость  $s=f(t)$  для выбега согласовывается с формулой (4), а для разбега — с формулой (7) (см. ниже).

Опыты по самозапуску были распространены на все двигатели указанных узлов нагрузок. Число опытов с отдельными агрегатами (при различных уровнях напряжения и продолжительности перерыва электроснабжения) доходило до 15. Данные ряда опытов по самозапуску на одиннадцати различных агрегатах приведены в таблице. Для каждого опыта, кроме типа машины агрегатов и номера осциллограммы, указаны моменты статического сопротивления в долях номинального, продолжительность перерыва электроснабжения, напряжение при самозапуске в долях номинального, скольжение, которое достигалось двигателем в режиме выбега, время самозапуска по данным опыта и по предлагаемой в настоящей статье формуле (8), а также результаты их сопоставления.

Как видно из таблицы, двигатели запускались из любых скольжений, включая единицу. Возможность самозапуска со скольжения, равного единице асинхронных двигателей, нагруженных механизмами с постоянным статическим моментом, при значениях коэффициентов загрузки до 0,9 является наиболее важным результатом проведенных экспериментальных исследований.

Число опытов по самозапуску с  $s_0=1$  различных агрегатов в ряде узлов нагрузок системы достигало нескольких десятков. В результате установлена возможность широкого внедрения в практику энергосистем и потребителей метода автоматического повторного пуска (АПП) под

Данные опыта и расчета времени самозапуска и пуска под нагрузкой асинхронных агрегатов

Параметры режима самозапуска	Номер агрегата Осциллограмма	БАМТ-138-8		АМО-138-8		БАМСО-147-8		БАМСО-147-8		БАМСО-148-8	
		72	82	50	52	Т35	Т38	35	23	Т30	Т31
Момент сопротивления в долях номинального $M_c$ . . . . .		0,74	0,74	0,76	0,76	0,78	0,73	0,81	0,81	0,72	0,72
Время перерыва электроснабжения $t_{пер}, сек$ . . . . .		1,28	1,55	0,92	6,00	2,81	6,00	1,69	1,53	2,56	3,09
Напряжение в долях номинального $U$ . . . . .		0,85	0,76	0,96	0,95	0,95	0,97	0,85	0,89	0,91	0,90
Время самозапуска $\tau_3, сек$ . . . . .		2,14	6,10	0,63	7,10	3,53	6,44	2,85	2,12	3,06	4,11
Скольжение по (4) $s_0$ . . . . .		0,26	0,30	0,19	1,00	0,53	1,00	0,34	0,31	0,49	0,58
Функция $F(s_0)$ по (8) . . . . .		1,61	1,60	1,95	1,44	1,53	1,38	1,68	1,70	1,53	1,53
$u^2 F(s_0) - M_c$ . . . . .		0,42	0,19	1,03	0,54	0,60	0,56	0,40	0,53	0,58	0,52
$J_{\omega_0}(s_0 - s_H)$ . . . . .		0,93	1,08	0,68	3,82	2,22	3,82	1,25	1,13	1,83	2,18
Время самозапуска по (8) $\tau_s$ . . . . .		2,21	5,70	0,66	7,10	3,70	6,83	3,12	2,13	3,16	4,20
$\tau_3 : \tau_s$ . . . . .		0,97	1,07	0,96	1,00	0,97	0,94	0,92	1,00	0,97	0,98

зкой отключившихся вследствие неуспешного самозапуска или отключаемых перед самозапуском крупных асинхронных агрегатов.

В качестве иллюстрации на рис. 1 и 2 приведены осциллограммы, полученные при опытах. Осциллограмме Т30 (рис. 1) представлен режим одновременного самозапуска четырех агрегатов 5, 6, 7, 8 после перерыва электроснабжения в 2,6 сек. На осциллограммах рис. 2 (Т38) представлены режимы отключения и повторного пуска под нагрузкой агрегатов 14 и 15. Данные режимов приведены в таблице.

**Метод АПП двигателей как мера повышения численной устойчивости узла нагрузок.** Пониженные напряжения в системе при различного рода аварийных режимах в ряде случаев приводят к потере устойчивости узлов нагрузок, в которых преобладающими являются асинхронные агрегаты. Предотвращения массовых аварийных отключений потребителей среди ряда мероприятий, направленных к повышению устойчивости системы, выдвигались также предложения о частичном сбросе нагрузки в зависимости от уровня пониженного напряжения [Л. 4] или сбросе нагрузки в зависимости от продолжительности режима самозапуска основных потребителей [Л. 3]. Обосновать эти предложения на идеях сохранения устойчивости как системы в целом, так и узлов нагрузки системы. Опыт показывает, что сброс нагрузки по высоковольтным линиям питания не только от признака, по которому этот сброс производится, приводит к длительному нарушению технологического процесса ряда предприятий отдельных его элементов.

Представляется более целесообразным при аварийных режимах в системе сбросы части нагрузки производить непосредственно на предприятиях с тем, чтобы по истечении некоторого короткого времени (порядка 10...20 сек) отключенные двигатели группами автоматически

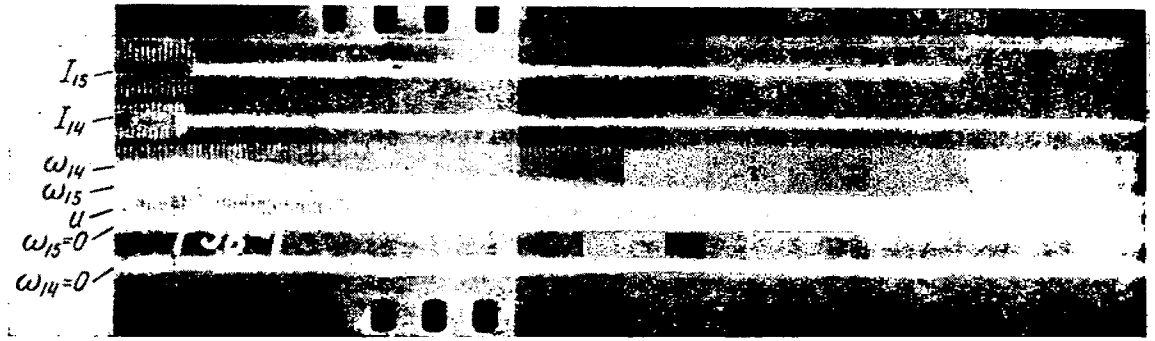
повторно запускались без разгрузки приводимых механизмов, как было показано выше. Выдержку времени АПП отключенного двигателя с момента восстановления (или появления) напряжения можно устанавливать при помощи реле времени автоматики.

В качестве агрегатов для оборудования их устройствами автоматического повторного пуска могут быть выбраны такие, на которых перерывы в работе продолжительности 10...30 сек не приводят к нарушениям технологии производства. Признак, по которому следует отключать двигатель от сети при аварийных режимах, безразличен, важно то, чтобы эти двигатели были оборудованы устройствами АПП. Количество отключаемых двигателей, порядок включения и другие количественные соотношения могут быть определены расчетом.

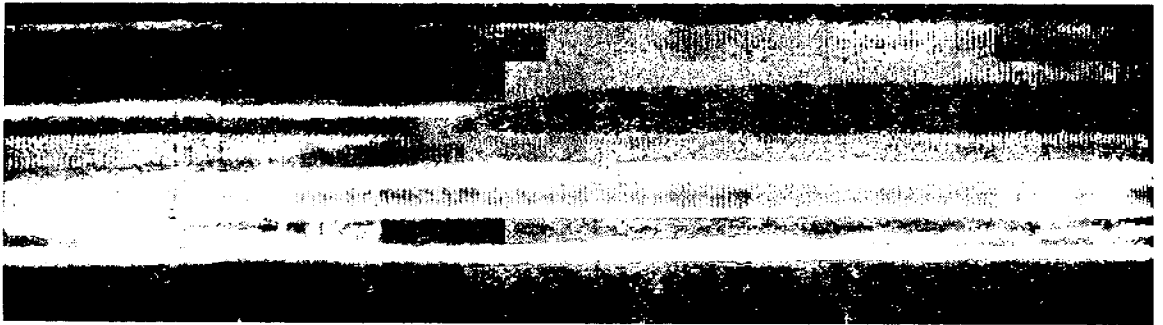
Например, сочетая предлагаемый метод АПП с принципом отключения двигателей по признаку продолжительности режима самозапуска, можно рекомендовать следующую систему самозапуска и АПП узла нагрузки системы.

Согласно принципу самозапуска двигатели разбиваются на несколько групп (например, четыре). Каждый двигатель снабжается органами выдержки времени отключения двигателя от токов самозапуска (например,  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4$  сек).

При авариях в системе, когда время самозапуска двигателей оказывается меньше  $\tau_1$ , ни один из двигателей узла нагрузки не отключается. Если время окажется в интервале между  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , защитой отключаются двигатели группы  $\tau_1$ . Соответственно при времени самозапуска от  $\tau_2$  до  $\tau_3$  защитой отключаются двигатели групп  $\tau_1$  и  $\tau_2$  и т. д. Для предотвращения подобных отключений предлагается часть двигателей из группы  $\tau_4$  оборудовать устройствами АПП, которые



Продолжение



Продолжение

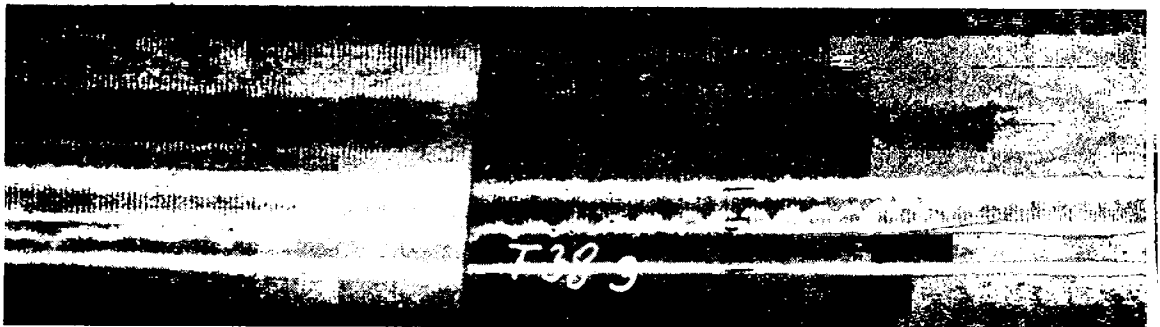


Рис. 2. Токи статоров двигателей 14, 15;  $\omega_{14}$ ,  $\omega_{15}$  — угловые скорости вала двигателей 14 и 15.  
 $U$  — напряжение на шинах трансформатора 3 200 кв, 20/2 кв.

отключаются с начала самозапуска с тем, чтобы после завершения режима самозапуска оставшихся двигателей поочередно, ступенями с определенной выдержкой времени, автоматически повторно запускались.

Методика расчета предлагаемой системы самозапуска и применения АПП двигателей дана в конце статьи.

При весьма тяжелых авариях в системе, связанных с отключением генерирующей мощности, возможен неуспешный режим автоматического повторного пуска части двигателей, что, по существу, будет дополнять ныне используемую систему разгрузки по частоте. При ряде различных видов коротких замыканий в высоковольтных сетях и срабатывании устройств системной

автоматики, приводящих узлы нагрузок к глубоким посадкам напряжения или кратковременному перерыву электроснабжения благодаря описанной выше системе самозапуска и устройством АПП двигателей можно избежать сброса нагрузок. Рекомендуемая система в настоящее время внедряется в ряде узлов нагрузок энергосистемы. На рис. 3 приведена осциллограмма режима отключения и АПП двигателя (БАМТ-138-8, 190 квт, 2 кв, приводящего в движение компрессор СГ-50).

Некоторые вопросы расчета режимов самозапуска. Отсутствие методики, удобной для практических расчетов режимов самозапуска асинхронных двигателей с переменными параметрами  $r$  и  $x$ , приводит к затруднениям при рас

	Выражения $s_0 = f(t_{nep})$
<p>1</p> <p><math>M_c = const</math></p>	$s_0 = s_H + \frac{(1 - s_H) M_c}{T_{выб}^{ном} M_H} t_{nep} \text{ или } s_0 = s_H + \frac{M_c t_{nep}}{J \omega_0}$
<p>2</p> <p><math>M_c = M_0 + (M_p - M_0)(1 - s)</math></p>	$s_0 = \left( s_H + \frac{1}{a} \right) e^{abt_{nep}} - \frac{1}{a}$ <p>где <math>a = \frac{M_p}{M_0} - 1</math></p>
<p>3</p> <p><math>M_c = M_0 + (M_p - M_0)(1 - s)^2</math></p>	$s_0 = 1 - \frac{1 - s_H - \frac{1}{\sqrt{a}} \operatorname{tg} \beta}{1 + \sqrt{a}(1 - s_H) \operatorname{tg} \beta}$ <p><math>b = \frac{M_0}{J \omega_0}</math></p> <p><math>\beta = b \sqrt{a} t_{nep}</math></p>
<p>4</p> <p><math>M_c = (M_p - M_0)(1 - s)^p</math></p> <p><math>p \neq -1</math></p>	$s_0 = 1 - e^{-\frac{1}{p-1} \ln[(1-s_H)^{1-p} + \frac{p-m_0}{J \omega_0} (p-1) t_{nep}]}$ <p>где <math>\rho = \frac{M_p}{M_H}</math>, <math>m_0 = \frac{M_0}{M_H}</math></p>
<p>5</p> <p><math display="block">M_c = \sum_{i=0}^n M_i^c \cos \Omega i t +</math></p> <p><math display="block">+ \sum_{i=1}^n M_i^s \sin \Omega i t</math></p>	$s_0 = s_H + \frac{1}{J \omega_0} \sum_{i=0}^n \frac{M_i^c}{\Omega i} \sin \Omega i t_{nep} + \frac{1}{J \omega_0} \sum_{i=1}^n \frac{M_i^s}{\Omega i} (1 - \cos \Omega i t_{nep})$

В таблице  $T_{выб}^{ном}$  — время выбега при статическом моменте сопротивления, равном номинальному.

Последующие приближения. Первое, второе и последующие  $n$  приближения определяются формулой (4а)

Функция под интегралом является известной и непрерывной, и все последующие приближения  $s_n$  вычисляются квадратурой. Ниже даны вычисления первого и второго приближений  $s_1$  и  $s_2$ .

$$s_n = s_0 + \frac{1}{J \omega_0} \int_0^t [M_c(t, s_{n-1}) - U^2 \sum_{i=1}^4 M_i e^{-a_i s_{n-1}}] dt, \quad (4a)$$

где  $s_{n-1}$  — скольжение при  $n-1$  приближении.

для механизмов с различными видами характеристик.

Характеристики $M_c(t, s)$	$s_1(t)$	$s_2(t)$
1	$s_1 = s_0 - C_0 t,$	$s_2 = s_{01} + \frac{M_c t}{J \omega_0}$
2	<p>где</p> $C_0 = \frac{1}{J \omega_0} \left[ U^2 \sum_{i=1}^4 M_i e^{-a_i s_0} - M_c(s_0) \right]$	$s_2 = s_{01} + \left[ M_0 + (M_p - M_0) \left( 1 - s_0 + C_0 \frac{t}{2} \right) \right] \frac{t}{J \omega_0}$
3	$s_{01} = s_0 - \frac{U^2}{J \omega_0 C_0} \sum_{i=1}^4 \frac{M_i}{a_i} (e^{-a_i s_1} - e^{-a_i s_0})$	$s_2 = s_{01} + \left\{ M_0 + (M_p - M_0) \left[ (1 - s_0)(1 - C_0 t) + C_0^2 \frac{t^2}{3} \right] \right\} \frac{t}{J \omega_0}$
4	$s_{02} = s_0 + \frac{1}{J \omega_0} \left\{ \sum_{i=0}^n \frac{M_i^c}{\Omega i} \sin \Omega i t + \sum_{i=1}^n \frac{M_i^s}{\Omega i} (1 - \cos \Omega i t) \right\}$	$s_2 = s_{01} + \left[ (M_p - M_0) \frac{(1 - s_0 + C_0 t)^{p+1}}{C_0 (p+1)} \right] \frac{1}{J \omega_0}$
5	$s_1 = s_{02} - \frac{t}{J \omega_0} U^2 \sum_{i=1}^4 M_i e^{-a_i s_0}$	$s_2 = s_{02} - \frac{U^2}{J \omega_0} \int_0^t \sum_{i=1}^4 M_i e^{-a_i s} dt$

е  $M_c(s_0)$  — статический момент сопротивления механизма при  $s = s_0$ .

Согласно теореме существования для решения уравнения (3) для  $n-1$  приближения необходимо выполнение следующего неравенства:

$$|s_{n-1} - s_0| \leq M_c t - t_0 \quad (6)$$

или при  $t_0 = 0$

$$\frac{s_{n-1} - s_0}{t} \leq M_c,$$

где  $M_c$  — максимум функции под интегралом (3);  $s_{n-1}$  — скольжение двигателя при  $n-1$  приближении.

Рассматривая устойчивые режимы самозапуска, для которых может быть принято за  $s_n - 1$  номинальное скольжение электродвигателя ( $s_H$ ),  $t$  — время самозапуска  $\tau_s$ , можно написать соотношение

$$\frac{s_{n-1} - s_0}{t} = \frac{s_H - s_0}{\tau_s} \quad (7)$$

Примем (7) в качестве выражения скольжения двигателя при  $n-1$  ом приближении, что допустимо для ряда агрегатов, когда по данным опыта закон изменения скорости в режиме самозапуска является линейным или может быть линеаризован.

$n$ -е приближение (конец режима самозапуска). Пользуясь формулой (4а), в которой качество скольжения для  $n-1$  приближения принимается условие (7), можно получить следующие выражения для определения времени самозапуска агрегатов с различными видами характеристик  $M_c(t, s)$ :

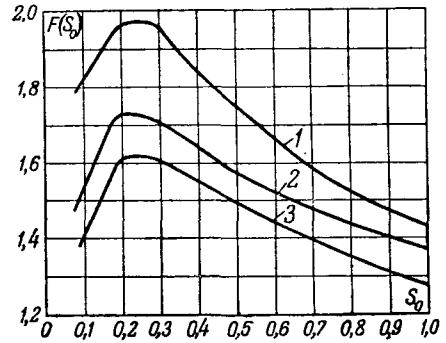


Рис. 4. Функция  $F(s)$  для трех типов двигателей.

1 — двигатель АМО-138-8, 190 квт; 2 — БАМСО-148-8; 3 — БАМТ-138-8, 200 квт.

где

$$F(s_0) = \frac{1}{s_0 - s_H} \sum_{i=1}^4 \frac{M_i}{a_i} (e^{-a_i s_H} - e^{-a_i s_0}).$$

Для режимов самозапуска под нагрузкой в этих формулах принимается  $s_0 = 1$ .

Параметры  $M_i, a_i$ , необходимые для построения функции  $F(s_0)$ , вычисляются согласно выражениям в приложении I.

На рис. 4 представлены использованные в настоящей статье графики функций  $F(s_0)$ , построенные по параметрам трех типов двигателей, применяемых на компрессорных станциях нефтепромыслов

Пользуясь формулами (8), можно определить также значение напряжения  $U$  или  $F(s_0)$ , при ко-

$$s_n = s_0 + \frac{1}{J\omega_0} \int_0^{\tau_s} \left[ M_c(t, s_{n-1}) - U^2 \sum_{i=1}^n M_i e^{-a_i \left( s_0 - \frac{s_0 - s_H}{\tau_s} t \right)} \right] dt.$$

Характеристики $M_c(t, s)$	$\tau_s = f(s_0)$	(8)
$M_c = const$	$\tau_s = \frac{J\omega_0 (s_0 - s_H)}{U^2 F(s_0) - M_c}$	
$M_c = M_0 + (M_p - M_0)(1 - s)^p$	<p>где</p> $\tau_s = \frac{J\omega_0 (s_0 - s_H)}{U^2 F(s_0) - M_c(s_0)}$ $M_c(s_0) = M_0 + (M_p - M_0) \frac{(1 - s_H)^{p+1} - (1 - s_0)^{p+1}}{(s_0 - s_H)(p+1)}$	
$M_c = \sum_{i=0}^n M_i^c \cos \Omega i t + \sum_{i=1}^n M_i^s \sin \Omega i t$	$\tau_s U^2 F(s_0) - \sum_{i=0}^n \frac{M_i^c}{\Omega i} \sin \Omega i \tau_s - \sum_{i=1}^n \frac{M_i^s}{\Omega i} (1 - \cos \Omega i \tau_s) = J\omega_0 (s_0 - s_H)$	

тором может быть завершен режим самозапуска агрегата в заданные промежутки времени, в частности в течение времени допустимой тепловой перегрузки двигателя от пусковых токов.

Результаты расчета  $\tau_s$  по первой из формул (8) для различных агрегатов и режимов самозапуска при значениях  $M_c$ ,  $U$ ,  $t_{пер}$ , соответствующих условиям опыта, приведены в таблице. Сопоставления данных расчета  $\tau_s$  и опыта показывают, что эти данные имеют расхождения в пределах  $\pm 5\%$ . Для значений  $s_0$ , близких к единице, результаты расчетов оказываются меньше данных опыта в пределах до  $10\%$ .

На основе формулы (8) разработана методика определения  $\tau_3$  по данным трех простых опытов (приложение II).

**Выбор числа двигателей, оборудуемых устройствами АПП.** Расчет режимов самозапуска и АПП двигателей узлов нагрузок для предотвращения сброса нагрузок при различных аварийных режимах в энергосистеме, как было показано выше, может быть сведен к определению числа (мощности) двигателей, подлежащих оборудованию устройствами АПП. Может быть рекомендована следующая упрощенная методика расчета.

Производится выбор асинхронных агрегатов, на которых по условиям технологии производства могут быть установлены устройства АПП. Для ряда типовых электродвигателей узла нагрузки по опытным данным определяются параметры  $M_i$ ,  $a_i$  (согласно формулам приложения I).

По этим параметрам строится кривая функции  $F(s_0)$ . Для этих же двигателей определяется время  $\tau_{доп}$  — допустимой тепловой перегрузки обмотки от пусковых токов.

Производится разбивка двигателей на несколько групп (например, четыре). Выбор уставок времени максимальной защиты для отдельных групп двигателей при режимах их самозапуска производится в пределах  $\tau_{доп}$  (например,  $\tau_1 =$

$$= \frac{\tau_{доп}}{4}; \tau_2 = \frac{2\tau_{доп}}{4}; \tau_3 = \frac{3\tau_{доп}}{4} \text{ и } \tau_4 = \tau_{доп}).$$

Число двигателей в отдельных группах определяется согласно кривой селективности защиты питающей линии данного узла нагрузки.

На основе анализа аварийных материалов данной энергосистемы или узла нагрузки определяется продолжительность ( $t_{пер}$ ) перерыва электроснабжения, на которую следует вести расчет. В качестве  $t_{пер}$  может быть взята наибольшая продолжительность перерыва, имеющего место при срабатывании устройств системной автоматики, или время, представляющее собой основание прямоугольника, по площади, эквивалентного площади над кривой изменения напряжения, зафиксированной при тяжелых авариях в энергосистеме. Расчетное время может лежать в пределах 1...2,0 сек.

По величине  $t_{пер}$ , пользуясь формулами (4), определяется величина скольжения  $s_0$ , достигаемого агрегатом в режиме выбега.

По схеме замещения узла нагрузки определяется значение напряжения на зажимах двига-

телей при замещении их сопротивлениями, соответствующими скольжению  $s_0$ .

По формулам (8) определяется время запуска этих агрегатов и сопоставляется временем уставок максимальной защиты отдельных групп двигателей (например,  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ ). При этом может быть установлено одно из следующих неравенств:

$$\tau_s < \tau_1, \tau_s > \tau_1, \tau_s > \tau_2, \tau_s > \tau_3, \tau_s > \tau_{доп}.$$

Число и мощность двигателей, подлежащих оборудованию устройствами АПП, определяются согласно неравенствам (9). При  $\tau_s < \tau_1$  устройства АПП не устанавливаются.

При  $\tau_s > \tau_1$  мощность двигателей, подлежащих оборудованию устройствами АПП, равна мощности группы двигателей с уставкой  $\tau_1$ .

При  $\tau_s > \tau_2$  мощность двигателей с АПП равна мощности групп двигателей с уставками  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

Двигатели, оборудованные АПП, входят в группу с уставкой времени максимальной защиты, равной  $\tau_{доп}$ .

Двигатели с АПП желательно снабдить органами, создающими полусекундную выдержку перед их отключением во избежание ненужных срабатываний устройств АПП при перерывах электроснабжения меньше 0,5 сек.

Аналогично может быть разработана методика расчета мощности двигателей, оборудуемых устройствами АПП, если отключение двигателя производится по другому признаку (например, напряжению).

**Выводы.** 1. Для предотвращения отключения в узлах нагрузок энергосистемы мощных асинхронных двигателей и повышения динамической устойчивости узла нагрузки при различных аварийных режимах в электрических сетях могут быть рекомендованы к широкому внедрению режимы самозапуска в сочетании с режимом автоматического повторного пуска под нагрузкой (с выдержкой времени  $\tau_{с.он}$ ) двигателей, отключаемых перед самозапуском или отключившихся из-за неуспешного самозапуска.

2. Для расчетов режимов самозапуска асинхронных двигателей с переменными параметрами  $r$  и  $x$  могут быть использованы предлагаемые в статье расчетные формулы.

3. Предлагается упрощенная методика определения числа двигателей, подлежащих оборудованию устройствами по их автоматическому повторному пуску.

4. Для определения возможности пуска под нагрузкой на агрегатах с  $M_c = \text{пост.}$  рекомендуется метод трех простых опытов.

В экспериментальных работах принимал участие ряд инженеров и техников Энергетического института, энергосистемы, нефтестров Орджоникидзенефть, Бузовнынефть и Азизбековнефть.

В проведении опытов автору оказали содействие руководящие инженеры энергосистемы и Азнефти товарищи: А. Н. Попов, М. А. Бабаев, М. А. Искендеров, Т. Н. Мирзоев, Ю. М. Коновалов, А. С. Дорошинский, А. Н. Петросян.

**Приложение I. Аппроксимация механической характеристики асинхронного двигателя экспоненциальной функцией.** В статье [Л. 7] показано, что механическую характеристику асинхронного двигателя с постоянными параметрами  $r$  и  $x$  можно с достаточной для практических расчетов точностью аппроксимировать при помощи их экспоненциальных функций вида

$$M(s) = M_k e^{a_1 s_k} (e^{-a_1 s} - e^{-a_2 s}).$$

двигателя с переменными параметрами  $r$  и  $x$  аппроксимацию можно выполнить при помощи четырех экспонент

$$M(s) = \sum_{i=1}^4 M_i e^{-a_i s}, \text{ где коэффициенты } M_i, a_i \text{ вычисляются по формулам: } a_1 = 2 \ln \frac{M_{0,5}}{M_n}; a_2 = \frac{4 \dots 6}{s_k}; a_3 =$$

$$a_4 = \frac{3 \dots 6}{0,5 \dots 0,75} \text{ (должно быть } a_4 > a_3); M_1 =$$

$$= -M_2 = M_n e^{a_1};$$

$$M_3 = -M_4 = \frac{M_k - M_n e^{a_1 (1-s_k)}}{e^{-a_3 s_k} - e^{-a_4 s_k}}.$$

Выбор значений коэффициентов  $a_2, a_3, a_4$  в указанных выше пределах определяется таким образом, чтобы получить большую точность приближения аппроксимации к действительной характеристике  $M(s)$ .

Необходимые для аппроксимации параметры двигателя  $s_n, s_k, M_n (s=1), M_k (s=s_k), M_{0,5} (s=0,5)$  могут быть получены из опыта или по формуле [Л. 5].

Для рассматриваемых в статье трех типов двигателей используются следующие величины  $M_i, a_i$ :

Тип двигателя	$s_n$	$s_k$	$M_n$	$M_k$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$M_1$	$M_3$
МО-138-8, 190 квт, 2 кв . . . . .	0,02	0,079	1	2,16	0,228	50,5	6	12	1,28	3,83
АМСО-147-8, 200 квт, 2 кв . . . . .	0,015	0,100	1,1	1,9	0,10	40	6	12	1,216	2,81
АМТ-138-8, 190 квт, 2 кв . . . . .	0,02	0,141	1	1,9	0,19	28,4	6	12	1,21	2,58

**Приложение II. Определение возможности пуска агрегата под нагрузкой по данным трех простых опытов.** Такая необходимость связана с тем, что, во-первых, расчеты требуют экспериментальной проверки, во-вторых, определение функции  $F(s)$  и других элементов, входящих в расчетную формулу (8), сопряжено со значительными затруднениями. Простой вид первых из формул (8) (для механизмов  $M_c = \text{пост}$ ) позволяет на ее базе разработать метод определения продолжительности времени пуска агрегата под нагрузкой по данным косвенных опытов. Сущность этого метода заключается в следующем. Последовательно производятся

Первый опыт. Отключается от сети двигатель, работающий под нагрузкой, определяемой рабочим моментом статического сопротивления  $M_{c,n}$ . Определяется время выбега агрегата.

Второй опыт. Разгружается приводимый механизм производится пуск агрегата при моменте  $M_{c,x}$ . Определяется время  $\tau_2$  пуска разгруженного механизма и напряжение на зажимах двигателя при пуске  $U_2$ .

Третий опыт. Отключается от сети двигатель определяется время  $\tau_3$  выбега разгруженного агрегата. Второй пуск разгруженного агрегата можно использовать в повторении второго опыта для получения второго значения  $\tau_2$ . В дальнейшем расчете можно использовать среднее из двух значений  $\tau_2$ .

Для этих опытов могут быть записаны следующие три расчетные формулы по типу (8):

$$-\tau_1 = \frac{J\omega_0(1-s_n)}{-M_{c,n}(s_0)}, \quad (II,1)$$

$$\tau_2 = \frac{J\omega_0(1-s_n)}{U_2^2 F(s_0-1) - M_{c,x}(s_0)}, \quad (II,2)$$

$$-\tau_3 = \frac{J\omega_0(1-s_n)}{-M_{c,x}(s_0)}. \quad (II,3)$$

Для опыта (который пока не производится) пуска агрегата под нагрузкой при  $M_{c,n}$  и напряжении на зажимах двигателя  $U_2$  можно записать также

$$\tau_{n,n} = \frac{J\omega_0(1-s_n)}{U_2^2 F(s_0-1) - M_{c,n}(s_0-1)}. \quad (II,4)$$

Совместное решение записанных выше четырех формул дает следующую расчетную формулу для определения продолжительности пуска агрегата под нагрузкой:

$$\tau_{n,n} = \frac{1}{\frac{\tau_2 + \tau_3}{\tau_2 \tau_3} - \frac{1}{\tau_1}}. \quad (II,5)$$

Результаты расчета  $\tau_{n,n}$  по формуле (II,5) и сопоставление с данными эксперимента  $\tau_{n,n}$

Наименование	Номер агрегатов							
	3	5	6	7	11	15	16	
напряжения при пуске . . . . .	0,94	0,86	0,84	0,935	0,855	0,845	0,85	
режим без загрузки (опыт) {	$\tau_1$ . . . . .	4,86	5,65	4,20	4,87	5,15	5,87	5,85
	$\tau_2$ . . . . .	3,53	4,99	4,05	3,89	5,30	3,44	5,68
	$\tau_3$ . . . . .	11,85	15,3	11,21	13,0	13,6	17,7	12,7
значение $\tau_{n,n}$ по формуле (II,5) . . . . .	6,2	11,6	10,2	7,83	14,7	5,50	12,1	
(опыт) . . . . .	6,20	11,22	10,1	7,78	15	5,44	11,2	
$\tau_{n,n}$ . . . . .	1,00	0,97	0,99	1,00	0,98	0,99	0,93	

Возможность пуска под нагрузкой определяется согласно условию

$$\tau_{лн} \leq \tau_{\partial} \quad (II,6)$$

где  $\tau_{\partial}$  — допустимое время тепловой перегрузки изоляции обмотки статора от действия пусковых токов принимается известным для конкретных типов двигателей.

Предлагаемая методика определения  $\tau_{лн}$  была использована для ряда конкретных объектов. Результаты опыта<sup>1</sup> и сопоставление их с данными расчета по формуле (II,5) приводятся в таблице.

Экспериментальные исследования режимов самозапуска и пуска под нагрузкой крупных асинхронных агрегатов, проведенные в двух новых узлах нагрузок энергосистемы, дали под-

<sup>1</sup> Эти опыты были проведены под руководством Г. Т. Адонца, А. Н. Попова и М. А. Бабаева при участии С. А. Алескерова, А. А. Хачатурова, Г. С. Шелевого, Э. Мирзамамедовой и Д. Б. Райчиной.

тверждение правильности предлагаемых рекомендаций и расчетных формул. Результаты исследования внедряются.

#### Литература

1. Повышение надежности работы потребителей. Плуатационный циркуляр № 7/Э Технического управления МЭС СССР, Госэнергоиздат, 1950.
2. М. П. Розенкоп. Некоторые вопросы проектирования АПВ в энергосистемах Министерства электростанций. Электрические станции, № 8, 1948.
3. И. А. Сыромятников. Режимы работы асинхронных двигателей, Госэнергоиздат, 1950.
4. И. М. Маркович, В. С. Малов и В. К. Марков. Устройство для предотвращения нарушения статической устойчивости электросистем, Электрические станции № 10 — 11, 1940.
5. А. А. Эфендизаде. Зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения, Электричество, № 1950.
6. В. В. Степанов. Курс дифференциальных уравнений, Гостехиздат, 1950.
7. Г. Т. Адонц. Аппроксимация механической характеристики асинхронного двигателя экспоненциальной функцией, Известия Академии наук Азербайджанской, № 3, 1951.

[5. 11. 1]



## О расчетах и исследовании электрических промышленных нагрузок

Инж. С. М. ЛИВШИЦ

Москва

Несмотря на то, что работы по созданию теории расчета электрических нагрузок и по исследованию фактических нагрузок (коэффициентов спроса) передовых промышленных предприятий<sup>1</sup> ведутся на протяжении ряда лет, положение остается неудовлетворительным. Для большинства отраслей промышленности (черная и цветная металлургия, уголь, нефть, химия и др.) почти нет проверенных расчетных коэффициентов и формул.

Изучения фактических нагрузок, проводимого одной проектной организацией, даже такой крупной, как Московское проектно-конструкторское управление Центроэлектромонтажа, совершенно недостаточно. Необходимых результатов можно достигнуть лишь совместными усилиями энергетиков промпредприятий и энергосбытов и только в том случае, если накопленные данные будут систематически анализироваться проектными и наладочными организациями различных министерств. Организующая роль в этом деле должна

<sup>1</sup> Первые работы по исследованию фактических коэффициентов спроса выполнялись в 1927—1929 гг. в связи с переводом станков с трансмиссионного привода на оди-

*Доказывается целесообразность пользования при расчете электросетей промышленных предприятий методом, принятым в системе Главэлектромонтажа и основанным на принципе средних нагрузок, первичных данных и двухчленных формул. Раскрывается физический смысл и приводится методика определения ожидаемых средних и максимальных нагрузок узлов электросетей. Приводятся соображения об определении мощности трансформаторов, расхода электроэнергии и экономической плотности тока. Печатается в порядке обсуждения.*

принадлежать Госинстанции по промэнергетики и энергонadzору [Л. 1].

Существенной посылкой для успешной работы является создание единой и простой структуры по измерению и обработке матери-

Инструкция должна опираться на научно обоснованную теорию расчета нагрузок.

**О максимальных и средних нагрузках.** В практике обычно имеют дело с тремя видами электрических нагрузок: а) средними за относительно продолжительный отрезок времени — смену, сутки, месяц, год ( $P_{cp}$ ); б) среднеквадратичными также за смену, сутки, месяц, год ( $P_{кв}$ ); в) максимальными за относительно небольшой отрезок времени — от нескольких секунд до нескольких часов ( $P_{м}$ ). По средней нагрузке легко определяется расход энергии, по среднеквадратичной в большинстве случаев производится выбор трансформаторов, подсчет потерь энергии, выбор экономических сечений проводов и по максимальной выбираются проводники и аппараты из условий нагрева.

В течение многих лет средним нагрузкам придавалось должного значения. В частности:



выбор экономических сечений производился по ожидаемой максимальной нагрузке  $P_m$  и числу часов максимума потерь  $\tau$ . Подсчет ожидаемого расхода энергии производился также по максимальной нагрузке и числу часов ее исполнения ( $T_u$ ).

Величины  $T_u$  и  $\tau$  сугубо эмпирические, данные о них чрезвычайно скудны, их определение при расчетах представляет значительные трудности. Особенно эти трудности велики при смешанной (неоднородной) нагрузке.

В [Л. 3] значения  $T_u$  и  $\tau$  даны для предприятий в целом лишь нескольких отраслей промышленности и без указания, к максимуму какой продолжительности они относятся. А между тем в электросетях одних и тех же предприятий имеются узлы и линии с весьма различным значением  $T_u$  — от нескольких сот до нескольких тысяч часов.

Сам метод расчета нагрузок промышленных сетей и районных сетей, в которых преобладают промышленные потребители, с помощью величин  $P_m$ ,  $T_u$  и  $\tau$  является чрезвычайно сложным. Появление этого метода относится к концу XIX в., когда преобладали осветительные сети, нагрузка которых меняется в широких пределах как на протяжении суток, так и в течение года и для которых расчеты по  $P_m$ ,  $T_u$  и  $\tau$  являются единственно возможными.

Данные о средних суточных и сменных нагрузках, относящихся к предприятиям, цехам и характерным группам электроприемников (кранам, станкам и т. д.), добываются легче и являются более точными при расчете расхода энергии и выборе экономических сечений. Они непосредственно зависят от технологии промышленных производств и поэтому для данной технологии являются величинами характерными и устойчивыми. Во многих случаях их легко получить из опытных данных об удельных расходах энергии на тонну стали, кубометр воздуха, квадратный метр площади или выявить на 1 квт установленной мощности.

Число часов использования средней нагрузки определяется элементарно просто, оно равно годовому числу часов работы  $T_p$ . Для односменных цехов и предприятий  $T_p = 2400$  час, для двухсменных — 4800 час и для трехсменных — 7200...8760 час.

Использование опытно-статистических данных об удельных нагрузках для определения средних нагрузок и расхода энергии предприятиями и цехами следует всемерно расширять. Шагом вперед в этом направлении является определение нагрузок проектируемых металлообрабатывающих цехов на 1 м<sup>2</sup> площади, широко применяемое ныне в организациях Главэлектромонтажа. Однако для расчета внутрицеховых сетей (например, питающих краны в металлургических цехах) и сетей предприятий и цехов, продукция которых измеряется тоннами, пока единственным методом продолжает оставаться метод коэффициента спроса.

**Метод расчета нагрузок в узлах электросети.** С 1948 г. в системе Главэлектромонтажа принят метод расчета нагрузок, который покоится на трех основных принципах: 1) принципе средних нагрузок; 2) принципе учета первичных приемников; 3) принципе двухчленных формул.

Ожидаемая нагрузка любого узла электросети характеризуется не одним, как раньше, а двумя показателями: а) средней нагрузкой  $P_{cp} = \sum P'_{cp}$ , являющейся суммой средних нагрузок отдельных характерных групп или индивидуальных приемников, присоединенных к узлу (станков, кранов, крупных электропечей и т. п.); б) максимальной нагрузкой  $P'_m$ , определяемой путем прибавления к средней нагрузке узла наибольшего из ожидаемых превышений максимума (пика)  $P'_m$  нагрузки отдельных групп или индивидуальных приемников над их средними нагрузками:

$$P_m = P_{cp} + P'_m = \sum P'_{cp} + P'_m. \quad (1)$$

Особенность этого принципа, предложенного М. К. Харчевым, состоит в том, что максимум нагрузки узла получается через среднюю нагрузку его, а не путем сложения максимальных нагрузок отдельных групп приемников или отдельных питающих линий узла и умножения полученной суммы на коэффициент совмещения максимумов ( $P_m = K_{cm} \sum P'_m$ ) [Л. 4].

Нагрузка любого узла электросети определяется по данным питающихся от узла первичных приемников разных категорий (электродвигателей, электропечей и т. п.).

В частных случаях, когда имеют место группы однородных приемников, максимальные нагрузки подсчитываются по двухчленным формулам, впервые предложенным в 1937 г. Д. С. Лившицем для определения нагрузок металлорежущих станков:

$$P_m = bP_n + cP_x, \quad (2)$$

где  $b = K_{cp}$  — эмпирический коэффициент, характеризующий среднюю нагрузку характерной группы приемников; он зависит от технологического режима приемников, но не зависит от числа приемников и их мощностей;

$c$  — эмпирический коэффициент, характеризующий превышение максимума над средней нагрузкой узла и зависящий от числа приемников и от соотношения их мощностей;

$P_n$  — установленная (номинальная) мощность всех приемников группы;

$P_x$  — номинальная мощность  $x$  (например, трех) наибольших приемников группы.

Коэффициент спроса  $K_m$ , соответствующий максимальной нагрузке, определяемой по фор-

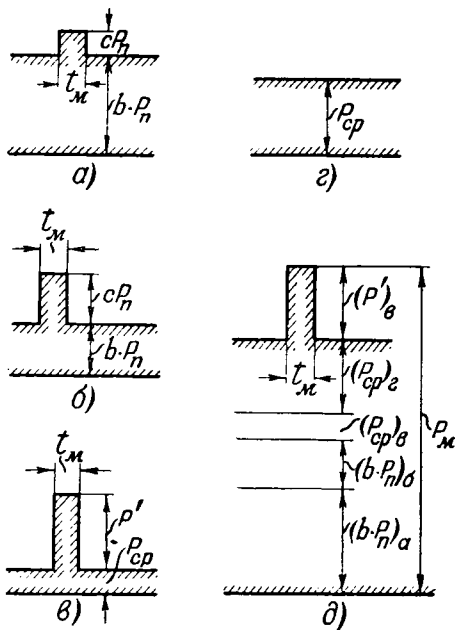


Рис. 1. Определение расчетного максимума  $P_m$  узла электросети по принципу средних нагрузок.

*a* и *б* — расчетные графики нагрузок отдельных характерных групп приемников; *в* и *г* — расчетные графики индивидуальных приемников; *г* — расчетный график нагрузок узла электросети. Длительность максимумов  $t_m$  отдельных групп и всего узла одинакова.

формуле (2), может быть выражен следующим образом:

$$K_m = \frac{P_m}{P_n} = b + c \frac{x}{n_g}, \quad (3)$$

где  $n_g$  — эффективное число приемников, равное такому условному числу приемников одинаковой мощности, при котором расчетная нагрузка и коэффициент спроса максимальной нагрузки будут такими же, что и при реальных приемниках различной мощности. Кривая  $K_m = f(n_g)$  является гиперболой; при  $n_g = \infty K_m = b = K_{cp}$ , при  $n_g = x K_m = b + c$ .

Рис. 1 иллюстрирует графически определение максимальной нагрузки узла электросети по методу, принятому в Главэлектромонтаже.

Техника расчета нагрузок по этому методу представляется ныне достаточно ясной [Л. 5]. Важнейшими вопросами, требующими разрешения, являются: физический смысл расчетных формул и вытекающий из него метод их построения, т. е. метод определения величин  $P$ ,  $P'$ ,  $b$  и  $c$  в формулах (1) и (2) по материалам исследования нагрузок аналогичных приемников на действующих установках. С точки зрения проведения исследовательских работ, анализа материалов исследования (измерений нагрузок), построения расчетных формул и расчета нагрузок с помощью этих формул при проектировании эти вопросы имеют решающее значение.

### Определение ожидаемых средних нагрузок

Наиболее важное значение при определении расчетных нагрузок узлов сети имеет определение средних нагрузок. Это значение тем выше, чем ближе рассчитываемый узел находится к источнику энергии. Например, в высоковольтных сетях, питающих металлообрабатывающие цехи некоторых заводов, доля средней нагрузки в максимуме нагрузки узла составляет от 75 до 95%.

Для таких приемников, как прокатные станы, бумажные машины, крупные электрические печи, мощные компрессоры, средние нагрузки могут быть вычислены на основании опытных данных об удельных расходах энергии  $E_{y0}$  на единицу продукции (тонну стали, кубометр воздуха и т. п.) и о часовой производительности агрегатов  $Q$  ( $m^3/час$  или  $m^3/час$ ):

$$P_{cp} = \frac{E_{y0} Q}{3600}. \quad (4)$$

Они могут быть определены также по измерениям среднесменных нагрузок аналогичных приемников на действующих установках.

Для групп однородных приемников (стала, краны, небольшие электропечи и т. п.) средняя нагрузка определяется по формуле (2) как  $bP_n$ . Числовое значение коэффициента  $b$  при анализе результатов измерений следует определять как средневзвешенный сменный коэффициент спроса приемников  $K_{cp}$ . Для этого средние нагрузки  $P_{cp}$  линий, питающих приемники одной характерной группы, суммируются и полученная сумма  $\sum P_{cp}$  делится на сумму установленных мощностей  $\sum P_n$  всех линий. Таким образом,

$$b = K_{cp} = \frac{\sum P_{cp}}{\sum P_n} = \frac{\sum E_8}{8 \sum P_n}, \quad (5)$$

где  $E_8$  — расход энергии за 8-часовую смену.

Среднюю расчетную нагрузку можно было бы представить как показание ваттметра, установленного на линии, питающей бесконечно большое количество приемников одной и той же характерной группы. Стрелка этого прибора стояла бы неподвижно, так как при бесконечно большом количестве приемников пики нагрузок отдельных приемников перекрывались бы, а показание прибора соответствовало бы средней нагрузке.

Если такую линию расщепить на большое число мелких линий с ограниченным числом приемников, то сумма показаний счетчиков, установленных на каждой из расщепленных линий, за определенный отрезок времени будет равна показанию счетчика за тот же отрезок времени на эквивалентной линии с бесконечно большим количеством приемников.

Не имея возможности на практике использовать линии очень большой мощности, мы можем для исследования нагрузки однородных приемников суммировать средние нагрузки различных обследованных линий небольшой мощности, питающих приемники данной характерной группы. При этом обследованные линии могут принадле-

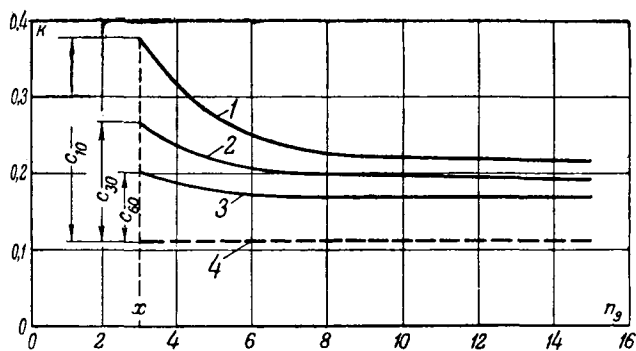


Рис. 2. Зависимость максимальных коэффициентов спроса  $K_m$  от числа эффективных приемников  $n_p$  различных кранов мартеновских цехов при длительности максимума.

1 — 10 мин; 2 — 30 мин; 3 — 60 мин; 4 — 480 мин ( $K = K_{cp} = b$ ).

к различным цехам и даже к различным заводам, а измерения нагрузок могут производиться в различное время.

Числовое значение коэффициента  $b$  будет тем ближе к истинному, чем больше энергии отсчитают счетчики обследованных линий, т. е. чем больше будет период времени (число смен), за который производилось измерение средней нагрузки на каждой из линий, чем большее число линий будет включено в общую сумму и чем большее число приемников будет питаться от каждой обследованной линии.

При суммировании измеренных нагрузок различных линий следует иметь в виду следующее: рассматриваемые приемники должны относиться лишь к одной характерной группе; измерения нагрузок должны производиться лишь в период загруженных смен.

Следует отметить, что в отличие от коэффициентов спроса  $K_m$  коэффициент спроса средней нагрузки  $K_{cp} = b$  не зависит от числа приемников  $n_p$  (рис. 2), а зависит только от их режима работы, от технологии. Это положение подтверждено реальными измерениями на технологических кранах металлургических заводов.

Техника измерений для выявления средних нагрузок и коэффициента  $b$  предельно проста сводится к отсчету показаний счетчиков на линиях, питающих группы однородных приемников или индивидуальные приемники энергии, в начале и конце рабочей смены.

**Определение ожидаемых максимальных нагрузок.** Под величинами  $P_m$ ,  $P'_m$  и  $cP_x$  в формулах (1) и (2) следует понимать наблюдаемые в эксплуатации и ожидаемые при проектировании максимумы определенной продолжительности, дающиеся измерению электрическими приборами. Разница по сравнению с прежней практикой заключается в том, что в расчет принимается максимум такой длительности, который не приводит к недоиспользованию металла проводников нагреву.

Максимумы могут также выявляться из графиков действующих аналогичных установок. Чем выше искомая продолжительность максимума,

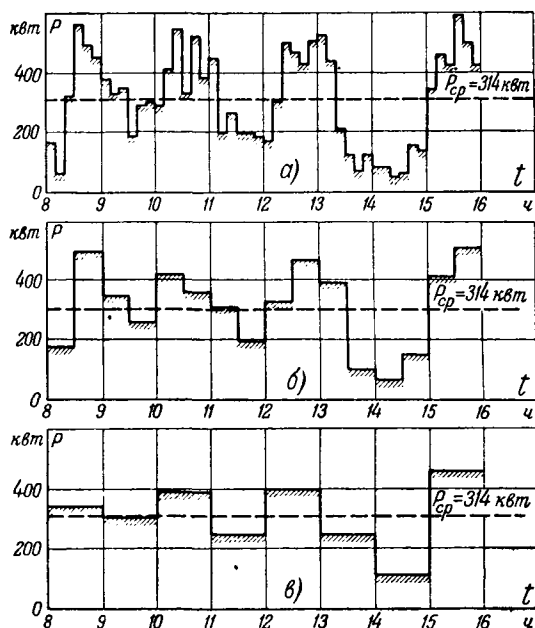


Рис. 3. Сменные графики нагрузки 5 различных кранов мартеновских цехов для продолжительности максимумов.

а — 10 мин; б — 30 мин; в — 60 мин.

тем меньше величина максимума, которую можно обнаружить на данном реальном графике (рис. 3).

Как указывалось выше, максимальные коэффициенты спроса  $K_m$  зависят от числа приемников (рис. 2). Ожидаемые максимумы могут быть подвергнуты анализу с точки зрения теории вероятностей. Математически эта задача вполне разрешима<sup>2</sup>. Трудность заключается в определении условий, необходимых для построения расчетных формул и определяемых разнообразными технологическими режимами работы приемников. Впредь до выработки на основании теории вероятностей расчетных формул, которые бы учитывали все особенности технологии и давали расчетные результаты, достаточно близкие к наблюдаемым в эксплуатации, определение расчетных максимумов следует основывать на данных исследований нагрузок существующих аналогичных установок.

Важнейшим вопросом является установление необходимой длительности максимума.

Допускаемая нагрузка проводников определяется условиями теплового старения изоляции и нормируется для продолжительного режима работы. Поэтому реальную переменную нагрузку приводят к эквивалентной продолжительной нагрузке  $I_n$ . На рис. 4 представлены график ожидаемой нагрузки  $I = f(t)$ , определяемый по формулам (1) и (2), и соответствующий ему график превышений температур  $\tau = f(t)$ . Имея эти графики и зная  $I_{cp}$ ,  $I_m$ ,  $\alpha = I_m/I_{cp}$  и  $t_m$ , можно пропускную способность проводника  $I_n$  (или, что

<sup>2</sup> Впервые теория вероятности была применена Н. В. Копытовым [Л. 6] для определения крановых нагрузок. В дальнейшем изыскания в этом направлении производились Г. М. Каяловым [Л. 7].

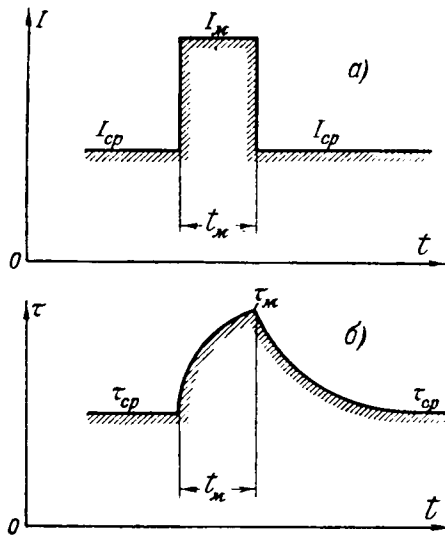


Рис. 4. График ожидаемой нагрузки (а), определенный по формулам (1) и (2), и соответствующий ему график превышения температур (б).

одно и то же, отношение  $m_n = I_n/I_{cp}$ , при которой превышение температуры проводника в период максимума не превзойдет даже кратковременно величины  $\tau_m$ , определить по следующей формуле:

$$m_n = \frac{I_n}{I_{cp}} = \sqrt{\frac{\tau_n}{\tau_m} \left[ \alpha_m^2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + e^{-\frac{t}{T}} \right]}, \quad (6)$$

где  $\tau_n$  — номинальная (допускаемая) температура перегрева;

$T$  — постоянная времени нагрева проводов.

Для частного случая, когда  $\tau_m = \tau_n$ , формула (6) принимает вид:

$$m_n = \frac{I_n}{I_{cp}} = \sqrt{\alpha_m^2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + e^{-\frac{t}{T}}}. \quad (6a)$$

Вывод формулы (6) основан на анализе общего уравнения нагрева тела и в настоящей работе не приводится.

Построенные по формуле (6a) кривые  $m_n = f(I_{cp})$  приведены на рис. 5 и относятся к 30-минутным максимумам. По этим кривым можно при проектировании определять значения  $m_n$  и  $I_n$  и выбирать сечения проводников  $s_n$ .

Хотя выбор проводников при помощи кривых (рис. 5) несложен, можно произвести его дальнейшее упрощение. Из рис. 5 следует, что при малых значениях средней нагрузки ( $I_{cp} = 30$  а) провода следует выбирать по пропускной способности  $I_n$ , почти равной току 30-минутного максимума, так как  $I_n = (0,98 \dots 1) I_{30}$ . Для больших значений средней нагрузки ( $I_{cp} = 180$  а) необходимая пропускная способность проводов будет несколько ниже  $I_{30}$  и составит  $(0,8 \dots 0,93) I_{30}$ . Для кабелей с бумажной изоляцией  $I_n = (0,88 \dots 1,0) I_{30}$ .

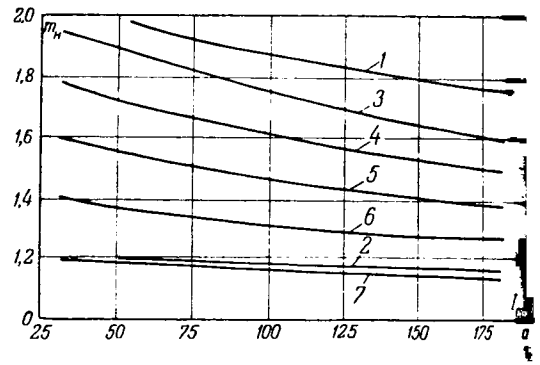


Рис. 5. Кривые  $m_n = f(I_{cp})$ , построенные по формуле (6a): 1 — для трехжильного кабеля с бумажной изоляцией до 3 кв, проложенного в земле,  $\tau_n = 65^\circ$ ,  $\alpha_{30} = 2$ ; 2 — то же,  $\alpha_{30} = 1,2$ ; 3 — для провода с резиновой изоляцией, проложенного в трубе,  $\tau_n = 30^\circ$ ,  $\alpha_{30} = 1,4$ ; 4 — то же,  $\alpha_{30} = 1,8$ ; 5 — то же,  $\alpha_{30} = 1,6$ ; 6 — то же,  $\alpha_{30} = 1,4$ ; 7 — то же,  $\alpha_{30} = 1,2$ .

Таким образом, без существенной погрешности за пропускную способность проводника можно принимать ток, соответствующий обычному 30-минутному максимуму  $I_{30}$ . При этом перерасход металла по сравнению с расчетом по кривым (рис. 5) будет колебаться в пределах 2...20% для проводов с резиновой изоляцией и в пределах 0...12% для кабелей с бумажной изоляцией.

Такой перерасход находится в пределах точности исходных расчетных данных и оправдывается не только упрощением расчета, но уменьшением потерь энергии в сети.

30-минутный максимум нагрузки в случае крупных индивидуальных приемников практически определяется путем снятия с помощью счетчика получасового графика нагрузки, из которого определяется превышение наибольшего 30-минутного максимума над средней нагрузкой.

Для определения величины коэффициента  $c$  в случае массовых приемников необходимо при помощи счетчиков снять несколько графиков сменных нагрузок линий, питающих отдельные приемники. Отсчет показаний счетчика при этом производится через каждые полчаса (рис. 3б). Из каждого графика выявляется наибольший 30-минутный максимум нагрузки  $P_{30}$  и коэффициент спроса  $K_{30}$ . Значение коэффициента  $c$  определяется по формуле

$$c_{30} = \frac{n_2}{x} (K_{30} - b). \quad (3a)$$

Предполагается, что значение  $b$  определено ранее. Из полученных значений  $c$  в двухчленной формуле следует подставлять наибольшие.

Ввиду того, что значение  $c$  связано лишь с величиной кратковременного перегрева проводников при сравнительно редко повторяющихся максимумах, для его определения можно ограничиться значительно меньшим количеством измерений, чем для определения величин  $b$ .

**Определение мощности трансформаторов.** До настоящего времени выбор номинальной мощности трансформаторов производился по той же расчетной нагрузке, что и выбор пропускной

способности проводников. Между тем трансформаторы допускают кратковременные, не часто повторяющиеся, перегрузки при условии, что температура их обмоток никогда не превышает  $160^\circ\text{C}$  [Л. 8]. Хотя постоянная времени нагрева трансформатора в целом ( $T_{\text{тр}} = 2 \dots 4$  час) во много раз превышает постоянную времени нагрева проводников воздушных и кабельных линий, при расчете кратковременных перегревов обмоток над температурой масла приходится учитывать постоянную времени нагрева не целого трансформатора, а проводников обмоток, которая принимается равной  $T_{\text{обм}} = 5 \dots 7$  мин, т. е. не выше, чем у проводов малых сечений.

Проанализируем условия нагрева обмоток трансформатора в условиях 30-минутных максимумов в соответствии с графиками рис. 4. Расчеты по формуле, рекомендованной Л. М. Шнидером [Л. 8] и учитывающей теплоотдачу от обмотки к маслу, показывают, что для обычных случаев практики, в пределах перегрузок до 40% ( $\alpha = 1,4$ ) продолжительностью 30 мин, температура трансформатора не выходит за пределы  $160^\circ\text{C}$ . Таким образом, при  $\alpha \leq 1,4$  номинальная мощность трансформатора может равняться  $P_s$ , причем для огромного большинства встречающихся на практике графиков

$$P_s = 1,05 \dots 1,1 P_{cp}. \quad (7)$$

При 30-минутных перегрузках, превышающих 40% (редкие случаи), номинальная мощность трансформаторов должна превышать значение  $P_s$ . Правильный выбор мощности трансформаторов по нагреву представляется еще более важным, чем правильный выбор проводников линий, так как увеличение номинальной мощности трансформаторов влечет за собой рост потерь в стали и рост реактивной мощности в питающих сетях.

**Определение расхода электроэнергии и экономической плотности тока.** Ожидаемый расход энергии за смену определяется путем среднего умножения ожидаемой средней нагрузки масла за смену на число часов работы узла за смену. Суточный расход энергии определяется путем суммирования расхода энергии по сменам.

При определении годовых потерь и экономических сечений в формулу экономической плотности тока следует подставлять не максимальный ток  $I_m$ , а среднеквадратичный ток  $I_s = (1,05 \dots 1,1) I_{cp}$ . Вместо числа часов максимума  $\tau$  следует принимать число часов работы  $T_p$  (по разным сменам).

**О методе Д. С. Лившица.** Рассмотрим отдельные элементы предложенного Д. С. Лившица [Л. 5] метода анализа материалов измерений нагрузок для построения расчетных двухчленных мул.

Д. С. Лившиц предлагает определять ожидаемую максимальную нагрузку с помощью формулы огибающей кривой. Существо этого способа состоит в том, что на диаграмме, где абсциссой является эффективное число приемников  $n_s$ , на-

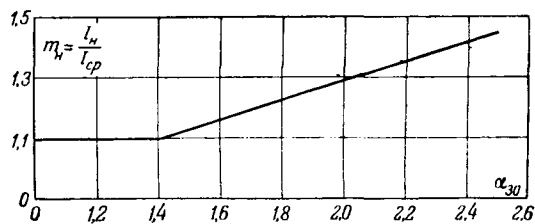


Рис. 6. Диаграмма для выбора номинальной мощности трансформатора.

носятся отдельные значения коэффициента спроса, выявленные из реальных сменных графиков нагрузки. Затем путем подбора парциальных коэффициентов  $b$  и  $c$  строится гиперболическая кривая  $K_m = f(n_s)$ , которая огибает подавляющее большинство точек  $K_m$ . Эта кривая и соответствующая ей расчетная формула  $P_m = bP_n + cP_s$  рекомендуется автором для проектирования.

Полученные таким способом парциальные коэффициенты  $b$  и  $c$  не являются однозначными и не имеют физического смысла, так как путем подбора различных значений  $b$  и  $c$  можно для каждой диаграммы начертить достаточное большое число кривых, которые с одинаковым правом могут называться „огибающими“. Сам прием подбора значений наиболее важного коэффициента  $b$  является математически неверным, основанным на экстраполяции огибающей кривой  $K_m = f(n_s)$  за пределы реальных значений  $K_m$  и  $n_s$  в сторону  $n_s = \infty$ .

На рис. 7 приведены значения  $K_m$ , определенные из графиков нагрузок линий, питающих электродвигатели станков на станкостроительных заводах. Кривая 1 на этом рисунке построена Д. С. Лившицем. Она является огибающей кривой  $K_m = 0,14 + \frac{0,4 \cdot 5}{n_s}$  и соответствует рекомендуемой им расчетной формуле  $P_m = 0,14 P_n + 0,4 P_s$  для станков при мелкосерийном и индивидуальном производствах. Из формулы видно, что значение  $b$  в данном случае равно 0,14.

На том же рис. 7 мной построена кривая 2, которая отличается от других возможных в данном случае кривых тем, что значение  $b = 0,12$  взято для нее не случайным, а подсчитано как средневзвешенный коэффициент спроса  $K_{cp}$  станков, присоединенных к исследованным питающим линиям. Таким образом, наиболее важная для расчета сетей величина  $b$  для станков станкостроительных заводов будет на 14% ниже определенной Д. С. Лившицем.

В формуле  $P_m = 0,06 P_n + 0,2 P_s$ , которую Д. С. Лившиц рекомендует для кранов механических и кузнечно-прессовых цехов [Л. 5] и которая построена на основании совмещенной диаграммы и общей огибающей кривой,  $b = 0,06$ . Если же подсчитать значение  $b$  арифметически как средневзвешенное сменное исследованных питающих линий отдельно для механических и отдельно для кузнечно-прессовых цехов, то

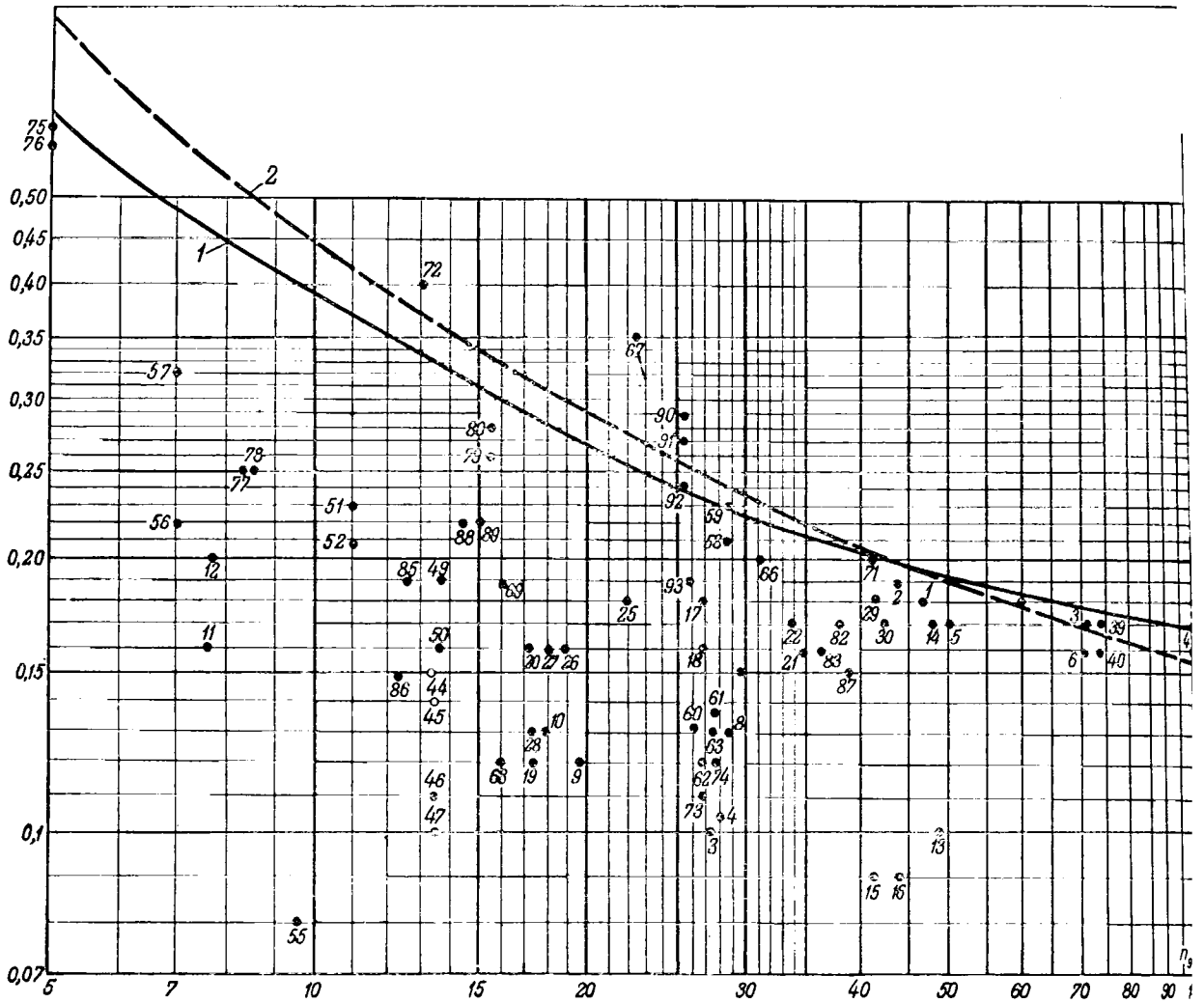


Рис. 7. «Огибающие» кривые коэффициентов спроса  $k_m$  для станков станкостроительных заводов.  
 1 — кривая, построенная Д. С. Лившицем; 2 — кривая, построенная автором.

окажется, что для механических цехов  $b = 0,07$ , а для кузнечно-прессовых  $b = 0,11$ . Таким образом, фактическая средняя нагрузка кранов механических цехов в 1,17 раза, а кранов кузнечно-прессовых цехов в 1,85 раза (почти вдвое) выше, чем в расчетной формуле Д. С. Лившица.

Последний пример показывает, насколько важным является вопрос о распределении электроприемников по характерным группам. Поучитель-

ные выводы в этом отношении могут быть сделаны из материалов исследования крановых нагрузок мартеновских цехов. При исследовании были измерены суммарные нагрузки не только всех кранов цеха, но и нагрузки отдельных технологических категорий. Для них по изложенному выше способу мною были выведены коэффициенты  $b$  и  $c$  и построены расчетные двухчленные формулы (таблица).

**Парциальные коэффициенты  $b$  (среднесменные) и  $c_{30}$  (максимальные получасовые) и рекомендуемые расчетные формулы для получасового максимума  $P_{30}$**

Наименование кранов	Взвешенное значение, $b$	Значение $b$ по отдельным сменам	Наибольшее значение $c_{30}$	Установленная мощность $P_n$ , %	Рекомендуемая формула для $P_{30}$
Различочные краны . . . . .	0,11	0,09 . . . 0,13	0,27	36	$P_{30} = 0,11 P_n + 0,27 P_3$
Заливочные краны . . . . .	0,09	0,08 . . . 0,12	0,23	13	$P_{30} = 0,09 P_n + 0,23 P_3$
Завалочные машины . . . . .	0,07	0,05 . . . 0,08	0,34	10	$P_{30} = 0,07 P_n + 0,34 P_3$
Миксерные отделения . . . . .	0,07	0,03 . . . 0,09	0,18	5	$P_{30} = 0,07 P_n + 0,18 P_3$
Краны шихтового двора . . . . .	0,26	0,18 . . . 0,33	0,63	19	$P_{30} = 0,26 P_n + 0,63 P_3$
Краны двора изложниц . . . . .	0,15	0,11 . . . 0,25	0,20	4	$P_{30} = 0,15 P_n + 0,20 P_3$
Стрипперные отделения . . . . .	0,14	0,09 . . . 0,19	—	13	
Средневзвешенный по цеху . . . . .	0,11			100	

Полученные значения  $K_{cp} = b$  весьма устойчивы для кранов одной технологической категории, хотя и работающих в разных цехах и в разные смены. Значения же, относящиеся к кранам различных технологических категорий, весьма различны и колеблются от 0,07 до 0,26. Следовательно, неправильно приписывать один и тот же коэффициент спроса кранам различных технологических категорий, как это сделано в формуле  $P_m = 0,11 P_n + 0,3 P_s$ , предложенной Д. С. Лившицем [Л. 5] для всех кранов мартеновских цехов.

Д. С. Лившиц отказался от пользования при расчете электросети расчетной максимальной нагрузкой той или иной продолжительности. Он предложил под расчетной нагрузкой  $P_m$  в формуле (2) понимать некоторый фиктивный максимум, по которому рекомендуется определять пропускную способность кабелей и проводов, также потребную мощность трансформаторов. Предложенный способ имел в виду наиболее полное использование проводников по нагреву.

Первым недостатком способа фиктивных максимумов является то, что величина  $K_m$ , выявляемая из каждого отдельного графика, зависит от постоянной времени нагрева проводника, т. е. от его материала и сечения, а значит, напряжения сети, способа и условий прокладки, а также материала изоляции, допускающей различные температуры нагрева. Между тем расчетный коэффициент спроса, как видно из структуры формулы (3), не зависит от перечисленных факторов и от абсолютной величины мощности линии или питающихся от нее приемников, а лишь от отношения мощностей приемников.

Согласно методу Д. С. Лившица расчетную нагрузку, выявляемую из графика, либо придется принимать, исходя из наилучших условий охлаждения и наибольших потерь в проводнике, либо для одного и того же реального графика нагрузки придется строить столько диаграмм нагрева и получать столько различных значений коэффициентов спроса, сколько возможно сочетаний условий потерь энергии в элементах сети охлаждения последних.

Другим важным недостатком способа фиктивных максимумов является отсутствие физического смысла у этих максимумов и невозможность проверки расчетных величин, полученных на действующих заводах, при помощи измерительных приборов.

**Выводы.** 1. При расчете промышленных нагрузок в каждом узле сети должны выявляться

ожидаемые средние нагрузки  $P_{cp}$  и 30-минутные максимумы  $P_{30}$ .

2. Проводники сетей могут выбираться по пропускной способности, равной 30-минутному максимуму  $P_{30}$ .

3. Номинальная мощность трансформатора должна выбираться по среднеквадратичной нагрузке  $P_s = 1,05 P_{cp}$ , если  $P_{30} \leq 1,4 P_{cp}$ , по диаграмме рис. 6, если  $P_{30} > P_{cp}$ .

4. Расчет расхода энергии в узлах электросетей следует вести по средним ожидаемым нагрузкам  $P_{cp}$ , умноженным на число часов работы  $T_p$  (по сменам).

5. Расчет экономических сечений следует производить по среднеквадратичным нагрузкам  $P_s = 1,05 P_{cp}$  и числу часов работы  $T_p$  (по сменам).

6. Массовые исследования нагрузок для определения среднего коэффициента спроса  $k_{cp}$  должны производиться путем снятия показаний счетчиков в начале и конце смены.

7. Для выявления 30-минутного коэффициента спроса  $K_{30}$  следует производить ограниченное количество исследований путем снятия показаний счетчиков через каждые полчаса.

8. Особое внимание следует уделить правильной разбивке потребителей на характерные группы, объединяемые одинаковой технологией и дающие устойчивые значения  $K_{cp}$ .

#### Литература

1. Материалы Всесоюзной научно-технической сессии по электроснабжению промышленных предприятий, Госстройиздат, 1950.

2. С. М. Лившиц. Одиночный и групповой приводы в механических мастерских, Известия ГЭТ, № 12, 1929.

3. Справочник по электрооборудованию промышленных предприятий, Госстройиздат, 1945.

4. С. М. Лившиц. Методы расчета электрических нагрузок промышленных потребителей, Промышленная энергетика, № 2, 1948.

5. Д. С. Лившиц. Расчетные нагрузки электросетей, Электричество, № 12, 1949.

6. Н. В. Копытов. Определение коэффициентов одно-временноности для приводов с повторно-кратковременной нагрузкой, ВЭП, № 9, 1933.

7. Г. М. Каялов. Основы проектных расчетов нагрузок электрических сетей промышленных предприятий. Материалы Всесоюзной научно-технической сессии по электроснабжению промышленных предприятий, Госстройиздат, 1950.

8. Л. М. Шницер. Трансформаторы, Госэнергоиздат, 1950.



# Катодный осциллограф со ждущей разверткой времени для исследования ионных вентилях и высоковольтных выключателей<sup>1</sup>

Инж. С. М. КАЦНЕЛЬСОН

Уральский политехнический институт и.м. Кирова

При исследовании процессов, протекающих в ионных вентилях, высоковольтных выключателях, искусственных схемах для испытаний вентилях и выключателей, возникает необходимость осциллографирования медленно протекающих процессов и быстропеременных переходных процессов. Для этой цели необходим осциллограф со ждущей разверткой времени, позволяющей непрерывно «выхватывать» из периодической кривой какого-либо явления промышленной частоты интересующий нас отрезок и развертывать его с необходимой скоростью.

Явления, протекающие в ионных вентилях и высоковольтных выключателях при их осциллографировании, требуют различных методов синхронизации в зависимости от скорости развертки, от наличия разброса во времени исследуемого периодического явления, от допустимости потери начальной части кривой осциллографируемого явления, от того, является ли исследуемое явление периодическим или внезапно возникающим переходным процессом, а также от ряда других причин.

Ряд периодических явлений, например восстановление напряжения на ионном вентиле и зажигание вентиля, имеет некоторый разброс во времени, который может достигать нескольких десятков микросекунд, что при большой скорости развертки времени не позволяет осуществить синхронизацию от напряжения сети, питающей исследуемый ventиль.

Обратное зажигание в ионном вентиле представляет собой переходный процесс, момент возникновения которого нельзя заранее предвидеть. Однако существенный интерес представляет собой как развитие самого процесса обратного зажигания, так и предшествовавший ему процесс восстановления напряжения. Для осциллографирования процессов без потери начальной части кривой исследуемых явлений приходится применять специальные методы.

По мере повышения максимальных скоростей

*Рассматривается возможность применения в схемах осциллографирования тиратронов, управляемых сеткой во время горения, и дается схема катодного осциллографа со ждущей разверткой времени, построенного на вышеуказанном принципе. Рассматривается схема непрерывного фазовращателя.*

записи яркость изображения на экране осциллографа снижается. В этом случае приходится прибегать к повышению напряжения на электроде

оптической системе трубки, а при периодически повторяющихся процессах также к наложению одного изображения на другое.

Ниже описывается схема катодного осциллографа со ждущей разверткой времени, применяемая для осциллографирования ряда переходных процессов, возникающих в ионных вентилях и высоковольтных выключателях.

Схема осциллографа полностью выполнена на тиратронах, управляемых сеткой во время горения.

Известно, что после зажигания тиратрона сетка вследствие образования вокруг нее ионной оболочки теряет способность управления разрядом. Это в значительной степени ограничивает область применения тиратронов в схемах осциллографирования. Однако при подаче высоких отрицательных потенциалов на сетку тиратрона и при уменьшении диаметра отверстий в сетке можно прервать разряд в тиратроне.

Для выяснения возможности применения в схемах осциллографирования тиратронов, управляемых сеткой во время горения, был сделан ряд опытов с тиратронами отечественного и заграничного производства, которые показали возможность четкого управления тиратроном с помощью сетки во время его горения при малых анодных токах, при которых уже имеет место дуговой разряд и падение напряжения в тиратроне мало. Это позволяет использовать тиратрон в схемах осциллографирования, где не требуется прерывания больших токов, в качестве чрезвычайно чувствительного реле с очень малой инерцией, способного производить не только замыкание, но и размыкание цепи постоянного тока в зависимости от полярности импульса, подаваемого на его сетку.

При подаче отрицательного импульса достаточной амплитуды на сетку тиратрона при малых анодных токах прекращение разряда в тиратроне происходит в течение доли микросекунды, хотя

<sup>1</sup> Работа выполнена на кафедре техники высоких напряжений УПИ под руководством М. М. Акодиса.



процесс деионизации полностью завершается все же через несколько десятков микросекунд. Поэтому длительность отрицательного импульса, подаваемого на сетку, должна быть не слишком мала во избежание преждевременного зажигания тиратрона.

Схема осциллографа (рис. 1) состоит из следующих основных узлов: блока питания, синхронизатора и непрерывного азображателя, генератора ждущей развертки времени и схемы управления яркостью луча.

**Синхронизация начала записи.** Схема синхронизатора выполнена при помощи анодного тиратрона  $L_4$ , управляемого сеткой во время горения. На сетку подается синхронизирующее явление, которое схемой синхронизатора преобразуется в импульс определенной амплитуды и длительности, независимого от формы кривой явления, используемого для синхронизации. Тиратрон  $L_4$  нормально заперт отрицательным смещением, поданным на его сетку. Явление, используемое для синхронизации, накладывается на постоянное сеточное смещение тиратрона, и когда результирующее напряжение на сетке достигнет определенной величины, тиратрон зажигается. При зажигании тиратрона  $L_4$  напряжение  $U_{cx}$ , до которого заряжена емкость  $C_{17}$ , окажется приложенным к сопротивлению  $R_{34}$ , шунтированному емкостью  $C_{16}$ , и к сопротивлению  $R_{35}$ . В результате на сопротивлении появляется кратковременный отрицательный импульс, используемый для гашения тиратронов генератора развертки и управления яркостью луча.

Напряжение  $U_2$ , снимаемое с сопротивления определяется уравнением

$$U_2 = U_{cx} \frac{R_{35}}{R_{34} + R_{35}} \left( 1 + \frac{R_{34}}{R_{35}} e^{-\frac{t}{T_c}} \right),$$

$$T_c = \frac{R_{34} R_{35} \cdot C_{16}}{R_{34} + R_{35}}.$$

Емкость  $C_{17}$  выбирается достаточно большой того, чтобы в течение переходного процесса напряжение  $U_{cx}$  не менялось по величине. После разряда емкости  $C_{16}$  ток, протекающий через тиратрон  $L_4$ , снижается и при снятии явления, используемого для синхронизации или перемене знака, тиратрон гасится отрицательным смещением на сетке. Величина тока определяется уравнением

$$I = \frac{U_{cx}}{R_{34} + R_{35}}.$$

После гашения тиратрона  $L_4$  емкость  $C_{16}$  разряжается через сопротивление  $R_{34}$ , и тогда тиратрон готов к восприятию и передаче следующего отрицательного импульса.

Осциллограф имеет внутреннюю синхронизацию и внешнюю многократную синхронизацию и

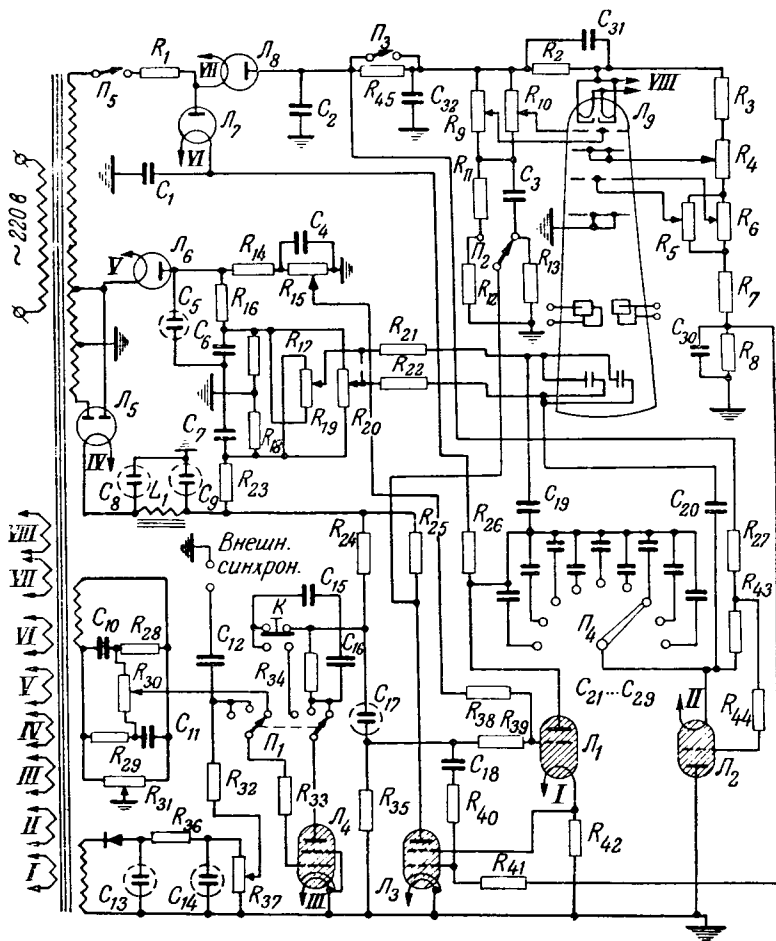


Рис. 1. Схема катодного осциллографа со ждущей разверткой времени для исследования ионных вентилях и высоковольтных выключателей.

внешнюю однократную синхронизацию, которые переключаются переключателем  $\Pi_1$ .

В ряде случаев представляет интерес наблюдение кривой изучаемого периодического явления промышленной частоты в пределах целого периода, но при достаточно больших скоростях развертки, при которых на экране осциллографа укладываются сотые или тысячные доли периода. При этом желательно перемещать изображение на экране таким образом, чтобы иметь возможность просмотреть всю кривую в пределах периода. Для этой цели может быть применена синхронизация от напряжения сети, смещаемого по фазе при помощи фазовращателя.

В рассматриваемом осциллографе разработана схема непрерывного фазовращателя, позволяющего непрерывно смещать по фазе синусоидальное напряжение на угол  $n \cdot 360^\circ$ , где  $n$  — любое целое число.

Схема фазовращателя и векторная диаграмма приведены на рис. 2. Сопротивления плеч фазовращателя выполняются равными:

$$R_{28} = R_{29} = \frac{1}{\omega C_{10}} = \frac{1}{\omega C_{11}}.$$

Движки потенциометров  $R_{30}$  и  $R_{31}$  механически связаны между собой и с рукояткой фазо-

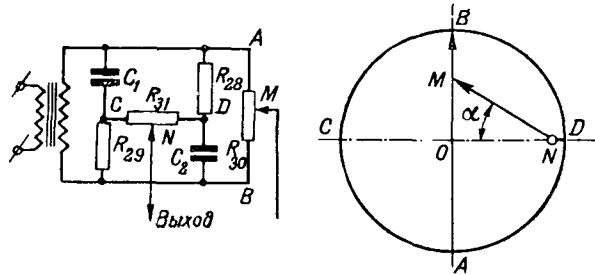


Рис. 2. Схема и векторная диаграмма непрерывного фазовращателя.

вращателя так, что их движение определяется уравнениями

$$OM = OB \cdot \sin \alpha,$$

$$ON = OD \cdot \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол поворота рукоятки фазовращателя. Тогда разность потенциалов между движками потенциометров будет равна:

$$NM = \sqrt{(OB \sin \alpha)^2 + (OD \cos \alpha)^2} = \text{const.}$$

В результате вектор напряжения остается постоянным по величине, а фаза его пропорциональна углу поворота рукоятки фазовращателя.

Механическая передача, осуществляющая синусоидальный закон перемещения движков потенциометров  $R_{30}$  и  $R_{31}$ , схематически показана на рис. 3.

Рукоятка фазовращателя может вращаться в любом направлении и при этом происходит непрерывное смещение фазы напряжения, снимаемого с фазовращателя. Внутренняя синхронизация в осциллографе осуществляется от непрерывного фазовращателя. Внешняя многократная синхронизация осуществляется от внешнего периодического явления, которое заставляет срабатывать тиратрон синхронизации  $L_4$  один раз в период.

Внешняя однократная синхронизация позволяет получить однократную развертку, в то время как явление, используемое для синхронизации, повторяется периодически. Для этой цели при помощи переключателя  $\Pi_1$  емкость  $C_{16}$  заменяется емкостью  $C_{15}$ , теперь уже не шунтированную сопротивлением. При нажатии кнопки  $K$  напряжение от конденсатора  $C_{17}$  подводится к схеме и первый синхронизирующий импульс зажигает тиратрон  $L_4$ , при этом емкость  $C_{15}$  заряжается. Следующий синхронизирующий импульс не вызывает срабатывания схемы, так как емкость  $C_{15}$ , оставаясь заряженной, не позволяет зажечься тиратрону  $L_4$ .

Синхронизацию можно повторить, если отпустить кнопку  $K$  и снова ее нажать.

**Развертка времени.** Генератор ждущей симметричной развертки времени выполнен при помощи двух

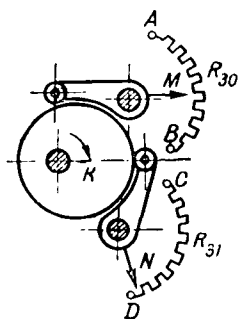


Рис. 3. Принцип устройства непрерывного фазовращателя.

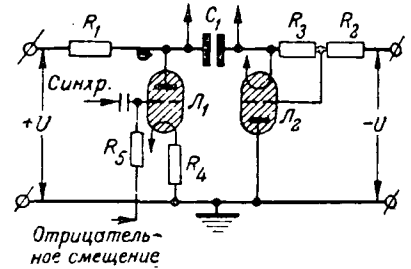


Рис. 4. Схема генератора ждущей развертки.

тиратронов. Принципиальная схема генератора указана на рис. 4. Тиратроны  $L_1$  и  $L_2$  непрерывно горят при наличии небольшого отрицательного смещения на их сетках.

При подаче синхронизирующего отрицательного импульса на сетку тиратрона  $L_1$  он гаснет но синхронно с ним гаснет и второй тиратрон  $L_2$  так как при равенстве сопротивлений  $R_1 = R_2 + R_3$  ток, протекающий через тиратрон  $L_2$ , после гашения первого тиратрона становится равен нулю. Тогда начинается заряд конденсатора  $C$  напряжение на обкладках которого будет изменяться симметрично относительно земли. В погашенном состоянии тиратроны удерживаются отрицательными смещениями на их сетках.

Когда луч проходит длину экрана в направлении развертки времени, напряжение на тиратронах становится достаточным для их зажигания.

При зажигании одного из тиратронов напряжение на втором удваивается и он зажигается синхронно с первым. Повторной развертки после зажигания тиратронов  $L_1$  и  $L_2$  не происходит так как постоянное отрицательное смещение на сетках тиратронов не может их погасить. После этого генератор находится в ожидании следующего синхронизирующего импульса, с подачей которого происходит повторная развертка. При достаточно высоком напряжении источника питания схема дает удовлетворительную линейность развертки.

Регулировка скорости развертки производится ступенями при помощи набора емкостей  $C_{21} \dots C_{25}$  (рис. 1). В тех случаях, когда можно допустить применение несимметричной развертки, схема генератора ждущей развертки получается исключительно простой, так как требует для своего выполнения только одного тиратрона. Максимальная скорость развертки ограничивается, с одной стороны, междуэлектродной емкостью тиратрона и емкостью проводов схемы, с другой стороны — максимальным током, протекающим через тиратрон, который возможно прервать при помощи сетки.

На тиратронах ТГ-2050 и ТГ-160 можно считать скорость нарастания напряжения на пластинах времени 20...40 в/мксек, что позволяет наблюдать переходные процессы с частотой  $10^6$  гц. Очевидно, применение тиратронов, имеющих сетки с меньшими отверстиями, позволит увеличить скорость развертки времени.

**Управление яркостью луча.** Схема управления яркостью луча в осциллографе со ждущей разверткой также может быть осуществлена достаточно просто при помощи тиратрона, управляемого во время горения. Тиратрон управления яркостью луча  $L_3$  (рис. 1) работает синхронно с генератором ждущей развертки.

Отрицательный синхронизирующий импульс, подаваемый на сетку тиратрона развертки  $L_1$ , через емкость  $C_{18}$  и сопротивление  $R_{40}$  подается одновременно и на сетку тиратрона  $L_3$ . Тиратрон  $L_3$  нормально горит при наличии постоянного отрицательного смещения на его сетке, но гасится при подаче на его сетку добавочного отрицательного импульса. При гашении тиратрона  $L_3$  через емкость  $C_3$  или сопротивление  $R_{11}$  на управляющую сетку трубки подается импульс, поддерживающий луч. После снятия синхронизирующего импульса тиратрон  $L_3$  удерживается в погашенном состоянии постоянным отрицательным смещением на сетке.

При окончании развертки зажигается тиратрон  $L_1$  и положительный импульс с сопротивления  $R_{42}$  передается на экранную или управляющую сетку тиратрона  $L_3$ , зажигая последний, что приводит к запиранию луча. Работа с кратковременным открытием луча при записи быстрых процессов позволяет значительно повысить напряжение на трубке по отношению к номинальному без повышенного износа трубки.

Для того чтобы при записи медленных процессов избежать повышенного износа трубки, в осциллографе применено переключение напряжения на трубке при переходе на ускоренную развертку. Это позволяет работать с номинальным напряжением на трубке при медленных развертках и с повышенным при быстрых. Конструктивно осциллограф выполнен переносным весом 25 кг. За последние 4 года ряд осциллографов описываемого типа успешно использовался в УПИ и на стенде завода «Уралэлектроаппарат».

[27.6.1951]



## Из опыта работы

# Синхронизация асинхронных электродвигателей на шахтах комбината „Сталинуголь“

*Инж. К. И. СКОРКИН*

*Комбинат „Сталинуголь“*

Предложенная в 1947 г. автоматическая схема синхронизации асинхронных электродвигателей фазным ротором (схема ДАГ) с применением для возбуждения селективных выпрямителей получила широкое распространение на шахтах комбината «Сталинуголь» других комбинатов Донбасса, а также и прочих угольных бассейнах Советского Союза.

С 1948 г., когда комбинат начал внедрять синхронизацию, до конца 1951 г. было синхронизовано 146 двигателей на общую мощность 883 квт.

Данные по годам по числу и мощности действующих синхронизированных двигателей, а также по эффекту их применения приведены в таблице.

Большинство синхронизированных двигателей является приводными двигателями вентиляторов и проветривания шахт. Было синхронизовано несколько приводов поршневых компрессоров, сетевого двигателя привода генератор—двигатель и двигатель подъемной машины наклонной шахты.

*На шахтах комбината «Сталинуголь» в широком масштабе осуществлена синхронизация асинхронных двигателей по схеме ДАГ<sup>1</sup>. Освещается опыт их эксплуатации и технико-экономический эффект синхронизации.*

Приводы вентиляторов по характеру и режиму своей работы являются на шахтах первоочередными объектами для синхронизации. Эти двигатели выбираются обычно с расчетом на срок службы 3—5 лет. В начале этого срока загрузка двигателей обычно составляет менее 50% номинальной мощности. Только по мере развития подземных работ шахты двигатель загружается до номинальной мощности. Синхронизация мощного двигателя, незагруженного в силу почти неустранимых технологических особенностей привода, особенно полезна, так как превращает его из крупного потребителя реактивной мощности от сети в генератор реактивной мощности, используемой для повышения коэффициента мощности шахты и сети.

Синхронизация двигателей поршневых компрессоров средней производительности также весьма эффективна. Эти двигатели обычно работают с небольшими колебаниями нагрузки, но все же часто полностью не загружены. Синхронизация также дает возможность превратить их

<sup>1</sup> Изобретение советских инженеров И. Г. Данкова, Л. Н. Афанасьева и Б. М. Гуревича. Авторское свидетельство № 71956, 1947, Бюллетень Изобретений, стр. 24, 4, 1948.

	Годы			
	1948	1949	1950	1951
Наличие синхронизированных на конец года двигателей:				
число . . . . .	14	79	79	107
мощность, <i>квт</i> . . . . .	3 077	18 325	19 401	27 236
Синхронизировано за отчетный год двигателей:				
число . . . . .	14	65	25	42
мощность, <i>квт</i> . . . . .	3 077	15 248	6 018	10 510
Снято за отчетный год синхронизированных двигателей:				
число . . . . .	—	—	25	14
мощность, <i>квт</i> . . . . .	—	—	4 942	2 700
Среднее снижение потребления реактивной мощности из сети за счет синхронизации, <i>квар</i> . . . . .	2 610	15 600	16 550	23 200
Удельный вес (%) реактивной мощности синхронизированных двигателей в покрытие реактивных нагрузок . . . .	20,1	44,5	29,6	29,1
Реактивная мощность двигателей в долях введенной реактивной мощности за год, % . . . . .	30,6	58,4	18,8	29,0
Коэффициент мощности (средне взвешенный за год) по комбинату . . . . .	0,755	0,8	0,84	0,92
Уплочено надбавок за низкий $\cos \varphi$ (с учетом скидок): тыс. руб. . . . .	5 236*	6 137	4 925	—1 034

\* Тарифы на электроэнергию в 1948 г. были ниже, чем в 1949 г. и в последующие годы. Из общего числа 146 синхронизированных двигателей в конце полугодия 1951 г. находилось в работе 107 двигателей. Уменьшение количества действующих синхронизированных двигателей в 1950 и 1951 гг. на 39 единиц с общей мощностью 7 652 *квт* вызвано останковкой в резерв или демонтажем шахтных установок по разным производственным соображениям. Минус означает скидку.

в двигатели с высоким коэффициентом мощности, а в ряде случаев достичь отдачи реактивной мощности в сеть.

Многие считают, что целесообразна синхронизация только двигателя, работающего в непрерывном и равномерном режиме с постоянной скоростью. С этой точки зрения асинхронные двигатели подъемных машин шахт не рассматривались как объекты для синхронизации. Однако оказалось, что значительная их часть, а именно двигатели подъемных машин шахт с наклонными стволами, может быть с успехом синхронизирована, особенно двигатели так называемых «одноконцевых», не уравновешенных подъемов.

Подъемная машина наклонной шахты, имеющей один рельсовый путь, работает в переменном режиме. Сначала производится спуск в шахту порожних вагонеток или вагонеток, груженых крепежным лесом или другими материалами, затем производится подъем партии вагонеток, груженных углем или породой. При спуске кратковременный запуск двигателя (20...60 *сек*) переходит в длительный период равномерного хода (5...12 *мин*), заканчивающийся торможением (30...100 *сек*). В период запуска и торможения подъемный асинхронный двигатель работает с регулировкой скорости вращения путем изменения

сопротивления в цепи ротора, а в период равномерного хода — с замкнутым накоротко ротор при сверхсинхронной скорости (в режиме ахронного генератора). При этом его коэффициент мощности крайне низок, порядка 0,25...0,45.

При подъеме загрузка двигателя в период равномерного хода значительно выше, чем при спуске, но все же она меньше, чем номинальная мощность двигателя, который выбирается по условиям нагрева при повторно-кратковременном режиме.

Синхронизация такого двигателя по автоматическому варианту схемы ДАГ позволяет автоматически переводить его на работу в синхронном режиме на время равномерного хода как при спуске порожних вагонеток, так и при подъеме.

На ряде шахт продолжительность работы подъемного двигателя с постоянной скоростью составляет до 50...65% всего времени. Подъемный двигатель обычно один из самых мощных на шахте (порядка 250...700 *квт*) и является крупным потребителем реактивной мощности. Синхронизация его оказывается поэтому вполне целесообразным и эффективным мероприятием, позволяющим достичь значительного сокращения потребления реактивной энергии из сети и улучшения коэффициента мощности.

Большой интерес представляет синхронизация асинхронного двигателя системы генератор—двигатель привода шахтной подъемной машины. В периоды пауз в работе подъемной машины привод вращается вхолостую и  $\cos \varphi$  сети ротора двигателя крайне низок.

Еще в 1949 г. был синхронизирован по схеме ДАГ двигатель привода системы генератор—двигатель подъемной машины шахты «Артем» треста «Шахтантрацит» (комбинат «Ростовуголь» мощностью 662,5 *квт*. Коэффициент мощности питающей линии повысился с 0,35 до 0,75...0,8).

В комбинате «Сталинуголь» в июле 1951 г. произведена синхронизация по автоматическому варианту схемы ДАГ асинхронного двигателя подъемной установки с приводом по схеме генератор—двигатель (мощность 400 *квт*). Результаты оказались вполне удовлетворительными. Коэффициент мощности по всей шахте повысился с 0,76 до 0,85, а максимальный эффект (на холостом ходу) оказался равным снижению реактивной нагрузки на 483 *квар*.

Вполне целесообразной является также синхронизация мощных двигателей насосов центрального (главного) водоотлива шахт, в тех случаях, когда они имеют фазный ротор. Однако для установки в подземных выработках шахт, опасных по газу, аппаратура должна быть в рудничном исполнении, что вполне осуществимо, но вызывает некоторые затруднения.

Вообще для угольных шахт может быть эффективной синхронизация любого двигателя с фазным ротором, работающего в любом режиме.

Практика и опыт синхронизации асинхронных двигателей в комбинате «Сталинуголь» подтвердили правильность всех положений и основных

принципов, заложенных в схему ДАГ ее авторами, и она применяется без всяких изменений в таком виде, как она была описана в [Л. 1, 2].

Наибольшее распространение на угольных шахтах получил полуавтоматический вариант схемы ДАГ, так как большинство установок находится под наблюдением дежурного персонала.

На проведении работы по массовой синхронизации двигателей на угольных шахтах очень благоприятно отразилось принятое еще в 1948 г. Министерством угольной промышленности западных районов решение о централизованном производстве и комплектной поставке шахтам всего потребного для синхронизации оборудования. Такая постановка работ по синхронизации позволила почти полностью избавиться от неизбежной на первых порах при внедрении нового кустарщины и сравнительно быстро (за 1—1,5 г.) накопить значительный опыт в этой области.

Выпуск Днепропетровским заводом Министерства угольной промышленности трех размеров (по току) селеновых синхронизационных агрегатов оказался вполне достаточным для синхронизации всех встречающихся на шахтах типов двигателей. Характеристика этих агрегатов была дана на страницах журнала [Л. 3].

Наиболее интенсивно синхронизация внедряется на шахтах комбината «Сталинуголь» в 1949 г., когда было синхронизировано 65 двигателей на общую мощность 15...25 тыс. квт (таблица). Снижение темпов синхронизации в 1950 г. было вызвано в основном отрицательным отношением к этому мероприятию со стороны отдельных работников органов Госэнергонадзора и Технического отдела Министерства электростанций.

Неправильное освещение вопросов синхронизации в журнале «Промышленная энергетика» [Л. 4, 5] и ограничения, содержащиеся в ряде руководящих ведомственных указаний МЭС, привели к тому, что ряд предприятий и ведомств, не встречая помощи и поддержки энергоснабжающих организаций, а иногда даже испытывая их стороны противодействие проводимым мероприятиям, вовсе отказался от массового внедрения синхронизации или значительно снизил раз- работ.

Следствием проводимой в настоящее время Министерством электростанций тарифной политики является еще одно обстоятельство, заметно снижающее получаемый от синхронизации эффект. Как известно, расчет с потребителями электроэнергии за коэффициент мощности производится по двойной шкале, отдельно за «естественный»  $\cos \varphi$  и за общий  $\cos \varphi$ , достигнутый в результате применения потребителем искусственной компенсации.

По действующим инструкциям Госэнергонадзора МЭС к искусственной компенсации относятся также повышение коэффициента мощности и счет работы синхронных или синхронизированных двигателей с перевозбуждением при опережающем  $\cos \varphi$ . Это толкает потребителей на искусственное снижение возбуждения синхронных синхронизированных двигателей с переводом их работу при значениях  $\cos \varphi$  до единицы

(в индуктивном квадранте). В результате непере- возбужденные синхронизированные двигатели только прекращают потреблять реактивную энергию, но не отдают ее в сеть, чем снижается эффект от применения синхронизации в среднем не менее чем на 30...35%.

Опыт эксплуатации основной части синхронизированных установок селеновых выпрямительных агрегатов полностью подтвердил целесообразность их применения для этой цели и соответствие их конструкции своему назначению.

Наблюдения за работой большого числа выпрямителей в течение двух-трех лет показали, что срок службы селеновых элементов на стальной основе зависит от их рабочей температуры. Если эта температура не превышает 60...65° С, то элементы работают удовлетворительно до 6—8 тыс. час. После этого выпрямленное напряжение начинает сильно снижаться. В ряде случаев использование регулировочных отпаек трансформатора позволяет эксплуатировать элементы еще 2...2,5 тыс. час.

Если выпрямители работают при температуре выше 70° С, то стальные элементы могут выйти из строя значительно быстрее и снижение напряжения выпрямленного тока наступит раньше. Поэтому при эксплуатации выпрямителей следует строго контролировать температуру масла, не допуская ее длительного повышения сверх 65° С, и обеспечивать хорошее охлаждение выпрямителей, применяя в случае необходимости обдувание, или вынос их из помещения.

Целесообразно периодически производить ревизию синхронизационного оборудования через 2—3 тыс. час работы. В селеновом выпрямителе у отдельных элементов может наблюдаться подгорание контактных звездочек.

Следует следить за состоянием трансформаторного масла, заполняющего выпрямители. При необходимости надо производить его фильтрацию или замену, но, видимо, не реже чем два раза в год. Совершенно недопустимо появление в масле обуглившихся твердых частиц или угольной пыли.

В агрегатах с применением элементов на алюминиевой основе (вакуумного нанесения) температура элементов ниже на 20...30° С, к. п. д. достигает 81...83%, не наблюдается явление отслаивания катодного сплава.

Необходимость систематического улучшения  $\cos \varphi$ , который только за два года повысился на шахтах комбината (средневзвешенные величины) с 0,8 (1949 г.) до 0,92 (1951 г.), заставила осуществить строгий повседневный контроль за работой всего синхронизационного оборудования.

Была признана необходимой дополнительная установка на каждом синхронизированном двигателе вольтметра и амперметра в цепи выпрямленного тока возбуждения, смонтированных на отдельном щитке, установленном на кожухе селенового агрегата, а также реактивного счетчика со стопором, учитывающего отдачу реактивной энергии в сеть синхронизированным двигателем.

Опыт работы показал, что лучшими по своей проводимости и наименьшей величине сопротив-

ления контакта между щеткой и контактными кольцами являются медно-графитные щетки марки МГ. Применение этих щеток по сравнению с другими позволяет повысить напряжение на кольцах на 1,5...2 в и соответственно увеличить ток возбуждения. Возбудительный селеновый агрегат должен быть расположен, как можно ближе к синхронизируемому двигателю, а кабели, соединяющие его с контактными кольцами, должны быть возможно короткими и достаточно большого сечения, за счет чего можно уменьшить падение напряжения в цепи ротора на 2...3 в.

Следует отметить, что синхронизированные двигатели не имели за все четыре года каких-либо аварий, связанных с работой в синхронном режиме или происходящих от их синхронизации.

Длительная эксплуатация синхронизированных двигателей при одновременном применении других средств компенсации  $\cos \varphi$  позволило сделать определенные выводы.

Общепризнано, что наилучшим способом повышения коэффициента мощности является широкое внедрение синхронных двигателей. К сожалению, выпуск двигателей этого типа до сих пор еще весьма ограничен и получение их затруднительно. С 1948 г. в комбинате введено в эксплуатацию 6 220 квт, а за последний год всего 1 500 квт синхронных двигателей. К тому же синхронные двигатели могут быть получены только относительно мощные (от 500 квт и выше), пригодные для привода весьма крупных машин, которые на шахтах насчитываются единицами.

Синхронные компенсаторы выгодны при большой их мощности (5 000 квт и выше), тогда как реактивные нагрузки отдельных, даже самых крупных, угольных шахт не превышают 1 500—2 000 квар.

Синхронные компенсаторы сравнительно небольшой мощности 1 500...2 000 квар требуют высоких затрат активной энергии на получение реактивной мощности (порядка 4,25...7,5 квт и выше на 100 квар), и их установка не дает экономии активной энергии.

Синхронизация парка уже действующих на шахтах асинхронных двигателей является для потребителей энергии и в том числе для угольных шахт наиболее простым и эффективным мероприятием. Синхронизировать можно почти любой асинхронный двигатель мощностью, начиная от 80...90 квт.

Практика подтвердила, что по величине экономии активной мощности синхронизированные двигатели в ряде случаев не менее выгодны, чем конденсаторы. Имея в ряде случаев собственный расход более чем 0,5...2,0 квт на 100 квар, они, однако, освобождают более длинные участки сети от реактивной мощности. Как правило, статические конденсаторы устанавливаются на подстанции, а синхронизированные двигатели присоединены на конце линий. Таким образом, во втором случае уменьшение реактивной мощности на 100 квар дает большую экономию потерь актив-

ной мощности в сети, чем и покрывается разницей в собственном расходе.

Для улучшения эксплуатации синхронизированных двигателей и повышения эффекта их применения следует:

1. Селеновые агрегаты для возбуждения пускать с приборами: вольтметром, амперметром в цепи выпрямленного тока.

2. В целях поддержания постоянства тока возбуждения в условиях колеблющегося напряжения сети, а также для возможности регулирования тока разработать конструкцию селенового агрегата с ручной регулировкой напряжения питающего трансформатора под нагрузкой.

В дальнейшем целесообразно этот агрегат разработать с автоматическим поддержанием заданного выпрямленного тока.

3. Разработать конструкцию безмасляного селенового выпрямителя с воздушным (принудительным) охлаждением.

**Выводы.** 1. Синхронизация асинхронных электродвигателей по схеме ДАГ вполне себя оправдала как одно из эффективных и простых по осуществлению мероприятий для сокращения потерь реактивной энергии и повышения коэффициента мощности.

2. Необходимо распространить имеющийся в угольной промышленности опыт массовой синхронизации на предприятия других ведомств, сделать его достоянием всей промышленности Советского Союза и привлечь к его распространению энергосистемы и органы Энергосбыта.

3. Следует поставить перед электропромышленностью и научно-исследовательскими организациями вопрос о целесообразности производства асинхронных синхронизированных двигателей и о специальной разработке такого двигателя, а также об усовершенствовании полупроводниковых выпрямителей (селеновых и других), могущих быть использованными для целей синхронизации.

#### Литература

1. К. И. Скоркин. Синхронизация асинхронных двигателей по схеме ДАГ, Уголь, № 1, 1949.
2. Б. М. Гуревич и М. С. Лихачев. Новый способ экономии электроэнергии на промышленных предприятиях. Механизация тяжелых и трудоемких работ, № 1 1949.
3. И. И. Ратгауз. Масляные селеновые выпрямители. Электричество, № 9, 1949.
4. Б. Г. Оркина. О синхронизации асинхронных двигателей. Промышленная энергетика, № 5, 1949.
5. Л. В. Литвак. К вопросу о внедрении эксплуатационного контроля за реактивной мощностью, потребляемой асинхронными двигателями. Промышленная энергетика, № 5, 1949.
6. М. С. Лихачев. Определение экономичности синхронизированных асинхронных двигателей с фазным ротором как средство повышения косинуса фи. Энергетический бюллетень МНП, № 1, 1950.
7. М. С. Лихачев. К вопросу об экономичности асинхронных двигателей. Энергетический бюллетень МНП, № 10, 1950.
8. Л. В. Литвак. Опыт синхронизации асинхронных двигателей. Электрофикация и электромонтер, № 2—3 1933.

# Итоги внедрения синхронизации на нефтяных промыслах Грозного

Инж. О. П. ШИШКИН

Объединение «Грознефть»

Синхронизация асинхронных электродвигателей по схеме ДАГ начала применяться на Грозненских нефтяных промыслах конца 1948 г.

Использование этого метода позволило в 1949—1950 гг. значительно повысить коэффициент мощности, ряд лет оставшийся на весьма низком уровне в силу особенностей работы электропривода при бурении и добыче нефти (табл. 1).

Анализируются результаты применения синхронизации асинхронных двигателей по схеме ДАГ на нефтепромыслах Грозного. Приводятся данные по повышению коэффициента мощности и снижению капитальных затрат на строительство высоковольтных линий.

в месском нефтепромысле напряжение увеличилось на 10%. Увеличение уровня напряжения способствовало росту производительности механизмов,

особенно при спуско-подъемных операциях в бурении.

2. За счет сокращения расходов реактивной электроэнергии уменьшились потери активной мощности в сетях и трансформаторах. За два года экономия электроэнергии на сокращении потерь в сетях составляет более 7 млн. квтч.

3. Надбавки, уплачиваемые нефтетрестами энергоснабжающей системе за низкое значение коэффициента мощности, снизились за два года на 15 млн. руб. Многие тресты получают сейчас скидки от энергоснабжающей системы.

4. Синхронизация значительно увеличила предельное расстояние, на которое можно передавать мощность при напряжении 6 000 в. В некоторых случаях удалось отказаться от строительства дорогостоящих линий и подстанций 35 кв, широко используя напряжение 6 000 в (Горский и Гудермесский промыслы).

Отдельные буровые и группы из двух-трех буровых, удаленные от промысловой площади на расстояние 10...15 км, сейчас снабжаются при напряжении 6 000 в. В качестве примера можно указать на разведочный район, где 3 буровых станка длительное время питались от линии передачи 6 000 в, что стало возможно благодаря синхронизации двигателей грязевых насосов на этих буровых. В другом районе 3 — 4 буровых станка питаются на расстоянии 8 км по линии 6 000 в, а напряжение поддерживается благодаря использованию синхронизационных агрегатов.

5. Двухлетний опыт применения синхронизирующих устройств показал надежность и удобство их в эксплуатации. За все это время не было случая повреждения электродвигателей по причине синхронизации. Схема ДАГ работает весьма четко. Селеновые синхронизационные агрегаты также достаточно надежны в работе.

Синхронизация прочно вошла в практику нефтепромыслового электрохозяйства Грозного. Реактивная мощность, вырабатываемая синхронизированными двигателями, играет в настоящее время существенную роль в общем балансе реактивной мощности энергоснабжающей системы.

Таблица 1

Естественный и общий коэффициенты мощности грозненских нефтяных промыслов

	Годы					
	1945	1946	1947	1948	1949	1950
Естественный коэффициент мощности . . . . .	0,62	0,627	0,64	0,63	0,70	0,73
Общий коэффициент мощности . . . . .	0,62	0,627	0,64	0,65	0,735	0,76

В частности, весьма резко вырос общий коэффициент мощности в Горском и Гудермесском промыслах (табл. 2).

Таблица 2

	Годы			
	1947	1948	1949	1950
«Горскнефть» . . . . .	0,57	0,61	0,77	0,84
Промысловые промыслы . . . . .	0,59	0,59	0,78	0,85

Начиная с конца 1948 г., число синхронизированных двигателей равномерно росло и в настоящее время достигло 74 с общей установленной мощностью 18 190 квт. (Всего на предприятиях министерства нефтяной промышленности синхронизировано 340 крупных двигателей средней мощностью 200 квт).

Увеличение коэффициента мощности благоприятно сказалось на технических и экономических показателях электрического хозяйства Грозненских нефтяных промыслов:

1. Уровень напряжения поднялся в среднем на 3—5%, а в отдельных случаях до 10% мощности, в тресте «Горскнефть» и на Гудер-

Если в 1949—1950 гг. не была бы в широких масштабах внедрена синхронизация, то потребовалось бы построить новые линии передачи и подстанции общей стоимостью в несколько миллионов рублей. Затраты денежных средств на приобретение, монтаж и эксплуатацию синхронизирующих устройств уже вполне окупились прямой экономией на сокращении стоимости работ по электроснабжению бурящихся буровых, экономией на сокращении потерь электроэнергии в сетях и экономией, вызванной отказом от расширения некоторых действующих магистральных сетей и подстанций.

Затруднительно подсчитать денежную экономию, полученную на Грозненских нефтепромыслах благодаря внедрению синхронизации. Однако достаточно рассмотреть несколько примеров для того, чтобы выявить порядок этой величины.

Для того чтобы трест «Горскнефть» работал нормально при прежнем коэффициенте мощности (0,61), уже в начале 1949 г. необходимо было бы построить линию передачи 20 кв от подстанции ЦПП-1 до подстанции 84 и включить повысительную подстанцию 20/35 кв на 84-м участке. Суммарная стоимость этих объектов по смете составляет 3 млн. руб.

Для нормального электроснабжения Гумесского промысла при прежнем уровне коэффициента мощности (0,59) подстанцию Южн сметной стоимостью 960 тыс. руб. следовало бы включить в первой половине 1949 г. Это следует сказать о переводе на 35 кв район со стоимостью работ 900 тыс. руб.

Если по перечисленным выше объектам приставилось возможным перенести на 2...3 п срок строительства, то при решении вопроса электроснабжения некоторых районов и разведенных буровых удалось вообще отказаться от дорогостоящего варианта с напряжением 20...35, используя напряжение 6 кв и синхронизацию. Более 1 млн. руб. сэкономлено на сокращении потерь активной электроэнергии в сетях и трансформаторах. Этот далеко не полный перечень в несколько раз перекрывает затраты на приобретение, установку и эксплуатацию синхронизирующих устройств.

Опыт синхронизации на промыслах Грозненского Союза указывает на целесообразность внедрения наиболее эффективного способа повышения коэффициента мощности на всех нефтяных промыслах Грозненского Союза.

Б. Б.



## Синхронизация асинхронных двигателей по схеме ДАГ в асбестовой промышленности

А. Ф. КИСЕЛЕВ и М. Я. БЕСКОВ

г. Асбест

В асбестовой промышленности работает большое число мощных асинхронных двигателей с фазным ротором, в частности на дробилках кулачковых, щековых, Блэк и др.

По технологическим условиям двигатели привода этих механизмов имеют переменную нагрузку, что снижает коэффициент мощности, ограничивает пропускную способность электрических сетей и уменьшает коэффициент использования мощности трансформаторов.

Выплата надбавок за низкий  $\cos \varphi$  резко удорожает электроэнергию, в результате и себестоимость готовой продукции также велика. Только в 1948 г. один район Асбэлектросети выплатил 5 504 тыс. руб. надбавок к стоимости электроэнергии. Работающий фазокомпенсатор мощностью 1 870 кв, и батарея статических конденсаторов на напряжение 3 и 6 кв, мощностью 2 000 кв, почти не улучшают положения, так как их применение не уменьшает потери в низковольтных сетях и улучшает  $\cos \varphi$  только на станциях и районных подстанциях.

*Излагается опыт применения синхронизации для компенсации  $\cos \varphi$  мощных двигателей различного типа дробилок асбестового производства.*

Для повышения напряжения в низковольтных сетях, а главным образом — целью возможности при

соединения новых производственных мощностей была применена схема ДАГ синхронизации асинхронных двигателей с фазным ротором.

В асбестовой промышленности мощные двигатели работают в условиях постоянного наблюдения, поэтому после предварительных испытаний был применен вариант полуавтоматической схемы ДАГ, обеспечивающий автоматический перевод в асинхронный режим при выпадении двигателя из синхронизации.

В полуавтоматической схеме ДАГ импульс перевода в асинхронный режим подается током, возникающим в цепи ротора вследствие нарастающего скольжения при выпадении двигателя из синхронизма. Импульс передается через катушечный трансформатор тока на токовую катушку реле, в результате чего выбивается защелка магнитный пускатель отключает синхронизационный агрегат, а шунтирующий разомкнутую цепь ротора контактор КШ замыкает контакты.



Последующее введение в синхронный режим при устранении причины выпадения двигателя из синхронизма осуществляется поворотом штурвала или нажатием пусковой кнопки. Полуавтоматическая схема проста в изготовлении, четко работает и полностью себя оправдала в эксплуатации.

В январе—феврале 1950 г. в асбестовой промышленности были синхронизированы первые двигатели и в скором времени введены в эксплуатацию еще 17 агрегатов ДАГ.

Опыт эксплуатации более 20 синхронизированных по схеме ДАГ двигателей в течение года подтвердил техническую целесообразность этого метода повышения коэффициента мощности. Не было ни одного случая повреждения двигателей. Несмотря на тщательные периодические проверки, перегрев обмотки ротора не обнаружен, но установлено, что производительность дробилок выросла за счет увеличения скорости вращения до синхронного.

Удельный расход активной энергии на компенсацию реактивной энергии составляет  $0,3 \dots 0,8 \frac{\text{квт}}{100 \text{ квар}}$ .

Коэффициент полезного действия двигателей, как правило, не уменьшился, у некоторых двигателей он даже повысился за счет уменьшения потерь в статоре.

Полуавтоматическая схема и синхронизационные агрегаты ДАГ, выпущенные заводом КИП, работают хорошо. За все время эксплуатации был один случай выгорания селенового элемента, других дефектов не было.

Экономический эффект от применения схемы синхронизации можно охарактеризовать результатами, полученными по одному из объектов асбестовой фабрики: на фабрике синхронизи-

ровано 9 электродвигателей общей мощностью 675 квт, работающих при напряжении 380 в. После перевода всех 9 двигателей в синхронный режим трансформаторы с низкой стороны разгрузились на 300 а, что дало возможность дополнительно присоединить более 100 квт активной мощности. Коэффициент мощности поднялся на 0,08, что дало годовое снижение себестоимости продукции на 420 тыс. руб. Затраты на приобретение, доставку и монтаж синхронизационных агрегатов и полуавтоматических станций управления составили 100 тыс. руб.

Полученные успешные результаты и на других установках послужили основанием для организации доклада «Опыт эксплуатации установок, синхронизированных по схеме ДАГ» на специальном семинаре по улучшению коэффициента мощности, состоявшемся с 29 мая по 1 июня 1950 г. по инициативе Энергосбыта Свердловского энерго. Доклад вызвал большой интерес энергетиков Свердловска и области.

В решении, принятом на семинаре, записано: «Просить МЭС об увеличении выпуска синхронизационных агрегатов».

Резюмируя, можно указать, что даже сравнительно ограниченное применение схемы синхронизации в течение года дало асбестовой промышленности только одного района повышение  $\cos \varphi$  на 0,05 и снизило себестоимость продукции на сумму более 4 млн. руб.

Схема ДАГ по эксплуатационным данным Асбоэлектросети является прогрессивным методом улучшения характеристики синхронизируемых двигателей и реально доступными средствами обеспечивает значительное повышение  $\cos \varphi$ .

[6. 4. 1951]



## Повышение коэффициента мощности на предприятиях мукомольной промышленности

**Инж. А. М. ОРЖЕХОВСКИЙ,**  
Главмука

**инж. С. Г. ЭММА,**  
Мелькомбинат им. Цюрупы

**инж. И. М. РАБИНОВИЧ**  
Мелькомбинат № 3

Большинство мельничных предприятий Главмуки Министерства заготовок имеет централизованный трансмиссионный привод малой скорости вращения. Соединение трансмиссии с электродвигателем чаще осуществляется эластичной муфтой, и электродвигатели выбираются тихоходными. Установленные на заводах асинхронные двигатели мощностью 200...600 квт при 375 об/мин имеют низкий номинальный коэффициент мощности 0,72...0,78. Общий коэффициент мощности мукомольного предприятия даже при условии полного использования всего электрооборудования часто не достигает «нейтральной» вели-

*Излагается опыт синхронизации централизованного трансмиссионного привода вальцевых станков и других мельничных машин и механизмов.*

ны — 0,75. За один только 1950 г. мукомольные предприятия выплатили энергосистемам за пони-

женный  $\cos \varphi$  надбавок 4,86 млн. руб.

Во второй половине 1949 г. на московских предприятиях Главмуки: Мелькомбинате им. Цюрупы и Мелькомбинате № 3, а в начале 1951 г. на Тбилиском мелькомбинате № 1 были синхронизированы по схеме ДАГ три двигателя централизованного трансмиссионного привода вальцевых станков и других мельничных машин и механизмов. Все двигатели присоединены эластичной муфтой. Данные двигателей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование	Мелькомбинат им. Цюрупы	Мелькомбинат № 3 Москвы	Мелькомбинат № 1 Тбилиси
Тип . . . . .	ДА-170'29-16	АМ-17-7-16	АМ-1710-16
Мощность, <i>квт</i> . . . . .	440	440	600
Напряжение, <i>в</i> . . . . .	6 000/3 000	6 000	6 000
Ток статора, <i>а</i> . . . . .	61/122	56	75
Напряжение ротора, <i>в</i> . . . . .	525	720	565
Ток ротора, <i>а</i> . . . . .	635	390	660
Класс изоляции . . . . .	А	А	А
Скорость вращения, <i>об/мин</i> . . . . .	364	368	369
Соединение обмоток ротора . . . . .	Треугольник	Звезда	Треугольник
Коэффициент полезного действия, % <i>cos φ</i> . . . . .	90 0,77	91 0,74	Не указан 0,8
Щеточное устройство	Постоянно налегающие	Постоянно налегающие	Постоянно налегающие

Указанная система привода, характер соединения двигателя с главной трансмиссией, скорость вращения двигателей являются типичными для мукомольных предприятий.

Работа мельничных предприятий характеризуется высоким коэффициентом одновременности, весьма близким к единице, с полной загрузкой до номинальной мощности при 6 500...7 000 час работы в год.

Для синхронизации были применены селеновые синхронизационные агрегаты типа ВСМН-1000/525 выпуска завода «КИП» Министерства нефтяной промышленности.

На Мелькомбинате им. Цюрупы и на Тбилиском мелькомбинате применены два выпрямителя каждый собранный по однополупериодной трехфазной схеме и соединенные между собой последовательно. На Мелькомбинате № 3 применен один выпрямитель типа ВСМН-1000/525, соединенный по схеме Ларионова.

Расчетные напряжения и токи для питания ротора при синхронном режиме приведены в табл. 2.

Таблица

	Мелькомбинат им. Цюрупы	Мелькомбинат № 3	Мелькомбинат № 1
Напряжение, <i>в</i> . . . . .	18,4	16,4	11,8
Ток возбуждения, <i>а</i>	895	550	930

В основу монтажной схемы положена полуавтоматическая схема ДАГ, при которой: 1) дуги двигателя осуществляется при асинхронном режиме; 2) перевод двигателя на синхронный режим может производиться при нагрузке до 60...80% от номинальной; 3) при выпадении синхронизма двигатель автоматически переключается на асинхронный режим.

Для выявления технико-экономических показателей и оценки надежности работы синхронизационной установки в эксплуатации на всех указанных комбинатах были проведены испытания при холостом ходе и наибольшей нагрузке. Результаты испытаний сведены в табл. 3, 4, 5, 6

Таблица

## Холостой ход

Мелькомбинат	Режим	Напряжение, <i>в</i>	Ток статора, <i>а</i>	Потребляемая активная мощность, <i>квт</i>	<i>cos φ</i> (-отстающий, + опережающий)	Реактивная мощность, (-отстающая, + опережающая), <i>квар</i>	Суммарный компенсационный эффект, <i>квар</i>	Потери в роторе или мощность возбуждения, <i>квт</i>	Излишняя потребляемая мощность при синхронизации, <i>квт</i>	Затраты активной мощности, <i>квт</i>
Им. Цюрупы (Москва)	Асинхронный	6 400	34,4	27	-0,071	-380	561,2	—	18,2	3,22
	Синхронный	6 500	16,0	22	+0,123	+181,2	—	23,2	—	—
№ 3 (Москва)	Асинхронный	6 150	31,5	22,5	-0,069	-331,6	484,4	—	8,85	1,83
	Синхронный	6 230	12,4	18,0	+0,118	+152,8	—	13,35	—	—
№ 1 (Тбилиси)	Асинхронный	6 280	36,8	29,2	-0,081	-402	662	—	15,3	2,31
	Синхронный	6 320	23,75	28,4	+0,122	+260	—	16,1	—	—

Таблица 4

## Полная нагрузка

Мелькомбинат	Режим	Напряжение, <i>в</i>	Ток статора, <i>а</i>	Потребляемая активная мощность, <i>квт</i>	Потребляемая реактивная мощность, <i>квар</i>	Скользящие, %	<i>cos φ</i>	Мощность на валу, <i>квт</i>	Коэффициент полезного действия	Потери в меди статора, <i>квт</i>	Потери в роторе или мощность возбуждения, <i>квт</i>	Ток возбуждения, <i>а</i>
Им. Цюрупы (Москва)	Асинхронный	6 150	65,5	532	453	2,63	0,761	479,9	0,902	15,95	13,25	—
	Синхронный	6 250	51,0	548	59	0	0,994	518,1	0,907	9,7	23,2	94
№ 3 (Москва)	Асинхронный	6 150	60	472,5	420,2	1,93	0,745	427,0	0,91	17,25	8,6	—
	Синхронный	6 150	45	472,5	54,5	0	0,993	443,0	0,915	9,80	13,2	615
№ 1 (Тбилиси)	Асинхронный	6 120	81,0	657	515	1,7	0,785	600,5	0,914	16,8	10,6	—
	Синхронный	6 330	60,7	639	37,5	0	0,996	604,5	0,92	9,45	16,1	1090

Таблица 5

## Нагрев

Мелькомбинат	Режим	Температура нагрева, °С			
		Ток в обмотке статора, а	Температура окружающей среды, °С	Температура нагрева стали статора при испытании, °С	Температура нагрева обмотки ротора при испытании, °С
И. Цюрупы (Москва)	Асинхронный	65	17	57	61
	Синхронный	51	17	55	86
№ 3 (Москва)	Асинхронный	60	14	53,8	47,8
	Синхронный	45	16	43,7	55,7
№ 1* (Тбилиси)	Асинхронный	81	10	52	
	Синхронный	60,7	10	46	

\* Температура обмотки ротора на Мелькомбинате № 1 не измерялась. Было проведено измерение относительного повышения температуры при том и другом режиме способом вольтметра и амперметра. Измерение производилось на ходу. При токе 660 а на асинхронном режиме падение напряжения на кольцах составило 9,5 в; при токе 1060 а на синхронном режиме падение напряжения составило 10 в. Это дает основание считать, что температура нагрева обмотки ротора в обоих случаях практически одинакова.

Таблица 6

## Экономический эффект синхронизации (не считая потерь в распределительных сетях энергосистем)

Мелькомбинат	Снижение потребления реактивной мощности, квар	Годовое снижение потребления активной энергии квтч за счет:		Высвобождение установленной трансформаторной мощности, ква	Первоначальная стоимость, отнесенная на 1 квар компенсации реактивной энергии, руб.
		повышения к. п. д. двигателя <sup>1</sup>	уменьшения потерь в питающей кабеле,		
Цюрупы (Москва)	394,0	19 250	196 000	280	65,5
№ 3 (Москва)	365,7	16 500	69 000	158	58,0
№ 1 (Тбилиси)	477,5	27 700	40 700	208	67,5

<sup>1</sup> С учетом мощности на возбуждение на синхронном режиме.

При осуществлении синхронизации существовало опасение, что при автоматическом переключении двигателя с синхронного режима на асин-

хронный и существующей максимальной защите мгновенного действия возможно отключение масляного выключателя, что крайне нежелательно в условиях работы мельницы. Практика эксплуатации в течение двух лет показала, что при правильно отрегулированной станции управления синхронизированного двигателя отключения не происходят и двигатель работает устойчиво.

Точно так же не подтвердились опасения перегрева обмотки ротора и отдельных элементов в двигателе: щеток, колец и др. Повышенная температура обмотки ротора при синхронном режиме у двигателя на Мелькомбинате им. Цюрупы (табл. 5) была вызвана большой перегрузкой двигателя при испытаниях.

Синхронизация двигателей повысила средневзвешенный коэффициент мощности на Мелькомбинате им. Цюрупы с 0,8 до 0,84; Мелькомбинате № 3 с 0,74 до 0,86; Мелькомбинате № 1 с 0,74 до 0,96.

Все 3 комбината в настоящее время получают скидку на стоимость электроэнергии. Опыт синхронизации асинхронных электродвигателей на мелькомбинатах показывает, что способ синхронизации мощных электродвигателей по схеме ДАГ при помощи селеновых выпрямителей представляет большой экономический интерес для мельничных предприятий.

Синхронизация тихоходных асинхронных двигателей приводит не только к повышению коэффициента мощности (к снижению потребления реактивной энергии), но также и к повышению к. п. д. двигателей при возрастающей производительности технологического оборудования вследствие отсутствия скольжения на синхронном режиме.

Остается только высказать сожаление, что до настоящего времени выпуск селеновых агрегатов для синхронизации комплектно со станциями управления министерствами угольной и нефтяной промышленности производится только для своих предприятий, а энергоснабжающие организации, в первую очередь заинтересованные в повышении коэффициента мощности и в экономии электроэнергии, не принимают мер для организованного внедрения этого мероприятия на предприятиях других министерств.

[17. 9. 1951]



# О формуле для определения рентабельности синхронизации асинхронных двигателей

Инж. Г. М. БЕРДИЧЕВСКИЙ

г. Рига

В Решении за № 36/18/Э Технического отдела и Государственной инспекции по промэнергетике и энергонадзору МЭС СССР от 4 февраля 1949 г.

была дана формула для подсчета экономической целесообразности и рентабельности устройств по синхронизации асинхронных двигателей. Это решение отменено Циркулярным письмом № 36-211 Технического управления МЭС СССР от 1 июня 1950 г. Однако из аннулированного Решения § 36/18/Э формула переписана в частично измененное Решение № 45/139/Э от 15 декабря 1949 г. Она вошла в «Сборник директивных материалов Технического отдела МЭС СССР», напечатана во всех информационных бюллетенях, издаваемых энергосбытами, и в книге Л. В. Литвака «Вопросы повышения  $\cos \varphi$  промышленных предприятий».

В журнале «Промышленная энергетика» [Л. 1] помещена статья Л. В. Литвака «К вопросу об экономичности синхронизации асинхронных двигателей». В статье Л. В. Литвак использует формулу МЭС для определения «минимального эквивалента реактивной мощности, при котором допустимо применение искусственной компенсации», и для сравнения разных вариантов компенсирующих установок.

Приводим эту формулу в том виде, в каком она напечатана в Решении № 45/139/Э:

$$0,065 \cdot 2500 (0,8K_1 - K_c) + (K_1 - K_c)TS > A0,2, \quad (1)$$

где 2500 — стоимость установленного на станции киловатта, руб.;

0,065 — амортизационные отчисления на станции;

0,8 — коэффициент, учитывающий несоответствие максимума реактивной нагрузки с максимумом системы и максимума предприятия с максимумом системы;

$K_1$  — экономический эквивалент (квт/квар) в часы максимума реактивной нагрузки системы;

$K_c$  — затраты активной мощности на синхронизацию, квт/квар;

$T$  — число часов использования, принимаемое в 3000 (учитываются только

Критически рассматривается формула по определению рентабельности синхронизации асинхронных двигателей, рекомендованная в Решении № 45/139/Э и в других документах Техническим отделом и Государственной инспекцией по промэнергетике и энергонадзору Министерства электростанций.

часы работы в период максимума реактивной нагрузки);

$S$  — стоимость одной составляющей энергии (0,08 руб.);

$A$  — затраты на синхронизацию для подсчета 1 квар (руб/квар) при нагрузке двигателя;

0,2 — коэффициент, учитывающий стоимость установки в 5 лет.

Для проверки пригодности приведенной формулы при подсчетах рентабельности синхронизации приведу только два примера.

1. На одном предприятии, снабжаемом Белорусэнерго,  $\cos \varphi = 0,72$ , средняя активная нагрузка 500 квт, а реактивная 480 квар. На предприятии работают 2 асинхронных двигателя АМ-117, мощностью по 115 квт, загруженные на 60%. Компенсирующий эффект одного двигателя при синхронизации определяется в 105 квт.

На основании элементарных подсчетов получается, что при синхронизации одного двигателя  $\cos \varphi$  предприятия повысится с 0,72 до 0,73, а при синхронизации обоих двигателей достигнет значения 0,88.

Принимаем стоимость затрат на синхронизацию в 80 руб/квар. Данные об экономическом эквиваленте в энергосистеме отсутствуют, а по таблице в наличии трех трансформаций принимаем  $K_1 = 0,12$ . По таблице (Решение № 36/18/Э) затраты на синхронизацию  $K_c = 0,055$ .

Подставив теперь числовые значения в формулу, получаем продолжительность окупаемости затрат на синхронизацию одного двигателя 3,6 года и ту же продолжительность окупаемости при синхронизации двух и более двигателей, что вызывает первое сомнение в правильности расчета по формуле.

2. Перейдем теперь к подсчету рентабельности синхронизации одного предприятия, снабжаемого Арменэнерго, на котором установлена в десять раз большая мощность: средняя активная нагрузка 5000 квт, реактивная 4800 квар и соответственно  $\cos \varphi = 0,72$ .

Примем, что на этом предприятии такие же два двигателя, как в первом примере, работают при загрузке 60%. В этом случае при синхронизации одного двигателя  $\cos \varphi$  предприятия повысится только с 0,72 до 0,73, а при синхронизации обоих двигателей до 0,74.

Число трансформаций — три, как и в первом примере. Продолжительность окупаемости по формуле получается теперь 3,6 года при синхронизации как одного, так и обоих двигателей.

Дополнительная плата за 1 *квтч*, учтенный счетчиком на стороне высокого напряжения, в Белорусэнерго составляет 40,5 коп., а в Арменэнерго только 2,3 коп., коэффициент мощности по первому примеру достигает значения 0,88, а по второму только 0,74, а по формуле продолжительность окупаемости одинаковая — 3,6 года.

Приведенные четыре варианта расчета продолжительности окупаемости наглядно показывают непригодность этой формулы для определения рентабельности синхронизации, тем более при сравнении вариантов компенсационных установок.

Переписываем эту формулу в более удобное для анализа уравнение

$$(0,065 \cdot 2500 \cdot 0,8 + TS)K_1 - (0,065 \cdot 2500 + TS)K_c > A0,2.$$

Согласно данным формулы следует принять:

$$TS = 3000 \cdot 0,08 = 240.$$

Подставив перемноженные числовые значения преобразованное уравнение, получаем:

$$(130 + 240)K_1 - (162,5 + 240)K_c > \frac{A}{5}.$$

Обозначив продолжительность окупаемости раз *C*, получаем ту же формулу в преобразованном виде:

$$C = \frac{A}{370K_1 - 402,5K_c}, \quad (2)$$

где 370 — стоимость сэкономленной в год активной энергии от уменьшения потерь на передачу реактивной энергии от станции до предприятия, руб/*квтч*; 2,5 — годовые затраты на дополнительные потери на синхронизацию, руб/*квтч*.

Принимая число часов использования установки  $T = 3000$  час в год, получаем стоимость сэкономленных потерь

$$b_1 = \frac{370 \cdot 100}{3000} = 12,3 \text{ коп/квтч}.$$

Эта стоимость складывается из топливной составляющей 8 коп/*квтч* и амортизационных отлений 4,3 коп/*квтч*.

Стоимость же киловаттчаса дополнительных затрат на синхронизацию

$$b_2 = \frac{402,5 \cdot 100}{3000} = 13,4 \text{ коп/квтч}.$$

В этом случае амортизационные отчисления составляют 5,4, а топливная составляющая остается неизменной — 8 коп/*квтч*.

Таким образом, принятый в формуле коэффициент 0,8, учитывающий несовпадение максимум реактивной нагрузки и системы и максимум предприятия и системы, фактически снижает амортизационные отчисления в системе с 5,4 до коп/*квтч*.

Если теперь в преобразованную формулу (2)

подставить стоимости киловаттчаса в копейках, то она примет следующий упрощенный вид:

$$C = \frac{A \cdot 100}{(12,3K_1 - 13,4K_c)T}. \quad (3)$$

Формула (3) дает такие же показатели экономической целесообразности и рентабельности, как и формула из Решения № 45/139/Э.

Анализ преобразованной формулы показывает, что стоимость киловаттчаса состоит только из двух компонентов: отчисления на амортизацию и стоимости топлива.

Такое исчисление стоимости киловаттчаса электроэнергии на месте синхронизации у потребителя весьма примитивно и неверно, так как не учтены прочие расходы, связанные с производством, передачей и распределением электрической энергии.

Вследствие того, что не учтены многие компоненты, из которых составляется тариф на электроэнергию, удельный вес топливной составляющей тарифа (8 коп/*квтч*) определяется в 65% от стоимости киловаттчаса потерь (12,3 коп/*квтч*), в то время как обычно топливная составляющая не превышает 25...30% от стоимости киловаттчаса.

Преобразованная формула показывает также, что для определения рентабельности синхронизации асинхронных двигателей для всего Советского Союза принимается в расчет стоимость 12,3 коп. за сэкономленный киловаттчас и 13,4 коп/*квтч* добавочных затрат на синхронизацию.

Между тем, как видно из «Сборника тарифов на электрическую и тепловую энергию», дополнительная плата за каждый киловаттчас, учтенный счетчиком на стороне первичного напряжения, для разных энергосистем различная, например: Литовэнерго 43,7, Белорусэнерго 40,5, Арменэнерго 2,3, а в Колэнерго только 0,5 коп/*квтч*.

Тарифы в разных энергосистемах разные, потому что составляющие тарифа разные: в Арменэнерго, Грузэнерго, Колэнерго и т. д. топливная составляющая равна нулю, а капиталовложение на 1 *квт* мощности станции значительно превышает 2500 руб.

Как мною показано в приведенных примерах, пользуясь формулой МЭС, получаем одинаковую рентабельность компенсирующей установки независимо от того, насколько повышен  $\cos \varphi$ , дешевая или дорогая электроэнергия и расходуется ли топливо на получение электроэнергии или нет.

Анализ формулы показывает, что слабо обоснованы и остальные компоненты, из которых она составлена. Основной показатель в формуле, который в значительной мере предопределяет рентабельность синхронизации, это «экономический эквивалент». По поводу этого показателя в Решении № 36/18/Э было сказано: «Указанные величины экономических эквивалентов являются усредненными и должны в соответствии с инструкцией Технического отдела МЭС ежегодно контролироваться энергоуправлениями». П. Г. Грудинский по поводу определения значения экономического эквивалента пишет [Л. 2]: «В системе потоки реактивной энергии обычно

имеют настолько сложное течение, что определить точно экономический эквивалент представляется сложным делом даже для какого-либо одного определенного часа в сутки». Таким образом, этот основной показатель рентабельности является сугубо ориентировочным.

Авторами формулы предписывается число часов использования принимать равным 3 000 в год. В Директивном письме № 44-201 Госинспекции Министерства электростанций от 13 февраля 1950 г. сказано: «Число часов работы токоприемников, к зажимам которых подключаются конденсаторы, должно составлять не менее 500 в месяц». Чем следует объяснить, что выдача реактивной мощности от потребителя при синхронизации ограничена 250 час в месяц и должна быть не менее 500 час при установке конденсаторов?

Для определения удельных затрат активной мощности на синхронизацию приведена в Реше-

нии № 45/139/Э специальная таблица. Значения коэффициента  $K_c$  в таблице преувеличены, что вышает срок окупаемости и тем самым препятствует внедрению синхронизации.

На основании анализа формулы и приведенных примеров расчета рентабельности синхронизации нельзя не прийти к выводу, что эта формула абсолютно непригодна для определения экономической целесообразности и рентабельности синхронизации асинхронных двигателей, а тем более для сравнения вариантов компенсирующих установок реактивной энергии.

#### Литература

1. Л. В. Литвак. К вопросу об экономичности синхронизации асинхронных двигателей. Промышленная энергетика, № 7, 1950.
2. П. Г. Грудинский. Экономические режимы трансформаторов и асинхронных двигателей. Сборник материалов научно-технической сессии по экономии электроэнергии. Госэнергоиздат, 1949.

[9. 2. 1950]



• ОТ РЕДАКЦИИ

*Публикуя в настоящем номере ряд статей по применению в разных отраслях промышленности синхронизации асинхронных двигателей по схеме ДАГ, редакция приглашает читателей принять участие в обсуждении этого вопроса.*

## Передача и распределение электроэнергии при помощи шин

Инж. М. В. ГРЕЙСУХ

Московское проектно-конструкторское управление Центроэлектромонтажа

Опыт проектирования электроснабжения энергоемких промышленных предприятий показал, что если источник питания (теплоэлектроцентраль или районная подстанция) расположен от потребителя на расстоянии, не превышающем 1...1,5 км, передачу, а иногда и распределение электроэнергии на напряжении 3, 6 и 10 кВ целесообразно осуществлять шинами, проложенными в туннеле, на эстакаде или на специальных опорах, а не кабелями.

Применение шин вместо кабелей при одних и тех же потерях мощности дает ряд преимуществ: 1) медь, идущая на изготовление кабелей, заменяется менее дефицитным алюминием; 2) экономится свинец, требующийся для изготовления оболочки кабелей; 3) трудоемкие в изготовлении кабели заменяются очень простыми в изготовлении шинами; 4) повышается удобство эксплуатации и надежность работы установки (отпадают затруднения, связанные с заменой проложенных в земле поврежденных кабелей, и исключается применение кабельных муфт, являющихся источником частых аварий); 5) сокращается число отходящих от источника питания линий и количе-

*Доказывается целесообразность передачи и распределения электроэнергии при помощи шин 3, 6 и 10 кВ при токе 1000 а и выше и расстоянии от источника питания до 1,5 км. Приведены кривые зависимости тока от расстояний, при которых капитальные затраты на кабельный и шинный варианты одинаковы. Приведены соображения о том, в каких случаях целесообразно применять шины и в каких кабели.*

ство высоковольтных аппаратов большой разрывной мощности; 6) в ряде случаев отпадает необходимость в установке реакторов, так как реактивность шин частично оказывается достаточ-

для ограничения разрывной мощности на шинной приемной подстанции.

При одинаковом расходе активных материалов потерей мощности при кабельном и шинном вариантах можно считать, как правило, одинаковыми. Но в ряде случаев при шинном варианте они будут меньше вследствие уменьшения потерь в реакторах, а также вследствие того, что не всегда имеется возможность использовать резервные кабели.

Для подтверждения сказанного приведем два примера.

Распределение электроэнергии на одной обогатительной фабрике с помощью шин 6 кВ дает по сравнению с кабельным вариантом экономии капитальных затрат около 220 тыс. руб., свинец — около 11,0 т, меди — около 15,0 т и уменьшение годовых потерь на 465,0 тыс/квтч.

Передачу электроэнергии на другую обогатительную фабрику от шин 6 кВ заводской та-

начала было намечено осуществить четыремя очередь), а затем семью (II очередь) сдвоенными кабельными линиями  $2 \times 3 \times 150 \text{ мм}^2$ , длиной около 700 м в туннеле. Переход от кабелей к двум линиям, выполненным алюминиевыми шинами, в данном случае дает экономию капитальных затрат около 400 тыс. руб., свинца — около 39 т и меди — около 56,0 т.

Существенным недостатком передачи и распределения энергии с помощью шин является необходимость сооружения специального туннеля или эстакады, в то время как при кабельном варианте в отдельных случаях можно ограничиться прокладкой кабелей либо в общем с другими коммуникациями в туннеле, либо непосредственно в земле.

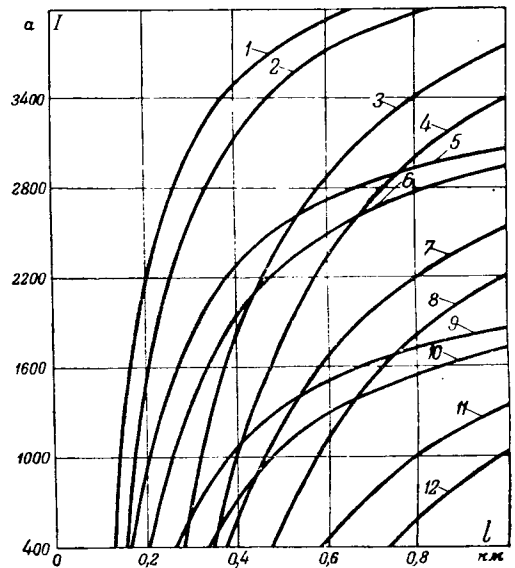
Для выяснения вопроса о том, при каких условиях более экономичным следует считать шинный вариант и при каких кабельный, нами была определена путем расчетов зависимость состояния (источник питания — приемная подстанция) от передаваемых токов, при которых капитальные затраты будут одинаковы как при передаче электроэнергии с помощью алюминиевых шин, так и с помощью кабелей. Эта зависимость представлена на рисунке в виде семейства кривых.

Кривые 1, 2, 5, 6, 9 и 10 построены для случая, когда от источника питания к приемной подстанции проложены 4 кабельных линии, кривые 3, 4, 7, 8, 11 и 12 — 6 кабельных линий. Кривые 1, 2, 3 и 4 построены для случая прокладки кабелей непосредственно в земле, кривые 5, 6, 7 и 8 — в общем с другими коммуникациями в туннеле и кривые 9, 10, 11 и 12 — в отдельном туннеле. Кривые 1, 3, 5, 7, 9 и 11 построены для случая, когда на тэц или районной подстанции установлены масляные выключатели типа МГГ-10, кривые 2, 4, 6, 8, 10, 12 — масляные выключатели МГГ-229.

Практический интерес представляют точки кривых, лежащие выше прямой, соответствующей току 1000 а, так как только при этом и больших токах может идти речь о применении шин.

Из кривых  $I = f(l)$  видно, что при 6 кабельных линиях и при прокладке кабелей в отдельном туннеле капитальные затраты при кабельном варианте будут всегда выше, чем при шинном. При том же числе кабельных линий и прокладке кабелей непосредственно в земле капитальные затраты в обоих случаях будут одинаковы при  $I = 1000 \text{ а}$  и  $l = 0,3 \dots 0,4 \text{ км}$ . С увеличением тока величина  $l$ , соответствующая равенству капитальных затрат, возрастает; при токе 2000 а она будет равна 0,45...0,55 км.

Если можно ограничиться 4 кабельными линиями, то при токе 1000 а капитальные затраты как при том, так и при других вариантах и прокладке кабелей в отдельном туннеле будут одинаковы при  $l = 0,4 \dots 0,5 \text{ км}$ ; при токе же, большем 1000 а,  $l$  резко возрастает. Следовательно, во всех случаях, когда кабели прокладываются в отдельном туннеле и когда токи равны или



выше 1000 а, линии, выполненные шинами, выгоднее кабельных. При прокладке же кабелей непосредственно в земле и при токе 1000 а капитальные затраты будут одинаковы при  $l = 0,15 \dots 0,2 \text{ км}$ , при токе 2000 а — при  $l = 0,2 \dots 0,3 \text{ км}$ .

Таким образом, если местные условия позволяют и если расстояние от источника питания до потребителя не превышает 200...300 м, а ток равен или выше 1000 а, во всех случаях передачу электроэнергии целесообразно осуществлять шинами, а не кабелями, так как капитальные затраты при этом не увеличиваются. Учитывая, однако, что при шинном варианте получается значительная экономия свинца и меди, можно не считаться с некоторым увеличением капитальных затрат и применять шины и при больших расстояниях от источника питания до потребителя. Увеличение капитальных затрат в каждом конкретном случае должно быть сопоставлено с полученной экономией цветных металлов.

Следует отметить, что на крупных предприятиях из-за загруженности территории другими коммуникациями (водопровод, канализация, паропроводы, железнодорожные пути и т. д.) прокладка большого числа кабелей непосредственно в земле встречает затруднения и в большинстве случаев кабели прокладываются в туннелях или блоках.

Ввиду того, что передача и распределение электроэнергии с помощью шин не нашли еще широкого применения, необходимо шире внедрять их, так как они имеют ряд несомненных преимуществ перед передачей и распределением с помощью кабелей.

#### Литература

- 1 М. В. Грейсух. Опыт проектирования систем электроснабжения предприятий цветной металлургии. Труды Всесоюзной научно-технической сессии по электроснабжению промышленных предприятий, Стройиздат, 1950.

## Работы академика М. В. Шулейкина по электрическим машинам<sup>1</sup>

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

Московский электротехнический институт связи

Один из выдающихся деятелей Советской радиотехники, академик Михаил Васильевич Шулейкин (14.11.1884—17.7.1939) изучал в первые годы своей инженерной деятельности явления колебаний в коллекторных электрических машинах, способы расчета специальных конструкций электрических машин высокой частоты, а также разрабатывал устройства для трансформирования частоты. Одной из целей этих исследований М. В. Шулейкина было создание надежных машинных генераторов для радиостанций взамен примитивных искровых передатчиков затухающих колебаний и дуговых передатчиков незатухающих колебаний.

Убедившись впоследствии, что для целей радиотелефонирования потребуются электрические колебания с высокими частотами, получение которых легче осуществимо с помощью электронных приборов, М. В. Шулейкин оставил исследования электрических машин и занялся радиотехническими исследованиями, результаты которых содействовали выдвиганию советской радиотехники на первое место в мире.

Тем не менее, оригинальные исследования М. В. Шулейкина по электрическим машинам заслуживают изучения; из них виден несомненный приоритет русской научной мысли в таких вопросах, как получение колебаний в электрических цепях, не содержащих емкостей, изучение колебаний в коллекторных электрических машинах и др.

Результаты этих работ могут принести пользу для развития техники электропривода и смежных областей электротехники.

Самим М. В. Шулейкиным было опубликовано небольшое число работ по исследованию электрических машин; однако в его личном архиве найдено несколько начатых работ, оставшихся неизвестными. К сожалению, архив М. В. Шулейкина собран еще не полностью; ряд материалов был, по видимому, утерян еще при его переезде из Петрограда в Москву. Результаты законченного исследования по колебаниям в коллекторных электрических машинах опубликованы в трех статьях [Л. 1, 2, 3].

В первой из этих работ, доложенной им 2 января 1909 г. на V Всероссийском электротехническом съезде в Москве, М. В. Шулейкин доказал возможность существования колебаний в системах: а) генератор постоянного тока с последовательным возбуждением — двигатель постоянного тока с независимым возбуждением; б) генератор того же типа — двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, при шунтировании обмотки возбуждения последнего активным сопротивлением.

М. В. Шулейкин дал ясное физическое объяснение процесса колебаний. Так, в случае (а) значение противо-э. д. с., индуктированной в якоре двигателя, равно разности э. д. с. генератора и омического падения напряжения во всей цепи  $E_m = E_g - IR_a$ . В первый момент пуска двигателя его скорость, а следовательно, и противо-э. д. с. равны нулю. Ток будет иметь максимальное значение, определяемое полным значением омического сопротивления цепи. Затем двигатель начинает разворачиваться. Его скорость и противо-э. д. с. возрастают, пока тормозящий момент, обусловленный полезной нагрузкой двигателя и вредными сопротивлениями, не станет равным вращающему моменту, развиваемому в силу взаимодействия тока якоря с магнитным полем. Если это равновесие моментов не установится до

некоторой критической точки  $D$  (рис. 1), характеризующей максимум величины противо-э. д. с., как функции тока, может случиться, что скорость и противо-э. д. с. двигателя будут еще продолжать возрастать. Ток в цепи начнет уменьшаться и э. д. с. генератора будет поэтому падать.

Когда ток в цепи и э. д. с. генератора достигнут больших значений, противо-э. д. с. двигателя еще сохранит некоторое значение, поскольку якорь, обладая живой энергией, продолжает вращаться в магнитном поле полюсов. В это время возникнет ток обратного прежнего направления. Генератор, вращающий его двигатель будет тормозиться. С другой стороны, поскольку к генератору продолжает подводиться механическая энергия извне, генератор вновь возбуждается и величина обратного тока в цепи станет увеличиваться. После прихода якоря в состояние покоя, двигатель, возбужденный независимым возбуждением, придет в движение в другую сторону. Описанный процесс будет повторяться.

Таким образом, в системе «генератор с последовательным возбуждением — двигатель с независимым возбуждением» могут возникнуть электрические колебания малой частоты, сопровождаемые изменениями скорости вращения двигателя между некоторыми положительным максимумом и некоторым отрицательным максимумом (рис. 2).

При опытной проверке на двух машинах постоянного тока (110 в, 41 а каждая) М. В. Шулейкин получил колебания с периодом в 1,75 сек. Кривая противо-э. д. с. двигателя теоретически должна отставать по фазе от тока на  $1/4$  периода. Вследствие же наличия нагрузки у двигателя

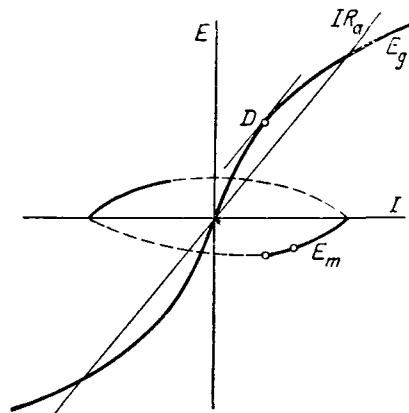


Рис. 1.

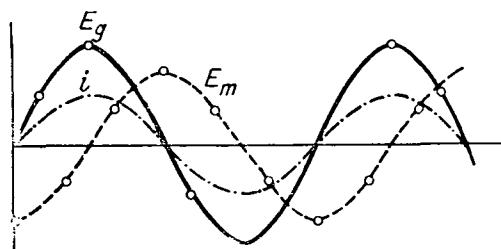


Рис. 2.

<sup>1</sup> По материалам доклада на научно-технической конференции МЭИС в апреле 1951 г.



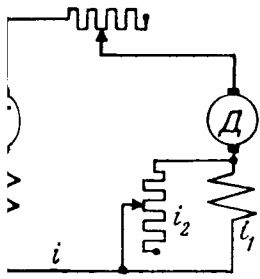


Рис. 3.

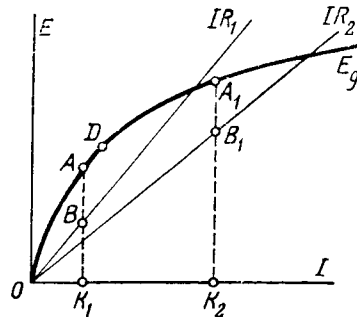


Рис. 4.

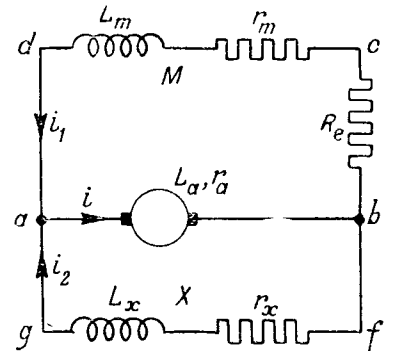


Рис. 5.

же из-за потерь в стали сдвиг получался меньшим, ю 70°.

Математическое исследование М. В. Шулейкина показывает, что при слабом насыщении генератора период колебаний равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\theta L}{C_1 C_2 \Phi}},$$

$L$  — индуктивность генератора и двигателя, соединенных последовательно;

$\Phi$  — постоянный поток возбуждения двигателя;

$\theta$  — момент инерции якоря двигателя;

$C_1 = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot \frac{1}{2\pi}$  — постоянная в формуле для определения противо-э. д. с. двигателя;

$C_2$  — постоянная в выражении, определяющем зависимость между полным вращающим моментом двигателя и током в якоре:

$$M = C_2 I \Phi.$$

Более резкая форма колебаний была получена М. В. Шейкиным в случае (б), т. е. при двигателе с последовательной обмоткой возбуждения, шунтированной активным сопротивлением. Основным фактором, обуславливающим возникновение колебаний, является непропорциональность потока полюсов и током в якоре двигателя (рис. 3).

Если, например, уменьшить сопротивление, шунтирующее обмотку возбуждения, то ток в якоре двигателя увеличится, его вращающий момент возрастет, и якорь получит некоторое ускорение. Вследствие явления самоиндукции величина потока полюсов будет спадать с известным законом по времени. Индуцированная в двигателе противо-э. д. с. может возрасти настолько, что сделается больше напряжения на зажимах; возникнут колебания, подробно разобранные выше.

Более подробно процесс колебаний объясняется М. В. Шейкиным с помощью рис. 4. Пусть двигатель вращается с некоторой постоянной скоростью и его режим задается точкой  $A$ , соответствующей току  $I_1 = OK_1$ . Увеличим теперь сопротивление цепи от величины  $R_1$  до величины  $R_2$ . Ток увеличится до значения  $I_2$ , определяемого углом  $OK_2$ . Противо-э. д. с. двигателя примет значение  $E$ . Вращающий момент увеличится вследствие возрастания тока в якоре, скорость двигателя начнет увеличиваться, развиваемый момент не будет полностью уравновешиваться моментами нагрузки и вредных сопротивлений. Если веские не установится до достижения точки  $D$ , то противо-э. д. с. двигателя послужит причиной уменьшения и напряжения генератора. Когда последние достигнут тех значений, дальнейший режим может протекать так:

а) Если сопротивление, шунтирующее обмотку возбуждения двигателя, подобрано так, что при  $I = 0$  в главной цепи поток полюсов еще сохранил величину, достаточную для индуктирования тока, который будет в состоянии вновь вращать генератор, получится колебательный процесс. То же произойдет и в случае достаточно большого значения остаточной индукции в магнитной системе двигателя.

б) В случае большой величины шунтирующего сопротивления

возникновения или незначительности остаточной индукции двигателя будет не в состоянии перемагнитить генератор; возникший процесс будет носить затухающий аperiodический характер.

В случае незатухающих колебаний скорость двигателя будет колебаться около некоторого среднего значения, но меньше направления; колебания скорости будут тем меньше, чем больше момент инерции вращающейся системы.

М. В. Шулейкин математически доказал возможность получения следующих четырех режимов в данной системе: а) стационарное состояние; б) аperiodический затухающий процесс; в) периодический затухающий процесс; г) незатухающие колебания. Эксперименты полностью подтвердили их существование.

Таким образом, М. В. Шулейкин доказал и теоретически, и практически, что двигатель с последовательной обмоткой возбуждения, шунтированной сопротивлением, представляет собой как бы емкость; присутствие такого двигателя в цепи генератора с последовательным возбуждением может вызвать электрические колебания, аналогичные полученным с помощью обычных конденсаторов [Л. 9]. Развивая результаты исследования, М. В. Шулейкин высказал следующее интересное предложение: «...Подобные механизмы могут применяться во всех тех случаях, где необходимо вызвать отрицательный сдвиг фаз (т. е. опережение током напряжения —  $V. L.$ ), независимо от того, будет ли этот механизм производить работу, как двигатель, или нет». «...Подобный механизм, построенный без железа, может служить для получения колебаний больших частот, играя роль применяющихся в этих случаях конденсаторов».

Во второй работе «Об электрических колебаниях» [Л. 2], относящейся к 1910 г., М. В. Шулейкин вывел возможность построения не содержащих конденсаторов электрических схем, в которых могут существовать свободные колебания.

В частности, в этой работе М. В. Шулейкин установил возможные режимы работы генератора постоянного тока с параллельным возбуждением, замкнутого на внешнюю цепь, не содержащую емкости: 1) аperiodически затухающий режим; 2) аperiodически возрастающий режим; 3) режим периодически затухающих колебаний; 4) режим периодически незатухающих колебаний; 5) режим периодически возрастающих колебаний; 6) режим постоянного тока.

Объяснение возникновения колебаний в цепи генератора с параллельным возбуждением (рис. 5), данное самим М. В. Шулейкиным: «Пусть в некоторый момент времени  $t = 0$ , после того как постоянные контуры  $abfg$  и  $abcd$  подобраны соответственным образом, я задаю контуру  $abcd$  некоторый ток  $I_1$  (рис. 6), который создает поток полюсов, индуктирующий в якоре некоторую э. д. с.  $e$ . После этого я замыкаю контур  $abfg$ . В нем начнет возникать ток  $i_2$ . Проходя по якору, он создает омическое падение напряжения. Электродвижущая сила на зажимах якоря благодаря этому уменьшится, будет уменьшаться и ток  $i_1$ , проходящий по обмотке магнитов (рис. 6). Следовательно,  $i_1$ , а затем и  $i_2$  будут уменьшаться постепенно.

$L_m$  и  $L_x$  я подбираю таким образом, что когда  $i_1$  будет равно нулю, то  $i_2$  еще сохранит некоторую положительную величину.

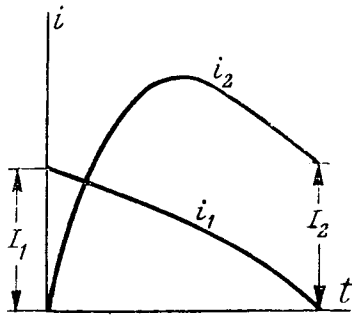


Рис. 6.

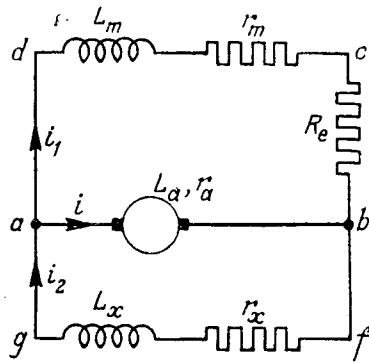


Рис. 7.

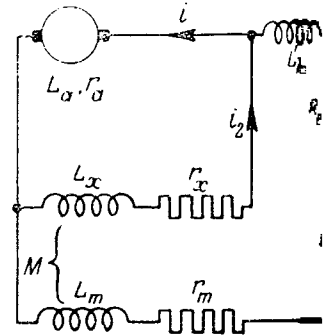


Рис. 8.

В следующий момент направление токов будет таково, как это указано на рис. 7. Ток пройдет через обмотку полюсов в противоположном направлении. Благодаря этому на зажимах генератора будет индуцироваться теперь э. д. с. противоположного знака прежней, поддерживая изменившееся направление тока в обмотке полюсов и принуждая ток в цепи *abfg* переменить свой знак.

Ток в цепи *abfg* начнет переходить от нуля к отрицательным величинам тогда, когда ток в контуре *abcd* будет уже иметь некоторую величину, после чего индуцированная э. д. с. начнет уменьшаться благодаря увеличению *i*<sub>2</sub>, и, наконец, явление пойдет в обратном порядке.

Период колебаний в цепи с генератором параллельного возбуждения равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L_x(L_a + L_m) + L_a L_m}{r_a(r_m + r_x + R_e) + r_x(R_e + r_m - k_1)}}$$

Здесь *k*<sub>1</sub> — коэффициент пропорциональности между э. д. с. генератора и током возбуждения; *E* = *k*<sub>1</sub>*i*<sub>1</sub> (генератор не предполагается сильно насыщенным). Остальные величины указаны на рис. 5.

При выводе формул М. В. Шулейкин предположил, что щетки расположены на нейтральной линии; это позволило не вводить в анализ усложнений, определяемых реакцией якоря, так как при слабом насыщении размагничивающим действием поперечно-намагничивающего потока машины можно пренебречь.

Колебания возможны при условии

$$L_a(R_e + r_m + r_x) + L_m(r_a + r_x) \leq L_x(k_1 - R_e - r_a - r_m).$$

Если обмотку *X* расположить на полюсах точно так же, как и обмотку *M* (рис. 5), то мы получим схему генератора со смешанным возбуждением. В этой схеме возможны те же режимы, что и для генератора с параллельным возбуждением.

Генератор с последовательным возбуждением может создавать электрические колебания в схеме с трансформатором (рис. 8); здесь *L*<sub>м</sub> — индуктивность обмотки возбуждения; *L*<sub>х</sub> и *L*<sub>м</sub> — индуктивность обмоток трансформатора; *M* — их взаимоиндуктивность.

Для получения незатухающих колебаний необходимо условие

$$(L - M)[L_a(R_m + r_x) + L(2r_a + r_x + R_m - k_1) + Mk_1] - 2MLr_a = 0,$$

где *L* = *L*<sub>м</sub> + *L*'<sub>м</sub>; *R*<sub>м</sub> = *R*<sub>е</sub> + *r*<sub>м</sub>; *k*<sub>1</sub> — коэффициент в выражении *e* = *k*<sub>1</sub>*i*<sub>1</sub>.

При *r*<sub>а</sub> ≪ *R*<sub>м</sub> и *r*<sub>а</sub> ≪ *r*<sub>х</sub> период незатухающих колебаний будет равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(L - M)^2(L + M + 2L_a)}{r_x[L(R_m - k_1) + Mk_1] - R_m r_x M}}$$

Опытная проверка производилась М. В. Шулейкиным на машине 4,5 квт, 110 в, 1250 об/мин. При схеме по рис. 8 периоды колебаний получались от 0,27 до 0,62 сек. Максимальные значения: напряжения на зажимах генератора 14 в; тока в главной цепи 30 а, тока в цепи возбуждения 4,7 а. При схеме с трансформатором (рис. 8) был использован трансформатор 220/110 в, обмотка высокого напряжения включалась последовательно с обмоткой возбуждения. Период колебаний был 0,34 сек.

Действующие значения: тока в главной цепи 45 а, тока в цепи возбуждения 11 а; напряжения 22 в.

Адъюнктовая диссертация М. В. Шулейкина, защищенная им в 1913 г. в Петербургском политехническом институте, «Самовозбуждение электрических колебаний в цепях коллекторных динамо-машин» [Л. 3] является в сущности обобщением накопленного автором за 4 года опытного материала и теоретических исследований. В чале работы М. В. Шулейкин определил ее цель так:

«Настоящая работа имеет целью выяснения условий возникновения свободных колебаний не только в цепи щеток или генераторов, как таковых, а вообще в цепи, в которую конденсаторы не введены».

Общий метод исследования, предложенный М. В. Шулейкиным, сводится к следующим положениям.

Пусть имеется (*m* - 1) параллельных ветвей, не содержащих источников энергии; назовем их «приемными цепями»; к ним присоединена ветвь, содержащая коллекторный генератор и называемая «генераторной цепью» (рис. 5).

Примем следующие допущения.

1. В генераторной цепи и приемных цепях конденсаторы совершенно отсутствуют.

2. Генераторная цепь обладает некоторой э. д. с. которая индуцируется благодаря движению одного полюса относительно других и вообще является функцией времени *f*(*t*), индуктивностью *L* и омическим сопротивлением *r* и связана электромагнитно с каждой из присоединенных к ней приемных цепей; эта связь определяется коэффициентом взаимной индукции *M*<sub>1,м</sub>.

3. Каждая из приемных цепей обладает индуктивностью *L*<sub>м</sub>, омическим сопротивлением *r*<sub>м</sub> и связана электромагнитно с каждой из остальных цепей; связь такого рода определяется коэффициентом взаимной индукции *M*<sub>м,н</sub> (*L*<sub>м</sub> = *M*<sub>м,м</sub>).

4. Все *r*, *L* и *M* — постоянные величины.

Электромагнитная энергия, сосредоточенная в данной системе после сообщения последней некоторых начальных условий, равна:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{n=m} \sum_{m=1}^{m=m} M_{m,n} i_m i_n.$$

Это однородная квадратичная функция с постоянными коэффициентами, по самой своей сущности положительная при каких угодно значениях входящих в нее ветвей и обращающаяся в нуль лишь тогда, когда все переменные равны нулю. Взаимоиндуктивности с индексными державшими одни и те же буквы, равны друг другу:

$$M_{m,n} = M_{n,m}.$$

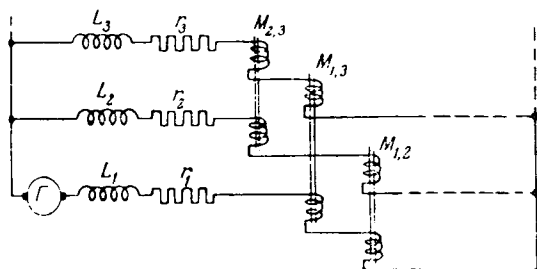


Рис. 9.

За время  $dt$  в данной системе превратится в тепло некоторое количество энергии  $Sdt$ , где

$$S = \sum_{n=1}^{n=m} r_n i_n^2.$$

Поскольку однородная квадратичная функция, положительная своему существу.

Для каждого контура нашей системы мы можем написать по одному уравнению Лагранжа-Максвелла:

$$\frac{d}{dt} \frac{dT}{di_n} + \frac{dS}{di_n} = E,$$

т.е. что то же самое, на основании второго закона Кирхгофа можно характеризовать  $m - 1$  контуров следующими  $m - 1$  уравнениями э. д. с.:

$$E = r_1 i_1 + \sum_{n=1}^{n=m} M_{1,n} i_n' + r_2 i_2 + \sum_{n=1}^{n=m} M_{2,n} i_n'$$

$$E = r_1 i_1 + \sum_{n=1}^{n=m} M_{1,n} i_n' + r_3 i_3 + \sum_{n=1}^{n=m} M_{3,n} i_n'$$

г.д. Кроме того, напомним уравнение первого закона Кирхгофа:

$$i_1 = i_2 + i_3 + \dots$$

Таким образом, общее число уравнений  $m$  равно числу известных токов  $m$ .

Задача, следовательно, имеет определенное решение. В. Шулейкин приводит сначала решение для системы дифференциальных линейных уравнений токов (первого ряда) без правых частей; это возможно в силу допущения о постоянстве всех коэффициентов при зависимых переменных и их производных. Решения ищутся в виде:

$$= e^{\rho t}, \quad i_3 = \mu_3 e^{\rho t}, \quad i_4 = \mu_4 e^{\rho t} \text{ и т. д., где } \mu_3, \mu_4, \dots, \mu_m$$

$\rho$  — неизвестные постоянные. Подстановка этих решений в дифференциальные уравнения дает систему алгебраических уравнений с неизвестными  $\mu_1, \dots, \mu_m$ .

Решение будет теперь в виде «характеристического» определителя; обозначая его корни через  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m$ , значение каждой из цепей системы определится интегралом вида:

$$i_n = A_1 e^{\rho_1 t} + A_2 e^{\rho_2 t} + \dots + A_{m-1} e^{\rho_{m-1} t}.$$

Корни данного характеристического определителя вещественны. М. В. Шулейкин применил для подтверждения об обстоятельства доказательства, данное Раутом (Routh) при исследовании лагранжева определителя.

(Примечание. Исследуется ряд определителей, появляемых путем последовательного исключения строк и столбцов у основного определителя; ряд имеет свойства, характеризующие свойства ряда функций Штурма).

На основании этого анализа М. В. Шулейкин заключил, что в системе, составленной из  $(m-1)$  подвешенных контуров, определенным образом связанных между собой, собствен-

ный режим всегда будет аperiodически затухающий.

Если же предположить

$$F = k_1 i + k_2' i_2 + k_3' i_3 + \dots = k_2 i_2 + k_3 i_3 + \dots$$

$$(k_2 = k_1 + k_2'; k_3 = k_1 + k_3' \text{ и т. д.}),$$

то характеристический определитель может иметь, кроме вещественных корней, еще и комплексные, что означает возможность возникновения в данной системе периодических и аperiodических режимов. Вещественные части комплексных корней и чисто вещественные корни могут быть не только отрицательными, но и положительными, т. е. аperiodический режим может быть не только затухающим, но и возрастающим, точно так же, как и режим периодический.

Мощность источника энергии всегда ограничена некоторым пределом, и в некоторый момент времени количество рассеиваемой в единицу времени энергии будет равно максимальной мощности источника. В этой точке получится некоторый устойчивый режим (соответствующий незатухающим колебаниям или постоянному току).

Таким образом, линейная зависимость э. д. с. генераторной цепи от токов является условием возникновения (самовозбуждения) в системе незатухающих колебаний или постоянного тока, причем тот или другой режим определяется постоянными цепи.

Если э. д. с., генерируемая в системе, будет иметь равные коэффициенты линейной зависимости со всеми токами системы или будет прямо пропорциональна лишь току генераторной цепи, то незатухающие колебания в системе возникать не могут. В этом случае режим системы будет аperiodически возрастающий или затухающий; в первом случае он переходит в режим постоянного тока. Доказательство этого обстоятельства М. В. Шулейкиным дано на частном примере двух приемных цепей.

Применяя этот анализ к конкретным случаям генераторов и двигателей, М. В. Шулейкин получил общие условия устойчивости работы коллекторных машин как в режиме постоянного тока, так и в режиме незатухающих колебаний.

Приводим здесь некоторые примеры частных выводов М. В. Шулейкина.

1. Коллекторная машина с последовательным возбуждением, построенная «с железом» или «без железа», может устойчиво работать только генератором постоянного тока в случае простой схемы включения на нагрузку, содержащую только активное и индуктивное сопротивления. Генерирование незатухающих колебаний возможно или при схеме включения с трансформатором, указанной ранее (рис. 8), или при включении сопротивления, непременно содержащего индуктивность, параллельно обмотке возбуждения (так как ток главной цепи должен отставать по фазе от тока возбуждения, а следовательно, и от индуктированной э. д. с.).

2. В коллекторной машине с параллельным возбуждением режим незатухающих колебаний возможен: необходимым условием возникновения колебаний является прямая пропорциональность между э. д. с. машины и током возбуждения  $E = k i$ ; это возможно или в машине, построенной «без железа», или же в машине «с железом» в случае слабого насыщения. Самоиндукция внешней цепи должна быть достаточно велика, а сопротивление невелико.

Этим объясняются факты перемагничивания генераторов с параллельным возбуждением при коротком замыкании.

Если же желательно получить устойчивый режим постоянного тока, то условия  $E = k i$  следует избегать; отсюда вытекает, что «роль железа» в машине заключается не только в том, чтобы наимыгоднейшим образом служить для распределения магнитного потока, но, создавая устойчивый режим постоянного тока, тем самым исключить все остальные».

Работа генератора тем устойчивее, чем выше перегиба характеристики холостого хода лежит точка номинальной э. д. с.

3. Репульсионный двигатель может работать генератором незатухающих колебаний на сеть, не содержащую никакой посторонней э. д. с.; частота будет определяться па-

раметрами всей цепи; однако он может работать и совместно с другими генераторами; если параметры внешней цепи подобраны так, что репульсионный генератор не может самовозбудиться, он может работать, получая намагничивающий ток из сети.

Возможен случай, когда репульсионный генератор будет давать ток двойной частоты (соответствующий вынуждающей силе и соответствующий собственным колебаниям системы). В этом случае намагничивающий ток, получаемый из сети репульсионным генератором, будет изменять его условия самовозбуждения, т. е. при одних и тех же постоянных внешней цепи репульсионный генератор может и не возбуждаться, если, например, условие самовозбуждения параметры цепи удовлетворяют, когда намагничивающего тока из сети нет. Другими словами, если репульсионный генератор возбуждается при некоторых определенных условиях насыщения магнитной системы, то он не возбудится, если намагничивающий ток из сети изменит эти условия.

4. В цепях, содержащих коллекторные двигатели, возможны колебания двух родов: а) связанные с изменением скорости двигателя; б) колебания, при которых скорость почти не меняется. Последний род возможен в случае, когда масса вращающихся частей велика.

Математическое исследование колебаний в цепях с коллекторными двигателями в общем случае весьма затруднительно из-за кропотливости вычислений. Поэтому необходимо введение ряда упрощающих допущений. Так, М. В. Шулейкин обычно предполагает, что щетки поставлены на геометрической нейтральной; поэтому можно пренебречь электромагнитной связью между обмотками якоря и возбуждения.

5. В случае коллекторного двигателя, возбуждение которого не связано с генератором, питающим данный двигатель (т. е. при независимом возбуждении двигателя), собственный режим системы — аperiodически затухающий; колебания могут быть только вынужденными.

6. В цепях коллекторных двигателей с последовательным или параллельным возбуждением при щетках, стоящих на геометрической нейтральной, возможен лишь навязанный режим, определяемый вынуждающей силой; собственный режим системы является аperiodически затухающим и может поэтому иметь лишь временное значение.

Примечание. В цепи двигателя с последовательным возбуждением могут возникнуть колебания из-за токов в короткозамкнутых секциях обмотки, что наблюдается при пониженном напряжении и малой нагрузке.

7. Возникновение незатухающих колебаний в цепях с коллекторными электродвигателями возможно в случаях: а) смешанного возбуждения; б) наличия дополнительных полюсов или компенсационной обмотки; в) сдвига щеток с геометрической нейтральной.

При анализе этого вопроса М. В. Шулейкин вскрыл ошибочность теорий К. Вагнера и Хумбурга [Л. 10, 11], которые, имея дело со свободными колебаниями некоторой системы, совершенно исключили из рассмотрения всю внешнюю цепь, заменяя ее некоторой вынуждающей силой.

М. В. Шулейкин установил, что:

«...Всякий раз, как исследуются свободные колебания некоторой системы, необходимо принимать во внимание все ее параметры, так как от них всех будут зависеть собственные колебания».

Колебания, причиной которых является как двигатель, так и генератор, могут возникать в ряде случаев. Дифференциальные уравнения получаются в общем случае с весьма сложными коэффициентами. М. В. Шулейкин рассматривает в качестве примера лишь простейший случай работы генератора с последовательным возбуждением на некоторый двигатель (рис. 1).

Разбирая работу коллекторного двигателя с последовательным возбуждением в случае, когда к его зажимам приложена синусоидальная э. д. с., М. В. Шулейкин выводит, что при определенных условиях ток будет опережать приложенное напряжение по фазе, т. е. двигатель будет работать в качестве «электромагнитного конденсатора» М. В. Шулейкин доказывает, что двигатель с последовательным возбуждением превосходит в этом отношении двигатель с независимым возбуждением, применявшийся германским профессором Каппом для компенсирования сдвига фазы асинхронного двигателя [Л. 12, 13, 14].

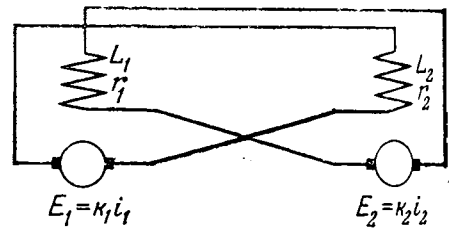


Рис. 10.

Незатухающие колебания могут генерироваться системой двух коллекторных генераторов с последовательным перекрестным возбуждением (рис. 10). Каждый генератор работает на свою цепь.

Период колебаний равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L_1 L_2}{r_1 r_2}}$$

Условие возникновения колебаний

$$L_1 r_2 + L_2 r_1 = k_1 k_2$$

Общие выводы, к которым пришел М. В. Шулейкин резюмированы им самим следующим образом.

1. Собственный режим электромагнитной системы, включающей конденсаторов и состоящей из ( $m$ ) параллельных цепей, присоединенных к некоторой общей, которую мы назовем генераторной, носит аperiodически-затухающий характер.

2. Условием возникновения незатухающих колебаний является присутствие в генераторной цепи благодаря движению одних ее частей по отношению к другим э. д. с., зависящей линейно от токов системы, причем коэффициенты линейной зависимости должны быть не все равны между собой; кроме того, должно существовать определенное отношение между параметрами системы.

3. Если коэффициенты линейной зависимости все равны друг другу, то режим системы аperiodически возрастает или затухающий.

4. Если э. д. с., индуктированная в генераторной цепи благодаря движению ее частей, прямо пропорциональна току, то режим системы — аperiodически возрастающий или затухающий.

5. Режим незатухающих колебаний постоянной амплитуды и режим постоянного тока представляют собой предельные случаи, в которые переходят соответствующие режимы незатухающих колебаний возрастающей амплитуды или аperiodически возрастающий режим.

6. Если э. д. с., индуктированная в генераторной цепи благодаря движению ее частей — нелинейная функция токов данной электромагнитной системы, то периодические колебания возникать не могут.

7. Условие линейной зависимости э. д. с. генераторной цепи от токов системы есть условие наличия коллекторного механизма, под которым разумеется также и универсальная машина.

8. Униполярная машина при определенных условиях может быть самовозбуждающимся генератором переменного или постоянного тока.

9. В цепи двигателей линейная зависимость между э. д. с., индуктированной в якоре двигателя, и токами системы является также причиной возникновения незатухающих электрических колебаний.

М. В. Шулейкин немало трудился по расчету специальных машин высокой частоты. К сожалению, он не оставил опубликованных работ по этой теме.

В его архиве сохранилось три дипломных проекта периода 1917 г., посвященных проектированию радиостанций с машинами высокой частоты. Тщательность электрических и механических расчетов, выполненных в этих проектах, и множество пометок, сделанных рукой М. В. Шулейкина, показывают, что он был весьма требовательным учителем и настаивал на выполнении расчета во всех деталях.

М. В. Шулейкин лично участвовал в испытаниях машинного генератора высокой частоты системы В. П. Возодина. Данные генератора: 120 в, 50 а, 20 000 пер/сек; рабочее частоты — при помощи трансформаторов. Испытания

производились в плавании на линкоре «Андрей Первозванный» с 23 по 29 сентября 1916 г. Условия работы были далеко не благоприятными; оборудование не могло пройти люки, так что пришлось расположиться на палубе.

М. В. Шулейкин сделал ряд весьма ценных замечаний и конструкторов машин высокой частоты как в электрической части, так и в части выбора подшипников, системы газки и т. п.

Найдена также незаконченная черновая рукопись М. В. Шулейкина «Теория обмоток динамо высокой частоты». Точной даты нет. Вероятно, она относится к 1915—1917 гг. Она представляет интерес оригинальный метод расчета магнитной проводимости междустального пространства машины индукторного типа. Идея его видна из рис. 11.

Магнитная проводимость узкой трубки потока шириной  $dx$  на единицу длины в направлении, нормальном к плоскости чертежа, выражается так (в нерационализированной системе единиц):

$$d\Lambda = 0,4\pi \frac{dx}{a+bx},$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные, зависящие только от геометрических размеров машины. Магнитный поток, выходящий из бока статора, делится на две части: а) основную — выходящую из горизонтальной поверхности зубца; б) боковую — выходящую из боковых поверхностей. Максимальное значение магнитной проводимости будет в случае расположения зубца статора над зубцом ротора (зубец I на рис. 11). Магнитная проводимость на единицу длины в направлении, нормальном к плоскости чертежа, равна:

а) для основной части

$$\Lambda_{10} = \frac{z}{0,8\delta} = 1,25 u,$$

где  $u$  — отношение ширины зубца к длине воздушного промежутка;

б) для боковой части  $a = \delta$ ;  $b = \frac{\pi}{2}$ ;  $x$  меняется от 0

до  $\frac{z}{2}$  (в данном случае положено  $Z = 2z$ ).

Интегрируя выражение для  $d\Lambda$ , имеем:

$$\Lambda_{10} = 0,4\pi \int_0^{\frac{z}{2}} \frac{dx}{\delta + \frac{\pi}{2}x} = 3,69 \log_{10} \left( 1 + \frac{\pi u}{4} \right).$$

Полное значение максимальной магнитной проводимости

$$\Lambda_I = \Lambda_{10} + \Lambda_{10}.$$

В случае расположения зубца статора над пазом ротора (зубец II на рис. 11) магнитная проводимость будет иметь минимальное значение:

а) основная часть

$$\Lambda_{110} = 0,4\pi \int_{\frac{z}{2}}^z \frac{dx}{\delta + \frac{\pi}{2}x} = 3,69 \log_{10} \frac{1 + \frac{\pi u}{2}}{1 + \frac{\pi u}{4}};$$

б) боковая часть

$$\Lambda_{110} = \frac{z}{\delta + \frac{\pi}{4}z} = 1,25 \frac{u}{1 + \frac{\pi u}{4}}.$$

Полное значение минимальной магнитной проводимости

$$\Lambda_{II} = \Lambda_{110} + \Lambda_{110}.$$

Величина индуктированной э. д. с. будет определяться отношением между максимальным и минимальным значениями магнитной проводимости

$$\Lambda_I - \Lambda_{II}.$$

Трудно видеть, что изложенный способ расчета представляет собой не что иное, как «метод ожидаемых путей

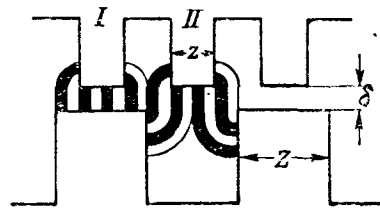


Рис. 11.

потока», разрекламированный американским автором Ротерсом в книге «Электромагнитные механизмы» (издана в США в 1941—1944 гг., а в русском переводе издана Госэнергоиздатом в 1948 г.). М. В. Шулейкин применял этот «метод» на 25 лет раньше американцев.

Исследования М. В. Шулейкина по машинам высокой частоты привлекли внимание современников. В первом русском радиотехническом журнале «Вестник телеграфии без проводов» (№ 4, 1913 г.) было опубликовано сообщение о докладе М. В. Шулейкина «Об альтернаторах весьма большой частоты».

Д. М. Соколов, рецензировавший первый русский учебник по радиотехнике проф. А. А. Петровского «Научные основания беспроволочной телеграфии» и не отличавшийся патриотизмом в оценке научной работы русских ученых, дважды признавал особо важным для русской науки работы М. В. Шулейкина в области машин высокой частоты (доклады Д. М. Соколова на II Менделеевском съезде по общей и прикладной химии и физике в 1911 г. [Л. 8] и на VII Всероссийском электротехническом съезде).

М. В. Шулейкин пытался искать новые пути получения незатухающих колебаний; об этом свидетельствует сохранившаяся незаконченная рукопись «О применении высших гармонических для получения токов высокой частоты». В главе I этой рукописи «Общие соображения» указано, что задача получения незатухающих колебаний высокой частоты решалась тремя путями:

I. Посредством генераторов, дающих непосредственно высокую частоту (до 200 000 *непчек*) (Gen. El. Со по работам Ламма, Фессендена и Александерсена).

II. При помощи преобразования частоты в машине асинхронного типа (машина Гольдшмидта).

III. Преобразованием частоты покоящимися трансформаторами (Жоли, Валлаури и мн. др., фирма «Телефункен» на ст. Науэн).

Кроме этих технических воплощенных методов, в литературе встречаются указания на возможность получения токов высокой частоты при использовании высших гармоник кривых тока и напряжения. Форма, в которую облечены эти идеи, не дает практического решения вопроса.

«Настоящее исследование имеет целью выяснить возможность выделения одной из гармонических, причем объект исследования являются существующая машина индукторного типа и существующий трансформатор в их обычном включении».

В результате исследования М. В. Шулейкин пришел к следующим выводам:

1. Для получения наибольшей амплитуды данной гармонической прямоугольная форма кривой э. д. с. индукторного генератора выгоднее «треугольной».

2. Невыгодно выделять гармонические выше третьей ввиду значительного уменьшения тока.

3. При прочих равных условиях амплитуды отдельных гармонических индуктированной э. д. с. при настройке в резонанс пропорциональны так называемому коэффициенту перенапряжения:  $s = \frac{1}{\omega CR}$  здесь  $C$  — емкость конденсатора,

подключенного к зажимам генератора. Из формулы видно, что сопротивление цепи желательно выбирать возможно меньшим.

4. При настройке на третью гармоническую амплитуды соседних гармонических значительны (33,6% — первая и 15,5% — пятая, считая амплитуду третьей гармонической за 100%). Однако они не являются источниками существенных потерь энергии, так как обе обладают большими сдвигами фаз между током и напряжением (свыше 85°).

Выделение данной гармонической из кривой напряжения индукторного генератора М. В. Шулейкин предполагал осуществить с помощью так называемого «резонанс-

гармонического» трансформатора, у которого первичная и вторичная обмотки входят в настраиваемые колебательные контуры. Начала теории такого трансформатора были им намечены, но не были закончены.

В 1916 г. были опубликованы статьи М. В. Шулейкина: «Радиотелеграфные преобразователи частоты» и «Об условиях применения генераторов высокой частоты для радиотелефонии» [Л. 6 и 7]. Первая из этих статей пока еще не найдена в оригинале. Во второй статье М. В. Шулейкин твердо устанавливает преимущества радиотелефонирования на высоких частотах и впервые в технической литературе того времени указывает на то, что при модулировании колебаний высокой частоты возникают дополнительные частоты  $\omega + \alpha$  и  $\omega - \alpha$ , называемые ныне боковыми частотами.

Из отдельных работ М. В. Шулейкина заслуживает внимания статья, написанная в 1912 г. совместно с будущим известным академиком А. А. Чернышевым об осциллографическом исследовании неравномерности движения машин [Л. 4]. В качестве примера описано исследование хода двигателя Дизеля.

Немаловажна роль М. В. Шулейкина и в качестве преподавателя по курсу электрических машин, которым он был в Петербургском политехническом институте с 1909 по 1918 г. Написанное им совместно с проф. Л. М. Пиотровским в 1916 г. «Руководство по испытанию электромашин» [Л. 5] служило пособием для студентов более 10 лет. Второе издание этого труда было выпущено студенческой кассой взаимопомощи спустя несколько лет после переезда М. В. Шулейкина в Москву.

Авторитет М. В. Шулейкина как специалиста по электрическим машинам был велик. В 1930—1931 гг. М. В. Шулейкин был приглашен к участию в экспертизе проекта мощной радиостанции с машиной высокой частоты системы В. П. Вологодина. Из записок, сохранившихся в архиве М. В. Шулейкина, видно, что он весьма заинтересовался магнитным усилителем и произвел ряд поверочных расчетов по его применению для целей модуляции. Магнитный усилитель был очень мало известен в то время. Теория его еще не была создана. Тем поразительнее техническая смелость М. В. Шулейкина, основанная на его эрудиции и глубоко знакомстве с электрическими машинами.

**Заключение.** Слава, заслуженная М. В. Шулейкиным как выдающимся радиотехником, заслонила его оригинальные работы по электрическим машинам. Однако они достойны внимания специалистов. Из трех крупных опубликованных работ М. В. Шулейкина в области колебаний в электрических машинах [Л. 1, 2, 3] вытекает несомненный приоритет М. В. Шулейкина в нижеследующих вопросах:

1. Открытие возможности возникновения и существования колебаний в электрических цепях, не содержащих конденсаторов. Установление закономерностей этих колебаний.

2. Полное математическое исследование возникновения колебаний в коллекторных машинах. Установление условий существования колебаний и самовозбуждения их; формулирование физической сущности процессов колебаний. Успешная опытная проверка полученных результатов в 1909—1912 гг.

3. Введение понятия «характеристичного определяющего» для исследования сложной системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами описывающих процессы в сложных разветвленных электрических цепях.

4. Исследование работы репульсионного двигателя как генератора переменного тока.

5. Возможность работы коллекторного двигателя с следовательно возбуждением в качестве фазокоммутатора в сети переменного тока.

Эти работы М. В. Шулейкина могут представлять интерес для специалистов по электроприводу, в частности случае привода для механизмов или машин-орудий с вратно-поступательным движением.

Из неопубликованных работ М. В. Шулейкина можно заключить о его приоритете в отношении метода «ожидаемых путей потока» для расчета магнитной проводимости воздушных промежутков.

Дальнейшее изучение научного наследства М. В. Шулейкина и восстановление не найденных пока рукописей дающегося радиотехника может открыть ряд новых интересных страниц развития русской науки.

### Литература

1. М. В. Шулейкин. О свободных колебаниях в цепи серьезного генератора и мотора. Известия СПб Политехнического института, отдел техники, естественных наук и математики, т. XI, вып. 2, стр. 483—514, 1909.

2. М. В. Шулейкин. Об электрических колебаниях. Журнал Русского физико-химического общества, т. XVI, отд. 1, стр. 471—494, 1910, а также т. XVIII, вып. 1, стр. 1—6, 1911.

3. М. В. Шулейкин. Самовозбуждение электрических колебаний в цепях коллекторных динамомаши. Известия СПб Политехнического института, отдел техники, естественных наук и математики, т. XX, вып. 1, стр. 85—119, 1913.

4. А. Чернышев и М. В. Шулейкин. Применение осциллографа к изучению движения машин. Известия СПб Политехнического института, отдел техники, естественных наук и математики, т. XX, вып. 1, 1913.

5. Л. М. Пиотровский и М. В. Шулейкин. Руководство по испытанию электрических машин. Литогр. изд., КУБУЧ, 1926.

6. М. В. Шулейкин. Радиотелеграфные преобразователи частоты.

7. М. В. Шулейкин. Об условиях применения генераторов высокой частоты для радиотелефонии. Известия СПб Политехнического института, отдел техники, естественных наук и математики, т. XX, вып. 1, 1913.

8. Д. М. Сокольников. Новейшие успехи телеграфии без проводов. Электричество, № 7, 1912.

9. Р. Рюденберг. Ph. Z., 20, 668, 1907.

10. К. Вагнер. ETZ, стр. 286, 1907.

11. К. Хумбург (K. Humburg). Das Pendeln bei Gleichstrommaschinen mit Wendepolen. Berlin, 1912).

12. Капп. ETZ, 1912, The Electrician, 69, 1912.

13. Свинборн. The Electrician, 1297, 1903.

14. Уокер. JIEE, Apr. 1913.



## Ферромагнитный резонанс—русское открытие

Н. А. СМОЛЬКОВ

Научно-исследовательский институт физики Московского государственного университета

Явление магнитного резонанса используется как мощное средство для изучения структуры вещества. Магнитно-резонансные явления открыты не только в ферромагнитных, но и в парамагнитных веществах и в ядрах атомов (ядерный резонанс). Радиоспектроскопия, основы которой, как это показано ниже, были заложены 40 лет назад в России работами В. К. Аркадьева, теперь превратилась в одну из ведущих областей науки. За истекшие после открытия В. К. Аркадьева 40 лет не раз предпринимались необоснованные

попытки исказить историю этого открытия и посягнуть на приоритет нашей науки. В 1921 г. в немецком журнале «Annalen der Physik» (т. 64) была помещена статья Ганса и его докторанта Лоярте из университета в Ла-Плате (Аргентина), в которой были переписаны формулы из работы В. К. Аркадьева 1913 г. Однако Ганс и его ученик претендовали на эту теорию, как на собственную. Плагиат был настолько груб, что под давлением улик Ганс был вынужден вскоре открыто признать приоритет советского уче-

т так, в его статье в том же журнале [Л. 1] сказано: прошу в этой заметке важнейшим считать следующее: Аркадьев ранее Лоярте и меня ввел понятие магнитной проводимости, вычислил зависимость от длины волны этой проводимости так же, как и начальной магнитной проводимости, и из своих экспериментальных результатов сделал все три константы, характеризующие дисперсию — Ла-Плата, Институт физики, 18 ноября 1921 г.».

Прошло три десятка лет после выступления Ганса и Лоярте и вот недавно вновь имели место попытки приписать приоритет в открытии магнитного резонанса 1 июля 1950 г. в Гренобле (Франция) происходила конференция по магнетизму. Эта конференция выдавалась за международную и преследовала цель сколотить блок из реакционных ученых Западной Европы для решения проблем, связанных с подготовкой третьей мировой войны. Участниками конференции были представители США некоторых маршаллизованных стран. Американский физик-теоретик Киттель выступил на конференции с обильным докладом [Л. 2] по ферромагнитному резонансу. В этом он утверждал, что ферромагнитный резонанс был впервые был теоретически исследован Гансом и Лоярте в 1921 г., а экспериментально открыт Гриффитсом в Норфолке в 1946 г. Киттель не побрезговал использовать плагиатный плагиат Ганса и Лоярте.

Он утверждал, будто ферромагнитный резонанс сначала теоретически предсказан, а потом открыт экспериментально.

В действительности открытие этого явления (40 лет назад в Москве) шло в обратном порядке: сначала К. Аркадьевым были получены экспериментальные данные, которые вызвали пересмотр уравнений Максвелла, а в нем же была создана теория электромагнитных процессов в ферромагнетиках, в которую вошла и теория естественного ферромагнитного резонанса. Любопытно то, что в 1946 г. Киттель еще ссылался на статью В. К. Аркадьева 1913 г., в которой указывалось на явление избирательного магнитного поглощения.

Почти слово в слово повторил «исторические исследования» Киттеля другой американский ученый Ван-Флек [Л. 3], выступая в сентябре 1950 г. в Амстердаме с обзорным докладом по ферромагнитному резонансу на конференции по радиоспектроскопии.

Издательство иностранной литературы в своем реферативном сборнике под редакцией В. Я. Фридмана [Л. 4] вводит в сети фальсификаторов истории науки. В комментариях к рефератам утверждается, что В. К. Аркадьев в 1913 г. якобы только «предсказал» принципиальную возможность ферромагнитного резонанса. Это, как мы сейчас видим, не соответствует действительности и извращает истину о приоритете русской науки.

27 декабря 1911 г. на II Менделеевском съезде в Петербурге В. К. Аркадьев сообщил о своем исследовании магнитного явления в высокопеременных магнитных полях. В этом в 1907 г. в лаборатории П. Н. Лебедева. Работая в интервале волн от 1,3 до 73 см длины, он обнаружил в железе и никеле спектральные полосы магнитного поглощения, лежащие между волнами в 2 и 7 см длиной [Л. 5]. В декабре 1912 г. В. К. Аркадьев в докладе на объединенном заседании физического отделения Общества любителей естествознания и Московского физического общества Лебедева изложил впервые в мире теорию электромагнитного поля в ферромагнитных металлах.

Эта теория являлась первой теорией динамического намагничивания вещества. В противоположность старым теориям Ампера, Вебера и др., рассматривавших элементарные магнитные диполи в веществе в их установившемся состоянии, В. К. Аркадьев рассматривал их динамику в условиях переменного магнитного поля. Он считал необходимым ввести в теорию собственные периоды колебаний магнитных диполей. Резонансом этих магнитных диполей на магнитное поле волн он объяснил наличие открытых им полос поглощения [Л. 6]. В этой работе он ввел в уравне-

ния Максвелла новую величину, которую он назвал магнитной проводимостью и обозначил буквой  $\rho$ . В его теории электромагнитного поля вещество в синусоидальных процессах характеризуется четырьмя величинами: проницаемостями  $\epsilon$ ,  $\mu$  и проводимостями  $\gamma$  и  $\rho$ . Комплексный показатель преломления  $n - ik$  выражается формулой

$$n - ik = \sqrt{\epsilon' - i\gamma/\omega}$$

где комплексные проницаемости  $\epsilon'$  и  $\mu'$  соответственно равны  $\epsilon - i2\gamma T$  и  $\mu - i2\rho T$ . Такую среду В. К. Аркадьев назвал бикомплексной.

В то время максвелловы уравнения с четырьмя характеристиками могли находить применение только в исключительно редких лабораторных условиях: при исследованиях ферромагнитных металлов в сверхвысоких частотах, а комбинация трех коэффициентов  $-i2\gamma T(\mu - i2\rho T)$  быстро нашла применение в технических расчетах синусоидальных электромагнитных процессов в металлах с магнитным гистерезисом.

В наши дни бикомплексная комбинация  $\epsilon, \mu, \gamma$  пробилась себе широкую практическую дорогу: применяющиеся в радиотехнике ферриты являются именно такой бикомплексной средой, к которой часто в равных долях выступают все четыре коэффициента  $\epsilon, \mu, \gamma$  и  $\rho$ .

Открыв магнитный резонанс и магнитные дисперсию и абсорбцию, т. е. магнитные спектры ферромагнитных металлов в сантиметровых волнах, В. К. Аркадьев поставил себе целью исследовать магнитные свойства в переменных полях самых различных периодов и при самых разнообразных условиях. Первым шагом в этом направлении было исследование влияния наложенного магнитного поля на магнитные спектры. Этому были посвящены работы его сотрудников: Н. Н. Малова и В. К. Митяева [Л. 7], которые исследовали явление экспериментально, а Н. С. Акулов [Л. 8] теоретически.

В наше время широко развита техника сантиметровых волн и хорошо освоена методика их получения и использования; магнитный резонанс ферромагнитных веществ, который теперь часто называют ферромагнитным резонансом, легко получается и широко изучается как в отсутствие наложенного поля, так и при наложении поля. Первое явление часто называется естественным феррорезонансом, а второе — искусственным или индуцированным феррорезонансом.

В работе 1913 г. В. К. Аркадьев дал [Л. 6] теоретические формулы и построил кривые магнитного резонанса, которые правильно отображают принципиальный ход компонент комплексной магнитной проницаемости, т. е. ход  $\mu$  и  $\rho$ . В последующие годы благодаря работам советских ученых Дорфмана, Поливанова, Ландау, Лифшица, Завойского, Френкеля и других учение о магнитном резонансе получило дальнейшее развитие

## Литература

1. R. Gans. Ann. d. Ph. 66, 429, 1921.
2. Ch. Kittel. Journ. phys. radium, 12, 291... 302, 1951.
3. Van Vleck, J. H. Physica, 17, 234... 252, 1951.
4. Проблемы современной физики. Серия третья, вып. 5. Ферромагнетизм. Изд. иностранной литературы, стр. 3 и 115, М., 1951.
5. В. К. Аркадьев. ЖРФХО, часть физическая, 44, стр. 165, № 4, 1912. Ann. d. Phys., 58, Nr. 2, 105, 1919.
6. В. К. Аркадьев. ЖРФХО, 45, стр. 312, № 6, 1913. Phys. ZS., 14, 928, 1913.
7. В. К. Митяев. ЖРФХО, 58, стр. 181, 1926. ZS. f. Phys., 38, 716, 1926.
8. Н. С. Акулов. ЖРФХО, стр. 577, 1926. Труды ГЭЭИ, № 15, 1926.



## Новые методы испытания лакотканей

Кандидат техн. наук И. И. ИВАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В стандарте 2214-46 на лакоткань отсутствуют методика испытания лакоткани марки ЛШ-2 по определению удельного объемного сопротивления после увлажнения материала и методика проверки лакоткани на раздираемость, хотя эта лакоткань широко применяется в электрических машинах и аппаратах, работающих в условиях высокой влажности, и подвергается в процессе изготовления конструкций раздирающим усилиям.

Автором было проведено исследование, которое позволило предложить новые характеристики, дать методику испытания лакотканей по этим характеристикам и разработать показатели по ним.

**Удельное объемное сопротивление лакоткани при увлажнении.** Определение удельного объемного сопротивления в зависимости от степени увлажнения производилось на образцах лакоткани марки ЛШ-2 с фактической толщиной 0,09 мм, отобранных из двух разных партий.

Образцы закладывались на 24 часа в эксикатор с хлористым кальцием, после чего определялось их объемное удельное сопротивление в исходном состоянии. Затем образцы переносились в эксикаторы с относительной влажностью 65, 80 и 98%, где и выдерживались соответственно 6, 18, 24, 48 и 72 часа, а в отдельных случаях и 96 часа. После каждого из перечисленных сроков образцы вынимались и определялось их объемное удельное сопротивление методом прямого отклонения гальванометра. Результаты измерений даны на рис. 1. Как видно, снижение удельного сопротивления особо значительно при выдержке образцов при 98% относительной влажности; эта влажность и рекомендуется для испытания в качестве первого критерия.

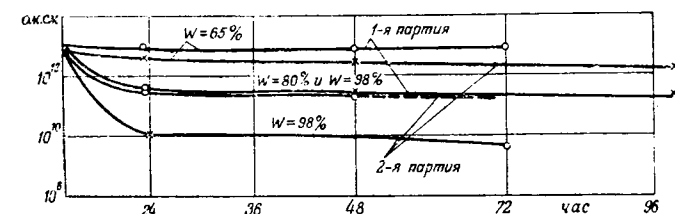


Рис. 1. Зависимость объемного удельного сопротивления лакоткани ЛШ-2 толщиной 0,09 мм от выдержки в атмосфере различной влажности.

Искаживается необходимость пополнения ГОСТ 2214-46 характеристикой объемного удельного сопротивления лакоткани ЛШ-2 после ее увлажнения и характеристикой сопротивления лакоткани раздирающему усилию. Приводится методика соответствующих испытаний.

Для окончания выбора времени в кн образца в ат с указанной влаж опыт был повто лакотканях раз марок и толщин. Как показали результаты димые на кривых рис. 2, длительность вы образца в атмосфере с 98%-ной относн влажностью должна быть не менее 48 ча выдержку можно принять за второй критер

Чтобы дать конкретные показатели, х ристика была проверена на основании ра танной методики для лакоткани марки ЛШ минальной толщины 0,08 и 0,10 мм на бо количестве образцов (табл. 1).

Номинальная толщина, мм	Удельное объемное сопротивление лакоткани ЛШ-2 после выдержки в атмосфере W = 98% 48 час, ом·см		
	среднее	максимальное	миним.
0,08	$3,4 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	4,5
0,10	$1,0 \cdot 10^{11}$	$3,1 \cdot 10^{11}$	8,1

**Разработка метода испытания лакоткани ЛШ-2 на раздираемость.** Сопротивление ткани раздирающему усилию относится к численным характеристикам. Поэтому приборный позволил бы контролировать эту характеристику, целесообразнее всего искать среди аппаратов, применяющейся для механических испытаний. С этой целью была рассмотрена возможность применения следующих аппаратов: ручной машины, маятникового копра, на котором определяется ударная вязкость, и аппарата раздираения бумаг. От первого из перечисленных приборов пришлось отказаться из-за большого разброса получаемых величин. Второй прибор конструктивным отношением его использования оказалось невыгодным.

В качестве третьего из рассмотренных приборов был использован «аппарат для определения сопротивления раздираению бумаг», принятый в ГОСТ 1782-42. Устройство этого аппарата, взаимодействие отдельных его частей и способ определения на нем раздирающего усилия подробно описаны в указанном стандарте.



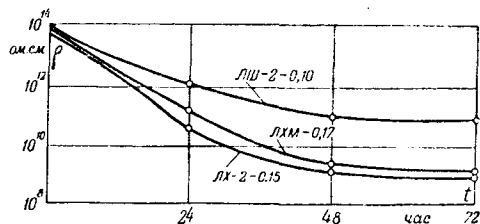


Рис. 2. Зависимость объемного удельного сопротивления лакокотки различных марок и толщины от длительности нахождения образцов в атмосфере с относительной влажностью 98%.

Раздирающее усилие  $Z$  (т. е. показатель раздиранья) в граммах определяется по формуле

$$Z = \frac{a16}{b} z, \quad (1)$$

- где  $a$  — показание стрелки;
- $b$  — число листов, одновременно подвергнутых испытанию;
- 16 — максимальное число одновременно закладываемых листов бумаги.

На этом аппарате предварительно были уточнены два момента:

- а) какое количество листов (слоев) целесообразно закладывать одновременно в зажимы;
- б) применима ли формула (1) также и для лакокотки.

С этой целью испытывались образцы лакокотки и бумаги, различной толщины: 0,08, 0,17 и 0,20 мм, нарезанные вдоль рулона.

Как видно из полученных данных, помещенных в табл. 2, наиболее желательное количество одновременно закладываемых слоев для лакокотки марки ЛШ-2 толщиной 0,08 мм будет от 4 до 16; для бумаги марки КВ — толщиной 0,20 мм от 2 до 8; для лакокотки марки ЛХ-2 — толщиной 0,20 мм от 1 до 4.

Таблица 2

Марка	Толщина, мм	Раздирающее усилие при числе слоев				
		1	2	4	8	16
ЛШ-2	0,08	—	—	19,75	36,60	76,55
КВ	0,17	9	18	27	86	—
ЛХ-2	0,20	14,7	27,0	53,6	—	—

Проверка формулы (1) показала, что последняя будет справедливой и для лакокотки.

Таким образом, аппарат ГОСТ 1782-42 для определения раздирающего усилия бумаги оказался пригодным без всякой переделки и для лакокотки марки ЛШ-2. На этом аппарате и были разработаны показатели для характеристики «раздирающего усилия» лакокотки марки ЛШ-2 толщиной 0,08 и 0,10 мм для образцов, нарезанных вдоль и поперек рулона (табл. 3).

Таблица 3

Номер рулона	Толщина, мм	Раздирающее усилие, г						Число слоев	
		по ГОСТ	фактически	вдоль			поперек		
				среднее	максимальное	минимальное	среднее		максимальное
1	0,08	0,09	45,6	54	40	83,2	96	68	4
1	0,08	0,09	46,4	54	40	69	80	62	8
2	0,10	0,105	69,6	88	56	102,4	116	88	4
2	0,10	0,105	68,6	81	63	86,2	96	67	8

Как видно из табл. 3, разброс средних значений раздирающего усилия лакокотки марки ЛШ-2, нарезанной вдоль рулона, толщиной 0,08 и 0,10 мм, колеблется в пределах до 1,5%, что может служить достаточной гарантией в точности полученных показателей.

**Выводы.** На основании проделанной работы можно рекомендовать пополнить ГОСТ 2214-46 на лакокотку характеристикой объемного, удельного, сопротивления лакокотки марки ЛШ-2 после ее увлажнения. Определение этой характеристики должно производиться после выдержки образца в эксикаторе с относительной влажностью 98% в течение 48 час. Electroды делаются из фольги, укрепляемой на лакокотки тонким слоем вазелина.

После выдержки образца во влажной атмосфере характеристика определяется как среднее значение из 10 образцов.

Средние показатели этой характеристики для лакокотки марки ЛШ-2 должны быть: для толщины 0,08 мм не менее  $1 \cdot 10^{10}$  Ом·см; для толщины 0,10 мм не менее  $1 \cdot 10^{11}$  Ом·см.

Минимальные значения характеристики в отдельных случаях для толщины 0,08 мм должны быть не менее  $1 \cdot 10^9$  Ом·см; для толщины 0,10 мм — не менее  $5 \cdot 10^{10}$  Ом·см.

Следует также ввести характеристику «сопротивление лакокотки раздирающему усилию», которая определяется на аппарате, применяемом по методике ГОСТ 1782-42 для определения сопротивления раздиранью бумаги. Число одновременно закладываемых листов лакокотки должно быть от 4 до 8. Количество образцов, нарезанных вдоль рулона, должно быть не менее 10.

Показатели новой характеристики для лакокотки ЛШ-2 должны быть: при толщине 0,08 мм не менее 45 г; при толщине 0,10 мм не менее 65 г.

Введение новых характеристик выдвигает вопрос об уточнении и ужесточении для лакокотки допусков по толщине.



## Книга Л. М. Пиотровского и Е. А. Паля „Испытание электрических машин“

К рецензии на книгу *Электричество*, № 6, 1951

Проф. А. Я. БЕРГЕР

Ленинградский электротехнический институт связи

Редакция журнала правильно поступила, заострив вопросы наилучшей подготовки студентов к производственной работе.

Правы рецензенты, указавшие, что основы теории процессов в электрической машине изложены в книге избыточно. Можно было материал по теории значительно сократить, сделав ссылки на соответственные учебники (авторы книги в ряде случаев так сделали), и за счет этого сокращения пополнить сведения, например, об измерительных приборах и т. д.

Непростительно, что испытанию на нагревание посвящены всего четыре страницы (это рецензентами не отмечено). В книге ничего не сказано об исследовании переходных и аномальных режимов работы машин постоянного тока. Терминология авторов книги, действительно, не всегда удачна: например устаревший термин «отдача» вместо к. п. д. и др. Мало в книге указаний по самой технике испытаний, по рациональности их последовательности, по оформлению записей, наблюдений, по обработке результатов и определению ошибок.

В связи с указанием авторов, что они не ставили перед собой задачу — охватить в книге и промышленные испытания электрических машин, возникает ряд принципиальных вопросов.

Может ли и должен ли втуз подготовить студента к решению всех возможных задач, которые могут возникнуть перед ним в его инженерной деятельности? Мы полагаем, что не может и не должен. Главное, что втуз обязан дать студенту (кроме определенного объема знаний и навыков надлежащего качества), — это приучить его к самостоятельной работе над книгой и в лаборатории. Научить промышленным испытаниям — это задача самой промышленности и институтов по повышению квалификации ИТР. Так делается всюду, и едва ли это подлежит пересмотру, учитывая ограниченные сроки обучения.

Два слова об объектах испытания (машинах) в лабораториях втузов. Обычно во втузах применяются машины от 0,5 до 10 квт. Более крупные машины неудобны во втузах. Исследование же микромашин всех видов (меньше 0,5 квт) имеет свою специфику и исследование микромашин надо вводить во втузах (а следовательно, и в учебниках), но добавочно (а частично — взамен) к исследованию основных, ходких, типичных машин, на которых основные свойства машин могут быть поняты без искажений и отклонений, вносимых особенностями микромашин.

Редакция журнала «Электричество» правильно поставила вопрос о наилучшей подготовке студентов к производственной деятельности, понятно, в пределах отведенного на обучение времени. Многое в этом направлении может быть сделано и должно быть сделано всеми кафедрами электрических машин втузов и авторами книги, которые должны учесть замечания рецензентов.

Кандидат техн. наук, доц. Ф. И. ЧЕРНЯВСКИЙ и инж. В. Я. ЯКУБОВСКИЙ

Новочеркасский политехнический институт

Следует отметить хорошие в методическом отношении общие указания по испытанию электрических машин, приведенные в начале книги.

Учитывая, что «Общая часть» относится к испытаниям машин как постоянного, так и переменного токов, можно расширить эту часть, поместив в ней описание основных приспособлений, применяемых при переменном токе некоторых измерительных приборов и т. п.

Лабораторные занятия по электрическим машинам должны не только научить студентов основным методам испытания, но должны также подтвердить опытным путем ряд положений, изложенных на лекциях, способствовать закреплению теоретического материала. Поэтому в учебном пособии правильным и уместным является изложение в учебном пособии физических процессов, происходящих в электрических машинах.

Нельзя согласиться с рецензентами в том, что во втузах пуска и регулирования скорости электродвигателей должны быть отнесены к курсу «Электропривода». Без изучения пусковых и регулировочных свойств электродвигателей нельзя составить полного представления о различных электрических машинах и произвести их сравнительную оценку. Совершенно правильно указано в рецензии, что измерение оборотов тахометром не является точным. Но вполне удовлетворяет требованиям лабораторного испытания электрических машин, например при снятии характеристик машин постоянного тока. Конечно, было бы лучше, если бы авторы поместили в «Общей части» описание других методов измерения оборотов, в частности, стробоскопического. Нельзя согласиться с некоторыми другими замечаниями рецензентов, например о регулировании напряжения и оборотов с помощью реостата в цепи якоря в вопросе об определении положения нейтральной точки.

Рассматривая данную книгу, не следует забывать, что лабораторные занятия должны не только расширить и углубить теоретические знания студентов, но и подготовить их в определенной степени к практической деятельности. Поэтому нужно признать правильным требование рецензентов, что в лаборатории студент должен научиться применять наиболее целесообразные методы испытания и ознакомиться с контрольно-измерительной аппаратурой, применяемыми методами исследований электрических машин.

Создавая пособие по испытанию машин, следовало бы пойти критически к существующей учебной программе испытаний электрических машин. К сожалению, авторы этого пособия не сделали и пренебрегли богатым опытом электромашинных лабораторий наших учебных заведений, научно-исследовательских институтов и электромашиностроительных заводов. Разве не об этом говорит тот факт, что пособие в своей значительной части не отличается по содержанию от первого издания («Испытание машин постоянного тока» под редакцией проф. Л. М. Пиотровского, 1934) и не учитывает новых положений в постановку лабораторных занятий.

Здесь необходимо отметить, что оснащение лабораторий наших высших учебных заведений новейшими приборами, аппаратами и т. п. отстает от научно-исследовательских институтов и лабораторий передовых промышленных предприятий. Необходимо поставить вопрос перед соответствующими организациями о том, чтобы новейшая аппаратура, проверенная и широко применяемая в практике научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий, в обязательном порядке поставлялась в лаборатории высших учебных заведений.

По нашему мнению, можно без увеличения числа часов, отведенных по программе на лабораторию электрических машин, увеличить число методов их испытания. Для этого следует, например, измерять число оборотов при испытании одной машины с помощью тахометра, другой — с помощью стробоскопа, затем применить электрический тахометр и т. п. И, конечно, новейшие методы исследова-

ия электрических машин должны найти отражение и в учебной программе и в пособии, предназначенном для применения во всех электромашинных учебных лабораториях. Это не в том, сколько приборов или элементов оборудования будет описано в пособии. Главное внимание должно быть обращено на то, чтобы пособие в возможно большей степени содействовало подготовке студента к практической деятельности, чтобы лабораторные занятия, по возможности, приближались к условиям промышленных испытаний.

По нашему мнению, следует включить в учебное пособие также практические рекомендации по наладке электромашинных схем, выявлению и устранению наиболее часто встречающихся неполадок. Это в значительной степени будет способствовать развитию у студентов практических навыков, плодотворно скажется на улучшении постановки испытаний.

Сделаем еще несколько замечаний по содержанию рассматриваемой книги. За последнее время получили широкое распространение машины поперечного поля, в частности электромашинные усилители. Для студентов некоторых специальностей знакомство с этими электрическими машинами ограничивается электромашинной лабораторией. Поэтому представляется целесообразным включить в книгу раздел по испытанию этих машин.

Большую роль при проведении испытаний электродвигателей играют тормозные приспособления. Раздел, посвященный этим приспособлениям, написан очень сжато. Крайне недостаточное место уделено электродинамическим тормозам. Ничего не сказано об электродинамических тормозах с противовесом в вертикальной плоскости и шкалой для непосредственного отсчета момента или мощности. В описании электродинамического тормоза отсутствуют практические указания на внесение поправки, вызванной изменением момента, соответствующего механическим, вентиляционным потерям и потерям в стали. Досадно, что в этом разделе не отражен опыт МЭИ в создании тормозных приспособлений. В частности, целесообразно описать конструкцию электромагнитного тормоза МЭИ со шкалой для непосредственного отсчета.

Следует включить в «Общую часть» вопросы испытания изоляции электрических машин, а также основные сведения по технике безопасности.

Некоторые обозначения на схемах выполнены неодинаково. Например, по-разному обозначены регулируемые сопротивления на фиг. 3,1; 9,1; 9,7; 9,11; 14,2; 15,4 и 8,1; 15; 8,6; 10,1; 11,3; 12,1.

В соответствии со всем вышеизложенным мы считаем, что программа лабораторных занятий по электрическим машинам должна быть переработана с точки зрения приближения подготовки студентов к их будущей практической деятельности. Соответственно с этим должно быть переработано и пособие по испытанию электрических машин.

Необходимо отметить большую работу, проделанную авторами по упорядочению терминологии. Эта работа должна быть продолжена и подвергнута специальному обсуждению.

**Доктор техн. наук, проф. Д. А. ЗАВАЛИШИН, кандидат техн. наук В. Н. ЛЕВИН и инж. Н. Г. ГАВРИЛОВА**

**Ленинградский институт авиационного приборостроения**

Если внимательно прочитать книгу Л. М. Пиотровского и Е. А. Паля «Испытания электрических машин», то становится совершенно очевидным как та добросовестность, с которой авторы подошли к изложению сложного материала по испытаниям, так и та огромная работа, которая была проведена авторами и другими членами кафедры электрических машин ЛПИ по выработке методики испытаний и по выявлению всех тонкостей явлений, возникающих в электрических машинах при их работе. Авторы издали руководство, в котором на примере анализа свойств и характеристик машин, полученных экспериментальным путем, они глубоко проанализировали физические особенности электрических машин; это позволяет лучше понять природу этих свойств и оценить влияние различных факторов на работу машины; в то же время это застав-

ляет диалектически подходить к изучению свойств электрических машин.

В этом руководе отразился подход к изучению электротехники, который был заложен в свое время академиком В. Ф. Миткевичем и воспринят и продолжен затем коллективом кафедры электрических машин ЛПИ. Строго логическое рассмотрение свойств электрических машин, базирующееся на глубоком физическом изучении процессов в электрических машинах, — вот основа данной книги.

Авторы рецензии, к сожалению, совершенно не разобрались в этом. Они не оценили ни той работы, которая сквозит в каждой строчке книги, ни той методики, которая положена в ее основу. Они не поняли того, что данная книга по испытаниям электрических машин является завершающей частью раздела курса электрических машин и дает гораздо больше, чем «технику испытаний электрических машин»; она заставляет студентов глубоко понять свойства электрических машин и оценить ту или другую машину не только по формальным признакам, но и по существу происходящих в ней процессов.

Все то, что предусмотрено ГОСТ 183-41 и предполагается предусмотреть новым ГОСТ, изложено в данной книге с исчерпывающей полнотой.

В рецензии обращает на себя внимание весьма односторонняя постановка вопроса. Рецензенты, не оценивая материала книги по существу (за исключением нескольких весьма поверхностных замечаний, которые с успехом отвергаются авторами книги в их ответе на рецензию), говорят все время о том, что в книге отсутствуют те или иные методы специальных испытаний (испытания уровня шумов, уровня радиопомех и пр.). Нам кажется, что по специальным испытаниям может быть написано особое руководство и никто не возбраняет авторам рецензии заняться этой работой.

С авторами рецензии можно согласиться только в части их критики раздела, посвященного оборудованию, необходимому для испытаний. Здесь действительно кое-что устарело. Обращает на себя, например, внимание нагруженный реостат (тумба), выполненный из проволочных спиралей. Значительно лучшие результаты дает выполнение таких реостатов из остеклованных сопротивлений. Измерение скоростей вращения помощью тахо-динамо применяется в настоящее время во многих лабораториях и дает лучшие результаты, чем измерение центробежными тахометрами.

То же следует сказать и о заключительной главе, посвященной методам магнитных измерений. Все это никак, однако, не порочит книги в целом, ибо основные разделы ее никаких возражений не вызывают. Заключение рецензентов о том, что книга не отвечает современным требованиям, совершенно неверно.

**Кандидат техн. наук, доц. Б. И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ и кандидат техн. наук. Г. С. МАВРОМАТИ**

**Ленинградский электротехнический институт им. Ленина**

Учитывая ограниченность времени, отводимого в учебном расписании на лабораторные занятия, рассматриваемое пособие должно с наибольшей последовательностью, ясностью и краткостью освещать вопросы испытания электрических машин, связанные с учебной программой и уровнем техники современных экспериментальных исследований машин. Поэтому в соответствующих местах книги должны быть отражены лишь некоторые основные и минимально необходимые при лабораторных исследованиях вопросы теории электрических машин.

Объем общей части можно было бы значительно сократить, распределив материал, касающийся вопросов нагрева и к. п. д., в несколько сокращенном виде в гл. 17 и 18. С другой стороны, в этой части книги не нашли отражения некоторые современные приборы и методы измерений, например: стробоскопические методы измерения скорости вращения, методы измерения угла между роторами синхронных машин при параллельной работе, принцип действия современных электромагнитных тормозов и т. п.

Материал, изложенный в гл. 6, 7, 9 и 13 раздела I, охватывающий физические условия работы генераторов и двигателей постоянного тока, определение геометрической

нейтрали и условия самовозбуждения методически, следовало бы распределить в весьма сокращенном виде в отделах, посвященных непосредственно вопросам испытания, чтобы напомнить изучающему лишь основные положения курса электрических машин. Расположение материала I раздела книги соответствует в основном программе курса и вызывает возражения лишь потому, что последовательность лабораторных работ студента часто расходится с порядком чтения лекций. Поэтому в пособии подобного рода совершенно необходимо полное описание каждой работы в отдельности независимо от других с краткими напоминаниями физической сущности происходящих в машине процессов, ее свойств и характеристик. Кроме того, в каждой работе должны иметься соответствующие таблицы для записи опытных данных и указания об их обработке.

Последняя глава (22) «Измерение коэффициента магнитного рассеяния машин постоянного тока» могла бы быть пополнена определением характера распределения магнитных полей главных полюсов и поля реакции якоря в воздушном зазоре с помощью баллистического гальванометра и представлена под заголовком «Исследование магнитных свойств машин постоянного тока».

Значительное место в пособии уделено графическому построению характеристик электрических машин и сравнению их с результатами опыта. Большинство кривых построено в системе относительных единиц, что приучает студента оценивать полученные результаты в долях номинальных величин.

Следует отметить, что в данной книге материал в основном изложен достаточно ясно и проделана определенная работа в области терминологии, хотя некоторые термины нельзя признать удачными, как, например, термин «отдача» вместо более правильного «к. п. д.», или «скоростная характеристика» (параллельного генератора) вместо термина «характеристика самовозбуждения».

В целом рассматриваемая книга по характеру содержания и методике изложения в ней материала не полностью соответствует задачам обычного учебного пособия к лабораторным работам по электрическим машинам, так как при сравнительно ограниченном времени у студентов на домашнюю работу по нескольким предметам учебного плана пользование этой книгой при подготовке к лабораторным занятиям и последующей домашней обработке их связано с определенными затруднениями.

**Кандидат техн. наук А. И. ВОЛЬДЕК**

*Таллинский политехнический институт*

Рецензенты не правы, требуя, чтобы учебное пособие по лаборатории электрических машин для вузов охватывало все вопросы испытания электрических машин, включая и исследования вентиляции, измерения шумов, радиопомех и т. д.

Книга Л. М. Пиотровского и Е. А. Паля предназначена в качестве пособия по лаборатории общего курса электрических машин для всех электротехнических специальностей техники сильного тока. Поэтому практически невозможно и не нужно было охватить весь круг вопросов исследования электрических машин. Время, отводимое в учебных планах вузов на общий лекционный курс электрических машин, позволяет рассмотреть лишь основные вопросы теории электрических машин. Также

ограничено время, отводимое на лабораторный курс электрических машин. Можно сказать, что с учетом этого обстоятельства книга Л. М. Пиотровского и Е. А. Паля, несмотря на наличие в ней недостатков, соответствует своему назначению. Более того, она, несомненно, окажет также мощь молодым преподавателям периферийных вузов в станковке ими лабораторных работ.

Специальным и глубоким вопросом исследования электрических машин, о которых говорят авторы рецензии, должна была бы быть посвящена особая книга, так как в одной книге — Г. К. Жерве «Промышленные испытания электрических машин» также не охватила все эти вопросы.

Повторяем, что книга Л. М. Пиотровского и Е. А. Паля отнюдь не свободна от недостатков. Хотелось бы, например, чтобы такая книга была в определенной мере ориентирована на применение более современного оборудования. В этой связи следует, в частности, отметить, что более широкое применение электродинамических тормозов было бы интересно вперед и преимущества этого тормоза (возможность получения тормозящего момента при низких скоростях и высокой скорости вращения, переход в двигательный режим оснащение весами, гибкость) следовало бы подчеркнуть. Кстати, в книге неправильно освещен вопрос о потерях этого тормоза: измеряемый момент полностью учитывает потери в стали, а частично учитывает и механические потери.

## **СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ИМ. МОЛОТОВА**

*(Из решения секции 23 октября 1951 г.)*

Профессор Л. М. Пиотровский широко известен своими многочисленными трудами по испытанию электрических машин. Составленные при его участии и под его руководством учебные пособия позволили ознакомить многочисленных кадры советских электротехников с разнообразными методами исследования электрических машин.

В последнее время получили широкое развитие передовые методы исследования электрических машин с нормальными электрическими машинами специального назначения. Для исследования их свойств разработано много новых оригинальных методов и создана специальная измерительная аппаратура, которая находит широкое применение и для исследования нормальных электрических машин, существенно повышая точность измерений.

В рецензии, опубликованной в журнале «Электричество», правильно указано на то, что в книге почти совсем не рассмотрены новые методы исследований машин и применяемая для этой цели измерительная аппаратура.

Недостатки рецензируемой книги во многом являются результатом неудовлетворительной постановки во вузах преподавания вопросов испытания электрических машин. Тематика и методика преподавания отстают от уровня техники передовых советских предприятий электропромышленности. Кафедры электрических машин вузов должны и этого сделать надлежащие выводы.

В связи с этим следует считать, что рецензия правильно потребовала от авторов, являющихся деятелями передовых советских вузов, чтобы они в своем учебном руководстве стремились устранить эти недостатки.

Характерным для книги является также перегрузка ее теоретическим материалом, излагаемым в общих чертах электрических машин.

# Правила устройства электротехнических установок

(Электричество, № 11 и 12, 1949; № 3, 4, 6, 8, 9 и 10, 1950; № 7 и 12, 1951; № 1 и 2, 1952)

Инж. О. Г. ВЕКсельман

Харьков

В § 11 раздела «Защита от перенапряжений» указывается, что максимальная допускаемая величина защитного угла тросового молниеотвода на опоре по отношению к внешним проводам не должна превышать 35°.

Эта регламентация, фиксирующая большой защитный угол, основана на предположении, что меньший угол вследствие увеличения расстояния между проводом и тросом дорожает линию. Между тем уменьшение защитного угла практически не вызывает удорожания линии и в то же время относительно заметно уменьшает вероятность числа отключений (при угле до 20° в три раза меньше, чем при угле в 30°), поэтому с приведенной рекомендацией соглашаться нельзя.

Действительно, для некоторых типов металлических опорных конструкций уменьшение защитного угла даже до нулевого значения во избежание поражения проводов от возможных, так называемых «боковых ударов» молнии не вызывает перерасхода металла. К этим опорам относятся опоры типа «Рюмка» и двухцепные опоры для линий электропередачи 220 кВ, для которых уменьшение защитного угла легко достигается изменением наклона рогов в первом случае и тросовых траверз — во втором. Увеличение расхода металла при двухцепных и одноцепных опорах вертикальным расположением проводов является в основном следствием того, что при проектировании этих опор ставилась задача достижения минимального защитного угла.

Лишь на одноцепной опоре с треугольным расположением проводов с одним тросом получение наилучшего защитного угла сопряжено с некоторыми осложнениями. Но

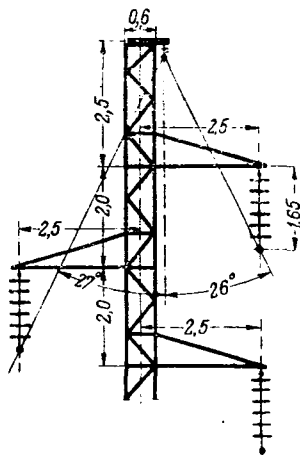


Рис. 1.

на этой опоре — типовой для линии электропередачи 110 кВ в I и II районах климатических условий — защитный угол 26... 27° (рис. 1) может быть без особых затруднений снижен до ниже предлагаемого нами минимального угла 20°, при котором поражения проводов практически исключаются. Вместе с тем изменения рассматриваемой конструкции для улучшения защитного угла должны рассматриваться с учетом дополнительных требований, обеспечивающих ремонт проводов под напряжением и большую эксплуатационную надежность линии.

На рис. 2 представлен один из возможных вариантов такой конструкции, которая при требуемом минимальном расстоянии между проводами в 4,2 м и минимальном вылете траверзы 2,1 м обеспечивает защитный угол 20°. Вес просодержателя получается даже несколько меньше веса просодержателя по рис. 1. В то же время повышение просодержателя позволит снизить степень необходимого натяжения троса, что приведет в ряде случаев к уменьшению его сечения с 50 до 35 мм<sup>2</sup>.

Указание § 12, что линии электропередачи 110 кВ на деревянных опорах не требуют во всех случаях специальной грозозащиты, представляется весьма жестким.

Действительно, эти линии при полном использовании изоляции дерева являются вполне приемлемыми, несмотря на то, что вероятное число их отключения в 12 и больше

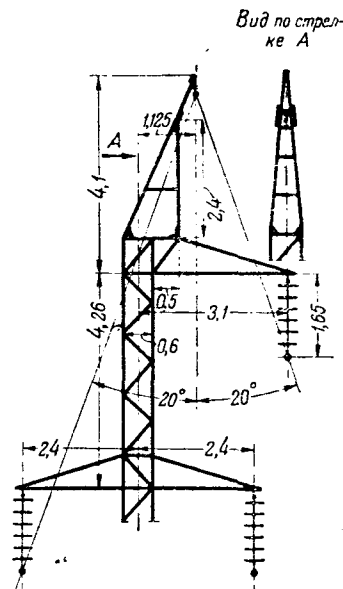


Рис. 2.

раз выше, чем для этих же линий с защитными тросами. При средней протяженности в 40... 50 км такая линия будет отключаться приблизительно один раз в 2,5 года.

Однако, учитывая возможные расщепления опор, когда не все случаи поражения смогут быть ликвидированы АПВ, представляется желательным допустить подвеску тросов на ряде линий в сильно грозовых районах. Эти единичные случаи подвески тросов не исключают широкого применения в грозовых районах грозозащитных подкосов не только на линиях 110 кВ, но и на линиях 35 кВ в особо поражаемых местах. В этих случаях должны приниматься минимальные защитные углы, так как при прорыве молнии через тросовую защиту на подходах почти каждый разряд будет сопровождаться приходом на подстанцию опасных волн. Обеспечение минимальных углов защиты легко и просто

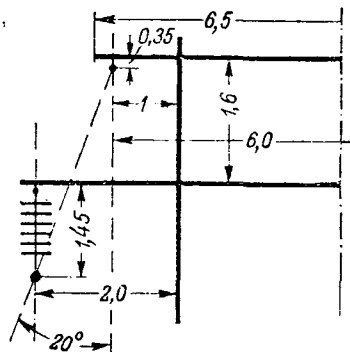


Рис. 3.

достигается посредством специальной траверзы (рис. 3), обеспечивающей защитный угол 20° вместо 29,5° на типовых опорах, где трос крепится непосредственно к стойке.

В отдельных случаях, когда осуществление защитного угла до 20° требует значительных дополнительных затрат,

допускается увеличение его до 25...30° за исключением тросовой защиты на подходах и на специальных переходных пролетах, где во всех случаях он должен быть не более 20°.

В Правилах должна получить отражение целесообразность увеличения междуфазного расстояния на деревянных П-образных опорах 35 кв с 3 до 4 м. Это увеличение, повышая расход древесины всего от 2 до 3%, улучшает удельный показатель грозоупорности этих линий на 50%. Также должно быть увеличено разрядное расстояние по дереву для линии — 20 кв с 1,5 до 2...2,5 м.

Желательно также, не меняя характера расставленных Правил, дополнить их рекомендуемыми значениями защитных уровней линии тросами, таблицей грозозащитных характеристик линий передачи и указаниями о специальных переходах.

Расчетные токи при определении защитных уровней могут быть снижены на 25% для местностей с высоким сопротивлением грунтов ( $\rho \geq 5 \cdot 10^4 \text{ ом} \cdot \text{см}$ ) и на 50% для горных районов (с отметками выше 700 м над уровнем моря).

## Тарифные мероприятия в борьбе за повышение $\cos \varphi$

(Электричество, № 7 и 11, 1950; № 6 и 11, 1951; № 1 и 2, 1952)

Инж. М. Д. ГОРЕНШТЕЙН

Новосибирскэнергэ

Отмеченное Г. В. Сербиновским ослабление темпа повышения  $\cos \varphi$  наблюдается во многих системах и вызвано в основном четырьмя причинами:

1. Существующая шкала скидок и надбавок перестает стимулировать повышение коэффициента мощности после того, как предприятие достигает возможного максимума естественного  $\cos \varphi$  за счет простейших мероприятий, не требующих значительных капиталозатрат. Для подавляющего большинства промышленных предприятий этот максимум составляет 0,7...0,8, что значительно ниже необходимого по оптимальному режиму энергосистем.

Такое положение объясняется очень малым значением надбавки или скидки в себестоимости продукции. Составляющая затрат на электроэнергию для машиностроительных и других неэнергоёмких предприятий обычно равна 1...2% от себестоимости продукции. Даже при надбавке в 30%, весьма редко встречающейся, увеличение себестоимости составит всего 0,3...0,6%. Еще меньшее значение имеют скидки. Поэтому, как правило, борьба энергетиков промышленности за повышение  $\cos \varphi$  не встречает необходимой поддержки хозяйственников.

2. Шкала скидок и надбавок не применяется к перепродавцам электроэнергии и, что особенно важно, к предприятиям с большим потреблением электроэнергии для электротермических или электрохимических процессов. Это приводит к затратам значительных средств на установку большого числа дорогостоящих мелких компенсирующих устройств на неэнергоёмких предприятиях.

Потребление реактивной энергии энергоёмкими предприятиями, несмотря на их высокий естественный  $\cos \varphi$ , имеет решающее значение в балансе реактивной мощности энергосистем. Удельный вес затрат на электроэнергию в себестоимости производства этих предприятий довольно велик. Поэтому фактор тарифного воздействия в данном случае был бы особенно ощутителен.

3. Тарифные мероприятия не касаются самих энергосистем, являющихся одновременно крупными потребителями реактивной энергии (собственные нужды, трансформаторы и т. д.).

В современных энергосистемах потери реактивной энергии в сетях системы и расход ее в установках собственных нужд соизмеримы с потреблением ее промышленными предприятиями. Однако материальной заинтересованности в повышении коэффициента мощности у предприятий энергосистем — электростанций и электросетей — нет.

4. Существующая единая шкала скидок и надбавок не отражает местных условий энергосистем.

Все выступавшие в дискуссии на страницах журнала «Электричество» приходят к выводу, что действующая шкала скидок и надбавок в настоящее время перестала быть стимулом для повышения коэффициента мощности, и ставят вопрос о ее пересмотре. Однако ряд предложенных мер не может способствовать разрешению поставленной задачи

Предложения привести шкалу скидок и надбавок в соответствие с действительной себестоимостью реактивной энергии (В. П. Лобанов) или, что то же самое, снизить коэффициент  $k$  при построении шкалы (И. М. Мень) не только не приведут к повышению коэффициента мощности, а наоборот полностью сведут к нулю стимулирующее действие системы тарифных мероприятий на повышение коэффициента мощности.

Расчеты показывают, что при наличии трех ступеней трансформации (а это имеет место в каждой крупной энергосистеме) любой вид компенсации экономически целесообразен. Поэтому тарифная и техническая политика должна исходить из задачи максимального уменьшения потребления реактивной энергии. Контроль рублем выполнения этой задачи должен быть особенно жестким.

Тарифная система должна быть построена таким образом, чтобы снижение расхода реактивной энергии путем было всегда экономически выгодно для потребителей. Органы Госэнергонадзора на местах должны добиваться применения наиболее экономичных способов компенсации исходя из конкретных местных условий.

Предложение В. Н. Лобанова перейти от оплаты максимальной мощности трансформаторов на оплату максимальной нагрузки в киловольтамперах неправильно и трудно осуществимо.

Применение двухставочного тарифа с взиманием платы за установленную мощность трансформаторов преследует не столько цель повышения  $\cos \varphi$ , сколько задачу борьбы с установкой излишней трансформаторной мощности, борьбы с омертвлением капиталовложений и ненужным расходом дефицитного оборудования, цветного металла и трансформаторного масла, а также с увеличением эксплуатационных затрат.

Переход на оплату максимальной нагрузки нанесет ущерб разрешению этой задачи и потребовал бы переделки миллионов парка счетчиков. Возникла бы необходимость в суммирующих устройствах для установок, питающихся по нескольким линиям, так как максимальные нагрузки по разным линиям не совпадают по времени. Следует также заметить, что максимальная нагрузка в киловольтамперах далеко не всегда соответствует максимальной потреблению реактивной мощности.

В. Н. Лобанов ошибается, утверждая, что оптимальная величина коэффициента мощности у потребителей должна быть в пределах 0,9...0,92 и что повышение  $\cos \varphi$  этой оптимальной величины нецелесообразно.

Потери реактивной мощности в сетях энергосистем весьма значительны. Это подтверждает и В. Н. Лобанов. Поэтому опасаться быстрого и чрезмерного повышения коэффициента мощности на шинах генераторов и связанных с ним ухудшения условий параллельной работы необходимо и преждевременно.

Независимо от того, какой будет шкала скидок и надбавок, необходимо стремиться к максимальному снижению потребления реактивной энергии потребителями, и для этого у них  $\cos \varphi$  до единицы. Если же в единичных случаях потребуются загрузка сети реактивной мощностью

чет потребителей, то энергосистемы смогут задать части предприятий в определенном районе необходимое значение  $\cos \varphi$ , освободив их от выплаты надбавок.

Особо следует остановиться на статье Г. В. Сербиновского.

Предложение отказаться от двойной шкалы для естественного и искусственного коэффициента мощности заслуживает внимания.

Величина потерь активной энергии в низковольтных сетях промышленных предприятий, обусловленная реактивными токами, преувеличена многими авторами. В действительности эти потери составляют очень небольшую часть от общих потерь в сетях системы, обусловленных реактивной нагрузкой. Однако необходимо учесть, что на каждый киловатт установленной мощности генераторов у потребителей установлено 2...3 *кВА* трансформаторной мощности. С этой точки зрения повышение коэффициента мощности на шинах рабочего напряжения промышленных подстанций способствует повышению использования оборудования, уменьшению строительных объемов трансформаторных помещений и снижению эксплуатационных расходов.

Тарифные мероприятия должны быть направлены на повышение коэффициента мощности на вторичной стороне трансформаторов, у потребителей. Это тем более необходимо, что в промышленности широко внедряются высокочастотные установки, индукционные печи и другое оборудование с низким  $\cos \varphi$ .

Предложение Г. В. Сербиновского об установлении единого «нейтрального», нештрафного  $\cos \varphi$  необоснованно и противоречит приводимым им же данным.

Если в настоящее время при нейтральном  $\cos \varphi = 0,75$ , как указывает Г. В. Сербиновский, 47% предприятий не стремятся его достигнуть и платят надбавки, то нет оснований полагать, что они будут повышать коэффициент мощности при какой-либо другой величине нештрафного  $\cos \varphi$ . В лучшем случае дело кончится тем, что на предприятиях будет установлено небольшое количество компенсирующих устройств и общий  $\cos \varphi$  системы возрастет на ничтожную величину.

Устанавливать такой наперед заданный, единый для всего Советского Союза, нештрафной коэффициент мощности, не поддающийся расчетам и не способный отразить не только особенности одного предприятия, но и целой отрасли промышленности, не нужно.

Даже если в качестве нештрафного  $\cos \varphi$  будет принято его оптимальное значение для энергосистемы, которое, несомненно, выше, чем 0,85, предложенное Г. В. Сербиновским, то и тогда применение единого нештрафного  $\cos \varphi$  не может быть оправдано, так как в отдельных районах системы, не имеющих генерирующих источников и питающихся по длинным загруженным линиям, для компенсации потерь реактивной энергии в питающей сети оптимальное значение  $\cos \varphi$  у потребителей должно быть равным единому или должно быть опережающим.

Весьма неубедительно Г. В. Сербиновский мотивирует свою точку зрения о несвоевременности перехода к оплате реактивной энергии.

Г. В. Сербиновский исходит из неверного предположения о стимулирующем действии надбавок, якобы рассматриваемых контролирующими организациями как штраф.

Это противоречит сборнику тарифов на электроэнергию, в котором подчеркнут нештрафной характер надбавки за  $\cos \varphi$ . В балансе всех промышленных предприятий надбавки за  $\cos \varphi$  включаются в общую стоимость электроэнергии и входят в себестоимость производства. Поэтому отказ от перехода к оплате реактивной энергии Г. В. Сербиновским не обоснован.

Второй мотив состоит в том, что после перехода к оплате реактивной энергии предприятия не будут иметь премиального фонда, образуемого из скидок за высокий  $\cos \varphi$  и являющегося, по мнению Г. В. Сербиновского, решающим стимулом для улучшения электрохозяйства.

Однако по данным самого же Г. В. Сербиновского 53% предприятий, потребляющих около 80% электроэнергии, отпускаемой промышленности, несмотря на наличие этого стимула почти не повышают коэффициента мощности. Следовательно, и этот мотив не убедителен.

Значительно более действенной, как показывает опыт, является система премирования за экономию электроэнергии. Необходимо распространить эту систему также и на реактивную энергию. Это будет достаточно действенным стимулом для повышения коэффициента мощности.

Таким образом, нет никаких препятствий для перехода на принципиально правильную, более удобную и более понятную систему расчетов непосредственно за потребленную реактивную энергию.

Тариф на реактивную энергию должен быть построен следующим образом:

а) Отпускная цена 1 *кварч* должна быть значительно выше его себестоимости в энергосистеме. Она должна быть равна 100...200% стоимости 1 *кВтч* активной энергии. Тариф на реактивную энергию должен быть дифференцирован по энергосистемам (аналогично тарифу на активную энергию), а в отдельных случаях и по районам или узловым подстанциям энергосистемы. Для районов, имеющих дефицит реактивной мощности или питающихся по длинным загруженным линиям, тариф на реактивную энергию должен быть более высоким, чем для районов, питающихся на генераторном напряжении.

б) Плата за реактивную энергию должна взиматься со всех промышленных предприятий независимо от технологии производства и наличия синхронных двигателей, а также с перепродавцов электроэнергии.

в) За реактивную энергию, выработанную на промышленных предприятиях и выданную в сеть энергосистемы, предприятие получает от энергосистемы плату. Тариф за 1 *кварч* должен быть установлен в 1,5...3 раза выше его себестоимости. Величина этого стимулирующего коэффициента должна быть дифференцирована по энергосистемам в зависимости от степени дефицитности реактивной энергии.

г) Для стимулирования компенсации реактивной энергии на рабочем напряжении предприятие (без выдачи в сеть энергосистемы) получает от энергосистемы премию в размере 110 до 150% стоимости 1 *кварч*.

Следует при этом особо подчеркнуть нецелесообразность объединения компенсирующего устройства с токоприемником, так как это приводит к плохому использованию и ненужному увеличению мощности компенсирующих устройств.



## К СТАТЬЕ И. М. ПОСТНИКОВА „УНИВЕРСАЛЬНАЯ МАШИННАЯ ПОСТОЯННАЯ“

(Электричество, № 11, 1951)

Ознакомившись с содержанием статьи И. М. Постникова „Универсальная машинная постоянная“, я заинтересовался приведенным в статье примером выбора размеров машины. Выбираются размеры гидрогенератора 27 мгва,  $n = 150$  об/мин,  $2p = 40$ ,  $U_s = 10,5$  кВ,  $\cos \varphi = 0,8$  с реактивностью рассеяния обмотки статора  $x_s = 0,15$  и продольным реактивным синхронным сопротивлением  $x_d = 1,2$ .

Реактивность рассеяния  $x_s$  введена автором статьи в формулу (23), по которой подсчитывается размер полюсного деления. Что касается продольного синхронного реактивного сопротивления  $x_d'$ , то оно вообще не используется автором в подсчете. Правда, автор повторяет формулу (23) с заменой  $x_s$  выражением  $x_d \tau_{1s}$ , полагая тем

самым, что  $x_s$  всегда пропорционально  $x_d$ , вовсе необусловлено.

Определение размеров гидрогенератора по заданным реактивным сопротивлениям  $x_d$ ,  $x_q$ , а также  $x_d'$  и  $x_q'$  в зависимости размеров от этих реактивностей не так важно.

Было бы желательно, чтобы автор статьи сообщил, применима ли предложенная им машинная постоянная для таких целей или же при использовании этой машинной постоянной возможно выяснение зависимости размеров машины только от реактивного сопротивления рассеяния обмоток статора, что практически имеет гораздо меньшее значение.

Кандидат техн. наук Н. А. ПОЛЯК

### ОТВЕТ АВТОРА

Н. А. Поляк в своем письме ставит следующий весьма важный вопрос: применима ли предлагаемая мной универсальная машинная постоянная для определения размеров электрической машины с учетом заданных параметров  $x_d$ ,  $x_s$ ,  $x_d'$ ,  $x_q$ .

В статье показано, что удобство этой постоянной и состоит в том, что она позволяет принять в соображение не только экономические, но и эксплуатационно-технические требования, в частности и электрические параметры  $x_d$ ,  $x_s$ ,  $x_d'$  и  $x_q$ .

Действительно, как следует из уравнений (22), (27), полюсное деление с учетом параметров ротора

$$\tau_R = C_s \left( \frac{P_\beta^3}{2p \sqrt{2} f k' \sqrt{x_s}} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{C_R}{C_s} \left( \frac{F_R \lambda_1}{F_s \lambda_{1R}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

или, иначе, по (23)

$$\tau_R = C_s^{\frac{8}{7}} \left( \frac{P_\beta^3}{2p \sqrt{2} f k' \sqrt{x_s}} \right)^{\frac{2}{7}} \frac{C_R}{C_s} \left( \frac{F_R \lambda_1}{F_s \lambda_{1R}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

Отношение

$$\frac{F_R}{F_s} = \frac{F_\delta k_\theta}{F_1 \frac{\pi}{4}} = \frac{4}{\pi} k_d k_\theta (1 + \tau_{1s}) x_d$$

где  $k_\theta = \frac{F_R}{F_\delta}$  — отношение тока возбуждения  $i_{aN}$  к  $i_{\theta\delta}$  (по прямой характеристике и  $U = U_N$ );  $\tau_{1s} = \frac{x_s}{x_{ad}}$ ;  $k_d$  — коэффициент реакции якоря в продольной оси.

Далее согласно (16а) и (16б)

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_{1R}} = \frac{k' \sqrt{x_s}}{k'_R \sqrt{x_{sR}}}$$

и мы получим (опуская индекс  $R$  у  $\tau$ ):

$$\tau = C_s^{\frac{8}{7}} \left( \frac{P_\beta^3}{2p \sqrt{2} f k' \sqrt{x_s}} \right)^{\frac{2}{7}} \frac{C_R}{C_s} \times \left( \frac{\frac{4}{\pi} k_d k_\theta (1 + \tau_{1s})}{x_d} \cdot \frac{k' \sqrt{x_s}}{k'_R \sqrt{x_{sR}}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Так как по (28)  $\frac{C_R}{C_s} \approx 1$ ,  $\frac{4}{\pi} k_d (1 + \tau_{1s}) \approx 1$ , а величина  $\frac{k_\theta}{x_d} = \frac{M_{max}}{M_N}$  представляет статическую перегрузку по моменту, то

$$\tau = C_s^{\frac{8}{7}} \left( \frac{P_\beta^3}{2p \sqrt{2} f k' \sqrt{x_s}} \right)^{\frac{2}{7}} \times \left( \frac{M_{max}}{M_N} \cdot \frac{k' \sqrt{x_s}}{k'_R \sqrt{x_{sR}}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

т. е. получаем размер  $\tau$  (а при выбранном отношении и длину  $l$ ) через заданные  $x_s$ ,  $x_{sR}$ ,  $x_d$  ( $x_d'$  при заданных  $x_s$  и  $x_{sR}$  вполне определено, так как  $x_d' \approx x_s + x_{sR}$ ). Что касается  $x_q$ , то эта величина при заданном  $x_d$  практически также определена, поскольку соблюдаются известные требования формы кривой поля. Коэффициенты пропорциональности  $k'$  и  $k'_R$  зависят от соотношений размеров полюсной системы, и при соблюдении требований синусоидальности формы кривой требования механической прочности полюсного наконечника и пр. изменяются незначительно; для неявнополюсных машин  $k' \approx k'_R$ .

Возьмем для примера генератор, рассмотренный в стр. 17 моей статьи в журнале „Электричество“, № 11. Для него получено  $C_s = 4,25$  см/дЖ<sup>1/4</sup>; при  $\beta = 0,5$  и  $x_s = 0,1$



полное деление по (23) определено в 48,5 с.м. По формуле (4) получаем:

$$\tau = 48,5 \left( \frac{M_{\max}}{M_N} \frac{k'}{k_R} \frac{\sqrt{x_s}}{\sqrt{x_{sR}}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Согласно сказанному на стр. 14 и 17 статьи  $k' = 3,5$ ,  $k_R \approx 7$  и при  $x_{sR} \approx x_s = 15\%$  получим  $\tau = 48,5$ , если  $\frac{M_{\max}}{M_N} = 2$ . Пусть теперь мы желаем увеличить перегрузимость вдвое, при этом можно либо увеличить  $k_0$ , либо уменьшить  $x_d$ , либо сделать то и другое одновременно. Тогда при прочих равных условиях по (4) полное деление должно возрасти до  $\sqrt[4]{2} \approx 1,2$  от прежней величины, т. е. приблизительно на 20%, а активный вес машины  $(\sqrt[4]{2})^3 \approx 1,7$ , на 70%.

Таким образом, по этому методу можно учесть одновременно и заданную величину  $x_d$  и форсировку возбуждения  $k_0$ , т. е. статическую перегрузаемость машины.

Учет влияния заданной величины переходной реактивности  $x'_d$  по (4) также возможен. Пусть в исходном измере  $x_s \approx x_{sR} = 0,15$  (15%) и  $x'_d \approx x_s + x_{sR} = 30\%$ . Как изменятся размеры и вес машины, если потребовать

$i = 15\%$ , при оставлении  $\frac{M_{\max}}{M_N}$  прежним?

Предположим, что мы приходим к этому путем одновременного понижения  $x_s$  и  $x_{sR}$  до 7,5%, тогда

$$\tau = 48,5 \left( \sqrt{\frac{15}{7,5}} \right)^{\frac{2}{4}} (2 \cdot 0,5 \cdot 1)^{\frac{1}{4}} = 48,5 (1,41)^{\frac{2}{4}} = 48,5 \cdot 1,1$$

возрастет на 10%, а вес при прочих равных условиях на  $(1,1)^3 - 1$ , т. е. на 30%.

Если  $x_s$  остается неизменным, а величина  $x'_d$  должна быть взята меньше (например, 20%) за счет снижения  $x_{sR}$  до 5%, то

$$\tau = 48,5 \left( 2 \cdot 0,5 \sqrt{\frac{15}{5}} \right)^{\frac{1}{4}} = 48,5 \cdot 1,15$$

возрастет на 15%, а вес на 50%.

Разумеется, приведенные расчеты могут быть уточнены, если учесть изменение  $\frac{C_R}{C_s}$  по (28) или изменение коэффициентов  $k'$  и  $k_R'$ . Однако это уточнение несущественно, так как изменения  $x_d$ ,  $x_s$ ,  $x_{sR}$  ( $x'_d$ ) не могут быть столь значительными, как это принято в наших примерах.

**Доктор техн. наук, проф. И. М. ПОСТНИКОВ**

<sup>1</sup> Снижение  $x_{sR}$  в явнополюсных машинах до 5% связано с известными трудностями. Здесь такое снижение взято для примера.



## К ЧИТАТЕЛЯМ

С 1950 г. выпускается в качестве приложения к журналу «Электричество» КАЛЕНДАРЬ-СПРАВОЧНИК на текущий год.

Содержание Календаря-справочника «Электричество» ежегодно пересматривается с учетом замечаний и пожеланий читателей.

Редакция обращается к читателям с просьбой сообщить свой отзыв о содержании и оформлении издания Календаря-справочника на 1952 год. Предложения читателей будут рассмотрены при подготовке к печати издания Календаря-справочника на 1953 г., к которой редакция приступает в ближайшее время.

Редакция журнала «Электричество»

## МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ РТУТНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ ДЛЯ ПИТАНИЯ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗНЫХ СЕТЕЙ

Министерством электропромышленности разработан новый металлический ртутный выпрямитель РМ-300 треханодный с воздушной системой охлаждения. Номинальный ток 300 а, выпрямленное напряжение на шинах 275 в. Аппарат предназначен для снабжения электрической энергией шахтных электровозных сетей и подземных зарядных станций. Питание выпрямителя осуществляется от специального трехфазного трансформатора ТМ РШ-180/6 с естественным масляным охлаждением, а вспомогательных цепей (двигатель вентилятора, зажигание и пр.) от сети 220/380 в.

Производственные испытания выпрямителя РМ-300 показали вполне удовлетворительные результаты. Он имеет ряд преимуществ перед употребляемыми в настоящее время конструкциями — компактен, прост в монтаже, эксплуатации и пр.

(Механизация трудоемких и тяжелых работ, № 7, 1951, М. С. Лихачев)

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ПОГРУЗОЧНЫХ ПЛОЩАДОК И ТРЕЛЕВОЧНЫХ ВОЛОКОВ

Освещение ночных работ на лесозаготовках при помощи прожекторов заливающего света недостаточно удобно. К недостаткам прожекторного освещения относятся: 1) необходимость оставлять деревья или ставить специальные мачты, причем монтаж на деревьях сложен и не экономичен; 2) отсутствие равномерности освещения и наличие больших теней от пней, бугров и других местных объектов затрудняет наблюдение за движением пачек хлыстов; 3) ослепление встречным прожекторным лучом; 4) дороговизна и быстрая порча ламп мощностью 500 и 1000 вт в связи с атмосферными воздействиями.

Более рациональным оказался иной способ освещения. Вдоль трелевочного волокна на расстоянии 2...4 м от грузового троса протягивается вспомогательный трос диаметром 9 мм и закрепляется одним концом на высоте 7...8 м от земли за дерево, находящееся в глубине сектора освещения. Другой конец троса пропускается через блок, подвешенный также на высоте 7...8 м на дереве вблизи погрузочной площадки. К этому несущему и еще не натянутому тросу подвешивают на роликах на расстоянии 20...25 м обыкновенные арматуры уличного освещения, присоединенные уже к питающему кабелю. Электрические лампы используются мощностью в 150, 200 и 300 вт. Затем несущий трос вместе с арматурой медленно натягивают до высоты 4...5 м над уровнем земли при помощи одной из лебедок, имеющихся на погрузочной площадке. После натяжения троса лампы включаются под напряжение. По окончании работы в данном месте несущий трос ослабляется, все арматуры стягиваются к мачте у погрузочной площадки, трос отвязывается от дерева в глубине сектора и при помощи лебедки также подтаскивается к погрузочной площадке.

Для развешивания освещения в другом секторе работы конец несущего троса присоединяется к грузовому трелевочному тросу и затаскивается к намеченному дереву и закрепляется. Арматуры на роликах вновь раздвигаются и несущий трос подтягивается до требуемого уровня.

При испытании предложенной схемы электрическое освещение оказалось лучше прожекторного.

(Лесная промышленность, № 1, 1952, С. А. Абрамов)

## БАЛАНСИРНАЯ ПОДВЕСКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОИНСТРУМЕНТА

Некоторые типы электрифицированного инструмента при всей своей компактности имеют значительный вес, что вызывает утомляемость рабочего. Поэтому представляет

большой интерес балансирующая подвеска типа И-97, которую начал изготавливать Московский завод им. Калинина. Подвеска обеспечивает при работе на конвейерах или на строительных участках опускание вручную подвешенного инструмента весом 14—20 кг на расстояние до 2,2 м и автоматическое возвращение его в исходное положение с прекращением действия внешней силы. Вес балансирующей подвески — 23 кг. Использование ее в работе значительно снижает утомляемость рабочего, так как она воспринимает на себя до 75% веса инструмента. Кроме того, увеличивается производительность труда вследствие того, что инструмент, освобожденный из рук рабочего, автоматически убирается с рабочего места и всегда готов к повторной работе.

(Механизация строительства, № 7, 1951, В. А. Пономарев)

## ЭЛЕКТРОТОПОР ДЛЯ ОБРУБКИ СУЧЬЕВ СО СВАЛЕННЫХ ДЕРЕВЬЕВ

В настоящее время на лесозаготовках сучья обрабатываются вручную, топором. Эта операция отнимает до 15% рабочего времени, идущего на заготовку 1 м<sup>3</sup> древесины. С. А. Богатырев предложил новый принцип резания древесины — ударно-вибрационный, заключающийся в интенсивном расчленении процесса на мельчайшие доли секунды. Резцу придается поступательно-колебательное движение в плоскости резания (2...100 ударов в секунду). Поступательное движение осуществляется за счет электропривода, который стоит в основном из механизма типа электромолокотки и режущего наконечника, торец которого соприкасается с древесиной в момент удара.

Сучкорубный электротопор БЭТ с ударным механизмом электромолокотки типа И-67 приводится в действие переменным трехфазным током при напряжении 36 или 220 в и частоте 200 гц. Электродвигатель механизма — асинхронный с короткозамкнутым ротором. Потребляемая мощность 1400 вт. Число ударов в минуту 4000...5000, энергия одного удара 0,5...0,6 кдж. Габаритные размеры электротопора — диаметр 112 мм, длина (без реза) 520 мм, длина режущего наконечника 250 мм. Общий вес электротопора 9,5 кг. Ударный механизм включается в работу при нажатии режущей частью на обрабатываемую древесину и автоматически прекращает работу при отсутствии сопротивления. Исследования позволили автору выработать наиболее рациональную форму режущей плоскости в струменте.

Испытания электротопора в производственных условиях в лесхозах показали принципиальную возможность и достаточную эффективность работы по обрубке сучьев этим инструментом. В настоящее время появилась новая опытная модель электромолокотки весом примерно 5 кг и, используя его в качестве ударного механизма электротопора, лесная промышленность может получить значительно легкий (6...6,5 кг), удобный и производительный инструмент для механизации трудоемких работ по обрубке сучьев.

(Механизация трудоемких и тяжелых работ, № 11, 1951, С. А. Богатырев)

## ЭЛЕКТРОБУР ДЛЯ ШПУРОВ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

При взрывных работах на строительстве зданий и сооружений потребовалось бурить шпуров в мерзлой глине. Применяемые обычные электробуры оказалось невозможно, так как они имели сильную вибрацию сверла. Точность соединения в туннеле Морзе с валом электродвигателя быстро нарушалась.

Изменение конструкции электробура состояло в том, что конец вала электродвигателя мощностью 2 квт, установленного на двух направляющих, разделялся под углом Морзе № 2, рассчитанный для спирального бура. Это устранялось промежуточное соединение рабочего сверла

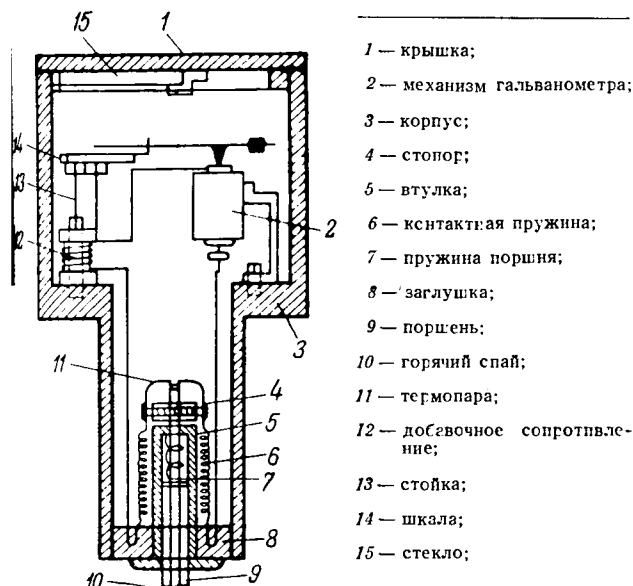
валом электродвигателя через отдельный конус Морзе. Вибрация сверла стала практически малоощутимой, что обеспечило высокую производительность механизма. Применение электробура такой конструкции способствовало легкому выполнению взрывных работ в зимних условиях.

(Механизация трудоемких и тяжелых работ, стр. 28, № 12, 1951.)

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для точного измерения температуры поверхностей нагретых тел пирометрическая лаборатория ЦЗЛ Горьковского автозавода им. Молотова построила и испытала в эксплуатации в течение нескольких лет поверхностные пирометры типа ПП-1 и ПП-2. Эти приборы имеют ряд преимуществ (компактность, чувствительность, удобство в обращении) перед обычными поверхностными термопарами, выпускаемыми заводами СССР.

Поверхностный пирометр типа ПП-1 смонтирован в алюминиевом корпусе (см. рисунок), внутри которого помещается гальванометр, соединенный с чувствительной термопарой (сплав хромель — копель), помещенной в подвижном поршне узкой части корпуса. Пределы измерения прибора 20 ... 350°, а время замера 5 ... 7 сек. Прибор используется для измерения температуры поверхностей корпусов машин, втулок подшипников, валов, осей и других деталей.



Поверхностный пирометр типа ПП-2 отличается от пирометра типа ПП-1 измененной конструкцией взаимного расположения гальванометра и термопары, которая вынесена из корпуса прибора. Пирометр ПП-2 предназначен для использования в тех случаях, когда нельзя применить пирометр ПП-1, например, при контроле температуры поверхности штампов. Пределы измерения прибора 20 ... 500°, точность 7 ... 8 сек.

(Автомобильная и тракторная промышленность, № 10, 1951. И. Брыкушкин.)

### РУБЕЖОМ

### ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ В ШВЕЦИИ

Задача работы состояла в экспериментальном определении влияния различных факторов на величину сопротивления заземления токам промышленной частоты и импульсным токам.

В процессе проведения исследований применялась интенсивная обработка грунта и изменялась глубина ук-

ладки заземлителей. Кроме того, применялись заземлители с шипами, которые должны были способствовать процессу растекания тока в земле.

Все измерения производились в грунтах с высоким удельным сопротивлением, характерным для условий работы заземлителей на высоковольтных линиях в Швеции.

Испытания проводились в открытом поле, в естественных условиях. Удельное сопротивление грунта определялось с помощью измерителя заземлений. Геологическая структура грунта в месте испытаний была следующая: верхний слой состоял из песка различной толщины. Под ним в некоторых местах находилась глина. Толщина слоя глины была различной. Под ней опять находился слой песка. Этот слой песка опирался на гранит. Содержание влаги в земле во время измерений на поверхности составляло 12 ... 15%, а в более глубоких слоях песка — 7 ... 12%.

В центре испытательного участка в одном и том же месте поочередно укладывались различные типы заземлителей.

Укладка делалась в горизонтальной плоскости в следующем порядке. Сначала электрод засыпался чистым песком до заданной отметки и утрамбовывался. Затем опять насыпался песок и покрывался слоем дерна толщиной в 20 см.

Испытания производились летом в сухую погоду. Было произведено измерение импульсного сопротивления заземлителя при отрицательной полярности и различном напряжении, а также сопротивление заземлителя току промышленной частоты. Измерения производились тремя различными осциллографами.

Результаты измерений, приведенные в таблице, позволяют сделать следующие выводы (см. табл. на стр. 84).

Удельное сопротивление грунта и тем самым сопротивление растекания при токе промышленной частоты заметно зависит от состояния слоя земли, находящегося в непосредственной близости от заземлителя.

В проведенных опытах рыхлая земля повышала величину сопротивления заземлителя на 65%. Увеличение удельного сопротивления при укладке заземлителя на глубине 60 см вместо 25 см можно также объяснить неодинаковой плотностью земли.

Для трех вариантов укладки заземлителей, указанных в таблице, были также измерены импульсные сопротивления заземления. Результаты измерений показаны на рис. 1.

Как известно, с ростом импульсного тока величина сопротивления заземления уменьшается.

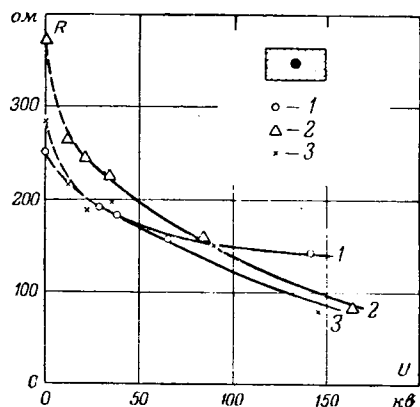


Рис. 1. Импульсное сопротивление медной полосы сечением 25 мм<sup>2</sup> и длиной 16 м, проложенной в песке. 1 и 3 — на глубине 25 и 60 см; грунт утрамбован; 2 — на глубине 60 см, грунт рыхлый.

Эта зависимость сильнее выражается при глубокой укладке заземлителя.

При достаточно больших импульсных токах величина импульсного сопротивления заземления не зависит от плотности грунта, непосредственно примыкающего к заземлителю, т. е. при рыхлом и утрамбованном грунте импульсное сопротивление одинаково.

На рис. 2 приведены результаты измерения импульсного сопротивления заземления горизонтального электрода.

## Результаты измерений сопротивлений заземлений медного провода, уложенного в песок

Глубина укладки, см . . . . .	25	60	60
Состояние грунта . . . . .	Утрамбован	Утрамбован	Рыхл
Сопротивление току 50 гц, ом . . . . .	235 . . . . 250	275 . . . . 285	365 . . . .
Удельное сопротивление, ом·м . . . . .	2 080 . . . . 2 210	2 640 . . . . 2 740	3 510 . . . . 3
Среднее значение удельного сопротивления, ом·м . . . . .	2 145	2 690	3 530

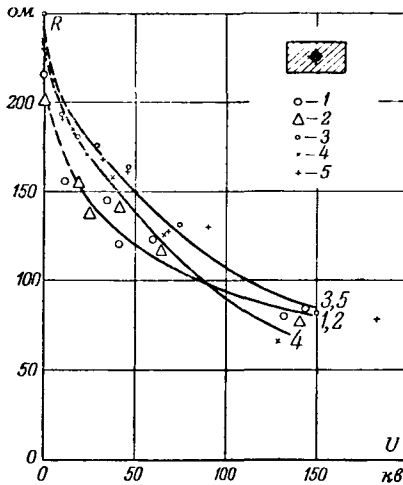


Рис. 2. Импульсное сопротивление ключей медной проволоки, проложенной в песке.

1 и 2 — на глубине 25 см, шпиль 5 и 10 см; 3 и 4 — на глубине 60 см, шпиль 5 и 10 см; 5 — с рыхлой засыпкой на глубину 25 см с шпильками 20 см.

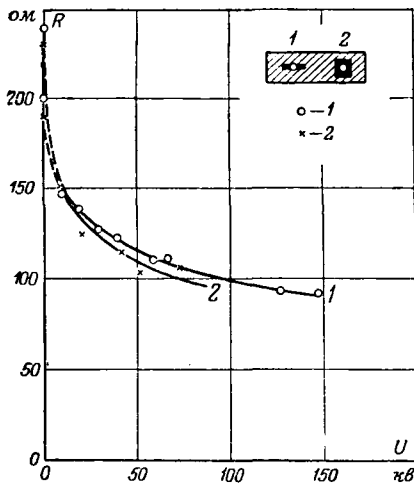


Рис. 3. Импульсное сопротивление медной полосы, уложенной в слое железной руды.

1 — слой 20×1,5 см на глубине 25 см; 2 — слой 20 см ширины на 25 см толщины, состоящий из смеси 12% железной руды с песком, заложный на глубине 20 . . . 45 см.

состоящего из медного провода с шпильками длиной 5 или 10 см. Из рисунка следует, что величина импульсного сопротивления заземления при импульсном напряжении порядка 150 кВ понизилась до 65—80 ом.

Влияние глубины укладки заземлителей (25 или 60 см), длины шпилек (5 или 10 см) и расположения шпилек вдоль заземлителя оказалось сравнительно небольшим.

Следующая серия опытов была посвящена влиянию материалов, окружающих заземлитель на величину импульсного сопротивления заземления. В первом случае на дно канавы глубиной 25 см был насыпан слой железной

руды шириной 20 см и толщиной 1,5 см. В этот слой уложен заземлитель. Затем выемка была заложена комом, утрамбована и покрыта дерном.

Во втором случае железная руда была смешана с комом (12% руды и 88% песка). Слой смеси руды с комом имел ширину 20 см и толщину 25 см. Заземлитель был уложен в середине слоя. Затем смесь утрамбовывалась пальцами с песком и покрывалась дерном. Результаты измерений показаны на рис. 3.

Кривые изменения импульсного сопротивления в зависимости от импульсного напряжения в обоих случаях зались практически одинаковыми.

Последняя серия опытов должна была выяснить влияние древесного угля на величину импульсного сопротивления заземления. Процесс укладки заземлителя проводился аналогично описанному выше.

Результаты измерений показаны на рис. 4. Импульсное сопротивление оказалось наименьшим в смеси 15,5% древесного угля с песком.

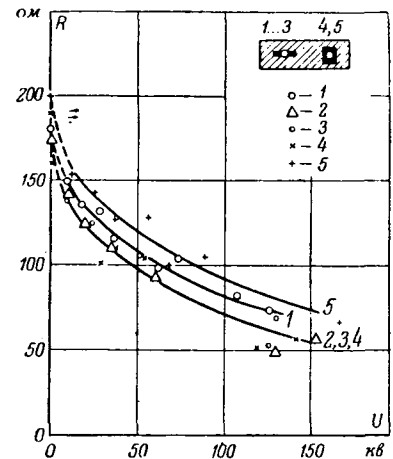


Рис. 4. Импульсное сопротивление медной полосы в слое древесного угля.

1 — слой крупного угля 20 см ширины на 1,5 см толщины, заложный на глубине 25 см; 2 — то же, но уголь мелкий; 3 — то же, но слой из угольной пыли; 4 — слой 40×20 см из смеси 23,5% угольной пыли с песком, заложный на глубине 20 . . . 40 см; 5 — слой 20×20 см из смеси 15,5% мелкого угля с песком, заложный на глубине 20 . . . 40 см.

Результаты опытов, показанные на кривых 2 . . . 4, зались наиболее благоприятными.

На основании проведенных опытов можно сделать вывод, что измерять сопротивление заземления надо некоторое время после того, как произойдет естественная усадка грунта.

Установить определенную зависимость, характерную для импульсных коэффициентов между сопротивлением току промышленной частоты и импульсным сопротивлением заземления, авторам не удалось.

Общая характеристика импульсных сопротивлений заземлений показана на рис. 5, где приведены кривые зависимости импульсного сопротивления заземления от импульсного напряжения при различном расположении заземлителей.

Наименьшее влияние напряжения на величину импульсного сопротивления заземления было установлено у гладкого проводника, закопанного в песок (кривая 1, рис. 5).

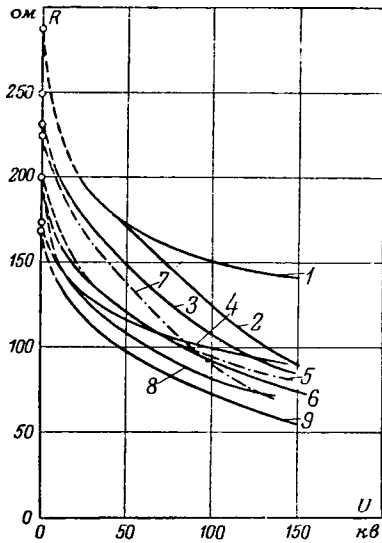


Рис. 5. Сопоставление кривых импульсных сопротивлений

1 и 2 — медная полоса в песке на глубине 25...60 см; 3 — колючая проволока с шипами 5 см в песке на глубине 60 см; медная полоса с шипами 20 см в песке на глубине 25 см; 4 — медная полоса в слое железной руды 20×1,5 см на глубине 25 см; 5 — полоса с шипами 5 и 10 см на глубине 25 см; 6 — медная полоса в смеси мелкого древесного угля с песком на глубине 20...40 см; 7 — полоса с шипами 10 см в песке на глубине 60 см; 8 — медная полоса в слое 20×1,5 см из крупного древесного угля на глубине 25 см; 9 — медная полоса в слое 40×2,5 см из угольной пыли на глубине 25 см; 10 — в смеси угольной пыли с песком на глубине 20...40 см; 11 — медная полоса в слое 20×1,5 см из мелкого угля на глубине 25 см

Из сравнения кривых 1 и 2 (рис. 5) можно видеть, что увеличением глубины укладки заземляющих электродов уменьшается величина импульсного сопротивления заземления.

Для электродов с шипами влияние глубины укладки и величину импульсного сопротивления заземления затронто меньше, чем для гладких электродов.

Было также установлено (кривая 9, рис. 5), что мелкий древесный уголь оказывает наиболее благоприятное влияние на уменьшение величины импульсного сопротивления заземления.

Влияние слоя древесного угля или смеси древесного угля с песком на величину импульсного сопротивления заземления оказалось практически одинаковым.

Результаты исследований подтвердили, что импульсное сопротивление заземления сильно зависит от среды, окружающей заземлитель и способствующей процессу растекания тока.

Произведенное во время опытов сравнение свойств железной руды с древесным углем показало, что древесный уголь, окружающий заземлитель, больше влияет на уменьшение величины импульсного сопротивления заземления, чем железная руда.

В результате исследований также выяснилось, что вилы на электродах способствуют процессу растекания и тем самым уменьшают величину импульсного сопротивления заземления. С этой точки зрения оказалось целесообразным увеличение длины шипов и глубины укладки заземлителя.

Авторы приходят также к выводу, что применение вадких электродов, окруженных угольной пылью, более целесообразно, чем снабженных шипами и уложенных непосредственно в песок.

ulletin ASE, № 10, 1951. Н. Norinder, G. Salka).

Из ж. А. Н. ШЕРЕНЦИС

## НОВЫЕ ЭЛЕКТРОВОЗЫ ОДНОФАЗНОГО ТОКА 50 гц (Обзор)

В предыдущем обзоре [Л. 2] в основном была описана конструкция электровоза, поставленного французским железным дорогам фирмой Эрликон (электровозу присвоено обозначение СС6051) и поступившего на испытания на опытном участке в сентябре 1950 г.

Позднее французскими железными дорогами были получены электровозы и моторвагонные секции однофазного тока 50 гц других фирм. Одновременно новый подвижной состав однофазного тока 50 гц пущен в опытную эксплуатацию на Геллентальской железной дороге в Западной Германии.

В настоящем обзоре дано краткое описание новейших электровозов (французских и немецкого).

1. Электровоз СС6052 [Л. 3 и 8] с коллекторными последовательными тяговыми двигателями построен фирмой Альстом по техническим условиям французских железных дорог и пущен в пробную эксплуатацию в начале сентября 1951 г. Его механическая часть очень близка по конструкции к механической части электровозов постоянного тока 1500 в французских железных дорог СС7100 (линия Париж—Лион), также построенных фирмой Альстом. От электровоза фирмы Эрликон электровоз СС6052 отличается тем, что на нем применены сдвоенные тяговые двигатели.

Сдвоенный двигатель типа TDM имеет следующие характеристики [Л. 8] (табл. 1).

Таблица 1

Показатель	Длительный режим	Часовой режим
Напряжение, в . . . . .	2×218	2×218
Ток, а . . . . .	1 400	1 600
Сила тяги, кг . . . . .	2 330	2 920
Скорость вращения, об/мин . . . . .	1 460	1 280
Скорость, км/час . . . . .	69,5	61
Мощность, квт . . . . .	450	500
cos φ . . . . .	0,9	0,89

Двигатели имеют принудительное охлаждение. Расход воздуха 1,8 м³/сек (на один якорь). Двигатели полностью подрессорены. Передача зубчатая, с полным валом. Передаточное число 1 : 4,83.

Силовая схема электровоза [Л. 11] приведена на рис. 1. Якоря сдвоенных двигателей соединены последовательно. Главный и регулирующий трансформаторы а и d, помещенные в общий кожух, регулируют напряжение в пределах от 540 — 340 = 200 в до 540 + 340 = 880 в. Комбинации ответвлений от обмотки главного трансформатора и положения переключателя е позволили по сравнению с другими схемами уменьшить вдвое количество ответвлений и контакторов при сохранении того же количества ступеней скорости (22 ступени), а также выбрать напряжение регулирующего трансформатора сообразно с конструкцией контакторов. Вторичное напряжение главного трансформатора выбрано равным 1 500 в, что уменьшает токи контакторов, позволяет использовать его для отопления поезда и применить контакторы 1 500 в электровозов постоянного тока. Мощность регулирующего трансформатора равна половине мощности главного трансформатора.

На электровозе используется реостатное торможение, при этом работают только 4 сдвоенных двигателя, включаемые в 2 группы по 2 двигателя последовательно. Каждая группа работает на отдельное сопротивление и имеет независимое возбуждение от регулирующего трансформатора. Имеется 10 ступеней торможения.

Включения осуществляются электропневматическими контакторами, главным образом с индивидуальным питанием от аккумуляторной батареи.

Имеется сигнализация буксования той или иной оси. Для работы на участках постоянного тока на электровозе установлен двигатель постоянного тока 1 500 в, 370 квт, соединенный с генератором постоянного тока. На

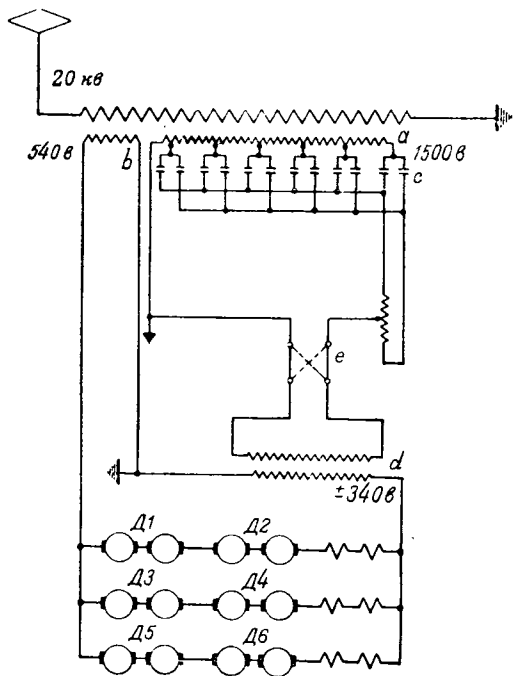


Рис. 1. Принципиальная силовая схема электровоза СС-6052.

Этом включении имеется 8 ходовых ступеней, получаемых регулированием возбуждения генератора.

Вспомогательные машины за исключением компрессоров имеют привод от трехфазных короткозамкнутых двигателей 380 в, питающихся от специального преобразователя фаз. Общая мощность вспомогательных машин (без компрессора) 100 л. с.

Компрессор имеет привод от двигателя постоянного тока 175 в, который получает энергию от генератора, посаженного на один вал с преобразователем фаз и работающего параллельно с аккумуляторной батареей 80 ач.

Вес электровоза СС6052 118 т, в том числе электрическое оборудование 62,2 т, длительная мощность 2 700 квт, часовая 3 000 квт при напряжении 20 кв; длина по буферам 18,742 м. Максимальная скорость 100 км/час.

2. Электровоз ВВ-8051 французских железных дорог [Л. 3, 4, 5, 9] ртутно-преобразовательный, построен также фирмой Альстом. Первоначально в программу французских железных дорог [Л. 1] не были включены постройка и испытания ртутно-выпрямительного электровоза. Этот вопрос был поднят только в феврале 1950 г., и в июле 1951 г. первый образец электровоза поступил на опытный участок.

Механическая часть электровоза укомплектована элементами, используемыми в других локомотивах. Кузов — от электровоза постоянного тока ВВ-8100 французских железных дорог, тележки и тяговые двигатели от электровоза ВВ-110 голландских железных дорог.

В отличие от голландских дорог электровоз ВВ-8051 оборудован подвесноосевыми двигателями. Эти двигатели типа ПЮ631 имеют следующие характеристики [Л. 9] (табл. 2).

На электровозе установлены 2 шестианодных, безнасосных ртутных выпрямителя с сетками, с воздушным охлаждением. Мощность каждого выпрямителя 1 100 квт (830 а при 1 350 в и перегрузка на 10 мин до 1 200 а). Все выпрямителя 350 кг. От обычных стационарных он отличается несколько большей механической прочностью, наличием резиновых подкладок под ножками корпуса, устройством на катоде особого приспособления, предотвращающего выплеск ртути, и т. д.

Силовая схема электровоза [Л. 3] представлена на рис. 2.

Кроме 6 главных анодов, соединенных по три параллельно, выпрямитель имеет 2 вспомогательных анода, 2 анода возбуждения и электрод для зажигания.

Сетки ртутных выпрямителей предназначаются для защиты; регулирование напряжения выпрямленного тока,

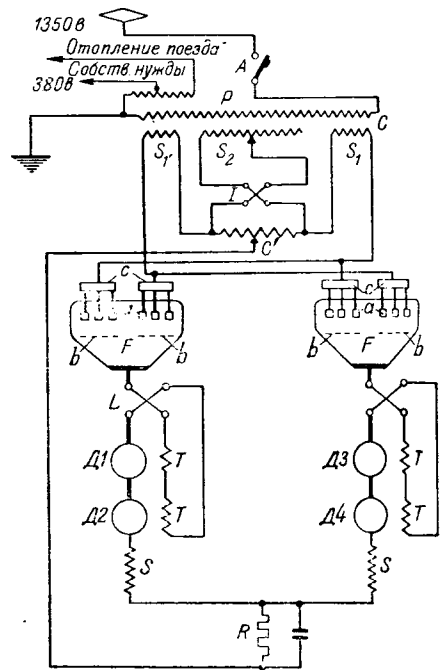


Рис. 2. Принципиальная схема ртутно-преобразовательного электровоза (ВВ-8051).

А — выключатель; С — трансформатор; F — центранодный выпрямитель; I — переключатель в цепи регулирования; L — переключатель направления движения; D — тяговый двигатель; R — сопротивление в цепи переключения ступеней скорости; S — сглаживающие индуктивности; T — главные полюсы тяговых двигателей; a — аноды; b — сетки для защиты выпрямителя; c — анодный делитель тока; p — первичная обмотка трансформатора; S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub> — вторичные обмотки трансформатора, в том числе обмотка (S<sub>3</sub>) с выводами для регулирования вторичного напряжения.

т. е. скорости тяговых двигателей, производится изменением напряжения на выпрямителе.

Основное регулирование осуществляется отвлечением вторичной обмотки S<sub>2</sub>, замыкаемыми 16 контакторами (на рис. 2 не показанными).

Количество ходовых позиций увеличено созданием промежуточных ступеней регулирования посредством изменения сопротивления R, чем достигается также большая плавность изменения скорости. Добавлены 2 позиции в тировки поля, таким образом на электровозе ВВ-8051 предусмотрена комбинация трех систем регулирования.

Общее количество ходовых ступеней 29. Управление осуществляется электропневматическими контакторами. Уменьшение номинальной мощности двигателей вследствие волнистости тока не превышает 2,7 ... 3%.

Коэффициент мощности достаточно высок и остается примерно постоянным на всем диапазоне скоростей.

Табл.

Показатель	Длительный режим	Часовой режим
Напряжение, в . . . . .	675	675
Ток, а . . . . .	800	840
Скорость вращения, об/мин . . . . .	1 130	1 100
Скорость, км/час . . . . .	60	58,5
Мощность, квт . . . . .	500	525
Сила тяги на ободу, т . . . . .	3	3,22
Передаточное число . . . . .	4,375	

Размеры кузова не позволили разместить добавочное оборудование, и поэтому электровоз ВВ-8051 не имеет возможности работать на участках постоянного тока.

Для питания однофазных двигателей вспомогательных машин (4 вентилятора, масляный насос и т. д.) в главном трансформаторе имеется отпайка на 380 в. Двигатель-компрессор питается постоянным током 175 в, 100 а от вспомогательных анодов ртутных выпрямителей [Л. 9].

Вес электровоза [Л. 9] 79 т, из них электрическое оборудование 33,5 т, длительная мощность 2 000 квт при скорости 60 км/час и силе тяги 12 т. Часовая мощность 100 квт. Длина по буферам 22,93 м. Максимальная скорость 105 км/час.

3. Электровоз ВВ-244-22 Геллентальской железной дороги [Л. 6, 7, 10, 12].

Этот электровоз с коллекторными последовательными двигателями однофазного тока 50 гц, построенный фирмой АЕГ, поступил в опытную эксплуатацию в конце 1950 г. Механической части он очень близок к электровозу однофазного тока 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> гц немецких дорог серии Е44.

Тяговые двигатели — подвесноосевые, с зубчатыми передачами по обе стороны якоря. Передняя ось каждой тележки, во избежание разгрузки, при трогании дополнительно нагружается с помощью цилиндра со сжатым воздухом.

Особенностью двигателей является применение двух скорей, насаженных на один вал, с двумя коллекторами. Якоря соединены последовательно. Обмотки главных и вспомогательных полюсов, а также компенсационная обмотка — общие для обоих якорей. Двигатель имеет 12 полюсов. Охлаждение — принудительное. Двигатель потребляет 1 500 а при часовом режиме при 1 200 об/мин и напряжении 2 × 260 в.

Диаметр коллектора 590 мм, длина 180 мм, диаметр поря 735 мм [Л. 10]. Вес двигателя 3,6 т.

**Основные характеристики электровоза:**

Длина по буферам . . . . .	15 290 мм
Жесткая база тележки . . . . .	3 500 мм
Диаметр колес . . . . .	1 250 мм
Максимальная скорость . . . . .	85 км/час
Вес . . . . .	85 т
Тяговых двигателей . . . . .	4
Передача . . . . .	18:85
Часовая мощность на обode . . . . .	2 300 квт
Часовая скорость . . . . .	56 км/час
Номинальная мощность трансформатора . . . . .	2 720 кВа
Сила тяги на обode при трогании . . . . .	26 т

При весе поезда 180 т электровоз должен на подъеме 60‰ вести его со скоростью 60 км/час и на спуске 55‰ — 0 км/час.

Силовая схема представлена на рис. 3. Основные отличия от схемы, примененной фирмой Сименса на геллентальском электровозе, поставленном в 1936 г., а также на электровозах однофазного тока 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> гц, сводятся к следующему:

- а) Для улучшения коэффициента мощности включена батарея из 16 конденсаторов емкостью 32,5 мкф (во время пусков коэффициент мощности в среднем равнялся 0,95).
- б) Установка одного двигателя на ось.
- в) Применение 15 позиций ходовых скоростей вместо 14.
- г) Длительная мощность на пару полюсов достигает 5 л. с. вместо 42 л. с.
- д) Вес на единицу мощности понижен почти на 40%. Кроме 15 основных ступеней имеется еще 14 промежуточных позиций (Т<sub>1</sub>), на которых езда может продолжаться не более 1 мин.

Регулирование скорости осуществляется контакторами групповым механическим приводом.

Вспомогательные двигатели за исключением двигателя вентилятора тормозных сопротивлений и вспомогательного компрессора для главного выключателя питаются трехфазным током. Для получения последнего установлен преобразователь фаз, который пускается в ход от однофазного тока с помощью вспомогательной обмотки.

Трансформатор с принудительным охлаждением маслом.

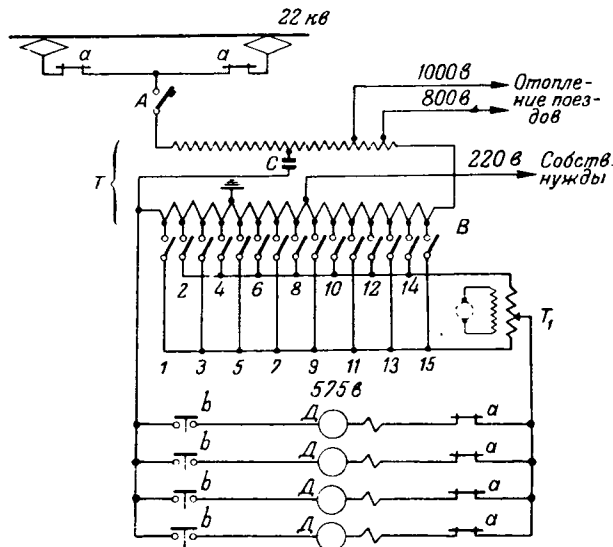


Рис. 3. Принципиальная силовая схема электровоза Геллентальской железной дороги фирмы АЕГ постройки 1950 г.

А — силовой выключатель; Т — главный трансформатор; В — групповой контактор; Т<sub>1</sub> — дополнительный трансформатор (с главным регулированием, как и в электровозах 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> гц); Д — тяговый двигатель с двойным якорем; а — разъединитель; б — контактор; с — конденсатор.

Главный выключатель безмасляный.

Наряду с обычными тормозами электровоз оборудован электрическим тормозом. Обмотки возбуждения двигателей при торможении питаются от специального генератора, имеющего привод от одной из осей. Регулировка тока возбуждения осуществляется пятью ступенями. Энергия поглощается в реостатах, установленных на крыше электровоза.

**Литература**

1. Л. М. Шильдинер и Д. Д. Захарченко. Электрификация железнодорожного транспорта на однофазном токе 50 гц. Электричество, стр. 78, № 8, 1949.
2. Л. А. Вислоух. Подвижной состав однофазного тока 50 гц французских железных дорог. Электричество, стр. 84, № 4, 1951.
3. J. Machefert-Tassin. Опыты с электрической тягой на однофазном токе 50 гц на французских государственных железных дорогах. Génie Civil, стр. 345, № 20, 1951.
4. M. Blondet. Некоторые вопросы конструкции и работы электровоза с выпрямителями. Bull. SFE, стр. 563, № 9, 1951.
5. Испытания нового электровоза 50 гц. Railway Gazette, т. 95, стр. 290, № 11, 1951.
6. O. S e x a u e r. Эволюция подвижного состава Геллентальской железной дороги. Eisenbahntechnik, стр. 116, № 5; стр. 136, № 6, 1951.
7. Новый подвижной состав Геллентальской железной дороги. Notre Metier, стр. 4, № 292, 1951.
8. Электровоз СС6052 французских железных дорог (фирмы Альстом). Rev. gén. des Chemins de fer, стр. 696, № 11, 1951.
9. Электровоз ВВ-8051 50 гц с выпрямителем французских железных дорог (фирмы Альстом). Там же, стр. 701, № 11, 1951.
10. Электровоз однофазного тока 50 гц с коллекторными двигателями железных дорог Западной Германии (фирмы АЕГ). Там же, стр. 714, № 11, 1951.
11. Тяга на однофазном токе 50 гц. Engineering, стр. 521, 545, 583, № 4474—4476, 1951.
12. J. Machefert-Tassin. Электрическая тяга на однофазном токе 50 гц. Génie Civil, стр. 367, № 19, 1951.

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ



## Золотая медаль имени А. С. Попова

Президиум Академии наук СССР ежегодно присуждает учрежденную Советом Народных Комиссаров Союза ССР в связи с 50-летием изобретения А. С. Поповым радио золотую медаль имени А. С. Попова по результатам конкурса за выдающиеся научные работы и изобретения в области радио<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Электричество, № 5 и 7, 1948; № 6, 1949, № 9, 1951.

По итогам конкурсов прошлых лет золотые медали были вручены В. П. Вологдину, Б. А. Введенскому, А. Л. Минцу и А. И. Бергу.

4 апреля 1952 г. Президиум Академии наук СССР рассмотрел материалы конкурса, присудил золотую медаль имени А. С. Попова 1952 года академику Михаилу Александровичу Леонтовичу за его выдающиеся работы в области радиофизики.



## Профессор Н. П. Богородицкий

К 50-летию со дня рождения

Николай Петрович Богородицкий родился 20 мая 1902 г. в Ташкенте.

В 1929 г. он окончил Ленинградский политехнический институт со званием инженера-электрика. Трудовая деятельность Н. П. Богородицкого началась еще в студенческие годы: с 1926 г. он начал работать в Ленинградском электрофизическом институте.

Первые годы самостоятельной творческой работы Н. П. Богородицкого были посвящены задачам освобождения отечественной промышленности от иностранной зависимости в области электротехнических материалов. Николай Петрович исследует отечественные породы мрамора и слюды, канифоль, битумы и другие необходимые электропромышленности материалы. В результате этих исследований им были даны оригинальные выводы и обобщения и внесены новые представления в физику диэлектриков. Большое внимание уделял Н. П. Богородицкий актуальной проблеме тех лет — разработке высокочастотных диэлектриков для радиотехники, и особенно для техники передающих устройств на коротких волнах.

Дальнейшая работа Николая Петровича была сосредоточена на особо важном для электро- и радиотехники исследовании физической природы диэлектрических потерь в различных видах электроизолирующих материалов и на изыскании новых материалов. К этому периоду относится ряд его работ по физике явлений в ионных кристаллах, стеклах, по диэлектрическим потерям в высокомолекулярных нейтральных диэлектриках, по полистиролу и другим диэлектрикам с малыми потерями.

Тесное общение Н. П. Богородицкого с промышленностью укрепляло его уверенность в том, что решение вопроса о создании высокочастотной изоляции может быть достигнуто только на базе материалов с очень высокой нагревостойкостью, стойких к действию влажности и других климатических факторов. С 1933 по 1942 г. Николай Петрович Богородицкий разработал и получил авторские свидетельства на широко теперь известные и внедренные в промышленность радиоматериалы: тиконд, микалекс, высокочастотное стекло, радиофарфор и ультрафарфор.

В 1937 г. Н. П. Богородицкий защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Изолирующие материалы для техники высоких частот», а в 1940 г. докторскую диссертацию на тему: «Высокочастотные диэлектрики».

Параллельно с научно-исследовательской и производственной деятельностью Николай Петрович занимался

воспитанием новых кадров инженеров-электриков и радистов. С 1930 по 1937 г. Н. П. Богородицкий преподавал в Ленинградском политехническом институте им. Калинина, с 1937 по 1942 г. — в Военной электротехнической академии им. Буденного, с 1942 по 1942 г. — в Ленинградском электротехническом институте им. Ульянова (Ленина).

В годы Великой Отечественной войны проф. Н. П. Богородицкий руководил крупной заводской лабораторией. Этот период его работы характеризуется рядом изобретений.

После окончания войны Н. П. Богородицкий работает профессором, заведующим кафедрой электротехнических материалов ЛЭТИ. В 1948 г. Н. П. Богородицкий вступил в ВКП(б). Большую педагогическую работу Николай Петрович совмещает с работой в научно-исследовательском институте.

В 1949 г. по инициативе Николая Петровича была организована в ЛЭТИ новая специализация по физике диэлектриков и полупроводников. С 1949 г. Н. П. Богородицкий возглавляет научную деятельность Электротехнического института им. Ульянова (Ленина).

Н. П. Богородицкий является автором ряда печатных научных трудов и учебных пособий. В 1938 г. им выпущена книга «Высокочастотные диэлектрики» — первая монография по этому вопросу. В 1946 г. под его редакцией вышло «Руководство к лабораторным занятиям по электроизолирующим материалам». В 1948 г. напечатана составленная Н. П. Богородицким совместно с И. Д. Фридбергом монография «Высокочастотные неорганические диэлектрики». Николай Петрович написал также (с соавторами) учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов «Электротехнические материалы», выпущенный Госэнергоиздатом — первым изданием в 1950 г. и вторым изданием в 1951 г. Кроме того, им опубликовано большое число журнальных статей.

Николаю Петровичу Богородицкому трижды присуждена Сталинская премия: за изобретение в области керамики (в 1942 г.), за учебник «Электротехнические материалы» (в 1952 г.) и за разработку и организацию массового производства деталей для радиоаппаратуры (также в 1952 г.).

**П. И. СКОТНИКОВ, А. Ф. АЛАБЫШЕВ,  
С. Я. СОКОЛОВ, А. А. ВАВИЛОВ,  
В. В. ПАСЫНКОВ, Б. М. ТАРЕЕВ**





## Л. И. Иванов

Советское электроаппаростроение понесло тяжелую утрату. На 46 году жизни скоропостижно скончался Лев Ильич Иванов — научный руководитель лаборатории защитной аппаратуры ВЭИ им. Ленина.

Л. И. Иванов начал свою работу в ВЭИ в 1930 г., прошел путь от лаборанта до научного руководителя лаборатории. Характерным для Льва Ильича было глубоко вдумчивое отношение к работе, широкий охват изучаемой проблемы, стремление проникнуть в суть физических процессов исследуемых явлений. Он обладал высокими организаторскими способностями, благодаря которым им был создан работоспособный инициативный коллектив лаборатории.

В 1930—1933 гг. Лев Ильич Иванов принимал самое деятельное участие в освоении производства в СССР трубчатых и вентильных разрядников, в разработке методики их испытаний и в установлении исходных данных для выбора их параметров. Им была проведена крупная работа по изучению характеристик импульсного пробоя закрытых искровых промежутков, закончившаяся разработкой конструкции искровых промежутков, обладающих минимальным запаздыванием. Эти конструкции применяются до сих пор во всех разрядниках отечественного производства.

В период 1933—1940 гг. при непосредственном участии Л. И. Иванова были внедрены в промышленность тиритовые разрядники типов РТМ и РЗСН.

Под его руководством в лабораторных условиях было проведено широкое исследование электрических свойств карборунда в зависимости от состава шихты и теплового



режима процесса синтеза карборунда, разработана технология изготовления электротехнического карборунда и методика измерения нелинейности карборунда в порошке. На основании этого исследования в 1944—1948 гг. было осуществлено промышленное освоение производства электротехнического карборунда. В это же время под руководством Льва Ильича была разработана и внедрена в производство упрощенная технология рабочих сопротивлений, названных «вилитовыми», и конструкция новой серии разрядников 3—35 кВ типа РВП, а к 1950 г. внедрена в производство унифицированная серия вентильных разрядников на напряжения от 3 до 220 кВ типа РВС. За эту работу Льву Ильичу Иванову в 1951 г. была присуждена Сталинская премия.

Основные результаты научно-исследовательских работ, выполненных Львом Ильичем Ивановым, были опубликованы в журнале «Электричество», в специальных сборниках и в технических отчетах ВЭИ.

В 1937 г. Л. И. Иванову была присвоена ученая степень кандидата технических наук.

Лев Ильич неоднократно принимал участие в составлении учебников по технике высоких напряжений и Р. У. по защите от перенапряжений.

Советское правительство высоко оценило заслуги Л. И. Иванова перед Родиной. Он был награжден орденом Красной Звезды и медалями Советского Союза.

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



Президиум Академии наук СССР, Министерство высшего образования СССР, Министерство электростанций СССР, Министерство электропромышленности СССР, Отделение технических наук Академии наук СССР, Энергетический институт имени Г. М. Кржижановского Академии наук СССР, Московский энергетический институт имени В. М. Молотова, Редакция журнала «Электричество» с глубокой скорбью извещают о смерти 24 апреля 1952 г. выдающегося советского электротехника, заслуженного деятеля науки и техники, члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора КАРЛА АДОЛЬФОВИЧА КРУГА.

К 150-летию со дня смерти выдающегося физика XVIII в., исследователя электричества и магнетизма русского академика Ф. У. Т. Эпинуса (13.12.1724—10.8.1802)

## ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ ЭПИНУСА ПО ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МАГНИТИЗМА

Ф. У. Т. ЭПИНУС. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МАГНИТИЗМА. Ред. и прим. проф. Я. Г. Дорфмана. 564 с. 26 руб. 50 коп. Издательство Академии наук СССР. Серия «Классики науки». 1951.

Значительная часть научных трудов Эпинуса, изданных Академией наук при его жизни, сохранилась до наших дней. В Музее книги Всесоюзной библиотеки им. Ленина в Москве имеются среди оригинальных изданий XVIII в.: «Рассуждение о строении мира», «Речь о сходстве электрической силы с магнитною» и некоторые другие сочинения Эпинуса.

Выпуск Академией наук СССР в серии «Классики науки» избранных трудов Эпинуса по теории электричества и магнетизма ожидался многими читателями в связи с наступающим в текущем году 150-летием со дня смерти Ф. У. Т. Эпинуса. Редакционная подготовка проф. Я. Г. Дорфманом издания сочинений Эпинуса, включенных в рассматриваемый сборник, облегчает пользование оригинальным текстом. Приложенная к сборнику редакционная статья имеет целью: ознакомить читателей с эпохой, к которой относится деятельность Эпинуса, определить вклад Эпинуса в теорию электричества и магнетизма и при этом выяснить и выделить частью ошибочные положения в трактовке Эпинусом некоторых физических явлений.

В сборник, объем которого превышает 40 печ. листов, вошли следующие работы Эпинуса.

1. «Опыт теории электричества и магнетизма», написанный автором в 1758 г. и изданный Петербургской академией наук в следующем году. Эта фундаментальная работа Эпинуса состоит из Введения и четырех глав: I. Общие основы теории электричества и магнетизма, II. Об электрическом и магнитном притяжении и отталкивании, III. О передаче электричества и магнетизма, IV. О некоторых явлениях, происходящих в телах, погруженных в электрический и магнитный вихрь<sup>1</sup>, и о магнетизме Земли.

2. Диссертация: Объяснение одного явления в Лейденской банке, открытого знаменитейшим Рихманом.

3. Диссертация: Объяснение одного парадоксального магнитного явления.

4. Речь о сходстве электрической силы с магнитною. Эта речь, произнесенная Эпинусом по латыни 7 сентября 1757 г., была впоследствии переведена на русский язык академиком С. Я. Румовским.

5. Мемуар, содержащий точное описание опытов, проведенных с турмалином.

Эпинус жил и трудился в эпоху Ломоносова. Великий русский ученый-самородок Михаил Васильевич Ломоносов оказал на Эпинуса благотворное влияние. Напомним, на каком уровне находились физические воззрения в области электричества и магнетизма в годы, непосредственно предшествовавшие наиболее плодотворной научной деятельности Ломоносова и Эпинуса, к концу первой половины XVIII в.

В марте 1746 г. был издан первый в России учебник по физике. Это был выполненный Ломоносовым перевод на русский язык учебника, написанного Вольфом в 1725 г. Ломоносов учился у Вольфа в Марбурге во времяграничной научной командировки. В приложении к «Экспериментальной Вольфийской физике» Михаил Васильевич отметил:

«В те времена, когда господин Вольф написал свою физику, весьма мало было знание о электрической силе, которая начала в уочном свете возрастать славою и приобретать успехи около 1740 г.».

<sup>1</sup> Пользуясь современными определениями, можно было бы сказать: ... в электрическое и магнитное поле. Эпинус, в гл. IV, уточняет, что под вихрем он не разумеет о с о б о й э л е к т р и ч е с к о й атмосферы, существующей вне тел, а применяет это выражение лишь в значении «сфера деятельности». Весьма вероятно, что это разъяснение Эпинуса породило мнение о том, что Эпинус придерживается принципа действия силы на расстоянии. Однако дальше будет показана несостоятельность такого обобщающего и противоречащего собственным высказываниям Эпинуса вывода.

Сведения об электрических явлениях были еще и скудными и ограничивались наблюдениями механических сил электростатического происхождения и акустических световых эффектов, сопутствующих маломощным электрическим искровым разрядам. Лейденская банка, открытая некоторыми новыми в ту пору возможности экспериментирования, была построена Мушенбреком (Голландия) в 1745 г. До изобретения столба Вольты (1799 г.) — примитивного по сути, электрохимического генератора — оставалось более полувека. Пока же в распоряжении физиков первой половины XVIII в. практически не было источников, пригодных для наблюдения электрического тока и его свойств. Понятен поэтому особый интерес, который привлекли ученые первой половины XVIII в. к молнии — одному естественному разряду атмосферного электричества. Изучение молнии сулило приоткрыть завесу над природой электрических явлений. Неудивительно, что великий французский философ-просветитель, вместе с Рихманом, посвятили проблеме исследования атмосферного электричества огромные усилия своего времени. Вдумываясь в смысл высказываний Ломоносова о молнии и северном сиянии, содержащихся в оде «Внезапное размышление о божьем величестве при случае в кого северного сияния» (1743 г.), следует считать, что исследование природы этих явлений, и таким образом, это суждение Ломоносова состоялось ранее Винклера и Франклина.

Изучение электричества и магнетизма в начале XVIII в. страдало многими недостатками и в теоретическом отношении: сколько-нибудь убедительной теории электрических явлений еще не было. Все те же идеи Гильберта, базирующиеся на допущении существования в некоторых телах особой электрической субстанции, перешли из XVII в. в XVIII в. (работы С. Грея в 1729 г. и др.). Предполагалось, что эта субстанция «выходила», «истекала» из тел при трении и была причиной притяжений, наблюдаемых в опытах (отталкиваний под влиянием электричества). Гильберт еще не знал). Убеждение Гильберта в глубоком различии природы электричества и магнетизма и в том, что последний представляет некую изначальною силу, подобие тяжести, было общепринятым и в течение длительного времени приводило к изолированному изучению электрических и магнитных явлений. В 30-х годах XVIII в. бы распространена дуалистическая теория Дюфэ (Дю Фурье), защищавшего раздельное существование «стеклянного электричества (положительного)» и «смоляного» электричества (отрицательного), причем частицы разноименных электричеств притягиваются, а одноименных — отталкиваются.

Спустя десять лет, в 40-х годах XVIII в., Ватсон, и независимо от него Франклин, выдвинули унитарную теорию согласно которой в природе существует лишь одно электричество, избыток которого в теле обуславливает положительный заряд («стеклянное электричество») Дюфэ недостаток электричества в теле означает отрицательный заряд («смоляное электричество» Дюфэ). В нормальном состоянии все тела имеют «естественное количество» электричества и потому друг друга не притягивают и не отталкивают. При избытке электричества тело становится положительно заряженным, при недостатке — отрицательно заряженным. И в том, и в другом случаях, т. е. при отклонении от «естественного количества» электричества заряженные положительно или отрицательно тела начинают взаимодействовать: отталкиваться или притягиваться в зависимости от равенства или неравенства знаков зарядов, причем для объяснения притяжений и отталкиваний под действием электрического заряда унитарная теория вводит гипотезу, по которой частицы электричества всегда взаимно отталкиваются, а притягиваются лишь частицы одной материи. Слабым местом унитарной теории и этой гипотезы была невозможность объяснить явление отталкивания отрицательно заряженных тел. Это затруднение Фран

линовской теории устранил Эпинус. Сохраняя гипотезу Франклина о взаимном отталкивании электрических частиц, Эпинус ввел постулат о взаимном отталкивании также и частиц обычной материи, которое при «естественном количестве» электричества в телах погашалось и поэтому не обнаруживалось, а проявлялось лишь при отклонении от «естественного количества» электричества; следовательно, и в случае отрицательного заряда (т. е. при недостатке в телах электрических частиц) также выявляло отталкивание отрицательно заряженных тел.

В отличие от картезианцев, т. е. последователей Декарта (Картезия), бесплодно пытавшихся на протяжении почти целого столетия раскрыть тайну внутренней природы электричества, Франклин, следуя методике Ньютона, ограничился формальным, описательным методом изучения электрических и магнитных явлений природы. Его сравнительно стройная теория электричества (1751 г.) опиралась на значительное число, правда разрозненных, экспериментальных фактов. Не вдаваясь глубоко в рассмотрение внутренней картины притяжений и отталкиваний «электрической материи», Франклин гипотетически соглашался с наличием некой «электрической атмосферы», окружающей заряженные тела. «Атмосфера» в данном случае имела значение объяснять способ передачи действия заряженных тел в пространство.

Мнение, будто Эпинус, отвергая гипотезу «электрической атмосферы», придерживался принципа действия некой нематериальной силы на расстоянии (*actio in distans*)<sup>2</sup>, не имеет достаточно веских оснований и должно быть пересмотрено. Философские представления Эпинуса типичны для механистического материализма XVIII в.: в своих рассуждениях Эпинус опирался на известные ему законы механики; когда же они оказывались недостаточными для объяснения явлений, он не хотел уклоняться от научных поисков, придумывая, «электрическую атмосферу», и в ряде случаев воздерживался от незрелых, преждевременных суждений, отсылая иной раз неудовлетворенных к «божественной воле», т. е. выражался так, как это тогда было принято. Можно считать, что Эпинус — физик и астроном — в таких случаях попросту отдавал дань господствовавшему в обществе и в сферах высшего придворного начальства высшему принципу — религии. В действительности, как мы увидим ниже, Эпинус глубоко был убежден в том, что не раскрытое наукой сегодня будет постепенно раскрыто в дальнейшем, а реальность неизвестной еще ему промежуточной среды была для него несомненной.

«Я считаю, — писал Эпинус во Введении к «Опыту теории электричества и магнетизма», — что тот, кто сводит более сложные явления к их ближайшим причинам и первоначальным силам, делает серьезный шаг вперед в исследовании действий природы, хотя бы причины этих действий и не были еще раскрыты...»

Допущение для объяснения явлений природы сверхъестественности Эпинус отвергал; он не считал приемлемым менять научный факт выдумкой. Критически относясь, с одной стороны, к «электрической атмосфере», Эпинус вместе с тем не разделял и гипотезы «*actio in distans*», во всяком случае в том, повидимому, нематериалистическом понимании, как это ему приписывается. Следующие слова Эпинуса из уже цитированной выше его работы свидетельствуют об этом совершенно недвусмысленно и поистине категорично.

«Я не одобряю учения, которое постулирует действие на расстоянии<sup>3</sup>. Действительно, я считаю несомненной аксиомой предложение, по которому тело не может производить никакого действия там, где его нет». Затем: «...хотя я и не знаю, какие средства применяет природа для произведения этих сил (взаимного отталкивания частиц материи, предлагаемого Эпинусом, и сил всемирного тяготения Ньютона — Д. Р.), для меня несомненно, что и та, и другая силы имеют какую-то внешнюю причину». И далее: «Если когда-нибудь будет доказано, что какое-либо притяжение или отталкивание совершенно не зависит от внешнего давления или импульса, то, по моему мнению, мы принуждены будем в этом случае допустить, что движение та-

кого рода руководится или производится духами или существами, которые действуют, притом сознательно, однако я не могу заставить себя поверить, что это имеет место в мире.»

Можно ли после этого принимать всерьез предположение, будто Эпинус допускал нематериальную промежуточную среду и в этом смысле был апологетом *actio in distans* или будто он верил в действие какой-то «божественной воли» и т. п.

Исследования электрических явлений в России получили большое развитие в середине XVIII в. усилиями М. В. Ломоносова (1711—1765) и Г. В. Рихмана (1711—1753). И хотя за рубежом к этому времени были достигнуты в изучении электричества немалые успехи, Петербургская академия наук, благодаря Ломоносову, сразу подняла вопросы теории электричества и магнетизма на высокий научный уровень. Главное внимание Ломоносов и Рихман направили на решение важнейшей задачи количественных измерений «электрической силы». В 1745 г. Рихман изобрел электрометр — «электрический указатель». Принцип, использованный в «указателе», получил широкое распространение и применяется по сей день, а предложенный Рихманом для измерения электрической силы принцип весов лежит в основе современного абсолютного электрометра<sup>4</sup>. Идея измерения электричества весами принадлежала Ломоносову, в записках которого по поводу одного из опытов говорилось: «Весами можно весить электрическую силу, однако сие еще в действие не приведено».

Насколько высоки были общие научные представления передовых русских академиков, явствует из того, что уже в 1748 г. М. В. Ломоносов сформулировал (в письме Л. Эйлеру 16.7.1748, н. ст.) свой знаменитый закон о неизменности общей массы вещества при химических изменениях, предвосхитивший общие начала сохранения материи и движения и опередивший почти на столетие аналогичную формулировку Гельмгольца. Через несколько лет после этого письма Ломоносова Эпинус в «Дополнении» к своему мемуару об опытах с турмалином (1762 г.) подчеркнул, что «нельзя создать один вид электричества без того, чтобы не создать другой» (Труды, стр. 452), и вслед за этим выдвинул принципиальное положение о сохранении количества электричества:

«если я хочу в каком-либо теле увеличить количество электрической материи, я должен неизбежно взять ее вне его и, следовательно, уменьшить ее в каком-либо другом теле... я не смогу где-либо уменьшить электрическую материю без того, чтобы не передать ее в другое тело, и там ее увеличить» (Труды, стр. 452).

С полным основанием можно назвать именем Эпинуса закон сохранения количества электричества, представляющий частный случай всеобщего закона сохранения материи и движения Ломоносова.

Отношение русских ученых (Ломоносова, Рихмана) к распространенным на Западе картезианским теориям «истечения» и к модной теории Франклина было явно критическим. В последней «некоторые к составлению электрической теории самые нужнейшие вещи не довольно наблюдаемы были», — писал М. В. Ломоносов. В соответствии с такой критической оценкой Ломоносов, выступая в конце 1753 г. в Академии наук, предложил важную конкурсную задачу:

«Сыскать подлинную электрической силы причину и поставить точную ее теорию».

При этом Ломоносовым была выдвинута (на столетие ранее Фарадея) «эфирная» гипотеза природы электричества. Согласно этой гипотезе электричество не есть особое вещество, а представляет лишь некоторую форму движения частиц эфира вокруг собственных осей. Для середины XVIII в. это была принципиально новая концепция природы электричества, сохранившая в различных вариантах свое значение почти до конца следующего, XIX в. и напоминая многие гипотезы более позднего времени, до наших дней включительно. Можно утверждать, что данной гипотезой Ломоносов заложил основы принципиально новой корпускулярно-эфирной философии, наметившей перспективу будущей молекулярно-атомной химии, кинетической теории материи и фарадеевской физики эфира.

<sup>2</sup> Например, Ф. Розенбергер. История физики, т. II. Гостехиздат, 1933, стр. 303; П. С. Кудрявцев. История физики, т. I. Метиздиз, 1948, стр. 287 и др.

<sup>3</sup> Здесь и ниже подчеркнута нами. Д. Р.

<sup>4</sup> Электроизмерительный прибор французских физиков Ле-Пуа и Д'Арси был представлен в Парижскую академию наук спустя 4 года, в 1749 г.

Работы и взгляды русских академиков середины XVIII в. привлекали пристальное внимание ученых многих стран; Петербургская академия наук, несмотря на короткий период своего существования, быстро заняла одно из ведущих мест в ряду высших научных учреждений мира. Многие иностранные ученые относились к перспективе своей работы в русской академии весьма положительно и были заинтересованы в получении приглашения из Петербурга, которое всегда ими расценивалось очень высоко.

После того как 6.8 (26.7). 1753 г. от удара молнии в момент научных исследований атмосферного электричества, погиб Г. В. Рихман, Академия наук в течение четырех лет не могла подыскать достойного заместителя. Наконец, в сентябре 1756 г. была выдвинута кандидатура Ф. У. Т. Эпинуса. В докладной записке по этому поводу на имя президента академии К. Г. Разумовского было сказано об Эпинусе следующее:

«А он имеет в ученом свете довольно хорошую репутацию, а г-н Эйлер<sup>5</sup> хвалит его искусство, хотя об оном не предложил, и не желает его отпускать, также гг. Котельников и Румовский<sup>6</sup> дают о нем весьма хорошее свидетельство; место же профессора физики после смерти профессора Рихмана еще порожнее и достойных охотников никого не сыскано». (Архив АН СССР, ф. 21, оп. 1, № 25).

Франц Ульрих Теодор Эпинус (Aepinus) родился 13.12.1724 г. в г. Ростокке, в Северной Германии. Он учился в Ростокском и Иенском университетах, где изучал математику и медицину. Получив степень доктора медицины, Эпинус до 1755 г. оставался в Ростокском университете в качестве приват-доцента. Затем в 1755 и 1756 гг. он работал профессором астрономии при Берлинской академии наук и астрономом Берлинской обсерватории. В начале 1757 г. Эпинус получил приглашение в Петербургскую академию наук. Сохранились данные о том, что приглашения этого он усердно добивался, был польщен его получением и предвидел успешное развитие своей научной деятельности в Русской академии. Переехав в Россию еще молодым ученым, Эпинус приобрел в России свое второе отечество и прожил здесь до глубокой старости; после приезда в Петербург он вскоре овладел русским языком. Эпинус получил известность не только как русский ученый и академик, но и как русский государственный деятель.

В Петербург Эпинус прибыл 10 мая 1757 г. и оставался в нем до 1798 г., когда Павел I освободил его, в 74-летнем возрасте, от службы с производством в тайные советники и с сохранением жалованья. Эпинус переехал на покой в Юрьев (Тарту), где и скончался 10 августа 1802 г., 78 лет от роду. Ни портрета, ни личных бумаг Эпинуса пока разыскать не удалось.

В 1760—1761 г. Эпинус, одновременно с работой в Петербургской академии наук, возглавил учебную часть Сухопутного шляхетского кадетского корпуса.

На одном из докладов Эпинуса в Академии наук (14.7.1763) присутствовала Екатерина II, которая в дальнейшем (в 1765 г.) пригласила Эпинуса в качестве учителя физики, математики и астрономии наследника престола Павла. С этого года Эпинус, оставаясь действительным членом Академии наук, фактически уже обязанностей профессора академии не исполнял за недостатком времени.

В том же 1765 г. Екатерина II начала привлекать Эпинуса к различным делам Иностранной коллегии, а в 1780 г. по ее поручению Эпинус участвовал в разработке декларации России о морском вооруженном нейтралитете во время англо-американской войны.

В 1782 г. Эпинус был назначен членом правительственной комиссии по учреждению в России народных училищ. Его записка «Об организации в России низшего и среднего образования» (изданная Академией наук в 1787 г.) легла в основу всей системы народного образования, установленной при Екатерине II.

Несмотря на то, что прибытию в Россию Эпинус в значительной мере был обязан Ломоносову, их отношения, вначале очень дружественные, вскоре разладились. Причиной были далекие от интересов науки козни иностранной клики, особенно влиятельной в те годы в Петербургской академии. Правитель канцелярии академии немец Шумахер, имев-

ший большое влияние на президента академии графа Разумовского (бывшего гетмана Малороссии), давал вредил простому сыну русского народа — великому Ломоносову, всячески тормозя его научные работы и возбуждая против него сановную знать, религиозных мракобесов же карьеристов, немалое число которых было в стране, работавших в Петербургской академии. Преемнику Шумахера, его зятю, Тауберту не удалось, в конце концов, вовлечь Эпинуса в оппозицию к Ломоносову. Вот, что писал о Ломоносове:

«Профессор Эпинус... против Ломоносова употребил грубые слова, и вдруг вместо дружбы прежней оказывать неприятельские поступки. Все ясно видно, что то есть Таубертоз промысел по Шумахеру, который ученые между профессорами могли бы дружелюбно кончиться, употребив свою пользу, портя их дружбу».

Эти строки, полные искренности и неподдельного огорчения, свидетельствуют о высоком моральном облике их автора и прекрасно дополняют светлый образ родоначальника русской науки Михаила Васильевича Ломоносова.

«Опыт теории электричества и магнетизма» Эпинус представил президенту академии К. Г. Разумовскому. В связи с этим он указывает, что в результате более полного исследования электрических явлений будет возможно дальнейшее «раскрыть тайны самой природы». Характеризуя электричество как мощный источник «действительности», Эпинус называет электричество одной из «важнейших тайн природы». Отмечая сравнительное преимущество Франклиновской теории электричества, Эпинус добавляет:

«Однако я пришел к выводу, что мне удалось нарушить в этой замечательной теории некоторые недостатки; поэтому я приложил усилия к тому, чтобы исправить их и... так приспособить эту теорию, чтобы она была приведена к полнейшему согласию с наблюдениями».

Учитывая, что природа магнитных явлений (несмотря на знакомство человека с естественными магнитами с древнейших времен) известна еще менее, чем электрических, Эпинус поставил перед собой «тонкое исследование» магнетизма в качестве «главной задачи». Утверждая, что на основе наблюдений им открыто «сходство между явлениями электрической и магнитной силы» («я сказал бы, и полное совпадение», — добавляет тут же Эпинус), он подчеркивает, что построенная им теория открыла путь «для нахождения некоторых новых вещей». В качестве примера Эпинус называет «способ увеличивать силы естественных магнитов до необычайной степени»; затем он указывает на усовершенствование им методов изготовления искусственных магнитов; свой метод он характеризует как «более простой, более удобный и более действительный»; наконец, он упоминает о своей работе, имеющей огромное практическое значение по усовершенствованию магнитной стрелки инструмента, «в котором человеческий род нуждается для жизненных потребностей и удобства».

«Опыт теории электричества и магнетизма» является главным и, пожалуй, наилучшим сочинением Эпинуса. Именно оно, вместе с речью Эпинуса «О сходстве электрической силы с магнитною», было предвестником новой эпохи в физике, открывшейся спустя три четверти века, когда Фарадей сформулировал закон электромагнитной индукции (1831 г.) и разработал учение об электрическом и магнитном поле (1837 г.). Справедливость требует безоговорочного признания выдающихся заслуг Эпинуса, оказавших науке разработкой своего учения о связи электрических и магнитных явлений.

С полным основанием можно утверждать, что Эпинус принадлежит приоритет в закладке основ теории явления электрической и магнитной индукции и поляризации. Эпинусом было открыто явление электростатической индукции. Он впервые дал хорошо согласующееся с опытом объяснение явления, состоящего в большем притягивании мягкого железа к магниту в сравнении с «магнитожесткими» телами. Эпинус совершенно определенно указывал на необходимость введения наряду с понятием о количестве электричества также нового понятия о степени сгущения (condensatio) электричества и о способности накопления электричества; таким образом, в своих рассуждениях о «плотную» подошел к понятиям о потенциале и о емкости, формулировкой которых, спустя 10 лет, занимался Кэвен-

<sup>5</sup> Известный физик действительный член Петербургской академии наук Леонард Эйлер, проживал в это время снова в Берлине. Эйлер хорошо знал и ценил Эпинуса.

<sup>6</sup> С. К. Котельников и С. Я. Румовский — известные русские ученые того периода.

Пионерское значение исследований Эпинуса в этом направлении признавал сам Кэвэндиш (см. H. Cavendish. Phil. Frans. of the Rog. Soc. for 1771, v. LVI, p. 584). Как известно, введение термина «потенциал» Дж. Грином относится уже к 1828 г.

Вольт, изобретший в 1775 г. электрофор, признавал Эпинуса и Вильке (работавший одно время совместно с Эпинусом) «предвосхитили эту идею и открыли явление, хотя и не сконструировали законченного лабораторного прибора» (см. A. Volta. Le Opere, v. III. Milano, 1918—1929, p. 214). В своих опытах 1762 г. и основанной на них теории Эпинус опередил более чем на 30 лет идею Вольты о возникновении электризации вследствие соприкосновения разнородных тел.

Кулон в своих работах по электричеству и магнетизму неоднократно ссылался на работы Эпинуса, пользуясь введенной им в теорию терминологией.

Исследуя вопрос о природе разряда лейденской банки, Эпинус высказал мнение о колебательном характере разряда; таким образом, он за 90 лет до Гельмгольца обратил внимание на вероятность этого свойства искрового разряда. Можно добавить, что эта идея Эпинуса о колебательном характере искрового разряда была через 100 лет подтверждена экспериментально (посредством вращающихся зеркал) Феддерсеном (1859 г.).

Много и плодотворно работал Эпинус над развитием и совершенствованием методов получения сильных постоянных магнитов для изготовления компасов. Эта проблема имела первостепенное практическое значение как для военного дела, так и для мореплавания и геодезии. В связи с этим следует отметить, что Эпинус впервые с необходимой полнотой исследовал процесс намагничивания подковообразных магнитов и дал в целом приемлемое объяснение роли ярма при определении коэффициента размагничивания постоянных магнитов.

Капитальная работа была выполнена Эпинусом в области *пирозлектричества*. Изучая турмалин, он обнаружил, что при нагревании этот минерал проявляет свойства электрического диполя — на противоположных сторонах нагретого турмалина возникает различная по знаку электризация (Опыт VII. Труды, стр. 426—427). В «Речи о сходстве электрической силы с магнитною» (1757 г.) Эпинус, оставаясь на своих опытах с нагретым турмалином, усматривает в свойствах, обнаруженных в последнем, «совершеннейшее с магнитом сходство» (Труды, стр. 397—398). Эпинус с полным убеждением говорит о сходстве электрических и магнитных явлений. Сделанные им выводы имели весьма ценное значение для развития в то время прогрессивных взглядов на природу электричества. В 1775 г. Вольт в письме к Фромонду писал об Эпинусе: «Прочитав его мемуар о турмалине, я лишь недавно узнал, что

его принципы не отличались от моих, и это меня весьма волнует» (A. Volta. Le Opere, v. III. Milano, 1918—1919, p. 113).

Эпинус задолго до Зеебека исследовал картину взаимодействия электрической и тепловой форм энергии (явления термоэлектричества).

Эпинус, столь близко стоявший в XVIII в. к открытию магнитного поля электрического тока, подошедший вплотную к теории электромагнетизма, не смог сделать этого завершающего его научные труды шага — в распоряжении физиков первой половины XVIII в. не было еще надлежащих источников постоянного тока; для опыта Эрстеда с магнитной стрелкой в то время еще не было, как мы теперь выражаемся, необходимой материально-технической базы.

Эпинус, живший и работавший в XVIII в., в своих общих научных воззрениях был, конечно, весьма близок ко многим формальным положениям учения Ньютона о притягательных и отталкивающих силах. В свете последующего развития физической науки многие элементы теории Эпинуса претерпели изменения, другие отпали вовсе как ошибочные, однако в целом научный вклад Эпинуса был для своего времени исключительно ценным и прогрессивным. Взгляды Эпинуса в середине XVIII в. во многом способствовали быстрому развитию молодого раздела физики, посвященного электричеству и магнетизму, не только в России, но и во всем мире.

В заключение назовем некоторые сочинения Эпинуса, не вошедшие в Сборник; они представляют интерес для общей характеристики тем, которым уделял внимание Эпинус после переезда в Россию. Издавались эти сочинения Петербургской академией наук. На русском языке: «Размышление о возврате комет» (1757 г.), «Рассуждение о некоторых новых способах, принадлежащих к поправлению магнитных стрелок и морского компаса» (1758 г.), «Краткое известие о новозобретенном способе к умножению силы в натуральных магнитах» (1759 г.), «Известие о наступающем прохождении Венеры между солнцем и землею» (1760 г.), «О строении поверхности луны и о происхождении неровностей оной от внутреннего огня» (1781 г.). Ряд сочинений Эпинуса был издан на латинском и на иностранных языках.

Собранные в рецензируемом издании Академии наук СССР труды Эпинуса по теории электричества и магнетизма представляют для нас наибольший интерес, так как именно в них Эпинус проявил себя, как прогрессивный для своей эпохи ученый, как автор оригинальной физической теории и как экспериментатор, выполнивший ряд изящных и точных опытов.

Д. Р.



## МИХАИЛ ФАРАДЕЙ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ.

т. 2. Комментарий и редакция члена-корр. Академии наук СССР Проф. Т. П. Кравца. стр. 538. ц. 28 руб. Изд. Академии наук СССР. 1951.

Советская литература по истории электротехники быстро разрастается.

Выход в свет второго<sup>1</sup> тома «Экспериментальных исследований по электричеству» Фарадея является весьма важным.

Второй том содержит четыре части (15, 16, 17 и 18-ю серии) и 27 различных статей об электричестве. «Серии» представляют собой доклады, сделанные автором на заседаниях Королевского научного общества в Лондоне и напечатанные затем в «Philosophical Transactions».

Кроме работ самого Фарадея в приложениях даны: 1) статья Т. П. Кравца «О втором томе экспериментальных исследований по электричеству М. Фарадея»; 2) его же примечания — комментарии ко всем работам английского ученого; 3) библиографический указатель печатных трудов Михаила Фарадея и основной литературы о его жизни и деятельности, составленный А. Лукомской под ре-

дакцией К. И. Шафрановского. К библиографическому указателю приложены сведения о лекциях, прочитанных М. Фарадеем, и список использованных журналов.

Пятнадцатая серия посвящена исследованию электрических явлений, наблюдаемых у электрических рыб. Автор исследует электрическое поле вокруг угря, сравнивает его с полем магнита и приходит к заключению, что вокруг угря создается поле пространственно распределенных токов, аналогичное полю магнита.

Шестнадцатая серия содержит важный материал об источнике мощности гальванического элемента. Фарадей обнаруживает этот источник в химическом действии и отвергает контактную теорию, утверждавшую, что э. д. с. возникает на границе контакта двух разноименных материалов.

В семнадцатой серии углубляется вопрос о происхождении э. д. с. гальванического элемента. Обнаружив источник мощности в химическом действии, Фарадей утверждает, что при этом никакого создания или «творения силы» нет. Он доказывает несостоятельность контактной теории, ибо

<sup>1</sup> Первый том «Экспериментальных исследований по электричеству» Михаила Фарадея был издан Академией наук СССР в 1947 г.

образование тока простым контактом разноименных тел есть создание силы, появление ее вновь. Автор здесь развивает принцип взаимозаменяемости и эквивалентности различных видов энергии и делает вывод, что «химическая сила» создает электрический ток, а электрический ток сопровождается химическими явлениями, т. е., говоря современным языком, энергия не исчезает, а переходит лишь из одного вида в другой.

Восемнадцатая серия посвящена описанию возникновения электричества при трении воды и пара о другие тела. Фарадей доказал, что электризация вызывается только лишь трением воды о препятствие, но ни в коем случае не изменением состояния воды и не ее испарением. «По своей природе такое электричество подобно тому, какое встречается в лубом, в самом обыкновенном случае возбуждения трением», — говорит он.

Статьи об электричестве, включенные во второй том, содержат материал о магнитных вращениях, о магнитных свойствах тел, об электромагнитной индукции и мысли автора по общей теории электрических явлений. Эти статьи, как совершенно точно отмечает в своей редакционной статье Т. П. Кравец, являются наиболее ценным материалом второго тома. Магнитным вращениям посвящено шесть статей, при работе над которыми Фарадей решил избрать свой путь исследований. Датский физик и химик профессор Эрстед, член Парижской академии наук Ампер и неприменный секретарь этой академии Араго изучали отталкивающее и притягивающее взаимодействие магнетизма и электричества. Фарадей же добился непрерывного вращательного движения магнитной стрелки вокруг проводника с током. Это открытие явилось очень важным вкладом в науку, значительно продвинуло вперед учение об электромагнетизме и прославило Фарадея. Шесть статей об электромагнитной индукции содержат дополнительный и ценный материал к основному закону, подробно описанному Фарадеем в первом томе; кроме того, в последних двух статьях автор говорит об инерции движущегося электричества. Не менее ценны статьи по общей теории электрических явлений и о магнитных свойствах тел.

Перевод основного текста, несмотря на трудность стиля Фарадея, выполнен на высоком теоретическом уровне. Авторам перевода удалось сделать его понятным для широких кругов советских читателей, интересующихся историей электротехники, и в то же время сохранить самобытность и непосредственность мыслей Фарадея.

Отдельные работы Фарадея переводились на русский язык и ранее, но были случайно выбранными и не могли дать полного представления о многогранной научной деятельности выдающегося ученого — экспериментатора прошлого века.

Во втором томе помещены, как уже отмечалось выше, статьи об электромагнитных вращениях и описание приборов, показывающих возможность непрерывных вращений магнитов вокруг тока и токов вокруг магнита. Известно, что на практике впервые применил принцип вращательного, а не возвратно-поступательного движения для электрических машин русский академик Б. С. Якоби. Своим электродвигателем Б. С. Якоби первый положил начало использования превращения электрической энергии в механическую. В связи с этим следует отметить, что М. Фарадей являлся почетным членом Петербургской академии наук, глубоко уважал русских ученых. В предисловии к своим «Исследованиям» Фарадей особо указал на заслуги Б. С. Якоби и очень похвально отозвался о его работах. Об одной из статей Якоби<sup>2</sup> Фарадей написал: «Это прекрасная статья, и хотя я не повторял этих опытов, но описание их приводит меня к убеждению, что я, вероятно, ошибся».

В пункте 1806 второго тома «Исследований» относительно возбуждающей силы в гальванической батарее Фарадей замечает: «Статья Якоби убеждает меня в том, что я ошибался...». В пункте 2074 второго тома «Исследований» Фарадей также упоминает о Якоби и соглашается с ним в вопросе количества электричества, которое можно получить от гальванического элемента.

Отдельные описания опытов в переводе избыточно тянутыми фразами, а поэтому очень тяжело восприниматься при чтении. Пользуясь грамматической спецификой английского языка, допускающей некоторую свободу слова, авторам его следовало бы несколько рациональнее построить фразы, раздробить их, избежать длинных искажая вместе с тем непосредственности и самобытности мыслей ученого. От этого перевод только бы выиграл, был бы более понятен современному читателю.

Хорошо, что в переводе сохранен курсив наиболее ярких мыслей автора. Однако в момент написания «Исследований» Фарадей мог не придавать значения своим суждениям, затем вошедшим в науку в качестве непреложных принципов, и не выделял эти места шрифтом. Но редакция должна была сделать это в настоящем издании книги.

Редакционная статья Т. П. Кравца, как уже говорилось выше, содержательна, проста для понимания, то очень лаконична. Она отличается глубиной материала, обобщая мысли автора «Исследований», объединяя в стройную систему. Однако следует все же заметить, что данная редакционная статья не в полной мере отвечает современным требованиям и задачам дня. Статья пренебрегает задачей одновременного освещения истории современной науки и достижений русских физиков и элекро-современников Фарадея. Это требование редакция должна была удовлетворить в первую очередь. Кроме того, следовало в этой статье отразить оценку деятельности Фарадея, данную классиком марксизма, значение истории естествознания и техники всегда rivalовало основоположниками марксизма-ленинизма. одно из условий формирования научного, диалектико-реалистического мировоззрения. Фарадей является одним из авторов научного объяснения явлений электричества магнетизма. Он решительно боролся с метафизическими антинаучными воззрениями в этой области. Энгельс высоко оценивал Фарадея. Он ставил ему в заслугу то, что Фарадей решительно восставал против представлений, будто электричество есть не состояние материи, а некоторая особая, отдельная материя.

Примечания редактора охватывают очень широкий круг вопросов и дают читателю возможность глубже проникнуть в смысл основного материала. В примечаниях охарактеризованы отдельные положения Фарадея и кратко охарактеризованы современники ученого, упоминаемые в труде. Кроме того, в примечаниях дан перевод терминов Фарадея применительно к нашей современной, что очень важно для точного и осмысленного понимания текста, имеющего более чем столетнюю давность. Автор примечаний знакомит читателя с техническими возможностями Фарадея. Однако, рассматривая вторую «Экспериментальных исследований по электричеству» неразрывное целое с первым томом, автор примечаний часто ссылается на первый том, не делая (во втором томе) дополнительных пометок, отчего примечания теряют для читателей практическую ценность. Это затрудняет работу над книгой.

Библиографический указатель состоит из четырех делов: 1) печатные труды М. Фарадея; 2) посмертные публикации писем и дневников; 3) основная библиографическая литература о М. Фарадее; 4) перечень изданий, держащих библиографию М. Фарадея. Такая систематизация библиографического указателя, несмотря на его большой объем, позволяет быстро ориентироваться и находить необходимую литературу. Указатель составлен с освещением многих исторически ценных вопросов в результате непосредственного просмотра больших книг, фондов и статей. В пределах каждого раздела материал расположен в хронологическом порядке. Это создает дополнительные удобства и позволяет судить о научной ценности и печатных трудах Фарадея по годам. Из указателя можно узнать о научной литературе о Фарадее, изданной у нас и за границей.

Внешнее оформление второго тома несколько лучше первого.

В заключение можно сказать, что и при наличии некоторых недостатков рецензируемая книга является важным вкладом в литературу по истории электротехники

Инж. В. Ф. БРЕ

<sup>2</sup> Доклад Якоби относительно возможности получения искры при соединении двух металлов всего одной парой пластин (Philosophical Magazine, 1838, XIII, 401).



# Номограмма для определения частного двух комплексных чисел $a + jb$ и $c + jd$

(См. номограмму на 3-й полосе обложки)

Частное двух комплексов

$$\frac{a + jb}{c + jd}$$

определяется посредством номограммы в двухчленной форме

$$Q = p + jq.$$

Номограмма построена для  $a, b, c, d$  — целых однозначных чисел.  $a, b, c, d$  можно всегда привести к таким числам, но при этом

$$p = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} \text{ и } q = \frac{bc + ad}{c^2 + d^2}$$

умножаются на  $10^n$ , где  $n$  — целое число (см. пример). На номограмме переменные величины  $c, d$  даны в виде прямых,  $a$  и  $b$  даны двумя семействами кривых. Для определения  $p$  значения  $a$  даны в левой части номограммы,  $b$  в правой. Для определения  $q$ ,  $a$  дано в правой части (в скобках) (положительные значения внизу),  $b$  — в левой (в скобках).

Пример. Дано  $a + jb = 50 + j10$ ;  $c + jd = 0,3 + j0,6$ . Делим  $a + jb$  на  $10$ :

$$\frac{50 + j10}{10} = 5 + j1$$

и умножаем  $c + jd$  на  $10$ :

$$10(0,3 + j0,6) = 3 + j6.$$

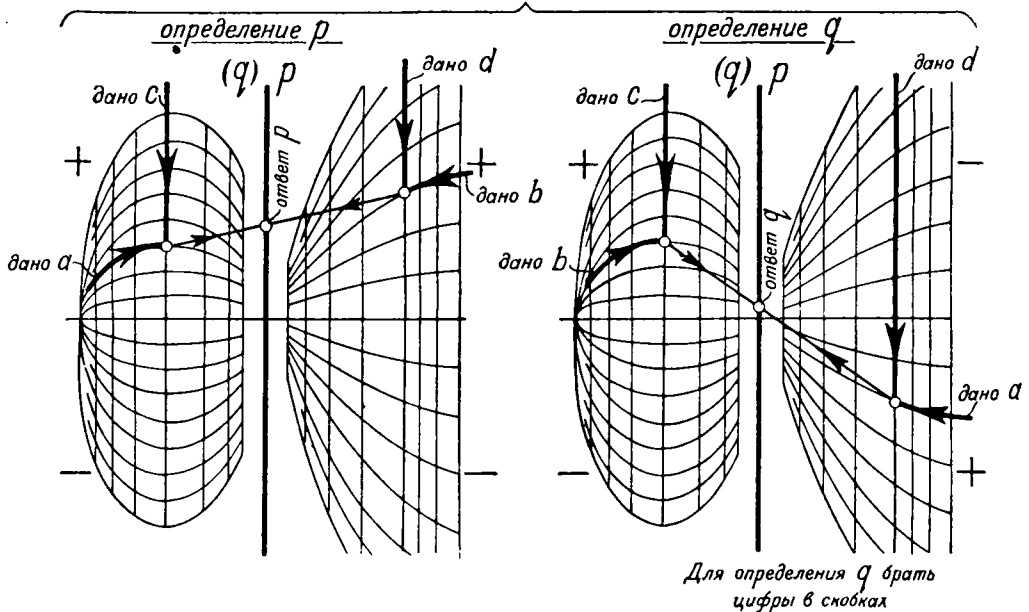
Следовательно, тем самым  $Q$  умножено на  $10^{-2}$ .

В левой части номограммы находим точку, общую кривой  $a=5$  и прямой  $c=3$ , а в правой точку  $b=1$  и  $d=6$ . Прямая, соединяющая эти точки, определяет на шкале  $p(q)$  точку  $p = 0,468$ .

Далее, находим в левой части номограммы  $p(b) = 1$ ;  $c = 3$ , а в правой ( $a = 5$ ;  $d = 6$ ). Прямая, соединяющая эти точки, определяет на шкале  $p(q)$  точку ( $= -0,6$ ):

$$Q = (p + jd) 100 = 100(0,468 + j0,6) = 46,8 + j60.$$

Схемы пользования номограммой



ОТК  
7



Формула  

$$p+jq = \frac{a+jb}{c+jd}$$

Пример  
 Дано  

$$p+jq = \frac{5+j1}{3+j6}$$
  
 Находим  
 $p = 0,468;$   
 $q = -0,6$

