

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1948



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

3

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Г. А. Сисоян—Научно-технические проблемы промышленной электротермии	3
Ф. Е. Темников—Метод динамической компенсации в автоматике и телемеханике	8
Б. И. Филипович—Стабилизация напряжения в фотоэлектрических устройствах промышленной автоматики	15
А. В. Москвин—Проблемы катодолюминесценции	24
Г. Н. Петров—К теории расчета индуктивности рассеяния трансформаторов	30
П. Л. Калантаров—Схема, эквивалентная трехобмоточному трансформатору	36
А. А. Горев, М. В. Костенко—Приведение сложных сетей к простейшим эквивалентным схемам	40
Л. Е. Эбин—Расчет заземлителей на нагрев при кратковременных электрических нагрузках	44
Из научно-исследовательских работ. Авторефераты	
Г. М. Каялов—Расчет на нагрев асинхронного прокатного двигателя	48
А. В. Бычковский—Расхождение характеристик тяговых двигателей и использование сцепного веса на электровозах постоянного тока	55
Д. Я. Ашкенази—Барреты	58
С. В. Персон—Метод разложения рабочих характеристик в ряд Фурье	61
Дискуссии	
По статье М. Ю. Шухатовича „Задачи развития электрического привода врубных машин и конвейеров“	67
По статье А. М. Кугушева „О выборе частоты при индукционном нагреве“	69
Нормы	71
Рефераты	74
Хроника	82
Библиография	
К. М. Поливанов—Книга И. Е. Тамма „Основы теории электричества“	93
Н. А. Сазонов—Книга Н. С. Власова „Экономича електрифицированного колхоза“	95
П. И. Воеводин—„Молодой электротехник“, журнал молодых электротехников Югославии	96



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

Секретарь инж. **Я. А. Климовицкий**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80.  
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.  
Адрес для телеграмм: Москва. Электричество

# Научно-технические проблемы промышленной электротермии

Доктор техн. наук Г. А. СИСОЯН

Грузинский политехнический институт им. Кирова

Развитие электротермии в Советском Союзе началось в тридцатых годах со строительства ряда мощных заводов. В начале сороковых годов эти заводы вошли в строй. Началось их промышленное освоение. Дальнейшее

развитие электротермии определили решения XVII съезда ВКП(б), под знаком которых шло освоение производства на построенных заводах и развертывание строительства новых предприятий. XVIII съезд ВКП(б) также уделил внимание проблемам электротермии. В резолюции съезда по докладу тов. В. М. Молотова о третьем пятилетнем плане развития народного хозяйства СССР указывается на необходимость развития электрохимических методов. Вместе с этим съезд дал указания о дальнейшем развитии производства специальных сталей.

К началу войны наша электротермическая промышленность достигла такого высокого уровня, что, несмотря на причиненный немцами ущерб, она сумела обеспечить военную промышленность необходимой ей продукцией. Не малая роль в выполнении этой задачи принадлежит заводам Грузии и Армении.

В послевоенной пятилетке еще шире и глубже отражены проблемы электротермии. В «Заключении о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг.» предусмотрено: «Расширять применение электротехнологии в производстве легких и цветных металлов, легированных сталей, химических продуктов и в металлообработке». В частности, предусмотрен ввод в действие 90 электропечей для выплавки стали, значительное увеличение мощности алюминиевой промышленности и организация новых видов электротермического производства: электролитного никеля, металлического магния и др. Выполнение этого раздела пятилетнего плана требует постановки широких научных исследований в области электротермии.

Электротермия—одна из самых новых отраслей современной промышленности. В Советском Союзе созданы мощные электротермические заводы в ряде районов. На основе опыта эксплуатации электротермических предприятий Закавказья и обобщения отдельных исследований, проведенных в Советском Союзе, выдвигается программа научно-исследовательских работ, реализация которой будет содействовать разрешению насущных проблем электротермии.

На основе опыта эксплуатации электротермических предприятий Закавказья, на основе исследований автора и обобщений результатов ряда других работ ниже освещаются некоторые из наиболее важных научно-

технических проблем электротермии.

**Проблема электроснабжения.** Электропечная нагрузка часто составляет значительную долю общего энергобаланса электрической системы. Это обстоятельство кладет свой отпечаток на характер эксплуатации энергосистем, графики их нагрузок, режим распределения реактивных мощностей, на режим напряжения и т. д. Остановимся вкратце на некоторых из этих проблем.

**График нагрузки и регулирующая способность печей.** Электропечная нагрузка вообще имеет ровный график без пиков как в суточном, так в месячном и годовом разрезе. Такая нагрузка в системе, располагающей достаточной установленной мощностью генераторов для покрытия пиков остальных потребителей, — в качестве примера которой можно назвать систему Армэнерго, — является наиболее благоприятной.

Примером другого рода систем является система Грузэнерго, гидроэлектростанции которой имеют резко выраженный сезонный характер. Отключение других видов потребителей в период минимума водотока связано с простоем большого числа рабочих. Обычно при таких условиях возникает вопрос об отключении электрических печей. Печи, таким образом, рассматриваются как потребитель — регулятор энергосистемы. В связи с этим сложилась проблема эксплуатации мощных электропечей в режиме потребителя — регулятора. Проблема эта технико-экономическая и требует оценки не только с точки зрения эксплуатации энергосистемы, но и с точки зрения технологического процесса заводов-потребителей. Некоторые детали этой проблемы были поставлены и разрешены в нашей литературе [Л. 1], но ряд сторон требует дальнейшего исследования.

*Реактивная мощность и коэффициент мощности.* Принято считать сопротивление электрической дуги чисто активным. Если даже полагать это положение неоспоримым, то достаточно все же взглянуть на диаграмму Рикке любой печи, чтобы удостовериться, что электропечная нагрузка в целом не является чисто активной и коэффициент мощности печи может меняться в довольно широких пределах. При значительной доле печной нагрузки в общем балансе системы даже небольшие изменения  $\cos \varphi$  печей могут вызвать резкое ухудшение баланса реактивной мощности и режима напряжения. Режим работы электропечей по кривым Рикке должен быть, поэтому, выбран так, чтобы их  $\cos \varphi$  был бы на достаточно высоком уровне и не требовал бы от системы значительных реактивных мощностей.

В особенно неблагоприятном положении в смысле распределения потоков реактивных мощностей и регулирования напряжения находится система Грузэнерго, растянутая в цепочку на сотни километров. Из практики эксплуатации этой системы известны случаи, когда вследствие низкого  $\cos \varphi$  и недостатка реактивной мощности ограничивалась возможность подачи активной энергии потребителям.

Кроме выбора оптимального режима по активной мощности и току, существенно важным фактором, определяющим  $\cos \varphi$ , является также перекос мощности по фазам.

Этот вопрос должен быть поставлен в порядок дня и разрешен, что даст возможность выработать мероприятия по улучшению регулирования реактивной мощности и режима напряжения систем.

*Коммутационные процессы.* Значение коммутационных процессов определяется прежде всего значительной мощностью отдельных печных агрегатов, доходящей до 5—7 тыс. kW. Одновременное приключение или отключение одного-двух таких агрегатов приводит к резкому изменению режима не только того участка энергосистемы, от которого непосредственно питаются эти агрегаты, но и всей системы в целом.

Эти вопросы коммутации не столь существенны в случае рудно-термических электропечей. Пуски и остановки этих печей производятся сравнительно редко, а в период работы они имеют довольно ровный режим. Проблема резко обостряется для сталеплавильных электропечей. В период расплавления скрапа в печах имеет место частое короткое замыкание с резкими толчками тока и напряжения, распространяющимися на систему.

Вопросу коммутационных перенапряжений на сталеплавильных печах мировая техника в последние годы уделяет весьма большое внимание. Проведенные работы дают весьма обширный экспериментальный материал и показывают всю важность этих исследований как в разрезе конструирования и выбора коммутационной аппаратуры для печных агрегатов, так и с точки зрения влияния печной нагрузки на электроснабжающую систему.

Каких-либо сведений об исследованиях коммутационных процессов на рудно-термических электропечах в иностранной литературе нет. Проведенные нами в 1941 г. заводские исследования показали, что значительные перенапряжения имеют место и на этих печах.

*Природа электрической дуги, как токоприемника.* Природе электрической дуги как постоянного, так и переменного тока посвящена весьма обширная литература. В основном она трактует маломощные дуги. К тому же общая и стройная теория горения дуги до сих пор не создана. Предложенные эмпирические формулы на настоящем этапе развития науки нас уже не могут удовлетворить.

Известно, что форма кривых тока и напряжения печной дуги в той или иной степени отличаются от синусоиды. Попытки сведения кривых напряжения дуги для всех рудно-термических печей к единой форме не оправдывают себя. Наши исследования [Л. 2] показали, что в зависимости от условий, в которых горит печная дуга, форма кривой напряжения дуги может меняться в весьма широких пределах. Кривая может иметь более или менее резкие пики зажигания и гашения, она может иметь форму, приближающуюся к трапеции, наконец, она может получить выпуклость, направленную вверх, и весьма близко подойти к синусоиде.

В период становления теплового режима печи форма кривой напряжения электрической дуги постепенно сглаживается, амплитуды высших гармоник уменьшаются. Но даже в период установившегося режима не у всех сплавов форма напряжения дуги одинакова. В зависимости от физико-химических свойств шихты и выбранного режима работы печи она может меняться в весьма широких пределах.

Форма кривых тока и напряжения дуги имеет значение не только для самой электропечной установки, но и для агрегатов электроснабжающей системы. Когда мы начинаем измерять время срабатывания коммутационной аппаратуры несколькими циклами, то нельзя пройти мимо формы кривых нагрузок. Однако не только в периоды коммутации, но и во время нормальной работы электропечи формы кривых нагрузок имеют существенно важное значение для системы.

Изучение характера дуговой нагрузки является, поэтому, весьма актуальной проблемой как для работы самого печного агрегата, так и для энергосистемы.

Важность изучения этой проблемы уже осознана нашими энергетиками. Водно-энергетический институт Академии наук Армянской ССР разрабатывает тему о характере электропечной нагрузки. Экспериментальные работы, проведенные этим институтом на мулитовых печах, дали определенные результаты. Их следует развивать. Следует также развить проводимые автором в Грузинском политехническом институте работы по осциллографированию печных дуг. Необходимо исследовать дуги не только на

рудно-термических, но и на сталеплавильных печах.

**Электротехнические проблемы.** Электротехническую часть печного агрегата составляет трансформатор, короткая сеть, электрод, коммутационная аппаратура и автоматика. Остановимся на наиболее острых вопросах в данной области.

**Трансформаторы.** Печные трансформаторы обладают крупными недостатками и в настоящее время не могут нас удовлетворить.

Печные трансформаторы производства Московского трансформаторного завода им. Куйбышева имеют пять ступеней напряжения (19,8—103,6—119,0—129,0—141,01 V), а импортные шесть—(82,0—92,0—102,0—112,5—123,0—132,5 V). Переключение анцапфов при переходе со ступени на ступень производится одновременно на всех трех фазах с отключением трансформатора от сети, так что исключена возможность работы печи на асимметричных напряжениях.

Конструктивные вопросы трансформаторостроения относятся к сфере деятельности трансформаторных заводов. Наша задача заключается в определении требований, которые должны быть предъявлены к трансформатору.

Прежде всего возникает вопрос об уровне напряжения и количестве ступеней напряжения. Разрешение этого вопроса требует кооперированной работы электриков и технологов, так как уровень напряжения зависит от электрических параметров короткой сети и от технологического процесса данного производства.

Все исследования, проведенные заводами Закавказья, показывают, что многоступенчатость печных трансформаторов — совершенно излишня и ведет к перерасходу меди. Нижний регистр ступеней вовсе лишен смысла, так как на них по условиям короткой сети нельзя получить номинальную мощность печи ни при одном режиме тока.

Весьма характерно, что МТЗ разрешил перегрузку по току печных трансформаторов на 15—20% трем рудно-термическим заводам. Тем самым подтвердилось наличие излишков меди в трансформаторах и возможность их перемаркировки.

В отношении требований технологии к уровню напряжения накопился громадный эксплуатационный материал. В настоящее время при соответствующей обработке этих материалов можно почти безошибочно решить проблему выбора оптимального напряжения. Во всяком случае на сегодня одно совершенно ясно — все наши печи работают на наивысших, имеющих у трансформаторов, ступенях напряжения, и эксплуатационный персонал редко пользуется средними и почти не пользуется низшими ступенями напряжения. Однако эти положения все же требуют известного уточнения и научного обоснования.

Следующей основной проблемой в отношении трансформаторов является задача регулирования напряжения пофазно и под нагрузкой. Путем такого регулирования легко

разрешается проблема «дикий» и «мертвой» фазы, по новому ставится вопрос об автоматическом регулировании печи.

Надо отметить, что вопрос об эксплуатации печи одного из заводов на асимметричных фазовых напряжениях был поставлен еще в 1941 г. Путем испытания трансформатора автор показал возможность такого режима работы, и этот трансформатор шестой год работает на асимметрии 124—124—132 V. Но при асимметрии напряжения в трансформаторе возникает весьма сложный процесс асимметричного распределения магнитных потоков.

Для конструирования печного трансформатора необходимого типа потребуются дальнейшее изучение этого и ряда других вопросов.

Наконец, следует уделить серьезное внимание вопросам эксплуатации, ревизии и капитального ремонта печных трансформаторов.

**Короткая сеть.** Короткие сети наших рудно-термических печей выполняются весьма разнообразно даже для печей одной и той же мощности. Это является показателем того, что еще недостаточно хорошо известны свойства этого важного участка печного агрегата. Особенно сильное отставание можно отметить по теоретическому исследованию коротких сетей. После небольшой обзорной работы М. А. Ченцова [Л. 3], появившейся в 1940 г., в нашей литературе этот вопрос почти совсем не освещался.

**Электроды.** Электроды на наших рудно-термических печах имеют чрезмерно большое сечение. Предложение уменьшить диаметр электродов печей выдвигалось неоднократно. Теоретическое изучение вопроса также показывает, что диаметр электродов следует уменьшить [Л. 4].

Но этим вопросом задача о выборе электродов не исчерпывается. Основным фактором, влияющим на работу электрода, является его температурный режим. Изучение температурных градиентов в электроде облегчит задачу выбора типа и диаметра электродов.

Эта задача имеет еще одну важную деталь. Электродная масса имеет теплопроводность, в десятки раз превосходящую теплопроводность футеровочных материалов. При значительном температурном перепаде между концами электрода из ванны через электроды отсасывается громадное количество тепла, для отвода которого приходится прибегать к сложной системе охлаждения.

При решении проблемы выбора диаметра электродов и качества электродной массы нельзя упускать из виду это обстоятельство. Наконец, широко должно быть поставлено изучение технологии изготовления электродов Золдербера.

**Зажимы.** Обычно переходное сопротивление в контакте электрод — плиты составляет около 20% активного сопротивления всего печного контура. Между тем, этому узлу до сих пор уделяется мало внимания. Одной из причин такого отставания является трудность самой проблемы. От исследователя данная задача требует глубокой эрудиции как в специальной области электротехники.

тротермии, так и в смежных областях физики и механики.

Пока что для передачи тока от сети к электроду используется принцип механического контакта между двумя поверхностями. Этот принцип создания контакта используется во всех других областях электротехники. Но ни в одной области электротехники не сталкиваемся с такими большими силами токов и со столь высокими температурами, как в электропечах. Ощущается необходимость в привлечении новых принципов осуществления передачи тока от сети к электроду.

Несомненный интерес в этом отношении представляет работа Л. А. Болдовского [Л. 5]. Автор предлагает два новых вида зажима: клиновый гидравлический зажим и зажим с контактом из расплавленного алюминия. В этой работе проблеме контакта дана новая принципиальная постановка. Следует самым внимательным образом изучить возможные варианты контакта и поставить в наших лабораториях и на заводах соответствующие эксперименты. Удачное решение вопроса позволит повысить коэффициент полезного действия печи на несколько процентов.

**Автоматика.** Дефекты автоматики электропечей настолько велики, что эксплуатационный персонал зачастую отдает предпочтение ручной регулировке. В последнее время наши научно-исследовательские институты начали уделять вопросу автоматики печей больше внимания. В советской научно-технической журнальной литературе появились по данному вопросу статьи С. И. Тельного [Л. 6] и Ю. Е. Ефроймовича [Л. 7, 8]. Эти исследования касаются в основном сталеплавильных печей. С. И. Тельный [Л. 6] вполне справедливо замечает, что пока еще не найдена удовлетворительная схема автоматического регулирования сталеплавильных печей.

С рудно-термическими печами дело обстоит еще сложнее. В настоящее время эти печи снабжены автоматикой, разработанной для сталеплавильных печей. Между тем, рудно-термические печи имеют свои специфические свойства и при решении вопросов регулирования требуют иного подхода. Значительный вес электродов, непрерывность процессов, отсутствие резких и частых толчков тока, наличие токов шихтовой проводимости — вот основные отличительные черты рудно-термических печей. Эти особенности, конечно, должны быть учтены при решении проблемы их автоматизации.

На рудно-термических печах весьма заманчиво, помимо способа регулирования, основанного на смещении электродов, использовать способ изменения напряжений на первичной стороне трансформатора. Этот способ применялся у нас на печах Миге, для трехфазных же печей он не опробован. Теоретическая разработка вопроса показывает, что регулирование печи изменением напряжения имеет ряд преимуществ по сравнению с существующим

методом регулирования печей смещением электродов.

Решение этой проблемы требует дальнейшей теоретической и экспериментальной работы. Прежде всего следует определить те требования, которые должны быть предъявлены к трансформаторам и самой автоматике с точки зрения оптимального технологического процесса.

**Распределение тока и мощности в ванне рудно-термической печи.** В рудно-термической печи, помимо тока в дуге, мы имеем дело еще с токами, шунтирующими электроды. Кроме того, сильные магнитные поля индуцируют еще в шихте дополнительные токи. Соотношения этих токов и мощностей тесно связано с технологическим процессом печи, температурным режимом и электропроводностью шихты.

Форма кривых тока и напряжения дуги зависит от температуры в очаге плавления и стволе дуги. Форма кривых также влияет на соотношение компонентов тока и мощности в ванне печи. Все это приводит к заключению, что проблему распределения тока и мощности в ванне нельзя решать для всех сплавов однозначно.

В одной из недавно выполненных работ даны общие закономерности распределения токов и мощностей в ванне и рассмотрены конкретные примеры двух сплавов — ферросилиция и силикомарганца [Л. 2]. Развитие этих положений для других видов сплавов несомненно облегчит весьма сложную работу технологів. Осциллографирование на электропечах сейчас применяется очень редко, но если успешно продолжить работы по изучению распределения мощности в ванне печи, то осциллограммы для технолога будут достаточно надежным аналитическим материалом.

В самом деле, как показали исследования, при нормальном ходе печи кривые напряжения и тока для такого сплава, как ферросилиций, должны иметь форму, весьма близкую к синусоиде. Если при эксплуатации печи осциллограммы дают отклонения от синусоиды, то это уже является признаком нарушения нормального режима. Естественно, что при обнаружении таких явлений технолог будет искать меры их устранения. Установленная же сейчас на печах аппаратура не дает возможности такого контроля работы печи.

**Технологические проблемы.** Ограничиваемся рассмотрением только вопросов, связанных с энергетикой печи.

В большинстве случаев наибольший процент потерь энергии вызывают побочные физико-химические процессы (удаление влаги из шихты и т. д.). Энергетические балансы 75% ферросилиция, подсчитанные на одном из заводов, показывают, что электрические потери печи составляют около 10—12%, тепловые — 15—18%, побочные технологические — 18—22% и только около половины подводимой к печи энергии идет на основной процесс, т. е. полный энергетический коэффициент полезного действия печи составляет около 50%. Примерно такая же кар-

тина и для других сплавов и карбида кальция. Отсюда ясна важность разработки вопросов, связанных не только с электрическими и тепловыми потерями, но и с потерями технологическими. Коснемся здесь только некоторых из них.

**Улавливание газов.** Разрешение этого вопроса не терпит дальнейшего отлагательства. Путем улавливания газов на руднотермических печах можно сэкономить сотни миллионов киловаттчасов энергии.

В настоящее время Главэлектропечью разработан проект закрытой ферросилициевой печи на 7,5 тыс. kW [Л. 9]. Весьма интересный вариант полужакрытой карбидной печи с использованием отходящих газов запроектирован С. Тевосяном.

**Уровень напряжения.** Значение уровня напряжения с чисто электрической точки зрения совершенно ясно: чем выше напряжение при заданной мощности, тем ниже электрические потери. Совершенно иначе обстоит дело с технологической точки зрения. Слишком высокие уровни напряжения приводят к высокому стоянию электродов, горячему ходу печи, диссоциации и улёту ведущего элемента сплава. Следует выбирать оптимальный для данного сплава уровень напряжения. Существенно важное значение имеет также связь между напряжением и габаритами ванны. Как видим, эта проблема—комплексная, требующая для своего решения тесной кооперации технологов, электриков и конструкторов. Прежде всего необходимо определять материальные и энергетические балансы различных сплавов при различных уровнях напряжения, чтобы иметь достаточный экспериментальный материал для анализа.

**Тигель ванны.** В рудно-термических печах вокруг створа дуги образуется газовый объем, свободный от шихты. Основные реакции протекают в стенках, замыкающих этот газовый объем, — в тигле ванны. Размеры тигля зависят от диаметра электродов, их посадки, вида сплавов и т. д. Попытка дать геометрию строения тигля делалась [Л. 2], но исследования следует продолжить, так как только при правильных габаритах тигля можно иметь нормальный режим работы печи.

**Сопротивление шихтовых материалов.** Электрическое сопротивление шихтовых материалов играет исключительно важную роль как в распределении мощности в ванне печи, так и в определении габаритов ванны и подбора уровня напряжения печи. До войны ряд вопросов данного цикла разрабатывался под руководством С. И. Тельного кафедрой электрометаллургии Днепропетровского металлургического института. Электрикам совместно с технологами следует теперь продолжить эти работы.

**Экономические проблемы.** Экономика является самым заброшенным участком наших

электротермических производств. Мы не можем здесь назвать почти ни одной крупной работы из этой области.

Узко, в разрезе энергетики, мы вправе поставить сегодня перед собой такой вопрос: в какой степени оправдывают себя льготные тарифы, устанавливаемые для некоторых наших энергоемких производств? Конечно, электротермические предприятия с круглосуточным ровным графиком имеют право на льготы, но размер и целесообразность льгот должны быть определены специальными технико-экономическими исследованиями.

Возникают еще вопросы сравнения капитальных затрат на строительство завода и строительство соответствующей мощности электростанции, вопросы экономической целесообразности исправления коэффициента мощности электропечного агрегата, целесообразности работы завода в режиме потребителя — регулятора и т. д.

Проблемы экономики должны быть предметом внимательного изучения заводов и научно-исследовательских институтов.

**Заключение.** Здесь освещена только часть проблем научного исследования, которые выдвигаются в связи с развитием промышленной электротермии. Ряд вопросов из этой области был рассмотрен И. С. Тельным [Л. 10].

Изложенное выше показывает, насколько многообразны и сложны задачи, стоящие перед электротермией СССР. Решение их требует согласованной работы технологов, теплотехников и электриков; необходима широкая взаимная информация заводов и институтов. Важное значение для успеха дела может иметь широкая научная дискуссия по некоторым основным проблемам электротермии.

#### Литература

1. Г. А. Сисоян. Оптимальный режим мощных ферросплавных печей. Кандидатская диссертация. ГИИ, 1940.
2. Г. А. Сисоян. Электрические явления в ванне рудно-термической печи. ГИИ, 1946.
3. М. А. Ченцов. Основные проблемы проектирования коротких сетей. Материалы к конференции по электротермии и электропечам, 1940.
4. Г. А. Сисоян. Уменьшение диаметра электродов мощных рудно-термических печей. Отчеты Грузинского отделения ВНИТОЭ, 1945.
5. Л. А. Болдовский. Новые конструкции электродных зажимов для рудно-термических карбидных печей. Сборник предложений по экономии электрической и тепловой энергии. Госэнергоиздат, 1946.
6. С. И. Тельный. Автоматическое регулирование трехфазных дуговых электропечей. Электричество, № 5, 1946.
7. Ю. Е. Ефроймович. Совместная работа автоматических регуляторов на трехфазных электроплавильных печах. Электричество, № 5, 1947.
8. Ю. Е. Ефроймович. Влияние колебаний напряжения на работу автоматизированных электроплавильных печей. Электричество, № 8, 1947.
9. М. Д. Смелянский. Мощная закрытая электропечь для выплавки ферросилиция. Промэнергетика, № 5, 1947.
10. С. И. Тельный. Некоторые вопросы теории дуговой электрической печи. Электричество, № 2, 1947.



# Метод динамической компенсации в автоматике и телемеханике

Кандидат техн. наук, доц. Ф. Е. ТЕМНИКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Система статической компенсации. Обобщенная принципиальная схема автоматического измерительного компенсатора, работающего по методу статической (с успокоением) компенсации, приведена на рис. 1, а. Элементы схемы  $\Pi$ ,  $K$ , и  $P$  жестко связаны общим валом. Следящий привод  $\Pi$  по знаку и скорости движения регулируется параметрическим нуль-индикатором  $H$ . Это — электромеханическая колебательная система, работающая как автоматический регулятор с возмущением в виде независимо меняющейся силы  $F_M$ . Вал  $\Pi-K-P$  следит за значением измеряемой силы  $F_M$  и в состоянии общего равновесия своим положением (углом поворота  $\alpha$ ) выражает значение  $F_M$ .

Состояние общего равновесия выражается следующими двумя уравнениями:

$$F_K = F_M; \sum (M_{ст} + M_d) = 0,$$

где  $M_{ст}$  и  $M_d$  — статические и динамические моменты системы. Устойчивость и точность ра-

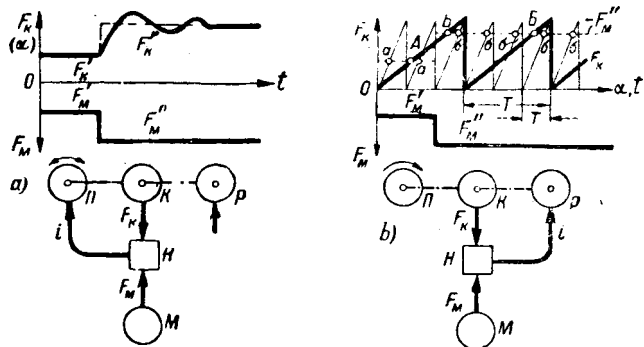


Рис. 1. Обобщенные принципиальные схемы автоматического измерительного компенсатора, работающего по принципу статической (а) или динамической (б) компенсации.

$M$  — источник измеряемой силы;  $F_M$  — измеряемая сила;  $H$  — нуль-индикатор с усилителем;  $F_K$  — уравновешивающая сила;  $K$  — регулируемый источник уравновешивающей силы;  $\Pi$  — привод;  $P$  — исполнительное устройство.

Метод динамической компенсации, предложенный в СССР, открывает новые пути в развитии автоматики и телемеханики. Излагаются сущность этого метода и представляемые им возможности, исследованные автором за период времени с 1934 г. до 1947 г. В частности, метод позволяет осуществить: точное измерение, регистрацию, интегрирование, автоматическое регулирование, сигнализацию, телеизмерение, телеуправление, автоматическое управление, централизованный многооточечный контроль, автоматическую сортировку изделий и некоторые математические преобразования.

боты системы зависят от значений действующих возмущений, успокоений, скоростей и масс. Измеряемая величина в большинстве случаев представлена механической силой или э. д. с. В последнем случае компенсационная цепь пред-

ставляет собой потенциометр или мост [Л. 1, 2].

Диаграмма работы системы статической компенсации приведена на рис. 1, а вверху. Скачкообразным изменением измеряемой силы от  $F'_M$  до  $F''_M$  равновесие компенсационной цепи нарушается, разность сил  $F_M - F_K$  воспринимается нуль-индикатором  $H$ , преобразуется, усиливается и действует (импульс  $i$ ) на привод  $\Pi$ . Этот последний поворачивает вал  $\Pi-K-P$ , выполняя при этом две операции: а) воздействием на источник уравновешивающей силы  $K$  изменяет в нужную сторону значение уравновешивающей силы  $F_K$ , б) воздействием на исполнительное устройство  $P$  изменяет положение рабочих элементов, например каретки с пером. Обычно имеет место прямая пропорциональность между углом поворота вала  $\Pi-K-P$ , значением уравновешивающей силы  $F_K$  и перемещением рабочих элементов исполнительного устройства  $P$ .

После возмущения система приходит в новое положение равновесия, совершая несколько колебаний. В целях приближения к апериодическому движению прибегают к успокоителям различных типов. В лучшем случае время действия описанной системы при скачкообразном изменении измеряемой силы от нуля до максимума не может быть менее одной секунды. Приближение к положению равновесия совершается с двух сторон (реверсивная система), что может вызвать значительную зону нечувствительности и вследствие этого значительные погрешности. Возможности метода ограничены. Однако приборы, основанные на этом методе измерения, имеют очень широкое распространение и строятся в большом количестве схемных и конструктивных разновидностей.

В системе статической компенсации измеряемая величина выражается только углом поворота вала  $\Pi-K-P$ :

$$F_{\kappa} = F_{\kappa} = A\alpha,$$

где  $A$  — коэффициент пропорциональности,  $\alpha$  — угол поворота вала  $\Pi-K-P$  в статическом состоянии.

Система динамической компенсации (ДК). Обобщенная принципиальная схема показана на схеме *b* рис. 1. Отличительные признаки показанной системы *b*: а) вместо следящего привода схемы *a* применен свободный привод  $\Pi$ , который не имеет никаких связей с нуль-индикатором  $H$ ; б) вал  $\Pi-K-P$  совершает непрерывное, равномерное и одностороннее движение; в) источник уравнивающей силы  $K$  периодически производит уравнивающую силу  $F_{\kappa}$ , меняющуюся по закону пилообразной кривой; г) рабочий элемент исполнительного устройства  $P$  периодически совершает движения, согласованные с изменениями  $F_{\kappa}$ ; д) возрастание  $F_{\kappa}$  в каждом периоде начинается от нуля или от какого-либо нижнего предела, и происходит непрерывно до достижения верхнего предела, перекрывающего все возможные значения  $F_{\kappa}$ ; е) нуль-индикатор  $H$  в принципе является не параметрическим устройством, а устройством однозначного (релейного) действия, создающим элементарный импульс  $i$  в момент достижения в компенсационной цепи  $F_{\kappa}-H-F_{\kappa}$  состояния равновесия; ж) импульсом от нуль-индикатора засекается значение измеряемой величины в отношении угла поворота вала  $\Pi-K-P$  путем воздействия на исполнительное устройство  $P$ .

Система ДК является стабилизированной электромеханической системой, в которой статические и динамические моменты не играют никакой роли и для которой условия равновесия сводятся к одному уравнению, имеющему отношение только в компенсационной цепи:

$$F_{\kappa} = F_{\kappa}.$$

Если компенсационная цепь составлена из электрических элементов, то может быть достигнута практически сколь угодно большая скорость измерений. Проверена, например, система с периодом, равным 0,02 сек., со скоростью 50 измерений в секунду. Эта скорость не является предельной.

Работу системы ДК иллюстрирует диаграмма над схемой *b* рис. 1. Как и в случае схемы *a* измеряемая сила скачком меняется от  $F'_{\kappa}$  до  $F''_{\kappa}$ . Уравнивающая сила  $F_{\kappa}$  независимо от этого меняется периодически в простейшем случае по линейному закону с любым наперед заданным периодом  $T$ . На диаграмме показаны два варианта периода: относительно большой и относительно малый периоды. Соответственно кривые изменения уравнивающей силы показаны толстой и тонкой линиями. Моменты равновесия отмечены точками *a* и *b* для малого

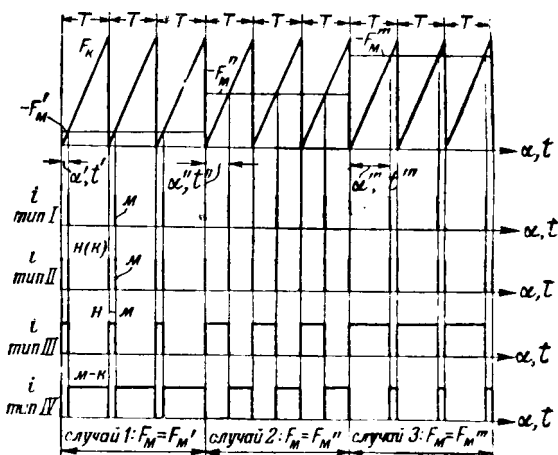


Рис. 2.

периода и точками *A* и *B* для большого. В отмеченных точках нуль-индикатор образует импульсы  $i$ , действующие на исполнительное устройство.

Уравнивание компенсационной цепи каждый раз происходит с одной стороны — при возрастании уравнивающей силы. Зона нечувствительности системы резко поэтому сокращается и в ряде случаев может быть регулировкой сведена к нулю. Погрешности даже в грубо выполненных устройствах составляют очень малую величину.

В случае постоянной скорости вращения значение измеряемой величины выражается не только мгновенным углом поворота вала  $\Pi-K-P$ , но и временем от момента прохождения нуля шкалы до момента образования нуль-индикатором импульса:

$$F_{\kappa} = F_{\kappa} = A\alpha = Bt,$$

где  $A$  и  $B$  — коэффициенты пропорциональности;  $\alpha$  — мгновенный угол поворота вала  $\Pi-K-P$ , отмеченный импульсом нуль-индикатора (отсчет от начала шкалы измерения);  $t$  — время, отсчитываемое от начала цикла измерения; полное время цикла измерения есть период  $T$ .

Диаграмма образования импульсов при работе циклической системы ДК показана на рис. 2. На той же диаграмме показаны варианты обработки импульсов  $m$  с добавлением импульсов засечки начала или конца шкалы  $n(\kappa)$ , для осуществления которых применены дополнительные контакты, срабатывающие при определенных положениях вала  $\Pi-K-P$ , а также нуль-индикаторы со ступенчатой характеристикой или вспомогательные реле с блокировкой. Тип I — одиночные острые импульсы, засекающие значения измеряемой величины, II — двойные острые импульсы, засекающие начало или конец шкалы измерения ( $n$  или  $\kappa$ ) и значения измеряемой величины  $m$ ; III — ступенчатые импульсы, заполняющие время от начала шкалы до засечки значений по шкале ( $n-m$ ); тип IV — ступенчатые импульсы, заполняющие время от засечки значений по шкале до конца шкалы ( $m-\kappa$ ).

**Ациклическая система ДК.** Система может быть преобразована в ациклическую. Для этого необходимо при каждом измерении обрывать процесс нарастания уравнивающей силы в момент достижения состояния равновесия и тотчас же после этого начинать процесс сначала. При этом рабочие элементы исполнительного устройства должны совершать действия, согласованные с изменениями уравнивающей силы. Простейшая модель ациклической системы показана на схеме *a* рис. 3. В отличие от циклической системы здесь дополнительно имеется устройство *Э* (например, электромагнитная муфта), расцепляющее на короткое время привод *П* и блок *К—Р* в момент поступления импульса от нуля-индикатора, и устройство *С* (например, спиральная пружина), при помощи которого в тот же момент блок *К—Р* возвращается в исходное положение. Такое решение приводит к дополнительным преимуществам и возможностям: а) в среднем на 50% сокращается время каждого измерения; б) результат измерений может быть представлен углами поворота вала, расстановкой импульсов во времени и частотой импульсов (при однократном измерении); в) при телеизмерении имеется возможность передавать каждое значение только одним острым импульсом; г) при телеизмерении упрощается задача синхронизации передающего — собственно измерительного — устройства с приемным — собственно исполнительным — устройством; д) при многоточечном последовательном измерении и телеизмерении импульсы от нуля-индикатора могут быть одновременно использованы как для основных операций, так и для приведения в действие переключателей измерительных и исполнительных цепей.

Недостатком ациклической медленной системы по схеме *a* рис. 3 является необходимость реверсирования элементов *К* и *Р* после каждого достижения состояния равновесия компенсационной цепи. Этот недостаток не имеет никакого значения в быстрой системе, построенной из чисто электрических и электронных узлов.

Диаграмма работы ациклической системы ДК представлена на рис. 4. Измеряются три значения  $F_M$ ; работа происходит с импульсами типа I. Значение измеряемой величины выражается углом поворота, временем между импульсами и частотой импульсов:

$$F_M = F_K = A\alpha = Bt = Bf,$$

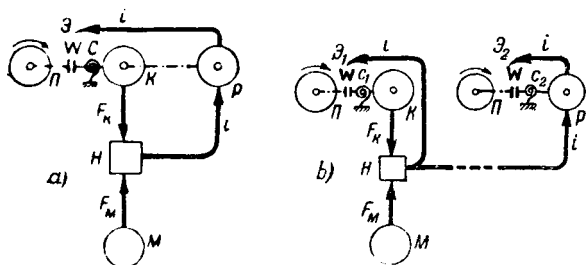


Рис. 3.

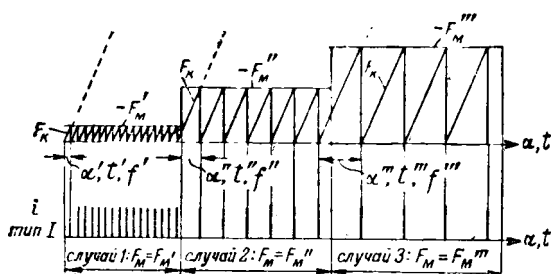


Рис. 4.

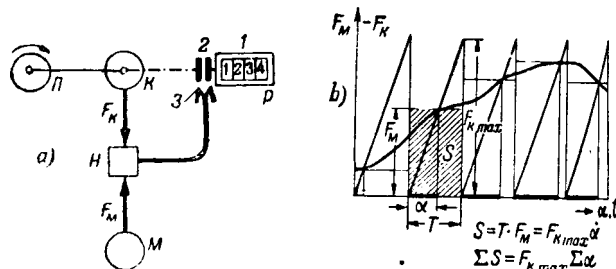


Рис. 5.

где *A*, *B* и *B* — коэффициенты пропорциональности;

$\alpha$  — угол поворота вала *К—Р* до момента компенсации;

*t* — время между соседними импульсами;

*f* — частота импульсов, причем

$$f = \frac{1}{t}.$$

Величина  $F_K$  есть значение уравнивающей силы в момент компенсации. Естественно, что при многоточечном последовательном измерении представить значения измеряемых величин частотой импульсов нельзя.

**Интегрирование посредством системы ДК.** Устройство для интегрирования величины  $F_M$  по времени может быть получено, если в циклической системе ДК, пользуясь счетным механизмом с электромагнитной муфтой (рис. 5), накапливать ступенчатые импульсы типа III в масштабе времени или в масштабе угла поворота вала *П—К—Р*. Очевидно, что в системе динамической компенсации процесс интегрирования сводится к суммированию элементарных площадей *S*, ограниченных кривой изменения измеряемой величины и имеющих основаниями равные периоды *T*. Диаграмма интегрирования показана на рис. 5, б:

$$\int_{t_1}^{t_2} F_M dt \approx \sum_{i=1}^{i=n} S_i = F_{K \max} \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i.$$

Исполнительным устройством в этой системе является счетный механизм 1 с электромагнитной муфтой 2 и 3.

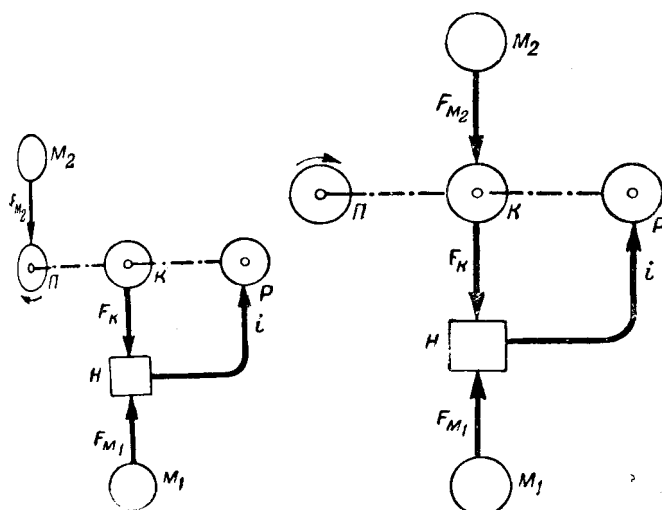


Рис. 6.

Рис. 7.

**Введение второй измеряемой величины через привод.** Может быть достигнуто интегрирование произведения двух переменных величин. Для этого одна величина должна циклически измеряться методом динамической компенсации с образованием импульсов типа III, а привод динамического компенсатора должен вращаться со скоростью, пропорциональной значению второй величины, причем во время действия импульса счетный механизм соединяется с этим приводом (с валом  $П—К—Р$ ). Такая система изображена на схеме рис. 6. Скорость привода  $П$  регулируется измеряемой силой  $F_{M2}$ , источником которой является элемент  $M_2$ . Сущность описанного решения заключается в том, что частота откладывания в счетчике текущего значения одной величины  $F_{M1}$  пропорциональна второй величине  $F_{M2}$  и, следовательно, с течением времени в счетчике накапливается сумма, пропорциональная интегралу произведения  $F_{M1}$  и  $t^2_2$

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{M1} F_{M2} dt.$$

Преобразование различных величин в скорость вращения двигателя осуществляется известными методами.

Описанная выше система была реализована, например, в форме интегрирующего тепломера, в котором одной переменной величиной является расход теплоносителя, а второй переменной величиной — разность температур теплоносителя.

**Введение второй измеряемой величины через источник уравнивающей силы  $K$ .** Из диаграммы работы системы ДК (рис. 1 б и рис. 7) имеем:

$$\alpha = T \frac{F_{M1}}{F_{M2}}.$$

Отсюда следует, что при постоянном  $T$  и при переменных  $F_{M1}$  и  $F_{M2}$  угол  $\alpha$  или соответствующее этому углу время пропорциональны отношению указанных двух измеряемых величин,

причем вторая из этих величин есть максимальное значение уравнивающей силы

$$F_{M2} = F_{K \max}.$$

В такой системе источник уравнивающей силы  $K$  является делителем измеряемой величины  $F_{M2}$  циклического действия. В систему должен быть введен второй источник измеряемой силы  $M_2$  (рис. 7).

Система описанного типа была реализована в форме регистратора отношения интенсивностей двух световых потоков «логографа» А. А. Соколовым.

**Визуальный отсчет.** Создав исполнительное устройство по схеме а рис. 8, можно осуществить визуальный отсчет значений величины, измеряемой методом динамической компенсации. Импульсы любого типа от нуля-индикатора подаются на малоинерционную лампу 3, помещенную позади вращающегося диска с чертой 1 (прозрачная черта на непрозрачном диске или наоборот), причем диск окружает неподвижная шкала 2. Тогда при достаточно большой частоте измерений вспышками лампы будет создано зрительное впечатление теневого указателя, ориентированного по шкале в соответствии с текущим значением измеряемой величины. Здесь используется стробоскопический эффект, заключающийся в том, что вспышки лампы с синхронной частотой создают впечатление неподвижности контрастного элемента вращающегося тела. В системе ДК частота вспышек, соответствующая частоте импульсов от нуля-индикатора, синхронизирована со скоростью вращения вала  $П—К—Р$ , но фаза вспышек меняется в зависимости от изменения измеряемой величины.

**Регистрация.** Простейшее из найденных решений задачи регистрации величин, измеряемых методом динамической компенсации, состоит в том, что в качестве исполнительного устройства (схема б рис. 8) используется барабан 1 с диаграммой бумаги, на которой посредством от-

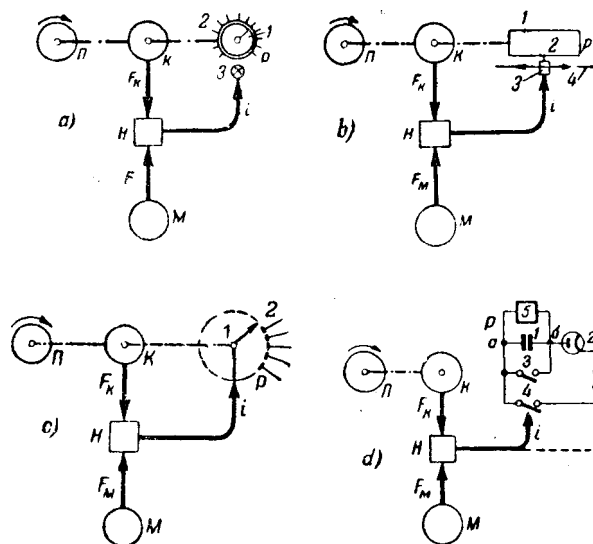


Рис. 8.

метчика 2 в моменты поступления импульсов от нуль-индикатора фиксируются точки. Барабан вращается валом  $П—К—Р$ . Отметчик 2 расположен на каретке 3, которая медленно перемещается по направляющей 4 в функции от времени. С течением времени на диаграмме записывается пунктирная кривая изменения измеряемой величины во времени, причем шкала времени располагается вдоль образующей барабана, а шкала значений — по окружности барабана. В зависимости от типа отметчика и качества импульсов могут быть осуществлены следующие способы записи: а) штриховая запись карандашом, пером, штифтом через копировальную бумагу или резцом по бумаге со специальным покрытием, импульсами типа III или типа IV, причем отметчиком управляет электромагнит; б) бойком через красящую бумагу или ленту с применением импульсов типа I или типа II, причем боек приводится в действие электромагнитом; в) электродом электрохимической, электротермической или электроискровой записи с применением импульсов любого типа; г) световой точкой, создаваемой импульсами любого типа посредством малоинерционной лампы с конденсором, причем применяется светочувствительная диаграммная бумага. Возможны и реализованы также другие способы записи и другие конструкции регистрирующих устройств.

**Введение второй измеряемой величины через исполнительное устройство Р.** Регистрирующее устройство по схеме б рис. 8 может быть видоизменено таким образом, что каретка отметчика 2 будет перемещаться вдоль образующей барабана 1 по направляющей 4 в функции не времени, а какой-либо второй измеряемой величины. Это перемещение можно осуществить дополнительно введенной силой  $F_{м2}$  с источником ее  $M_2$ . Тогда на диаграмме будет записана штриховая или пунктирная кривая изменения величины  $F_{м1}$  в функции от второй величины  $F_{м2}$ , причем ни одна из этих величин не является временем. При помощи таких устройств могут быть записаны кривые изменения деформации от нагрузки, вязкости от температуры, усилий резания от скорости и т. д., а также изменения положения объекта на плоскости.

Устройства такого типа относятся к классу так называемых «координатных самописцев» или «Х-У-самописцев».

**Образование импульса заданного значения.** В целях организации автоматического регулирования, автоматического управления или сигнализации отклонения величины от заданного значения необходимо иметь импульсы от нуль-индикатора и импульсы от вспомогательного устройства, задающего значение. Для этого случая исполнителю устройству в простейшем решении будет иметь вид по рис. 9. Валом  $П—К—Р$  приводится во вращательное движение контактная щетка 2, которая в определенные моменты касается контакта 1 для образования импульса заданного значения. Контакт 1 по желанию может быть установлен в любом месте неподвижной кольцевой шкалы 3. Этот контакт может быть

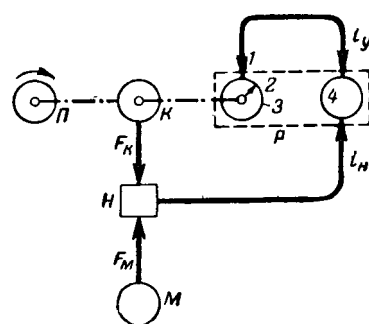


Рис. 9.

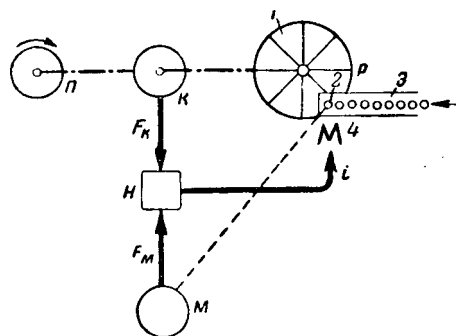


Рис. 10.

также приведен в движение вспомогательным механизмом для осуществления автоматического программного регулирования. Наличие двух импульсов: импульса действительного значения  $i_x$  и импульса заданного значения  $i_y$ , позволяет при каждом цикле измерения создать дифференциальный импульс, который по знаку и величине соответствует имеющемуся отклонению, причем этот последний импульс может быть использован для приведения в действие исполнительного механизма регулирования или сигнального устройства. Для выработки дифференциального импульса применяется релейная схема, обозначенная на рис. 9 блоком 4.

**Выполнение энергоемких операций.** Все автоматические измерительные компенсаторы являются своеобразными усилителями. Циклическая система ДК также является усилителем, причем эта система выгодно отличается тем, что в ней нет необходимости изменять скорость или производить реверсирование элементов, повторяющих шкалу измерения. Вследствие этого с валом  $П—К—Р$  можно связать сколь угодно громоздкие и тяжелые приспособления, предназначенные для выполнения энергоемких операций в зависимости от результатов измерения. В частности, имеется возможность создать исполнительные устройства в виде многосекционных барабанов для сортировки различных изделий по характерным параметрам. Так, например, можно сортировать электрические сопротивления и конденсаторы по их электрическим данным, детали машин по размерам или твердости, элементы оптической техники по их оптическим свойствам и т. д.

Простейшая модель такой системы показана на рис. 10. Многосекционный барабан 1 вращается

щается валом  $P-K-R$ . Изделия 2 толчками передвигаются по дорожке 3 и в крайней позиции измеряются по характерному параметру. Измерение производится по методу динамической компенсации, причем характерный параметр представлен измеряемой силой  $F_m$ . Импульсом от нуль-индикатора при помощи электромагнита 4 изделие сбрасывается в секцию, отвечающую значению параметра.

**Коллектор в исполнительном устройстве.** В качестве универсального приспособления, распределяющего импульсы от нуль-индикатора по отдельным каналам рабочих элементов дискретного исполнительного устройства, может служить коллектор (рис. 8, с), щетка которого связана с валом  $P-K-R$  и, следовательно, движется синхронно и синфазно с изменениями уравнивающей силы. В таком выполнении каждой ламели 2 отвечает определенный участок шкалы измерения (ступень). Импульс подается через щетку 1. С применением коллектора решены следующие задачи: а) указание значения измеряемой величины путем зажигания лампы, соединенной с ламелью, принявшей импульс, причем вся шкала указывающего устройства составлена из такого количества ламп, сколько ламелей имеет коллектор; б) регистрация измеряемой величины посредством гребенки электродов, в которой каждый электрод соединен с определенной ламелью коллектора, причем диаграмма медленно перемещается перпендикулярно гребенке в функции времени; в) автоматическая сортировка изделий по секциям неподвижного магазина, причем нужная секция открывается при помощи электромагнита, получающего импульс от нуль-индикатора через соответствующую ламель коллектора; г) автоматическое регулирование и управление посредством введения в схему нужных ламелей или групп ламелей; д) запоминание (для последующей отработки) измеренного значения с применением конденсаторов, тиратронов или неоновых ламп, соединенных с ламелями коллектора. Для практических целей достаточно бывает иметь коллектор с 100 рабочими ламелями, что создает погрешность дискретности  $\pm 0,5\%$ .

**«Запоминающий» конденсатор в исполнительном устройстве.** В целях применения нормальных измерительных или регистрирующих приборов (катодный вольтметр, самопишущий гальванометр, автоматический потенциометр) или в случае регистрации многих величин на индивидуальных диаграммах при поочередном измерении этих величин посредством одного общего динамического компенсатора удобно применять группу контуров по схеме *а* рис. 8. Показанный контур имеет «запоминающий» конденсатор 1, заряжаемый от вспомогательного источника через насыщенный диод 2 и контакт 4 при разомкнутом контакте 3 и разряжаемый при кратковременном замыкании контакта 3. При надлежащем выборе параметров напряжения между точками *а* и *б* будет пропорционально длительности импульса типа III и, следовательно, значению измеренной величины. В системе ДК импульсом

типа III от нуль-индикатора замыкается контакт 4, а предыдущее значение заранее снимается кратковременным замыканием контакта 3. В ациклической системе ДК контакт 4 может быть заменен ламелью переключателя, обслуживающего целый ряд контуров с «запоминающими» конденсаторами. Конденсаторы должны иметь возможно малую утечку, а вторичные приборы 5 должны отвечать условию сохранения зарядов конденсаторов.

**Многоточечные и комбинированные системы.** Резко выраженная цикличность действия систем динамической компенсации с большим удобством используется для поочередного измерения ряда величин, приведенных к единообразной силовой шкале. При этом особенно удобно пользоваться единой шкалой э. д. с. постоянного или переменного тока. В таком случае имеется возможность применить одну общую систему ДК с регулируемым источником уравнивающей э. д. с. и электрическим нуль-индикатором, поочередно обслуживающими группу источников измеряемых э. д. с. посредством переключающего устройства. Переключения производятся после завершения каждого цикла измерения. Для группы измеряемых величин можно применить одно общее исполнительное устройство или же повторить исполнительные устройства нужное число раз и воспользоваться вторым переключателем, распределяющим импульсы от нуль-индикатора по исполнительным устройствам в соответствии с обходом измеряемых э. д. с. В ациклической системе, как уже указывалось выше, переключатели можно приводить в действие импульсами от нуль-индикатора. В циклической системе для той же цели удобно пользоваться вспомогательными импульсами, производимыми контактным устройством в моменты прохождения специально предусмотренных холостых участков шкалы измерения. В обоих случаях (в медленных системах) для приведения в действие переключателей можно применить кинематические пары, получающие движение от валов динамических компенсаторов.

Рабочие элементы системы динамической компенсации  $K$ ,  $H$ ,  $M$  и  $P$  могут быть скомбинированы в различных количествах и сочетаниях. Наиболее интересные комбинации: а) использование результатов измерения в нескольких исполнительных устройствах; б) обслуживание одним приводом и одним исполнительным устройством нескольких компенсационных цепей; в) обслуживание одним приводом нескольких компенсационных цепей и соответственно нескольких исполнительных устройств; г) применение одного общего привода и одного общего источника уравнивающей силы для обслуживания нескольких источников измеряемых сил при наличии соответственно нескольких нуль-индикаторов и одного или нескольких исполнительных устройств; д) применение нескольких компенсационных цепей с блокированными нуль-индикаторами для образования импульсов только в моменты достижения заданных отношений между значениями измеряемых величин.

**Дистанционные системы.** В дистанционных системах динамической компенсации исполнительное устройство отделено от собственно измерительного устройства и снабжено отдельным приводом, синхронизированным с приводом измерительного устройства. Следует иметь в виду, что в дистанционных системах сохраняются возможности многоточечного измерения и комбинирования рабочих элементов, показанные для локальных систем. Для синхронизации приводов используются известные методы: а) применение синхронных двигателей, питаемых от общей сети переменного тока; б) автономная синхронизация посредством стабилизации скорости приводов местными средствами; в) принудительная синхронизация с применением отдельного канала связи или с использованием импульсов  $n$  или  $k$  (тип II на рис. 2); г) старт-стопная синхронизация по примеру телеграфной техники. Автономная синхронизация в циклической системе приводит к накоплению неточности, вследствие чего требуется периодическая коррекция. Если пользоваться импульсами типа II, то неточность синхронизации не скажется на точности отсчета записанных величин, так как на диаграмме фиксируются линия значений и линия начала или конца шкалы измерения. При существовании синхронного движения приводов задача передачи значений измеряемой величины на расстояние сводится к передаче импульсов любого типа

(рис. 2) по проволочной линии или по радиоканалу.

В ациклической системе ДК задача синхронизации упрощается тем, что старт-стопный способ содержится в самом принципе измерения. Передачей одного импульса на каждое измерение одновременно решаются задачи и синхронизации и воспроизведения на расстоянии значений измеряемой величины. Схема дистанционной ациклической системы ДК изображена на рис. 3, б. В этой системе необходимо на расстоянии повторить не только привод, но и устройства расцепления Э и сброса С. Положительные качества дистанционной ациклической системы проявляются в полной мере только при замене электромеханических узлов электрическими и электронными. Поэтому систему по рис. 3, б следует рассматривать как простейшую модель, иллюстрирующую принцип.

### Литература

1. Ф. Е. Темников. Дистанционный контроль в промышленности. Энергоиздат, 1940.
2. Ф. Е. Темников и Р. Р. Харченко. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, 1947.
3. Ф. Е. Темников. Авторские свидетельства 49959 (1935 г.), 49319 (1935 г.), 60595 (1940 г.), 60648 (1940 г.), 61418 (1940 г.), 70442 (1946 г.).
4. Отчеты научно-исследовательской группы Ф. Е. Темникова. Кафедра автоматики и телемеханики МЭИ.

## ОТ РЕДАКЦИИ

В американском журнале «Instruments» (апрель 1946) опубликована статья Георга Кейната «Регистратор Кейната». Статье предпослано редакционное примечание, содержащее, между прочим, следующее:

«Этот принцип («свин-балансинг») представляет собой только одно из нескольких изобретений доктора Кейната, из которых должна составиться его система. Редко случалось, чтобы крупное нововведение было в такой значительной степени делом рук одного изобретателя...»

И далее:

«Поскольку это является его важнейшим открытием с того времени, как он стал гражданином США, мы считаем, что изменили бы американскому чувству долга, если бы упустили случай этим заглавием отдать дань уважения автору».

По поводу изложенного необходимо отметить, что еще в 1935 г. кандидат техн. наук Ф. Е. Темников оформил заявку на изобретение им группы устройств, основан-

ных на принципе, названном им принципом динамической компенсации («свин-балансинг» в терминологии Кейната). Его работы по исследованию и реализации этого принципа частично освещены выше в статье «Метод динамической компенсации в автоматике и телемеханике».

В 1922 г. Эрих Ручка (Чехословакия) заявил об изобретении им механических устройств, в которых измеряемая величина компенсировалась силой периодически взводимой пружины. В 1934 г. рядом сотрудников ВЭИ и в Ленинграде проф. П. А. Молчановым разрабатывались регистрирующие устройства, основанные на том же принципе.

В названной же статье Кейната наиболее ранней ссылкой на его работы в области динамической компенсации является патент 1941 г. Первая публикация была сделана им в январе 1945 г. в журнале «Electronics». Таким образом, Кейнат не может претендовать на приоритет в разработке метода динамической компенсации.



# Стабилизация напряжения в фотоэлектрических устройствах промышленной автоматики

Кандидат техн. наук Б. И. ФИЛИПОВИЧ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

**Влияние напряжения на работу фотоэлектрических устройств.** Отклонения напряжения сети, питающей фотоэлектрическое устройство, от номинального значения могут

нарушать нормальную работу этого устройства: 1) вызывая изменения светового потока источника света; 2) влияя на чувствительность фотоэлемента; 3) изменяя режим усилителя, включенного между фотоэлементом и измерительным прибором, реле или контактором; 4) сокращая срок службы источника света и электровакуумных приборов, примененных в усилителе. Влияние отклонений напряжения на прочие элементы фотоэлектрических устройств несущественно.

Применяемые в промышленных фотоэлектрических устройствах в качестве источников света лампы накаливания обладают сравнительно сильной зависимостью светового потока от напряжения на зажимах. При обычно принятой оценке светового потока по визуальному восприятию зависимость эта может быть выражена в довольно широком диапазоне изменений напряжения параболой высшего порядка:

$$\Phi = k_1 U^m. \quad (1)$$

Зависимость светового потока от тока в цепи лампы может быть выражена сходной формулой:

$$\Phi = k_2 I^n, \quad (2)$$

показатель степени которой  $n$ , однако, отличается от  $m$  вследствие нелинейной зависимости тока, потребляемого лампой, от приложенного напряжения ( $m=3,6...3,7$ , а  $n=6...7$ ) [Л. 1, 2].

При изменении напряжения на лампе спектральный состав испускаемого ею излучения меняется вследствие изменения температуры нити. Поэтому при определении светового потока по создаваемому им току в цепи фотоэлемента зависимость светового потока от напряжения на лампе (или от тока через нее) может заметно отличаться от приведенной выше, соответственно различию в спектральных характеристиках чув-

ствительности примененного фотоэлемента и глаза. Однако, для обычно применяемых фотоэлементов это отличие невелико (порядка  $\pm 20\%$ ) [Л. 41, 42].

Довольно чувствительны к изменениям напряжения газонаполненные фотоэлементы с внешним фотоэффектом, у которых зависимость тока от напряжения на зажимах фотоэлемента (при неизменном световом потоке) может быть для узкого диапазона напряжений вблизи номинального заменена параболой  $I = k_3 U^p$ , где  $p=1,6...3,2$  (рис. 2, 3). Для фотоэлементов с внутренним фотоэффектом зависимость от напряжения меньше:  $p=0,5...1,0$  (рис. 4). Наконец для вакуумных фотоэлементов с внешним фотоэффектом она ничтожна:  $p=0,02...0,3$  (рис. 5). Только что приведенные выражения показывают зависимость тока от напряжения на зажимах самого фотоэлемента. Зависимость тока от напряжения на зажимах цепи фотоэлемента благодаря влиянию нагрузочного сопротивления оказывается иной. При нагрузке фотоэлемента на постоянное сопротивление зависимость тока

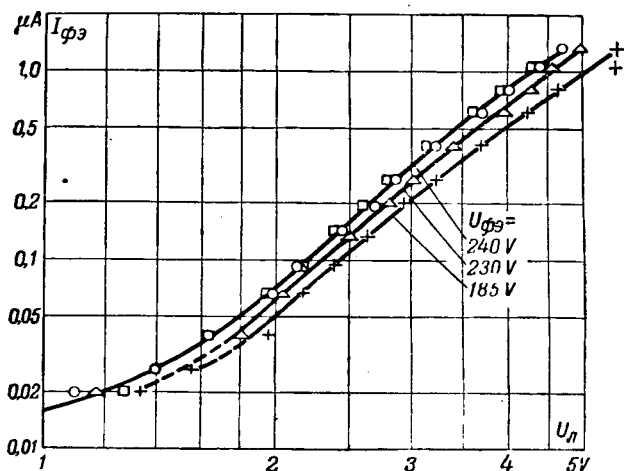


Рис. 1. Зависимость фототока газонаполненного фотоэлемента типа ЦГ-3 от напряжения накала освещающей его лампы накаливания автомобильного типа 6—8 В, 21 св



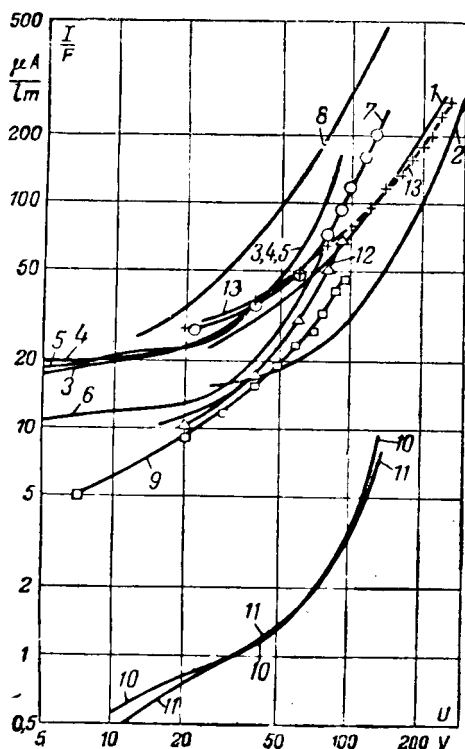


Рис. 2. Характеристики  $\frac{I}{F} = f(U)$  различных газонаполненных фотоэлементов по литературным данным:

1, 2—типа ЦГ-1 [Л. 9]; 3, 4, 5—типа 918 [Л. 3, 6, 7]; 6—типа 868 [Л. 6]; 7—типа Сасопрес [Л. 8]; 8—типа Technik [Л. 9]; 9—типа PZ3 [Л. 8]; 10—типа ЗГС [Л. 4]; 11—неизвестный [Л. 8]; 12—типа Sk-60 [Л. 3, 9]; 13—типа WL-735 [Л. 40].

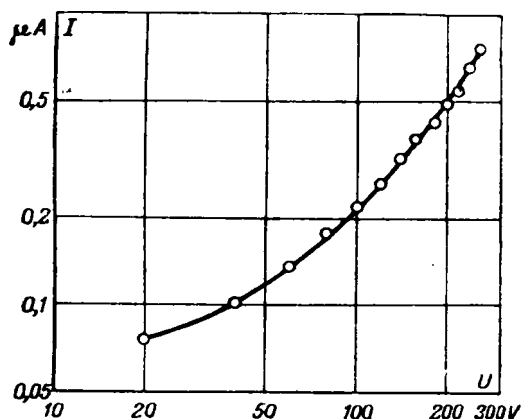


Рис. 3. Характеристика  $I = f(U)$  для фотоэлемента типа ЦГ-3.

от напряжения на зажимах всей цепи приближается к линейной тем сильнее, чем больше падение напряжения на нагрузочном сопротивлении по сравнению с напряжением на фотоэлементе.

Особое положение среди фотоэлементов занимают фотоэлементы с запирающим слоем, не нуждающиеся для своего действия в постороннем источнике напряжения. При использовании их в схемах, в которых в цепи фотоэлемента не включено никаких э. д. с., кроме создаваемой

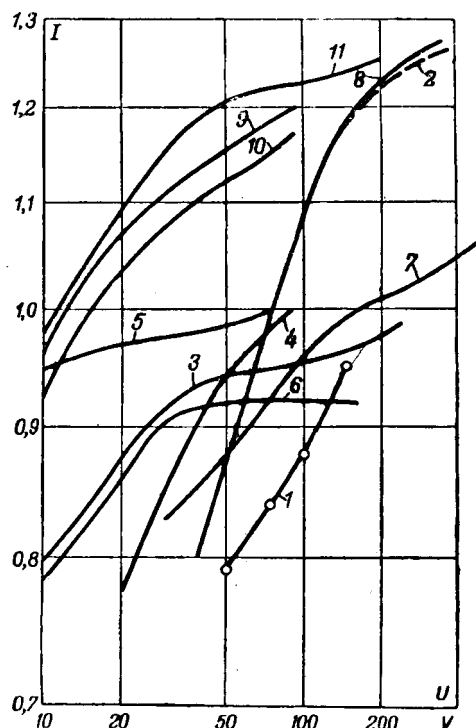


Рис. 4. Характеристики  $I = f(U)$  различных вакуумных фотоэлементов по литературным данным ( $I$  выражено в произвольных единицах).

1—типа Сасопрес [Л. 8]; 2—неизвестный [Л. 8]; 3—типа 917 [Л. 7]; 4—сферический [Л. 5]; 5—плоский [Л. 5]; 6—типа 917 [Л. 6]; 7—тип ЦВ-2 [Л. 9]; 8—типа 3VS [Л. 4]; 9—типа SR-51 [Л. 3]; 10—типа Sk [Л. 3, 9]; 11—типа PJ-22 [Л. 40].

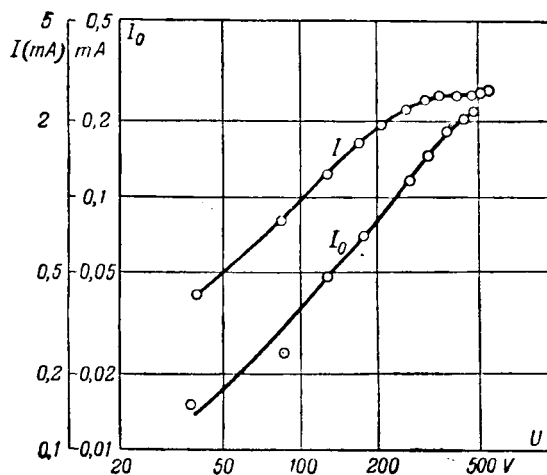


Рис. 5. Характеристики  $I = f(U)$  для селенового фотоэлемента сопротивления на свету и в темноте [Л. 3].

фотоэлементом, можно получить полную независимость тока фотоэлемента от изменений напряжения питающей сети.

В отношении усилителей можно дать только отрывочные указания о характере и порядке величины влияния изменений напряжения, так как свойства усилителей в этом отношении очень разнообразны и зависят как от принципиальной схемы усилителя, так и от применяемых в нем элементов. Усилители постоянного тока на электронных лампах и управляемых ионных приборах

рах, особенно многокаскадные, обычно весьма чувствительны к изменениям напряжений, питающих сеточные и анодные цепи. Однако, даже среди них есть класс схем — мостиковые и балансные, которые, так же как усилители переменного тока, могут быть сделаны почти независимыми от изменения этих напряжений в сравнительно широких пределах. Дополнительное улучшение в этом отношении может дать применение отрицательной обратной связи.

Редко применяемые в фотоэлектрических устройствах электромеханические усилители и электромагнитные усилители (обычно называемые просто «магнитными») всегда могут быть сделаны малочувствительными к изменениям питающего напряжения (см. например, [Л. 47]).

Изменения питающего напряжения вызывают сокращение срока службы ламп накаливания, прежде всего потому, что наименьшее возможное напряжение на лампе должно быть не меньше того, при котором световой поток лампы равен минимально необходимому для нормальной работы фотоэлектрического устройства. Поэтому, чем шире диапазон изменений напряжения, тем большим оказывается среднее значение напряжения на лампе, определяющее ее срок службы. Влияние напряжения на срок службы у ламп накаливания очень велико. Если принять для зависимости срока службы от напряжения форму, аналогичную (1):

$$t = k_1 U^q,$$

то [Л. 1, 2]

$$q = (-13 \dots -15).$$

Поэтому, например, уменьшив диапазон изменений напряжения с  $\pm 10\%$  до  $\pm 1\%$ , можно увеличить срок службы лампы более чем в 3 раза.

Изменения напряжения сокращают также срок службы накаливаемых катодов электровакуумных приборов, причем в этом отношении в некоторых случаях понижение напряжения относительно номинального оказывается даже опаснее, чем его повышение.

**Требования к стабилизатору напряжения.** Условия работы стабилизатора и требования к нему характеризуются прежде всего возможными пределами изменения питающего напряжения и нагрузки и допускаемыми при этих условиях отклонениями стабилизированного напряжения от номинального значения в установившемся режиме («качество стабилизации»). Помимо этого к стабилизатору всегда предъявляются определенные требования в отношении номинального значения стабилизированного напряжения или тока и возможности его подрегулировки впоследствии, величины и характера длительной и кратковременной нагрузки, к. п. д., амплитуды и длительности кратковременных отклонений стабилизированного параметра режима (тока или напряжения) при внезапных изменениях питающего напряжения или нагрузки, срока службы отдельных элементов, стоимости, потребного надзора и ухода, габаритов и веса.

Диапазон изменений напряжения питающей сети зависит от местных условий. Для заводских

сетей переменного тока можно на основании систематических наблюдений, проводившихся на Московском рентгеновском заводе в 1932 г. [Л. 44] и в 1937 г. [Л. 45], а также кратковременных, но широких обследований, проведенных в 1943 г. в Америке [Л. 46], и некоторых дополнительных наблюдений, указать в качестве ориентировочного диапазон от  $-25\%$  до  $+10\%$  по отношению к номинальному напряжению сети.

Для оценки качества стабилизации может служить разность максимального и минимального значений стабилизованного напряжения, при заданных условиях работы, отнесенная к номинальному значению этого напряжения:

$$\delta_U = \frac{\Delta U_2}{U_{2n}} \equiv \frac{U_{2\max} - U_{2\min}}{U_{2n}}.$$

В случае стабилизатора тока вместо значений напряжения нужно брать соответственные значения тока.

Относительные изменения стабилизованного напряжения или тока можно различать по их причинам:

- $\delta_U$  — от изменения питающего напряжения;
- $\delta_f$  — от изменения частоты (при питании переменным напряжением);
- $\delta_z$  — от изменения сопротивления нагрузки;
- $\delta_c$  — от изменений со временем характеристик стабилизатора (вследствие протирки отдельных деталей, износа и т. п.) и от других причин.

Стабилизирующее действие стабилизатора принято оценивать коэффициентом стабилизации [Л. 10, 17]

$$K = \frac{\Delta U_1}{U_{1n}} : \delta_U,$$

хотя зависимость  $\delta_U$  от  $\frac{\Delta U_1}{U_{1n}}$  у большинства стабилизаторов нелинейная и сильно зависит от нагрузки и других условий работы стабилизатора. Чувствительность стабилизатора к изменениям частоты и нагрузки можно характеризовать коэффициентами

$$\psi = \delta_f : \frac{\Delta f}{f_n} \text{ и } \zeta = \delta_z : \frac{\Delta z_2}{z_{2n}}.$$

У стабилизатора напряжения  $\zeta$  можно рассматривать при малых отклонениях  $z_2$  от  $z_{2n}$  как отношение внутреннего сопротивления стабилизатора к номинальному сопротивлению нагрузки

$$\zeta \approx \frac{z_i}{z_{2n}} \equiv -\frac{\partial U_2}{\partial I_2} \cdot \frac{1}{I_2}.$$

В отношении результирующего диапазона изменений стабилизованного параметра всегда справедливо неравенство

$$\delta_z < \delta_U + \delta_f + \delta_z + \delta_c,$$

в правую часть которого должны быть подставлены наибольшие возможные значения  $\delta_U$ ,  $\delta_f$ ,  $\delta_z$  и  $\delta_c$ . Только в случае  $x = \text{const}$ ,  $\varphi = \text{const}$ ,  $\zeta = \text{const}$  знак неравенства мог бы быть заменен знаком равенства.

Инерционность стабилизаторов принято оценивать по времени  $\tau$ , потребному для возвращения стабилизированного параметра, с точностью до малой величины  $\epsilon$ , к номинальному значению после скачкообразного изменения  $U_1$  или  $z_2$ . Так как часто при этом не указывается ни величина  $\epsilon$ , ни величина скачка  $U_1$  или  $z_2$ , при котором определяется  $\tau$ , то приводимые в литературе числовые значения  $\tau$  позволяют судить лишь о порядке величины его.

Требования к стабилизации напряжения или тока в различных цепях фотоэлектрического устройства неодинаковы и зависят как от свойств и характеристик примененных в них элементов, так и от назначения и принципа действия устройства в целом.

Так, у фотоэлектрических устройств, предназначенных обнаруживать только возможность или невозможность прохождения света по заданному пути (световые ограждения, фотоэлектрические счетчики и регистраторы движущихся предметов, устройства для контроля наличия или отсутствия отверстий), необходимое качество стабилизации режима источника света определяется скорее связанным с этим изменением срока службы лампы накаливания, чем влиянием изменений светового потока ее на работу устройства. Для таких устройств колебания напряжения на зажимах источника света порядка  $\pm 5\%$ , т. е. относительное изменение напряжения

$$\delta_{(U)\Sigma} \approx 0,1,$$

которому соответствует относительное изменение тока

$$\delta_{(I)\Sigma} \approx 0,06,$$

представляются вполне допустимыми. Почти такие же требования к стабилизации режима источника света предъявляют фотоэлектрические устройства для измерения или регулирования цветности, мутности, площади или числа отверстий и т. п., использующие для своего действия или сравнение двух световых потоков от одного и того же источника света или же качественные изменения светового потока при изменениях контролируемого параметра.

Более жесткие требования ставят устройства для тех же целей, реагирующие просто на изменения величины светового потока, прошедшего через контролируемый объект, и устройства, основанные на сравнении световых потоков от двух или более независимых источников света. Даже необходимая для грубого регулирования точность измерения контролируемой величины (а следовательно, и светового потока) порядка  $\pm 10\%$  может быть обеспечена только, если  $\delta_{(U)\Sigma} < 0,05$  или  $\delta_{(I)\Sigma} < 0,03$ . При повышении требований к фотоэлектрическому устройству в от-

ношении его чувствительности соответственно повышаются требования к  $\delta_\Sigma$ .

Значительная тепловая инерция нити накала у ламп, применяемых обычно в фотоэлектрических устройствах, приводит к тому, что инерционность стабилизатора может оказать вредное влияние только, если  $\tau > 0,1 \dots 0,2$  с. По той же причине стабилизированное напряжение может быть как постоянным, так и переменным; формы кривой его — несущественны. Приведенные выше значения  $\delta$  относятся к эффективным значениям напряжения или тока. Сопротивление нагрузки меняется мало, так что  $\delta_z$  можно пренебречь. Рабочее (стабилизированное) напряжение в цепи лампы накаливания лежит обычно в пределах  $3 \dots 24$  В при токе нагрузки порядка нескольких ампер.

Цепи накала катодов электровакуумных приборов усилителя отличаются от цепей накала осветительных ламп в отношении требований, предъявляемых к стабилизатору, в основном только диапазоном допускаемых изменений напряжения. Для этих цепей в большинстве случаев можно допускать, независимо от схемы и принципа действия фотоэлектрического устройства, отклонения напряжения порядка  $\pm 5\%$  (таким образом  $\delta_{(U)\Sigma} = 0,1$ ). Однако, для газоразрядных приборов с накаливаемым катодом предпочтительно иметь  $\delta_{(U)\Sigma} \leq 0,07$ , соответственно рекомендуемым [Л. 26] пределам изменения напряжения  $+5 \dots -2\%$ .

В цепи фотоэлемента, так же как в анодных и сеточных цепях усилителя на электровакуумных приборах, может быть применена только стабилизация напряжения, так как относительные изменения тока в этих цепях при работе устройства могут быть значительными. От цепей накала эти цепи отличаются величиной рабочего напряжения (десятки и сотни вольт) и порядком величины тока нагрузки (не более нескольких десятков миллиампер, а у фотоэлементов с внешним фотоэффектом — порядка нескольких микроампер). В большинстве случаев предпочтительно питание этих цепей постоянным напряжением. В случае питания переменным напряжением от стабилизатора обычно требуется поддержание постоянства не только эффективного значения, но и формы кривой стабилизированного напряжения. Малая инерционность процессов в этих цепях делает желательным применение практически безинерционных стабилизаторов.

Требуемое качество стабилизации напряжения в цепи фотоэлемента зависит от тех же факторов, что и качество стабилизации напряжения источника света. Однако, благодаря меньшей зависимости от напряжения, дополнительно уменьшаемой влиянием нагрузочного сопротивления, требования в отношении постоянства напряжения даже для газонаполненного фотоэлемента могут быть мягче, чем для лампы накаливания. Вакуумные фотоэлементы с внешним фотоэффектом во многих случаях позволяют обходиться совсем без стабилизации напряжения в цепи фотоэлемента.

Требования в отношении качества стабилизации напряжения в сеточных и анодных цепях усилителя полностью определяются выбором схемы усилителя.

**Стабилизаторы тока и напряжения для фотоэлектрических устройств.** Для стабилизации режима цепей накала ламп накаливания и катодов электронных или ионных ламп усилителя могут быть применены следующие стабилизирующие устройства:

а) аккумуляторы, заряжаемые периодически или включенные в качестве буферных; б) барреты; в) мостиковые схемы с нелинейными сопротивлениями; г) феррорезонансные стабилизаторы напряжения.

*Аккумуляторы* могут обеспечить очень хорошую стабилизацию напряжения, обладая малым внутренним сопротивлением, обеспечивающим очень малое  $\zeta$  и позволяющим получить большое  $\kappa$  [Л. 10]. Недостатками их являются: необходимость тщательного ухода, громоздкость, пригодность только для постоянного тока и необходимость в периодической подрегулировке накала, обусловленная медленным изменением напряжения во время разрядки и зарядки (значительное  $\delta_c$ ).

*Барреты* представляют собой стабилизаторы тока; они одинаково хорошо работают и на постоянном, и на переменном токе.

Коэффициент стабилизации у барретеров невысок: у барретеров распространенных в СССР типов коэффициент стабилизации, отнесенный к изменению напряжения на зажимах барретера,  $\kappa_0 = 8,6 \dots 9,5$  [Л. 11]. Коэффициент стабилизации, отнесенный к изменению напряжения питающей сети,  $\kappa$  — всегда меньше  $\kappa_0$  и тем меньше, чем больше  $\frac{U_2}{U_1}$ .

Изменение  $I_2$  во время работы может быть значительным: по данным [Л. 13] после 1200 h горения наблюдалось снижение  $I_2$  примерно на 3,5% ( $\delta_c \geq 0,035$ ). Это приводит к тому, что с помощью барретера можно добиться постоянства тока с точностью лишь до нескольких процентов:  $\delta_{(I) \Sigma} = 0,04 \dots 0,10$ . Такая точность стабилизации тока может быть достаточна для катодов электронных ламп, но обычно совершенно неудовлетворительна в применении к стабилизации источника света.

Значительная инерционность барретеров не существенна при стабилизации накала усилительных ламп, однако для лампы накаливания длительность переходного процесса  $\tau$ , составляющая при скачкообразном изменении напряжения несколько минут [Л. 11, 12, 14], слишком велика. Другой неприятной особенностью барретеров, тоже связанной с их тепловой инерцией, являются большие толчки тока при включении, для ограничения которых в ряде случаев приходится применять включение последовательно с барретером балластного сопротивления или даже сопротивления с отрицательным температурным коэффициентом [Л. 12, 13].

Далее, все лампы накаливания, пригодные для использования в фотоэлектрических устройствах, и большинство электронных и ионных ламп изготовляются для работы при определенных значениях напряжения на зажимах нити накала, причем ток, потребляемый нитью при этом напряжении, может у отдельных экземпляров заметно отличаться от номинального значения. Это, а также несогласованность номинальных значений токов накала отдельных ламп друг с другом и с номинальным током барретера, заставляла усложнять схему включения барретера дополнительными приспособлениями для индивидуальной подрегулировки тока накала у каждой лампы. Обычно для этой цели применяются регулируемые сопротивления, включаемые параллельно нити накала; при переменном токе можно применять включение барретера через трансформатор с регулируемым коэффициентом трансформации [Л. 15]. Необходимость в подобных приспособлениях отпадает только при использовании лампами, предназначенными для последовательного включения (например, лампами ТО-141, 142, 143).

*Мостиковые схемы с нелинейными сопротивлениями*, в качестве которых обычно применяются лампы накаливания [Л. 16], позволяют довести коэффициент стабилизации до  $\kappa = 200$  [Л. 14], однако низкий к. п. д.  $\eta = 0,02 \dots 0,04$  ограничивает их применение лабораторными установками.

*Феррорезонансные стабилизаторы* напряжения [Л. 17—24], [Л. 31—34] применимы только на переменном токе. Точность стабилизации напряжения при фиксированной нагрузке может быть сделана довольно высокой. Коэффициент стабилизации у феррорезонансных стабилизаторов зависит от настройки и обычно [Л. 17] составляет около 15, однако при постоянной нагрузке может быть доведен до  $\kappa = 100$ . Влияние нагрузки на стабилизированное напряжение сравнительно невелико:  $\zeta = 0,02 \dots 0,05$  (по данным [Л. 17]) при активной нагрузке  $\zeta \leq 0,01$ . С помощью дополнительных устройств [Л. 23] можно сделать  $\zeta$  еще меньше, так что изменения нагрузки от нуля до полной будут вызывать изменение напряжения в пределах 0,5%. В применении к стабилизации накала подобные условия не могут быть оправданы, кроме случаев, особо оговоренных ниже.

Изменения стабилизированного напряжения в работе вызываются прогревом обмоток и конденсаторов и могут составить согласно нашему опыту и по литературным данным [Л. 17, 22, 23, 24] несколько процентов  $\delta_c = 0,003 \dots 0,03$ . Процесс прогрева после включения может длиться от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Для цепей накала феррорезонансные стабилизаторы могут считаться практически безинерционными, так как длительность  $\tau$  переходного процесса в цепи стабилизированного напряжения при скачкообразном изменении напряжения питающей сети не превосходит 0,04...0,05 sec. [Л. 17, 19]. Не представляет труда получение от

одного и того же стабилизатора нескольких различных напряжений для питания отдельных цепей фотоэлектрического устройства [Л. 24, 32]. Коэффициент полезного действия этих стабилизаторов заметно выше, чем у схем с баррером (0,6...0,8 против 0,3...0,6).

Основной недостаток большинства феррорезонансных стабилизаторов напряжения—сильное искажение формы кривой стабилизованного напряжения, зависящее и от напряжения сети и от величины и характера нагрузки—для стабилизации накала нитей ламп не является существенным. Но другой недостаток феррорезонансных стабилизаторов—зависимость стабилизованного напряжения от частоты питающего напряжения—может повлечь значительное ухудшение практически достижимой стабилизации, так как зависимость стабилизованного напряжения от частоты довольно велика:  $\varphi = 1,5...2,0$ .

Для стабилизации напряжения в цепи фотоэлемента и в анодных и сеточных цепях усилительных ламп в фотоэлектрическом устройстве, предназначенных для питания от сети переменного тока непосредственно, без особого выпрямителя, а с использованием вентиляционных свойств фотоэлементов и электронных или ионных ламп, эффективным может быть только феррорезонансный стабилизатор с синусоидальной кривой стабилизованного напряжения [Л. 21, 33]. В некоторых случаях возможно применение стабилизатора напряжения с электронными лампами [Л. 36]. Все остальные экономически допустимые способы стабилизации не могут обеспечить необходимого постоянства формы кривой стабилизованного напряжения.

При питании цепей фотоэлемента и анодных и сеточных цепей усилительных ламп от отдельного выпрямителя (или нескольких выпрямителей) возможно применение следующих видов стабилизаторов: а) буферные аккумуляторные батареи (после выпрямителя); б) лампы тлеющего разряда (после выпрямителя); в) стабилизаторы напряжения с электронными лампами (как правило, после выпрямителя); г) феррорезонансные стабилизаторы напряжения (перед выпрямителем).

Недостатки аккумуляторов, отмеченные выше применительно к задаче стабилизации накала, оказываются здесь еще более заметными, так что аккумуляторы можно считать применимыми только в лабораторных установках.

Лампы тлеющего разряда [Л. 25, 26, 27] позволяют получить коэффициент стабилизации около [Л. 28]  $\kappa = 10$ ;  $\left(\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = 17 \text{ при } \frac{U_1}{U_2} = \frac{450}{280}\right)$ ,

а при включении через соответственно выбранный баррер [Л. 25, 28] в установившемся режиме  $\kappa \approx 100$ . При каскадном включении [Л. 27, 29] можно получить  $\kappa = 125$  и более, вплоть до  $\kappa = 20\,000$ . Очень высокое значение  $\kappa$  можно получить также при включении ламп тлеющего разряда по мостовой схеме [Л. 38].

Внутреннее сопротивление стабилизаторов напряжения с лампами тлеющего разряда мало, так что  $\zeta = 0,01...0,02$ . Однако, практическое использование высоких значений  $\kappa$  оказывается затруднительным вследствие значительного влияния температуры [Л. 29, 48]  $\frac{\partial U_2}{\partial \theta} = -0,03...-0,04 \text{ V/}^\circ\text{C}$  и наблюдающегося даже при непрерывной работе постепенного изменения стабилизованного напряжения иногда на несколько процентов, заканчивающегося не ранее, чем через месяц непрерывной работы [Л. 29] и сопровождающегося, у некоторых ламп, внезапными изменениями напряжения на 0,1...0,2% [Л. 48], а также из-за изменения напряжения на несколько процентов после каждого перерыва в работе стабилизатора [Л. 29, 48]. Практически можно обеспечить постоянство напряжения с точностью до 2...3% ( $\delta_x = 0,02...0,03$ ), причем стабилизация напряжения в пределах такой точности может считаться безинерционной. Коэффициент полезного действия таких стабилизаторов не превышает 0,5.

Стабилизаторы напряжения с электронными лампами [Л. 30] позволяют получить очень большую точность стабилизации напряжения и исключительно малое внутреннее сопротивление [Л. 37], сочетающиеся с практически совершенной безинерционностью, что делает их пригодными при очень высоких требованиях к качеству стабилизации. Недостатками их можно считать сравнительную сложность, наличие изнашивающихся деталей (электронные лампы) и невысокий к. п. д.

Свойства феррорезонансных стабилизаторов напряжения уже были отмечены выше. В случае применения к питанию анодных и сеточных цепей усилительных ламп в цепи фотоэлемента через выпрямитель следует иметь в виду зависимость формы кривой стабилизованного напряжения от напряжения питающей сети, заставляющую настраивать такой стабилизатор иначе, чем стабилизатор для питания цепей накала. Кроме того, нужно учитывать увеличение длительности неустановившегося режима при внезапных изменениях напряжения питающей сети до 0,2...0,4 сек, обуславливаемое переходными процессами в фильтрах выпрямителей [Л. 23].

Приведенный обзор стабилизаторов позволяет произвести в каждом конкретном случае выбор стабилизатора для фотоэлектрического устройства применительно к предъявляемым к нему требованиям. В наиболее часто встречающемся случае стабилизации напряжения во всех цепях с точностью до 2...3% при колебаниях напряжения сети порядка  $\pm 10...25\%$  самым удобным решением является применение феррорезонансного стабилизатора напряжения, питающего как цепи накала, так и (через выпрямитель) анодные и сеточные цепи электронных и ионных приборов. Серьезными доводами в пользу такого решения являются: применение одного стабили-

затора для стабилизации режима всех цепей фотоэлектрического устройства, сравнительная дешевизна и простота изготовления и регулирования, практически неограниченный срок службы (при правильном выборе напряжения на конденсаторах и теплового режима обмоток), отсутствие потребности в дефицитных сменных деталях (например, барретах, лампах тлеющего разряда), требующихся при других способах стабилизации.

Если к стабилизации напряжения отдельных цепей предъявляются повышенные требования, можно выполнить феррорезонансный стабилизатор с двумя вторичными цепями, одна из которых должна быть настроена на постоянство эффективного значения напряжения (для цепей накала), а другая — на постоянство выпрямленного напряжения.

В тех случаях, когда изменения стабилизированного напряжения, вызываемые изменениями частоты питающей сети, превосходят допустимые пределы, можно идти на усложнение схемы стабилизатора [Л. 17, 22] или же применять дополнительную стабилизацию: в цепях накала — с помощью барретеров, а в цепях постоянного тока высокого напряжения — с помощью ламп тлеющего разряда или при особенно жестких требованиях (например, в лабораторных установках) стабилизаторов с электронными лампами. Пользуясь дополнительными стабилизаторами, следует иметь в виду свойственные им изменения стабилизированного напряжения или тока (см. выше), ограничивающие применение дополнительных стабилизаторов случаями, когда эти изменения оказываются заметно меньшими, чем изменения, могущие иметь место при питании непосредственно от феррорезонансного стабилизатора.

При промышленном применении фотоэлектрических устройств, когда ряд расположенных поблизости станков оснащается однотипными фотоэлектрическими устройствами, может оказаться технически и экономически целесообразным питать несколько фотоэлектрических устройств от общего стабилизатора напряжения. При повышенных требованиях к постоянству стабилизированных напряжений в этом случае может оказаться целесообразным применение несколько усложненных видоизменений феррорезонансного стабилизатора, дающих напряжение, почти не зависящее от нагрузки [Л. 19, 23].

**Основные типы феррорезонансных стабилизаторов напряжения.** Все разнообразие предложенных до настоящего времени и испытанных в работе феррорезонансных стабилизаторов может быть сведено к следующим принципиальным схемам:

1. Последовательное включение насыщенного дросселя и конденсатора; стабилизированное напряжение снимается с дросселя [Л. 17, 20, 31, 34] (рис. 6).

2. Последовательное включение индуктивного сопротивления и феррорезонансного контура, составленного из параллельно соединенных насы-

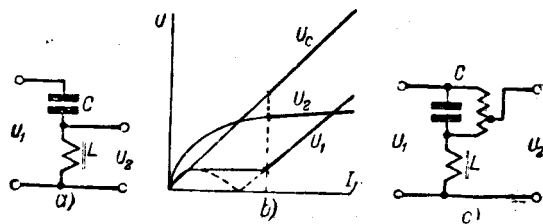


Рис. 6. Стабилизация напряжения посредством насыщенного дросселя, включенного последовательно с конденсатором.

а — принципиальная схема; б — характеристики отдельных элементов и схемы в целом при холостом ходе; жирными линиями отмечены рабочие участки характеристик; в — действительная схема.

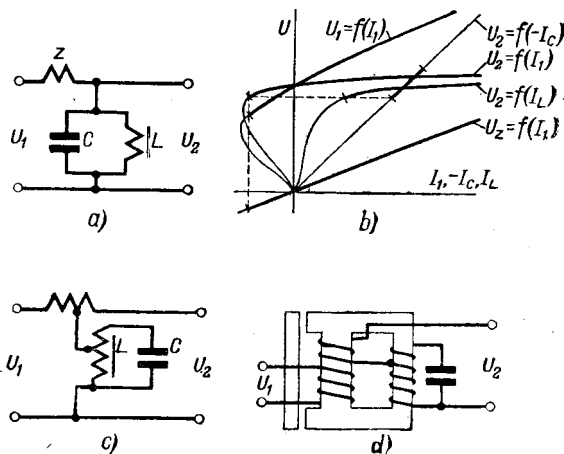


Рис. 7. Стабилизация напряжения посредством феррорезонансного контура с последовательно включенным балластным сопротивлением (феррорезонанс токов).

а — принципиальная схема; б — характеристики отдельных элементов и схемы в целом при холостом ходе; жирными линиями отмечены рабочие участки характеристик; в и д — примеры практического выполнения.

щенного дросселя и конденсатора; стабилизированное напряжение снимается с феррорезонансного контура [Л. 17, 21, 22, 23, 31, 32, 33] (рис. 7).

Вариантом этой схемы являются схемы с трансформатором с большим рассеянием и с частично насыщенным магнитопроводом [Л. 17, 18, 24, 31] (рис. 7, д).

3. Последовательное включение активного или реактивного сопротивления и феррорезонансного контура, составленного из последовательно соединенных насыщенного дросселя специальной конструкции и конденсатора; стабилизированное напряжение снимается с феррорезонансного контура [Л. 19]; в качестве сопротивления, включаемого последовательно с феррорезонансным контуром, применяются феррорезонансный стабилизатор тока [Л. 35], состоящий из параллельно соединенных конденсатора и насыщенного дросселя специальной конструкции (рис. 8).

Несмотря на принципиальное различие (рис. 6, б, 7, б, 8, б) указанных трех схем, стабилизаторы, построенные по этим схемам, практически не отличаются друг от друга в отношении достижимой точности стабилизации, допустимого диапазона изменений напряжения сети, инерционности, к. п. д., коэффициента мощности,

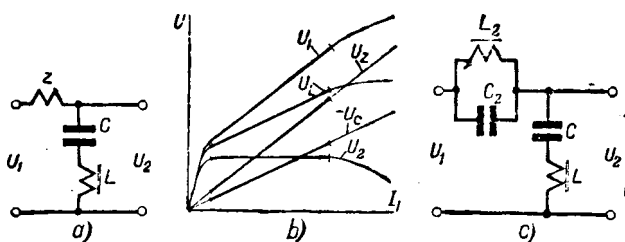


Рис. 8. Стабилизация напряжения посредством феррорезонансного контура с последовательно включенным балластным сопротивлением (феррорезонанс напряжений).

а — принципиальная схема; б — характеристики отдельных элементов и схемы в целом при холостом ходе; жирными линиями отмечены рабочие участки характеристик; с — действительная схема.

формы кривой стабилизованного напряжения, что позволило нам выше при сравнении различных стабилизаторов рассматривать феррорезонансные стабилизаторы как единый тип. Различия в чувствительности к изменениям частоты питающей сети:  $\varphi = (1,5... 1,7)$  у первых двух схем [Л. 17] против  $\varphi = 2$  у третьей [Л. 19] и в расходе активных материалов<sup>1</sup> также не слишком велики. Единственная существенная особенность стабилизаторов по третьей схеме — почти полное отсутствие зависимости стабилизованного напряжения от реактивной нагрузки — в применении к стабилизации напряжения в фотоэлектрических устройствах не имеет большого значения, так как цепи фотоэлектрических устройств и питающих их выпрямителей представляют нагрузку с мало меняющимся в работе коэффициентом мощности, близким к единице.

Для диапазона мощностей, потребляемых фотоэлектрическими устройствами, — от нескольких десятков ватт и до нескольких сот ватт, — наибольшим распространением пользуются в настоящее время стабилизаторы, построенные по второй схеме с (рис. 7) или по ее варианту d (рис. 7). Выбор того или иного решения должен в значительной степени определяться конструктивными соображениями.

• **Заключение.** Задача стабилизации режима в фотоэлектрических устройствах может быть разделена на стабилизацию накала осветительных и усилительных ламп и на стабилизацию напряжения выпрямителей, питающих все остальные цепи.

Единственным видом стабилизатора напряжения, позволяющим разрешить обе задачи с помощью одного стабилизатора, при умеренных требованиях к качеству стабилизации, является феррорезонансный. Наиболее экономное решение, удовлетворяющее практически всем требованиям, среди феррорезонансных стабилизаторов напряжения дают стабилизаторы, у которых стабилизованное напряжение снимается с зажимов феррорезонансного контура, составленного из параллельно соединенных насыщенного дросселя и конденсатора (схемы с и d рис. 7).

<sup>1</sup> По литературным данным [Л. 19, 31, 32] меньший расход материалов дают стабилизаторы по второй принципиальной схеме.

Применение более сложных схем, не обладающих чувствительностью к изменениям нагрузки или частоты питающей сети, может иметь смысл лишь в особых случаях.

### Литература

1. А. П. Иванов. Электрические источники света. ч. I. Лампы накаливания. ГОНТИ, стр. 308 — 320, 1938.
2. K. Henney. Electron Tubes in Industry. 1-е изд. Mc Graw-Hill, стр. 340, 1934, в русском переводе стр. 230 ОНТИ, 1937.
3. K. Henney. Electron Tubes in Industry. 2-е изд. Mc Graw-Hill, стр. 307, рис. 5, стр. 320, рис. 22, 1937.
4. K. Henney. Electron Tubes in Industry. 1-е изд. Mc Graw-Hill, стр. 280, рис. 5, 1934.
5. R. C. Walker, T. M. Lance. Photoelectric Cell Applications. Pitman, стр. 8, рис. 5, 1932.
6. H. J. Reich. Theory and Applications of Electron Tubes. 1-е изд. Mc Graw-Hill, стр. 500, рис. 13 — 5; стр. 501, рис. 13 — 7; стр. 512, рис. 13 — 21, 1939.
7. A. L. Albert. Fundamental Electronics and Vacuum Tubes. Mc Millan Co, стр. 364, рис. 13 — 2; стр. 365, рис. 13 — 3, 1938.
8. H. Simon, R. Suhrmann. Lichtelektrische Zellen und ihre Anwendung. J. Springer, стр. 86, рис. 60; стр. 87, рис. 62; стр. 90, рис. 68, 1932.
9. А. А. Соколов. Кислородно-цезиевые фотоэлементы. Электричество, т. 58, № 12, стр. 11 — 22, рис. 22 — 25, июнь 1937.
10. Л. Д. Брызжев. К расчету стабилизаторов тока и напряжения. Метрология и поверочное дело, т. 1, № 4, стр. 14 — 17, апрель 1939.
11. Приемно-усилительные лампы. Наркомтяжпром, стр. 242 — 245, 1937.
12. W. Meyer. Die elektrische Leitfähigkeit von Uraradioxyd und seine Anwendung als Vorschaltwiderstand, insbesondere für Eisenwasserstoffwiderstände. Zeitschrift für technische Physik, т. 14, № 3, стр. 126 — 128, март 1933.
13. W. Kleinschmidt. Untersuchungen an Eisenwasserstoffwiderständen. Zeitschrift für technische Physik, т. 14, № 10, стр. 385 — 386, октябрь 1934.
14. P. J. Higgs. The Performance of Physical Voltage Regulating Devices. Journal of Scientific Instruments, т. 13, № 4, стр. 114 — 117, апрель 1936.
15. Б. И. Филипович. Авторское свидетельство № 8955.
16. F. G. H. Lewis. An Automatic Voltage Regulator. Proceedings of the Physical Society of London, т. 34, № 1, стр. 17 — 21, 15 декабря 1921.
17. W. Geyger. Selbsttätige Strom und Spannungs-Regelung für technisches Messen, J 062 — 7, 8, 9, 1934 и 1937.
18. E. Friedländer. Der Spannungsgleichhalter, ein verzögerungsarmes, statisches Regelgerät zum Ausgleich von Wechselspannungsschwankungen. Siemens-Zeitschrift, т. 15, № 5, стр. 177 — 181, май 1935.
19. C. M. Summers, T. T. Short. A Static Voltage Regulator Insensitive to Load Power Factor. Electrical Engineering, Transactions Section, т. 61, № 2, стр. 67 — 70, февраль 1942.
20. В. К. Ковалевская. Электромагнитные стабилизаторы напряжения. Известия электропромышленности слабого тока, № 8 — 9, стр. 63 — 74, август — сентябрь 1938.
21. Spannungsgleichhalter mit sinusförmiger Verbraucherspannung. Siemens-Zeitschrift, т. 16, № 9, стр. 379 — 380, сентябрь 1936.
22. А. Г. Никифоров. Электромагнитный стабилизатор напряжения, нечувствительный к колебаниям частоты. Известия электропромышленности слабого тока, № 4 — 5, стр. 72 — 78, апрель — май 1940; № 6, стр. 61 — 62, июнь 1940.
23. F. Harres. Über ein Gleichrichtergerät mit belastungsunabhängiger Verbraucherspannung. ETZ, т. 60, № 3, стр. 889 — 892, 27 июля 1939.
24. М. Г. Лозинский, В. Ф. Тутылев. Новые схемы и конструкции феррорезонансных стабилизаторов напряжения. Вестник электропромышленности, т. 11, № 11 — 12, стр. 8 — 14, ноябрь — декабрь 1942.
25. R. Seidelbach. Das Glimmteiler-Stromversorgungssystem. ETZ, т. 56, № 10, стр. 299 — 302, 7 марта 1935.

26. Газоразрядные приборы. Оборонгиз, стр. 32 и 114—124, 1939.
27. C. Morton. The Application of the Gaseous Discharge Tube to Problems of Voltage Regulation. *Journal of Scientific Instruments*, т. 14, № 5, стр. 161—164, май 1937.
28. Spannungskonstanthaltung durch Glimm-Stabilisatoren. *Bulletin de l'Association Suisse des Électriciens*, т. 31, № 18, стр. 399—400, 6 сентября 1940.
29. H. Gockel. Über die Spannungskonstanz von Stabilisatorröhren bei Dauerbelastung. *Physikalische Zeitschrift*, т. 38, № 2, стр. 65—67, 15 января 1937.
30. F. V. Hunt, R. W. Hickman. On Electronic Voltage Stabilizers. *Review of Scientific Instruments*, т. 10, № 1, стр. 6—21, январь 1939.
31. А. М. Бамдас, Б. В. Беляев, С. Е. Ростковская. Сравнение типов феррорезонансных стабилизаторов и расчет стабилизатора. *Вестник электропромышленности*, т. 15, № 10, стр. 12—15, 1944.
32. R. Miehlich. Über Wirkungsweise und Eigenschaften magnetischer Netzspannungsgleichhalter. *VDE-Fachberichte*, т. 10, стр. 154—156, 1938.
33. A. H. B. Walker. The „Stabilisator“; An Improved A. C. Voltage Stabiliser. *Wireless World*, т. 50, № 11, стр. 339—341, ноябрь 1944.
34. А. Бибергаль, В. Хрущев. Феррорезонансный стабилизатор напряжения. *Заводская лаборатория*, т. 6, № 2, стр. 249—251, февраль 1937.
35. C. M. Summers. A Static Constant-Current Circuit. *Electrical Engineering; Transactions Section*, т. 57, № 11, стр. 636—639, ноябрь 1938.
36. A. Glynn. A Differential Electronic Stabilizer for Alternating Voltages, and Some Applications. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, ч. II, т. 90, № 14, стр. 101—110, апрель 1943.
37. W. R. Hill. Analysis of Voltage-Regulator Operation. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, т. 33, № 1, стр. 38—45, январь 1945.
38. H. Meyer. Netzanschluss mit Glimmstrecken-Spannungsteiler als Batterieersatz. *Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens*, т. 25, № 19, стр. 516—519, 14 сентября 1934.
39. A. V. Eastman. Fundamentals of Vacuum Tubes. 1-е изд. Mc Graw-Hill, стр. 395, рис. 3—11; стр. 396, рис. 6—11, 1937.
40. D. R. Fink. *Engineering Electronics*. 1-е изд. Mc Graw-Hill, стр. 166, рис. 97; стр. 167, рис. 100, 1938.
41. Н. Э. Ритынь. О применении феррорезонансного стабилизатора при фотометрических измерениях. *ЖТФ*, т. 9, № 11, стр. 1032—1033, 1939.
42. С. Ю. Лукьянов. Вакуумные фотоэлементы. *ЖТФ*, т. 13, № 1—2, стр. 1—34, 1943.
43. D. K. Alpern. The Engineering Development of Photo-Voltaic Cells. New-York, стр. 16, 1932.
44. В. В. Дмоховский. Стабилизация напряжения в рентгентехнике. *Достижения в области рентгентехники*, № 3, стр. 38—48, 1933.
45. Б. И. Филипович, А. П. Шорыгин. Исследование автоматического регулятора напряжения для рентгеновских аппаратов. *Технические отчеты Научно-исследовательской лаборатории Московского рентгеновского завода*, 1937.
46. C. H. Humes. Constant-Voltage Control — The New Design Essential. *Instruments*, т. 17, № 2, стр. 85—87, 1944.
47. W. Geyger. Experimentelle Untersuchungen an magnetischen Verstärkern für die Mess- und Regeltechnik. *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken*, т. 20, № 2, стр. 33—47, 1942.
48. G. M. Kirkpatrick. Characteristics of Certain Voltage-Regulator Tubes. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, т. 35, № 5, стр. 485...489, 1947.





# Проблемы катодолюминесценции

Кандидат техн. наук А. В. МОСКВИН

В 1858 г. Плюккер подметил интенсивное свечение поверхности стекла вакуумных трубок под действием разряда. Десять лет спустя Гитторф (1869) и Гольдштейн (1876) приписали обнаруженный эффект действию «катодных лучей» и отнесли свечение

к особому виду люминесценции. Позже причиной его оказалась электронная бомбардировка. Поток свободных электронов в вакууме долго рассматривали как особый вид лучей, имеющих своим началом катод. Этот период наложил отпечаток на терминологию и новому виду свечения было присвоено название «катодолюминесценции».

Свечение под электронным лучом очень распространено. Число известных катодолюминесцирующих соединений почти неограниченно и продолжает с каждым днем увеличиваться. Подобно остальным видам люминесценции, свечение возбуждаемых электронами препаратов может быть характеризовано яркостью, цветом и инерционными свойствами.

Яркость свечения является индивидуальным свойством каждого люминофора, но широко зависит от энергии (ускоряющего напряжения) и числа бомбардирующих электронов (плотности тока). В синтетических препаратах или так называемых «фосфорах» она может достигать высоких значений. На экране современной высоковольтной проекционной трубки мгновенная яркость бегущего пятна оценивается, например, в  $10^5$  sb, что уже превышает яркость кратера обычной дуги.

Цвет свечения, в противоположность яркости, почти не зависит от условий возбуждения. Спектральный состав излучения каждого люминофора строго индивидуален. В виде одной полосы или суммы полос и линий излучение приурочено к определенному участку спектра. Во многих искусственных препаратах путем изменения состава максимум излучения может быть произвольно смещен от ультрафиолетовой через видимую до инфракрасной области. В пределах видимого участка это позволяет получать в катодолюминесценции все цвета с предельно высо-

*Возбуждаемая электронной бомбардировкой люминесценция (катодолюминесценция) широко применяется в телевидении, радиолокации и осциллографической метрике как средство безинерционной трансформации электрических импульсов в световые. Техническая важность перечисленных применений повышает интерес к проблемам катодолюминесценции. Изложена скелетная схема работ, которые должны быть проведены для обеспечения техники высококачественными люминофорами и экранами. Намечены также некоторые чисто научные исследования, необходимые для решения практических задач.*

кой насыщенностью до белого цвета всех оттенков.

Свечение в катодолюминесценции несколько инерционно. В начале возбуждения оно характеризуется определенным периодом разгорания, а по прекращении возбуждения затухает не сразу,

оставляя за собой более или менее длительное послесвечение. Меняя состав люминофора, длительность послесвечения можно варьировать от долей микросекунды до нескольких секунд и даже минут. Помимо особенностей самого люминофора, скорость разгорания и затухания зависит от условий возбуждения.

Малая инерционность свечения и закономерная связь его яркости с возбуждением делают катодолюминесценцию очень удобным индикатором электронного потока. В конце прошлого столетия Гесс (1894) и Браун (1897) использовали катодолюминесценцию для наглядной и количественной регистрации быстротекущих электронных процессов. Трубка Брауна легла в основу современных электронно-лучевых приборов. Яркость и положение пятна на люминесцирующем экране этих приборов так же легко поддаются управлению во времени и пространстве, как сам электронный пучок. Задача в отношении источника света — совершенно неразрешимая обычной оптикой. Преимущества электронно-лучевой трубки как индикатора и измерительного прибора наглядно вытекают из сравнения ее с обычным стрелочным указателем.

1. Инерционность электронно-лучевого индикатора на несколько порядков ниже любого стрелочного прибора. Указатель трубки — светящееся пятно на экране — с исключительной верностью и быстротой следует за изменениями тока или напряжения в изучаемом процессе.

2. В противоположность одномерному движению стрелки, пятно на экране может двигаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях, фиксируя одновременно два параметра процесса.

3. Третью степень свободы дает возможность изменять яркость пятна по току или напряжению. Комбинируя модуляцию яркости с развер-

кой, удается получить в одном приборе три типа информации одновременно.

4. Дальнейшее увеличение числа свобод прибора дает изменение сигнала по цвету модуляции свечения по току, напряжению или системе синхронно вращающихся перед экраном фильтров. Два процесса принимаются в виде двух различных по цвету сигналов; совмещение их в одной точке экрана резко меняет результирующий цвет свечения. Пятно становится, например, белым, если цветные компоненты дополнительные, а сигналы по величине находятся в определенном отношении друг к другу. Высокая чувствительность глаза к цветным оттенкам позволяет осуществить на этом принципе особо точную синхронизацию или сравнение процессов.

5. Применение люминофора с длительным послесвечением позволяет фиксировать на экране не только изменение процесса в данный момент, но и всю его предыдущую историю.

6. За счет стереоскопического эффекта можно сделать изображение на экране рельефным и подчеркнуть, таким образом, положение движущихся объектов.

7. Смещая максимум излучения экрана от ультрафиолетовой до инфракрасной части спектра, можно приспособить индикатор к любому типу приемника. Имеются в виду глаз, фотографическая пластинка и различные фотоэлементы. Последние важны для систем с маскировкой или в телепередаче с разверткой изображения бегущим лучом.

8. Высокая яркость свечения допускает проекцию принимаемого изображения на большой экран. Это облегчает отнесение сигналов к определенным координатам, к плану на местности и разрешает одновременно исключительно важную задачу коллективного телеприема.

9. Число свобод электронно-лучевого измерительного прибора и путей его практического использования почти неограниченно возрастает, если от обычного однолучевого осциллографа перейти к приборам с двумя и большим числом одновременно работающих электронных пучков.

Приведенное сравнение далеко не исчерпывает всех преимуществ электронно-лучевого индикатора как измерительного прибора, но наглядно показывает разносторонность и изящество его работы. Неудивительно, что трубка Брауна в ее современном оформлении получила столь широкое и разнообразное применение. В большом числе конструктивных модификаций современные электронно-лучевые трубки обслуживают задачи метрики (катодные осциллографы), черно-белое и цветное телевидение (передающие трубки и кинескопы) и работу различных радиолокационных систем. Культурное и техническое значение телевидения, ставшего возможным благодаря разработке катодолуминизирующего экрана, не может быть преувеличено. Не менее важно развитие и практическая реализация способов радиолокации. Область ее применения особенно широка — от средств нападения и защиты в военной обстановке

до автоматической навигации или метеорологических и астрономических наблюдений в условиях мирного времени.

Помимо осциллографических трубок, эффект катодолуминесценции нашел применение в разнообразных приборах из других областей техники. Достаточно упомянуть экраны в электронной микроскопии, специальные источники света, различные индикаторы, электронно-оптические преобразователи и т. д. С помощью преобразователей, например, на особенностях электронной оптики удается решать задачи, уже непосильные обычной световой оптике.

Перечисленные приборы, прямо или косвенно основанные на свечении люминофоров под электронной бомбардировкой, принадлежат к числу новинок техники. Это блестящий синтез науки и инженерного искусства последних десятилетий. Эксплуатационные особенности приборов определяют современные требования к катодолуминесценции. Одновременно с этим они очерчивают объем научно-исследовательской работы, которую предстоит провести для удовлетворения запросов техники. Максимум требований падает, естественно, на сам люминофор, как определенную физико-химическую систему, трансформирующую энергию электронного луча в оптическое излучение. Требования эти относятся к: 1) яркости; 2) спектральному составу; 3) инерционным свойствам свечения; 4) к остальным физико-химическим свойствам, которые необходимо учитывать в специфике применения катодолуминофоров.

Яркость свечения во всех случаях должна быть максимальной при крутом ходе зависимости ее от плотности тока или ускоряющего напряжения. Крутизна хода определяет контрастность принимаемых на экране сигналов. По тем же соображениям, чтобы не ограничивать глубины модуляции сигнала, желательно иметь минимальный эффект насыщения яркости по току и малую зависимость свечения от температуры. Последнее важно в катодолуминесценции в связи с высоким термическим эффектом электронной бомбардировки. При высокой яркости свечения желателен, конечно, и высокий коэффициент отдачи, определяемый как отношение мощности получаемого потока лучистой энергии к подводимой мощности возбуждения. Этот коэффициент должен быть высок, однако, только для электронного возбуждения. В ряде люминофоров оптическое возбуждение нежелательно или область его должна быть отнесена в сторону короткого ультрафиолета, чтобы экран можно было использовать в условиях высокой общей засветки или люминесцентного освещения (кабины самолетов).

Требования к спектральному составу еще более широки и разнообразны. Максимум спектральной кривой желательно иметь в любом участке спектра — от ультрафиолетовой до инфракрасной области. Излучение за пределами видимой области необходимо при фотографической регистрации спектров и в работе с фото-

элементами. Цветные катодолуминофоры с высоким коэффициентом насыщенности по цвету нужны в цветном телевидении, в экранах дневного видения, предназначенных для работы в условиях высокого общего освещения, и в некоторых специальных экранах. Примером последних служит экран насыщенно красного цвета, который не нарушает темновой адаптации глаза и не мешает работающему вести наблюдения за посторонними объектами. В подавляющем большинстве современных приборов цвет экрана не должен зависеть от условий возбуждения и температуры люминофора.

Разгорание люминофора, охватывающее период от начала возбуждения до наступления полной яркости, должно быть возможно коротким и не ограничивать яркости экрана при кратковременных сигналах, длительность которых иногда не превышает долей микросекунды. Длительность затухания, наоборот, необходимо иметь от долей микросекунды до минуты при очень крутом, а иногда возможно пологом спаде яркости во времени. В послесвечении люминофоров нежелателен слабый длительно светящийся «хвост». Яркость его мала для непосредственного использования, но создает на экране общий фон, который понижает контрастность изображения и пороговую различимость приборов.

Учитывая условия массового производства, физико-химические свойства люминофора не должны осложнять вакуумной технологии трубки. Сюда относятся: простота способов нанесения экрана, возможность прогрева до полного обезгаживания прибора, достаточная стойкость к влажности, окислению, парам металлов и остаточным газам трубки, чтобы экран не страдал при активации катода или формировании фотокатода, если последний совмещен в одном приборе с экраном.

Помимо свойств люминофора, в работе прибора одинаково важны и свойства экрана. Они определяют условия возбуждения и использования получаемого светового потока, а соответственно к. п. д. самого эффекта. Метод нанесения экрана должен гарантировать достаточную механическую прочность покрытия, равномерность его по поверхности и точную дозировку толщины слоя. Дозировка определяет величину светоотдачи, направленность светового потока в пространстве и разрешающую способность экрана. Необходимым условием работы служит достаточная проводимость экрана или хорошая диатронная характеристика. В противном случае, при работе на высоких напряжениях экран будет терять в яркости и разрешающей способности за счет аккумулирующихся на нем отрицательных зарядов. Материал экрана во время работы не должен давать летучих продуктов, которые отравляли бы катод и сокращали срок службы трубки. Для осциллографических трубок обычного типа срок службы экрана оценивается примерно в 1000 h и в 300—400 h для трубок с повышенной мощностью возбуждения типа проекционных.

Среди исследовательских работ по катодолуминесценции первое место занимает получение самих люминофоров. Эта работа на практике должна быть расчленена на две самостоятельные задачи. В первую входит массовое изготовление уже разработанных люминофоров, а во вторую — разработка новых соединений с улучшенными физико-химическими и люминесцентными свойствами.

Важность первой задачи вполне понятна и остро ощущается техникой. В лабораториях получен широкий контингент люминофоров, пригодных для принятого типа трубок и для разработки принципиально новых приборов. В силу особенностей лабораторного изготовления эти люминофоры не обладают, однако, необходимой стандартностью и недоступны широкой технике. Разрыв между результатами исследовательской работы и производством объясняется отчасти трудностью получения высококачественных катодолуминофоров в широком производственном масштабе. Люминофор представляет собой весьма сложную физико-химическую систему, чрезвычайно чувствительную к изменениям состава и структурным особенностям. Наличие в качестве примесей миллионных долей таких металлов-космополитов, как железо, медь, никель и кобальт, существенно понижает яркость свечения или вообще меняет люминесцентные свойства препарата. Из-за высокой мощности возбуждения влияние примесей в катодолуминесценции сказывается при меньшей их концентрации, чем в случае возбуждения люминесценции светом. В силу этого получение хороших катодолуминофоров более сложно, чем обычных фотолуминофоров, производство которых в первом приближении освоено промышленностью. Ряд инертных с точки зрения фотолуминесценции примесей совершенно недопустим в работе с электронным лучом. Сюда относятся щелочи, щелочные земели, анионы кислородных и галогидных кислот. Катодолуминофор в процессе работы испытывает необратимые химические изменения, которые губят люминесценцию, отравляют катод и сокращают срок службы трубки. Скорость таких вторичных реакций, вызванных большой мощностью возбуждения, ионной бомбардировкой и большим термическим эффектом электронной бомбардировки, катастрофически возрастает при наличии в материале посторонних примесей.

Для получения высококачественных катодолуминофоров необходима, таким образом, исключительная чистота всего технологического процесса. В распоряжении химика существуют сейчас точнейшие методы разделения веществ и изоляции отдельных соединений. С помощью их теоретически возможно получение предельно чистых препаратов; на практике, однако, гораздо легче освободить люминофор от того или другого компонента, чем предохранить его от случайных загрязнений в процессе работы. Главным источником подобных загрязнений является окружающая обстановка и, как это ни обидно звучит для химика, — руки самого экспериментатора.

При разработанных способах очистки сырья и синтеза люминофоров борьба со случайными загрязнениями может идти двумя путями. В первом из них рабочее помещение должно быть доведено до состояния идеальной чистоты, которая в смысле люминесцентной «стерильности» далеко оставляет за собой чистоту хирургического зала. Во втором способе вся операция очистки и приготовление окончательного соединения протекают в системе цельнопаянных стеклянных сосудов. Материал не соприкасается с руками экспериментатора и окружающей атмосферой до получения окончательного твердого продукта, который труднее загрязнить, чем промежуточные растворы. Оба способа синтеза на практике дают одинаково хорошие результаты. В массовом производстве, однако, предпочтение должно быть безусловно, отдано работе в замкнутой системе.

Организация промышленного производства катодолуминофоров обеспечит технику вполне стандартными и высококачественными материалами. Повышение стандартности при этом вполне понятно; повышение качества, наоборот, в связи с приведенными выше требованиями к чистоте звучит несколько парадоксально. Казалось бы, в лабораторных условиях легче получить безукоризненно чистые, а следовательно, и лучшие по качеству люминофоры. Опыт показывает, однако, преимущество производственных люминофоров перед изготовленными в небольших навесках лабораторными образцами. При прочих равных условиях в работе с большими количествами уменьшается поверхность соприкосновения обрабатываемого материала со стенками сосудов и атмосферой, а вместе с этим и вероятность вторичного загрязнения.

В настоящее время существуют катодолуминофоры с исключительно высокой яркостью и отдачей, произвольно регулируемым спектральным составом и очень разнообразной характеристикой затухания. Нет, однако, соединений, в которых все эти качества комбинировались бы одновременно. На практике для решения каждой конкретной задачи приходится выбирать люминофор по одному из параметров, жертвуя в угоду ему остальными люминесцентными свойствами. В конечном счете, существующие катодолуминофоры далеко не удовлетворяют запросам даже современной техники, не говоря о работах дальнего прицела. Разработка новых катодолуминофоров представляет поэтому вторую из очередных задач. Она решается усовершенствованием старых и поиском новых катодолуминесцирующих соединений.

Усовершенствование уже известных люминофоров возможно за счет изменения их кристаллической структуры, более глубокой очистки или новых способов активации и часто дает положительные результаты. Изменением условий термической обработки можно значительно уменьшить размер зерна и повысить разрешающую способность экрана (силикаты, сульфиды, сульфид-селениды), выделить кристаллические модификации, наиболее выгодные для работы на высоком

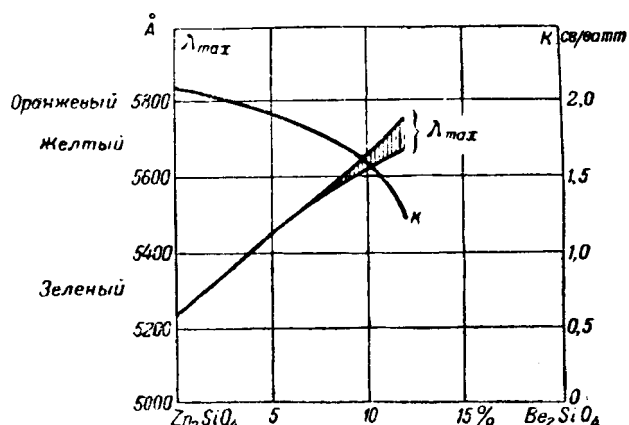


Рис. 1. Изменение световой эффективности  $K$  и цвета свечения  $\lambda_{\max}$  активированных марганцем цинк-бериллий силикатов в зависимости от их состава.

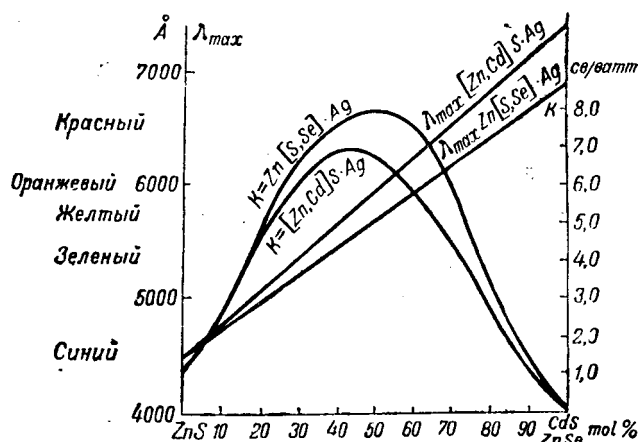


Рис. 2. Изменение световой эффективности  $K$  и цвета свечения  $\lambda_{\max}$  активированных серебром цинк-кадмий сульфидов и цинк-сульфид-селенидов в зависимости от их состава.

или очень низком напряжении (сфалерит и вурцит в сульфидах), а также увеличить крутизну кривой яркость — напряжение в области малых токов (виллемит). Последнее существенно улучшает контрастность изображения на экранах, работающих при малой плотности тока. Тщательная очистка виллемита увеличивает его стойкость и уничтожает длительный хвост в после-свечении. Двукратная активация, наоборот, позволяет менять длительность основного этапа в затухании и цвет свечения.

Усовершенствования подобного рода позволяют приспособить люминофор по одному из его параметров к конкретным эксплуатационным условиям, но редко дают большой выигрыш в яркости или отдаче. Последнего можно ожидать преимущественно за счет новых люминофоров. Естественно, что поиски их должны занимать ведущее место в работе.

На первом этапе технического применения катодолуминесценции наилучшим люминофором считался виллемит со световой отдачей 1,6—1,8 свечей на ватт. В последующем его световая отдача была повышена до 2,1. Несмотря на это, виллемит был полностью вытеснен из практики более

яркими сульфидами, светоотдача которых достигает 6—6,5 свечей на ватт при почти неограниченной возможности произвольного изменения цвета. В последнее время сульфиды в свою очередь вытесняются так называемыми сульфидселенидами. При одинаково широкой возможности изменения цвета светоотдача новых люминофоров достигает 8 свечей на ватт, что делает практически возможной проекцию изображения на большой экран. Дополнительным преимуществом сульфидселенидов является хорошая динактронная способность, которая допускает работу на высоких напряжениях. Без заметного накопления отрицательных зарядов на экране потенциал его при новых люминофорах можно повысить до 25—30 kV по сравнению с 12 kV для сульфидов или 6,5 kV для силикатов.

За счет новых катодолюминофоров большой сдвиг был сделан и по остальным свойствам свечения. Люминофором с наиболее коротким затуханием долгое время считался вольфрамат кальция. Спадение его яркости до нескольких процентов начальной величины занимает  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $6 \cdot 10^{-6}$  sec. при особо тщательной очистке. На смену вольфрамата кальция пришли чистая окись цинка, активированный сурьмой сульфид магния, активированная церием окись кальция и селенид цинка. Длительность послесвечения их настолько мала, что допускает глубокую модуляцию сигнала при телепередаче с разверткой бегущим лучом. Малая инерционность свечения и разнообразие цвета делают возможным применение их в цветном телевидении по аддитивному способу. В качестве недавно появившихся катодолюминофоров с исключительно затянутым затуханием могут быть названы активированный марганцем фторид магния и активированный диспрозием метафосфат кальция.

Приведенных примеров достаточно, чтобы по достоинству оценить важность поиска новых катодолюминофоров. Эти поиски, однако, вряд ли дадут надежные и быстрые результаты, если не будут ориентированы по наиболее обещающим направлениям. Для этого необходимо провести большую предварительную работу по выяснению особенностей катодолуминесценции и связи ее с физико-химическими свойствами люминофора. К числу последних относится химический состав трегера, работа отдельных и комбинированных друг с другом активаторов, выгодный для катодолуминесценции тип кристаллической решетки, роль дефектов структуры и т. д. Часть подобных исследований уже проведена в фотолюминесценции; выводы этих наблюдений с известной огоркой могут быть перенесены на возбуждение электронным лучом.

Отдельным направлением в поиске новых катодолюминофоров является исследование более стойких соединений, яркость которых может быть увеличена за счет мощности возбуждения. Большая вероятность необратимых химических реакций, разрушающих экран при электронной и ионной бомбардировке, делает вопрос о стойких люминофорах особенно важным. В этом отношении

желательно изучить люминесценцию свободных окислов, алюминатов, нитридов, боридов и карбидов. Три последних группы соединений представляют большой интерес, но трудность получения в достаточно чистом виде тормозит пока их оценку.

Люминесцентные свойства экрана и срок его службы сильно зависят от условий возбуждения. Изучение количественной роли этих условий открывает новые пути для продвижения катодолуминесценции в технику. Увеличение яркости экрана за счет возбуждения возможно пока только повышением ускоряющего напряжения. Игра на плотности тока ограничена эффектом насыщения, который присущ всем катодолюминофорам и с трудом поддается регулировке в процессе изготовления. При работе на высоких напряжениях неизбежно встает вопрос об улучшении динактронных свойств экрана, проводящих покрытиях и подложках, чтобы избежать аккумуляции отрицательного заряда и приблизить потенциал экрана к потенциалу ускоряющего электрода. Самым надежным способом устранения зарядов является металлизация обращенной к лучу поверхности экрана. Металлический слой дополнительно повышает яркость за счет зеркального отражения светового потока в сторону наблюдателя. Способ вполне оправдывает себя при работе со стационарным лучом малой плотности; мощный развернутый луч быстро нарушает сплошность покрытия и срок службы металлизированного экрана в проекционных трубках оказывается, например, слишком малым. Единственно надежным путем удаления зарядов в них остается динактронный эффект самого экрана. Введение сульфидселенидов частично разрешило эту задачу.

Изменение условий возбуждения в двукратно активированных люминофорах вызывает своеобразное перераспределение освобождаемой энергии между обоими типами излучающих атомов. Это дает принципиальную возможность модуляции цвета по току или напряжению, что оказывается полезным в ряде случаев применения.

Условия возбуждения оказывают большое влияние на ход разгорания и затухания катодолюминофора. Скорость разгорания заметно возрастает с увеличением плотности тока; при переходе к коротким возбуждающим импульсам, когда результирующая яркость экрана может быть ограничена периодом разгорания, необходимо увеличивать силу тока пучка. Период затухания (и разгорания) можно сократить повышением температуры экрана. На практике путь этот мало надежен, так как заметное увеличение скорости затухания обычно совпадает с началом температурного гашения яркости в момент возбуждения. Гораздо выгоднее передача сигнала на несущей частоте, уже использованная в ряде передающих систем, но еще недостаточно изученная. При работе на прерывистом возбуждении необходимо учитывать интегрирующий эффект многих экранов.

Условия возбуждения играют особенно боль

шую роль в процессах временного утомления и необратимого выгорания экрана. Комплекс относящихся сюда явлений почти не затронут систематическими исследованиями, а практическое значение их очень велико. Достаточно указать, что срок службы сульфидного экрана в трубках осциллографического типа падает с 1 000 до 200 и даже 100 h при переходе к проекционным экранам с большой мощностью возбуждения. Необходимо установить природу протекающих в люминофоре изменений и выяснить их зависимость от теплового эффекта электронной и ионной бомбардировки. Для этого нужны систематические испытания на срок службы в сочетании с анализом экранов и масс спектрографическим исследованием остаточных газов трубки.

При изучении роли условий возбуждения отдельной задачей стоит разработка способов количественной оценки люминофоров и экранов. Сюда относятся измерения светотдачи, разгорания и затухания, стойкости, разрешающей способности и динактронной характеристики. Величина светотдачи с экономической точки зрения не имеет большого значения, но способ измерения ее важен для сравнения друг с другом отдельных катодолюминофоров. Отсутствие установившегося стандарта в определении светотдачи делает наблюдения различных авторов почти несравнимыми друг с другом. В еще большей степени это справедливо в отношении характеристик разгорания и затухания, количественная оценка которых особенно важна в практическом применении люминофоров.

Для сохранения свойств люминофора в конструкции трубок центральное место занимает борьба с отрицательным зарядом экрана, оптимальные условия отвода тепла и экранировка люминофора от непосредственной ионной бомбардировки. Разработка способов нанесения экранов имеет в виду механическую прочность покрытия, максимальную яркость, разрешающую способность и срок службы. Большая механическая прочность экрана необходима в трубках с высоким напряжением, в испытывающих быстрое изменение скорости мобильных установках и в установках с частой сменой вакуума (электронные микроскопы). Применение биндера (связки) для закрепления слоя люминофора обычно ведет к понижению яркости и срока службы. Нанесенный без биндера сульфидный экран работает, например, почти в полтора раза дольше нанесенного с помощью щелочных соединений. Подбор связующего материала представляет поэтому большую сложность. Он используется еще обычно как защитный коллоид против сбивания зерен люминофора в хлопья. Особняком стоит задача получения мелкоструктурных экранов для элект-

тронной микроскопии и других приборов, где экран рассматривается с помощью увеличивающей оптики. Это повело к разработке экранов из отдельных монокристаллов, сплавленных или сцементированных слоев с субмикроскопическими размерами слагающих кристалликов.

Задачи чисто научных и теоретических исследований более или менее общие для всех видов люминесценции и не нуждаются в детальном разборе. Корпускулярный характер, чисто поверхностное поглощение и высокая мощность возбуждения придают катодолюминесценции ряд специфических особенностей. Размен энергии и кинетика всего процесса оказываются отличными от остальных видов люминесценции. Для правильного понимания механизма свечения необходимо установить более точные взаимоотношения бомбардирующих электронов с электронной плазмой кристалла, действительную глубину проникновения электронов в толщу люминофора и эффективный радиус их действия. При этом следует учесть роль возникающих при бомбардировке потенциалов, локального перегрева и поверхностей раздела, которые оказывают существенное влияние на баланс энергии в катодолюминофоре. При толковании механизма катодолюминесценции недостаточно чисто формальных энергетических моделей. Особенности поглощения и транспортировки энергии в кристалле требуют отхода в сторону более конкретных корпускулярно-химических представлений.

Приведенные примеры отдельных направлений в работе дают только скелет предстоящей задачи. Они наглядно показывают, однако, всю сложность исследований, в которых тесно переплетаются вопросы физики, химии, вакуумной техники и смежных с ними дисциплин. Для всестороннего освещения катодолюминесценции и успешного внедрения ее в технику необходимы координированные усилия научных работников и инженеров на производстве.

#### Литература

1. R. G. Hopkinson, Journ. Inst. El. Eng., т. 93, стр. 779, 795, 808, 1946.
2. H. W. Leverenz, RCA Review, т. 7, стр. 199, 1946.
3. S. T. Martin, L. B. Headrick, Journ. Appl. Phys., т. 10, стр. 116, 1939.
4. А. В. Москвин, ИЭСТ, № 6, стр. 52, 1941; Изв. АН СССР, серия физ., т. 9, стр. 429, 1945.
5. W. B. Nottingham et al., Journ. Appl. Phys., т. 8, стр. 762, 1937; т. 10, стр. 73, 335, 1939.
6. Н. Ф. Риль, Люминесценция. Гостехиздат, 1946.
7. A. Schleede, B. Bartels, Z. techn. Phys., т. 19, стр. 364, 1938; Telefunken Harsmitt, т. 20, стр. 104, 1939.
8. J. W. Strange et al., Tr. Farad. Soc., т. 35, стр. 95, 1939; Proc. Phys. Soc., т. 55, стр. 364, 1943; т. 58, стр. 369, 1946.



# К теории расчета индуктивности рассеяния трансформаторов

Доктор техн. наук, проф. Г. Н. ПЕТРОВ

По расчету индуктивности рассеяния трансформаторов существует весьма обширная литература. Разработаны методы, позволяющие определять индуктивность рассеяния как в простых, так и в сложных случаях. Однако, эти методы, имея свои несомненные достоинства, обладают рядом недостатков. Некоторые из них недостаточно общи [Л. 1, 5, 7], некоторые — ненаглядны и сложны [Л. 8, 12], другие, хотя и обладают достаточной общностью и внешней простотой, приводят к слишком кропотливым вычислениям, что затрудняет их практическое использование [Л. 3, 4].

Если размещение обмоток на стержнях трансформатора имеет регулярный характер, например, в случаях чередующихся обмоток, хорошие результаты дает метод, разработанный В. Роговским [Л. 1] и развитый Е. Г. Марквардтом [Л. 7]. При нерегулярном размещении обмоток, наиболее часто встречающемся на практике, метод В. Роговского не дает возможности получить общие и простые приемы расчета. Е. Г. Марквардтом [Л. 7] и Э. А. Манькиным [Л. 5] были сделаны попытки применить метод В. Роговского для расчета индуктивности рассеяния в этих случаях, однако полученные ими результаты пригодны лишь для определенной категории обмоток и не решают задачи в целом.

В настоящей работе делается попытка дальнейшего развития теории расчета индуктивности рассеяния обмоток трансформатора при нерегулярном, произвольном размещении их на стержне. В основу работы кладется метод средних гео-

Метод средних геометрических расстояний позволяет во многих случаях определить индуктивность рассеяния обмоток трансформаторов. При этом расчеты получаются достаточно простыми. Статья является дальнейшим развитием работ автора по данному вопросу.

метрических расстояний, предложенный К. Максвеллом [Л. 9].

Согласно этому методу, как было показано в предыдущих работах ав-

тора [Л. 3], индуктивность рассеяния обмоток с равномерно распределенными ампервитками в сечении (рис. 1) может быть выражена формулой

$$L = 2 \cdot 10^{-9} \omega^2 c \ln \frac{k_c g_{12}^2}{g_1 g_2} H, \quad (1)$$

где  $\omega$  — число витков, к которому отнесена индуктивность;

$c$  — средняя длина витков в сантиметрах;

$g_1, g_2$  — среднее геометрическое расстояние сечений обмоток 1 и 2 от самих себя;

$g_{12}$  — среднее геометрическое расстояние между сечениями обмоток 1 и 2;

$k_c$  — коэффициент, учитывающий влияние стального стержня на индуктивность рассеяния.

Формула (1) выведена в предположении плоскопараллельно магнитного поля. Это допущение, как показывают многочисленные эксперименты и расчеты [Л. 6], не приводит к неточностям, недопустимым в практических расчетах.

Средние геометрические расстояния определяются в общем случае из равенств (рис. 2):

$$\ln g_1 = \frac{1}{S_1^2} \int_{S_1} \int_{S_1} \ln r_{m_1 n_1} dS_1 dS_1, \quad (2)$$

$$\ln g_2 = \frac{1}{S_2^2} \int_{S_2} \int_{S_2} \ln r_{m_2 n_2} dS_2 dS_2, \quad (3)$$

$$\ln g_{12} = \frac{1}{S_1 S_2} \int_{S_1} \int_{S_2} \ln r_{m_1 n_2} dS_1 dS_2. \quad (4)$$

Здесь  $S_1$  и  $S_2$  — площади соответствующих сечений обмоток;

$r_{mn}$  — расстояния между двумя элементами  $m$  и  $n$  сечений.

При интегрировании элементы  $m$  и  $n$  занимают все возможные положения в пределах соответствующих сечений.

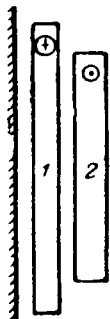


Рис. 1.

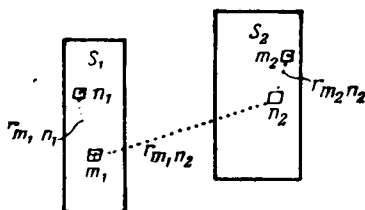


Рис. 2.



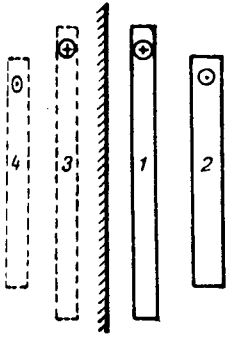


Рис. 3.

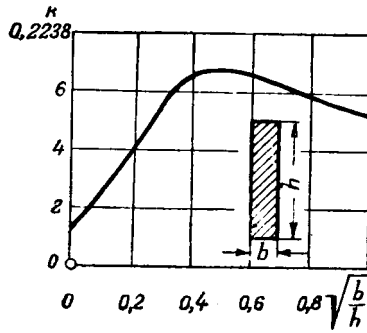


Рис. 4.

Коэффициент  $k_c$  в формуле (1) может быть найден [Л. 4] методом зеркальных изображений (рис. 3)

$$k_c = \frac{g_{14}^2}{g_{18} g_{24}}. \quad (5)$$

По своему внешнему виду формула (1) достаточно проста и обнимает любые случаи взаимного расположения обмоток 1 и 2 на стержне. Трудности при пользовании этой формулой возникают только при определении значений средних геометрических расстояний.

Как показали Роза и Зумек [Л. 3], вычисление среднего геометрического расстояния прямоугольного сечения от самого себя по формулам (2) и (3) может быть сведено к элементарной операции определения полупериметра сечения

$$g = (h + b) k, \quad (6)$$

где  $h$  и  $b$  — стороны прямоугольника (рис. 4);

$k$  — коэффициент, равный в среднем 0,2235. Четвертый десятичный знак коэффициента  $k$  зависит от отношения  $\frac{b}{h}$ , как это видно из рис. 4, но при практических расчетах можно полагать во всех случаях  $k = 0,2235$ .

Таким образом, первая часть задачи решается легко. Покажем теперь, как могут быть вычислены  $g_{12}$  и  $k_c$ .

Рассмотрим общий случай расположения обмоток, представленный на рис. 5. Построим вспомогательные прямоугольники 3, 4, 5, 6.

Исходя из определения понятия среднего геометрического расстояния, легко доказать (приложение 1), что

$$g_{12} = \frac{g_{AB}^{\alpha} g_{CD}^{\beta}}{g_{EF}^{\gamma} g_{GH}^{\delta}}. \quad (7)$$

Здесь сечение  $A$  соответствует суммарному прямоугольнику  $(1+3+5)$ , сечение  $B$  — суммарному прямоугольнику  $(2+4+6)$ , причем оба прямоугольных сечения  $A$  и  $B$  имеют общую высоту  $h_a = h_1 + h_2 + h_0$ ; показатель степени  $\alpha = \frac{h_a^2}{2h_1 h_2}$ . Сечения  $C$  и  $D$  соответствуют прямоугольникам 3 и 4, имеющим общую высоту  $h_b = h_0$ , причем  $\beta = \frac{h_0^2}{2h_1 h_2}$ . Сечения  $E$  и  $F$  соответствуют прямоугольникам  $(1+3)$  и  $(4+6)$ , имеющим общую

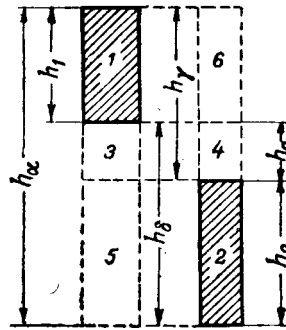


Рис. 5.

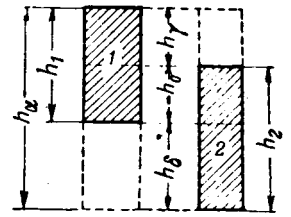


Рис. 6.

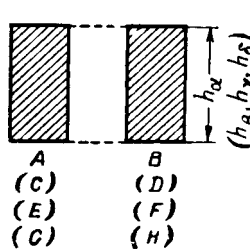
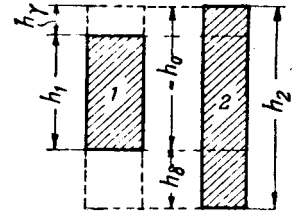


Рис. 7.

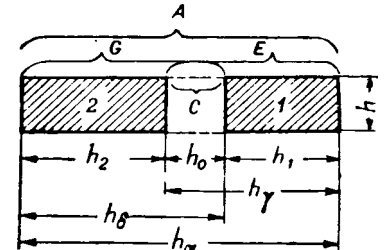


Рис. 8.

высоту  $h_\gamma = h_1 + h_0$ , причем  $\gamma = \frac{h_\gamma^2}{2h_1 h_2}$ . Сечения  $G$  и  $H$  соответствуют прямоугольникам  $(3+5)$  и  $(2+4)$ , имеющих общую высоту  $h_\delta = h_2 + h_0$ , причем  $\delta = \frac{h_\delta^2}{2h_1 h_2}$ .

Если обмотки трансформатора сдвинуты так, как показано на рис. 6, то формула (7) также остается справедливой [Л. 6], только в этом случае величина  $h_0$  становится отрицательной.

Если  $h_b = h_0 = 0$  или  $h_\gamma = 0$ , или  $h_\delta = 0$ , то соответствующие члены в числителе и знаменателе формулы (7) обращаются в 1. Следовательно, расчет по формуле (7) сводится к четырех- или трехкратному определению среднего геометрического расстояния между прямоугольными сечениями, имеющими одинаковые высоты, равные соответственно  $h_a$ ,  $h_b$ ,  $h_\gamma$  и  $h_\delta$  (рис. 7).

Эта последняя задача может быть в свою очередь решена достаточно просто. Допустим, что ширина обмоток 1 и 2 (рис. 5) одинакова. Совместим сечение 2 с сечением 5 и сечение 6 с сечением 1. Тогда формула (7) примет вид:

$$g_{12} = \frac{g_A^{\alpha} g_C^{\beta}}{g_E^{\gamma} g_G^{\delta}}, \quad (8)$$

где в данном случае  $g_A$ ,  $g_C$ ,  $g_E$ ,  $g_G$  — средние геометрические расстояния соответствующих прямоугольных сечений от самих себя (рис. 8), определяемые по элементарной формуле (6). Для более удобного сопоставления рис. 7 и 8 сечения



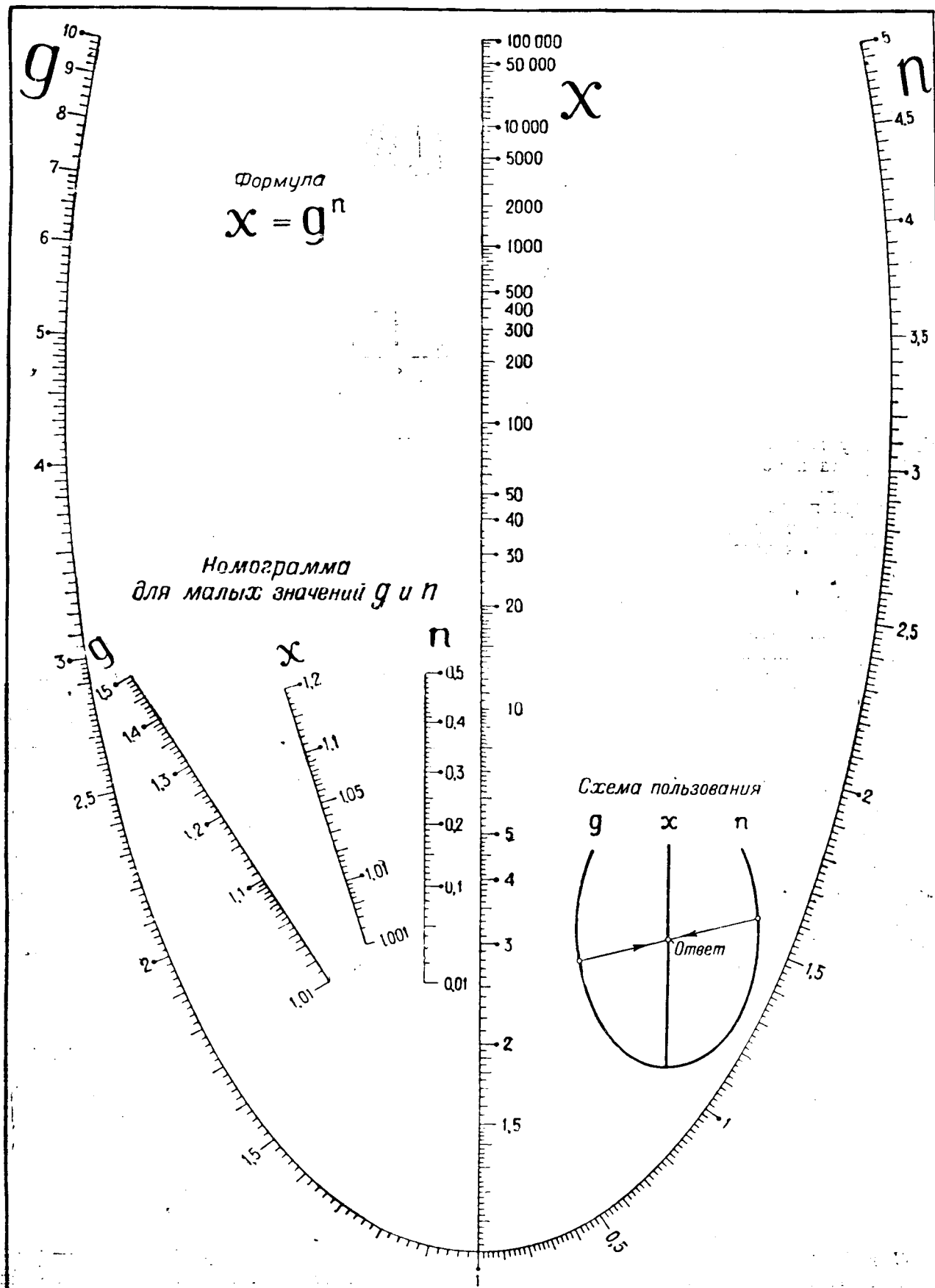


Рис. 9.

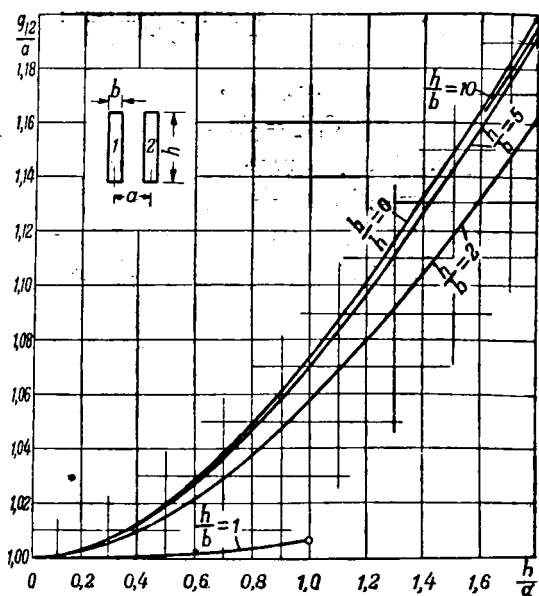


Рис. 10.

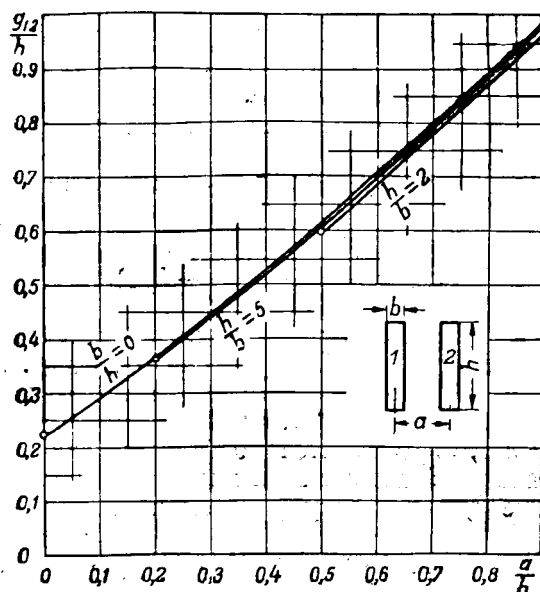


Рис. 11.

на рис. 8 размещены горизонтально, причем размеры  $h_a, h_b, h_c, h_d$  рис. 7 соответствуют размеру  $h$  рис. 8. Таким образом, определение среднего геометрического расстояния между двумя прямоугольными сечениями, произвольно сдвинутыми, приводится с помощью формул (7) и (8) к определению средних геометрических расстояний ряда прямоугольных сечений от самих себя.

Техника расчета при этом сводится к однообразным операциям: определения по формуле (6) соответствующих значений  $g$  и возведения этих величин в заданную степень. Для облегчения этих расчетов может служить номограмма, приведенная на рис. 9<sup>1</sup>. При пользовании номограммой следует иметь в виду (приложение 1), что  $(\gamma + \delta) - (\gamma + \delta) = 1$ . Поэтому для удобства расчета значения всех величин  $g$ , входящих в числитель и знаменатель формул (7) и (8), можно умножать или делить на любое число (например 10, 100 и т. д.), делая или умножая на то же число итоговое значение  $g_{12}$ . Расчет по формулам (7) и (8) без логарифмирования часто бывает более прост. Весьма часто приходится пользоваться формулой (8), когда  $h_1 = h_2$  и  $g_E^2 = g_G^2$ .

В этом случае существенное облегчение могут дать кривые, приведенные на рис. 10, 11, 12 [Л. 10].

Пример расчета рассеяния обмоток приведен в приложении 2.

В случае, если ампервитки распределены в сечении обмотки неравномерно, приведенные выше приемы расчета не могут дать правильных результатов. В этих случаях расчет рассеяния несколько усложняется.

Разобьем обмотку на части, последовательно соединенные между собой, в пределах которых ампервитки распределены в сечении равномерно

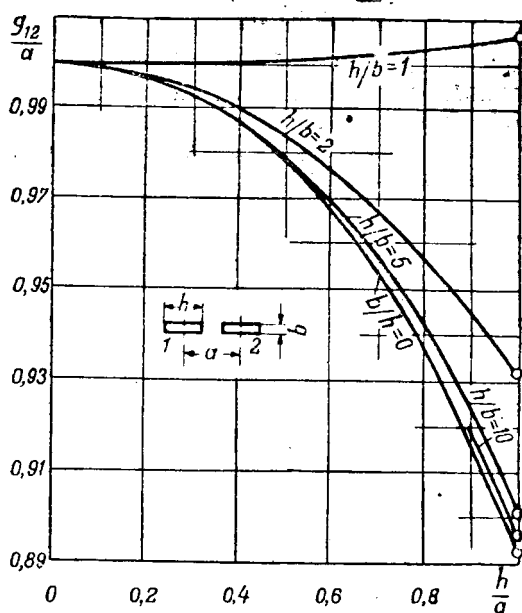


Рис. 12.

(рис. 13). Обозначим части первичной обмотки последовательным рядом нечетных чисел, а части вторичной обмотки — соответственно четными числами.

Можно доказать, что в этом случае индуктивность рассеяния обмоток, приведенная к числу витков всей первичной обмотки ( $w_1 + w_3 + w_5 + \dots$ ) будет равна [Л. 3]:

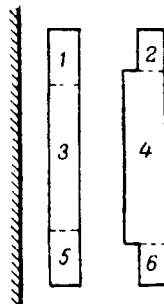


Рис. 13.

$$L = k_3 L_3 + k_5 L_5 + \dots + k_0 (k_2 L_2 + k_4 L_4 + \dots), \quad (9)$$

где для любой  $n$ -ой части обмотки, имеющей  $w_n$

<sup>1</sup> Номограмма составлена Л. П. Бородулиной.

витков,  $k_n = \frac{w_n}{w}$ ,  $w$  — число витков, к которому приведены все части обмоток,

$$k_0 = \frac{w_1 + w_3 + w_5 + \dots}{w_2 + w_4 + w_6 + \dots} \quad \text{и}$$

$$L_n = -k_0 k_2 L_{1n3} + k_3 L_{1n3} - k_0 k_4 L_{1n4} + k_5 L_{1n5} - \dots, \quad (10)$$

причем

$$L_{1nm} = \frac{1}{2} (L_{1n} + L_{1m} - L_{nm}). \quad (11)$$

Индуктивности, входящие в формулы (10) и (11), приведены к общему числу витков  $w$ . Индуктивности рассеяния  $L_{1n}$ ,  $L_{1m}$  и  $L_{nm}$ , соответствующие попарно взятым частям обмоток  $1n$ ,  $1m$  и  $nm$ , определяются по формуле (1). После подстановки значений этих индуктивностей (приложение 3) в формулу (11) получим:

$$L_{1nm} = 2 \cdot 10^{-9} \cdot w^2 c \ln \frac{k_c g_{1m} g_{1n}}{g_1 g_{mn}}, \quad (12)$$

где коэффициент  $k_c$ , учитывающий влияние стального сердечника (рис. 17), равен:

$$k_c = \frac{g_{1M} g_{1N}}{g_{1A} g_{mN}}. \quad (13)$$

Таким образом, и в более общем случае неравномерного распределения ампервитков по сечению обмоток расчет индуктивности рассеяния сводится к однообразным и сравнительно простым операциям определения средних геометрических расстояний между сечениями отдельных частей обмоток.

Рассмотренная выше теория позволяет наметить обобщенный метод расчета рассеяния трансформатора, основанный на понятии среднего геометрического расстояния. Во многих случаях этот метод достаточно быстро и просто приводит к решению задачи. Наличие графиков и номограмм для определения средних геометрических расстояний может значительно упростить расчеты.

#### Приложение 1

Из определения понятия среднего геометрического расстояния следует, что в случае рис. 14,а

$$\begin{aligned} S_A S_B \cdot \ln g_{AB} = & S_1 S_2 \ln g_{12} + S_1 S_4 \ln g_{14} + \dots + S_1 S_{2n} \ln g_{12n} + \\ & + S_3 S_2 \ln g_{32} + S_3 S_4 \ln g_{34} + \dots + S_3 S_{2n} \ln g_{32n} + \\ & + \dots + S_{2n-1} S_2 \ln g_{(2n-1)2} + S_{2n-1} S_4 \ln g_{(2n-1)4} + \dots + \\ & + S_{2n-1} S_{2n} \ln g_{(2n-1)2n} = \sum_{k=2n-1}^1 \sum_{q=2}^{2n} S_k S_q \ln g_{kq}. \quad (1') \end{aligned}$$

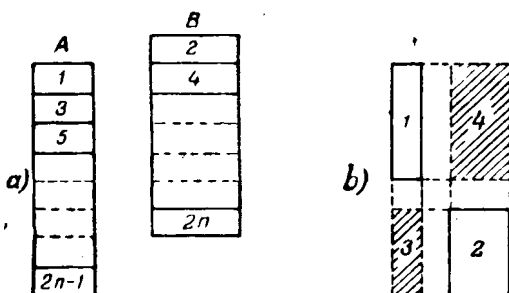


Рис. 14.

Можно доказать также, что для сопряженных сечений [Л. 11], представленных на фиг. 14,б, имеют место следующие равенства:

$$g_{12} = g_{34}, \quad (2')$$

$$S_1 S_2 = S_3 S_4. \quad (3')$$

Для случая рис. 15 из равенства (1) имеем:

$$\begin{aligned} S_A S_B \ln g_{AB} = & S_1 S_2 \ln g_{12} + S_1 S_4 \ln g_{14} + S_1 S_6 \ln g_{16} + \\ & + S_3 S_2 \ln g_{32} + S_3 S_4 \ln g_{34} + S_3 S_6 \ln g_{36} + \\ & + S_5 S_2 \ln g_{52} + S_5 S_4 \ln g_{54} + S_5 S_6 \ln g_{56}. \quad (4) \end{aligned}$$

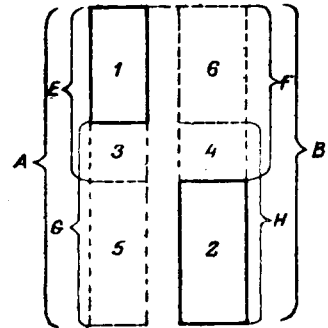


Рис. 15.

Принимая во внимание равенства (2') и (3'), получим из уравнения (4):

$$2S_1 S_2 \ln g_{12} = S_A S_B \ln g_{AB} - S_1 S_6 \ln g_{16} - S_3 S_4 \ln g_{34} - S_5 S_2 \ln g_{52} - 2S_1 S_4 \ln g_{14} - 2S_3 S_2 \ln g_{32}. \quad (5)$$

Для сечений E и F и сечений G и H аналогично получим:

$$2S_1 S_4 \ln g_{14} = S_E S_F \ln g_{EF} - S_1 S_6 \ln g_{16} - S_3 S_4 \ln g_{34}. \quad (6)$$

$$2S_3 S_2 \ln g_{32} = S_G S_H \ln g_{GH} - S_3 S_4 \ln g_{34} - S_5 S_2 \ln g_{52}. \quad (7)$$

Решая совместно уравнения (5'), (6') и (7'), получим:

$$2S_1 S_2 \ln g_{12} = S_A S_B \ln g_{AB} - S_E S_F \ln g_{EF} - S_G S_H \ln g_{GH} + S_5 S_4 \ln g_{34}$$

или

$$g_{12} = \frac{g_{AB}^\alpha \cdot g_{34}^\beta}{g_{EF}^\gamma \cdot g_{GH}^\delta}, \quad (8)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{S_A S_B}{2S_1 S_2}, \quad \beta = \frac{S_3 S_4}{2S_1 S_2}, \quad \gamma = \frac{S_E S_F}{2S_1 S_2}, \quad \delta = \frac{S_G S_H}{2S_1 S_2}.$$

Так как  $S_A = S_1 + S_3 + S_5$ ,  $S_B = S_2 + S_4 + S_6$ ,  $S_E = S_1 + S_3$ ,  $S_F = S_4 + S_6$ ,  $S_G = S_3 + S_5$ ,  $S_H = S_2 + S_4$ , то  $(\alpha + \beta) - (\gamma + \delta) = 1$ .

Поэтому

$$N g_{12} = \frac{(N g_{AB})^\alpha \cdot (N g_{34})^\beta}{(N g_{EF})^\gamma \cdot (N g_{GH})^\delta},$$

где  $N$  — любое число.

#### Приложение 2

Определим индуктивность рассеяния  $L_{12}$  для случая расположения обмоток однофазного трансформатора, данном на рис. 16. Число витков в обмотках  $w = 1600$ . В этом случае формула (7) принимает вид:

$$g_{12} = \frac{g_{AB}^\alpha}{g_{EF}^\gamma} = \frac{g^2 (1+3)(2+4)}{g_{14}},$$

$$\text{так как } \alpha = \frac{(2h_1)^2}{2h_1^2} = 2; \quad \gamma = \frac{h_1^2}{2h_1^2} = \frac{1}{2}.$$

Средние геометрические расстояния  $g_{(1+3)(2+4)}$ ,  $g_{14}$  почитываются по формуле (8) или по кривым рис. 11, полагая, что в среднем радиальный размер обмоток равен 11.

Из рис. 11 находим:

$$g_{(1+3)(2+4)} = 7,9 \text{ см.}$$

$$g_{14} = 4,95 \text{ см.}$$

По формуле (8)

$$g_{12} = \frac{7,9^2}{4,95} = 12,6 \text{ см.}$$

Для учета влияния стального сердечника по формуле (5) получим:

$$k_c = \frac{g_{26}^2}{g_{15} g_{26}}.$$

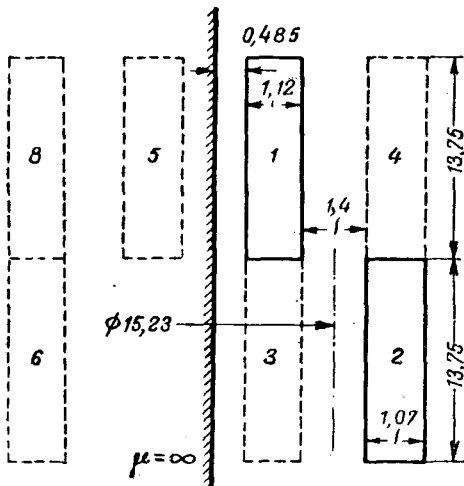


Рис. 16.

Значения  $g_{15}$  и  $g_{26}$  находим (при допущении равенства радиальных размеров обмоток) по рис. 11:

$$g_{15} = 4,54 \text{ см.}$$

$$g_{26} = 8,6 \text{ см.}$$

Значение  $g_{16}$  найдем аналогично  $g_{12}$  по формуле (8):

$$g_{16} = \frac{g_{(1+3)(6+8)}}{g_{18}}.$$

Из рис. 11 находим:

$$g_{(1+3)(6+8)} = 9,35 \text{ см.}$$

$$g_{18} = 6,53 \text{ см.}$$

Этому

$$g_{16} = \frac{9,35^2}{6,53} = 13,4 \text{ см.}$$

Подставляя найденные значения в (9'), получим:

$$k_c = \frac{13,4^2}{4,54 \cdot 8,6} = 4,6.$$

По формуле (6)

$$g_1 = 3,325 \text{ см.}$$

$$g_2 = 3,315 \text{ см.}$$

Окончательно по формуле (1) получим:

$$L_{12} = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 1600^2 \cdot \pi \cdot 15,23 \ln \frac{4,6 \cdot 12,6^2}{3,325 \cdot 3,315} = 1,03 \text{ Н.}$$

Опытное исследование [Л. 6] дало в этом случае  $L_{12} \approx 1,05 \text{ Н.}$  Интересно отметить, что без учета сердечника ( $k_c = 1$ ) формула (1) дает  $L_{12} = 0,63 \text{ Н.}$

### Приложение 3

Индуктивность  $L_{1,m}$  согласно формуле (1) равна:

$$\begin{aligned} L_{1,m} &= \frac{1}{2} (L_{1n} + L_{1m} - L_{mn}) = \\ &= \omega^2 \cdot c \cdot 10^{-9} \left( \ln \frac{k_{c1n} g_{1n}^2}{g_1 g_n} + \ln \frac{k_{c1m} g_{1m}^2}{g_1 g_m} - \ln \frac{k_{cmn} g_{mn}^2}{g_m g_n} \right) = \\ &= 2 \omega^2 \cdot c \cdot 10^{-9} \ln \left[ \left( \frac{k_{c1n} \cdot k_{c1m}}{k_{cmn}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{g_{1m} \cdot g_{1n}}{g_1 \cdot g_{mn}} \right]. \quad (10') \end{aligned}$$

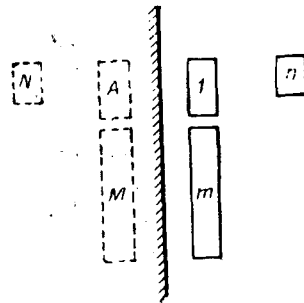


Рис. 17.

Согласно формуле (5) и рис. 17

$$\begin{aligned} k_{c1n} &= \frac{g_{1n}^2}{g_{1A} g_{nN}}, \quad k_{c1m} = \frac{g_{1m}^2}{g_{1A} g_{mM}}, \quad k_{cmn} = \frac{g_{mn}^2}{g_{mM} g_{nN}}, \\ k_c &= \left( \frac{k_{c1n} \cdot k_{c1m}}{k_{cmn}} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{g_{1n} \cdot g_{1m}}{g_{1A} \cdot g_{mN}}. \quad (11') \end{aligned}$$

### Литература

1. W. Rogowski. Ueber das Streufeld und den Streuinduktionskoeffizienten eines Transformators mit Scheinwicklung und geteilten Endspulen. Berlin 1909.
2. Г. Н. Петров. Обобщенный метод расчета рассеяния трансформаторов Т и ЭЭ, № 5—6, 1932.
3. Г. Н. Петров. Расчет рассеяния обмоток трансформатора при произвольном расположении их на сердечнике. Бюлл. ВЭИ, № 5, 1934.
4. Г. Н. Петров. К расчету рассеяния трансформаторов. Электричество, № 15, 1935.
5. Э. А. Манькин. Расчет реактивности рассеяния трансформаторов с обмотками сложной конфигурации. Электричество, № 24, 1937.
6. С. И. Кочин. Индуктивность рассеяния пары обмоток, произвольно расположенных на сердечнике. Диссертация, МЭИ, 1937.
7. Е. Г. Марквардт. Электромагнитные расчеты трансформаторов. Москва, 1938.
8. В. А. Карасев. Рассеяние в системах обмоток, включающих элементы прямоугольного сечения. Труды ВЭИ, № 31, 1938.
9. J. C. Maxwell. Electricity and Magnetism. Oxford, 1873.
10. H. B. Dwight. Geometrie Mean Distances for Rectangular Conductors. El. Eng., № 8—9, 1946.
11. H. Hemmeter. Die Induktivität von Spulen, Ringen und Stäben. A. f. E., Bd. 14, S. 153, 1924.
12. E. Roth. Etude analytique du champ de fuites des transformateurs et des efforts mécaniques exercés sur les enroulements. RGE, XXIII, p. 773, 1928.

# Схема, эквивалентная трехобмоточному трансформатору

Доктор техн. наук, проф. П. Л. КАЛАНТАРОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

При анализе работы трехобмоточного трансформатора часто в уравнения трансформатора вводят коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции его обмоток и соответствующие им индуктивные сопротивления. Такой метод, вполне законный и целесообразный при отсутствии железного сердечника, не обладает необходимой убедительностью при наличии железного сердечника, когда коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции обмоток трансформатора зависят от силы токов в этих обмотках. В дальнейшем мы, как это делали некоторые авторы [Л. 1], будем исходить из предположения о возможности разделения магнитного потока трансформатора на основной поток, все линии которого, замыкаясь по железному сердечнику, сцепляются со всеми витками всех трех обмоток, и на потоки рассеяния, замыкающиеся целиком или частично по воздуху, что обычно и допускают, рассматривая двухобмоточный трансформатор с железным сердечником.

Трехобмоточный трансформатор можно рассматривать как пассивный шестиполюсник. Нами в другой работе [Л. 2] было показано, что в общем случае любой пассивный шестиполюсник может быть заменен шестиэлементной эквивалентной схемой. Простейшие шестиэлементные схемы, симметричные по своей структуре относительно всех трех пар зажимов шестиполюсника, приведены на рис. 1. Однако, эти шестиэлементные симметричные схемы не могут быть приведены в соответствие с разделением магнитного потока трансформатора на основной поток и потоки рассеяния, и поэтому использование их в качестве эквивалента трехобмоточному трансформатору с железным сердечником не представляется целесообразным. С другой стороны, обычно применяемая при рассмотрении трехобмоточного трансформатора трехэлементная симметричная

В качестве схемы, эквивалентной трехобмоточному трансформатору, обычно пренебрегая намагничивающим током, пользуются трехэлементной схемой. Однако, в общем случае трехобмоточному трансформатору должна отвечать шестиэлементная эквивалентная схема. Симметричные шестиэлементные схемы, эквивалентные пассивному шестиполюснику, неудобны при анализе работы трехобмоточного трансформатора с железным сердечником. Приводится несимметричная шестиэлементная схема, в которой в явном виде имеются элементы, соответствующие основному потоку трансформатора и потерям в железе сердечника, и показано, что при некоторых обычно вполне допустимых пренебрежениях эта схема может быть упрощена и сведена к четырехэлементной схеме.

эквивалентная схема [Л. 3], основанная на пренебрежении намагничивающим током трансформатора, не во всех случаях может дать достаточное приближение. В связи со сказанным желательно найти схему, эквивалентную трехобмоточному трансформатору с железным сердечником, которая отвечала бы разделению магнитного потока

трансформатора на основной поток и потоки рассеяния.

Обозначим числа витков обмоток трансформатора через  $w_1, w_2, w_3$  и условимся называть эти обмотки соответственно первой, второй и

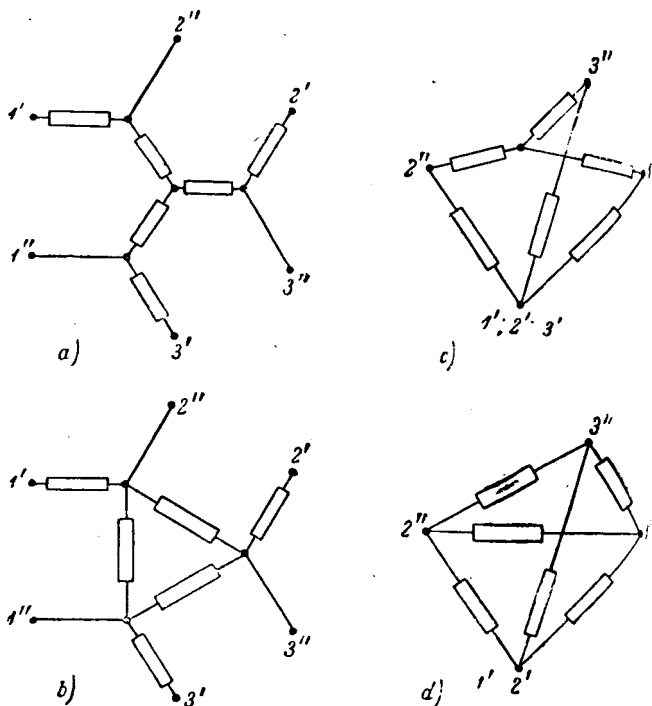


Рис. 1.

третьей, а зажимы их на схемах будем снабжать пометками  $1'-1''$ ,  $2'-2''$ ,  $3'-3''$ . В последующем изложении будем предполагать, что все обмотки трансформатора приведены к числу витков первой обмотки, и будем оперировать с приведенными величинами, не помечая их, однако, особыми значками.

Пусть к зажимам  $1'-1''$  первой обмотки приложено напряжение  $u_1$ , а к зажимам  $2'-2''$  и  $3'-3''$  второй и третьей обмоток присоединены приемники. Обозначим токи в обмотках через  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ , а напряжения на зажимах приемников через  $u_2$  и  $u_3$ . После приведения обмоток к одному и тому же числу витков  $w_1$  число сцеплений  $\Psi_0$  основного потока  $\Phi_0$  трансформатора для всех обмоток будет одинаково и равно  $w_1\Phi_0$ . В соответствии с этим э. д. с., индуцируемые в обмотках основным потоком трансформатора, также будут для всех обмоток одинаковы и равны  $e_0 = -\frac{d\Psi_0}{dt} = -w_1\frac{d\Phi_0}{dt}$ . Рассматривая э. д. с., индуцируемые в обмотках трансформатора потоками рассеяния, необходимо принять во внимание как э. д. с., возникающую в данной обмотке вследствие изменения тока, протекающего именно в этой обмотке, так и э. д. с., возникающие в этой обмотке вследствие изменения токов, протекающих в соседних обмотках. Так, в первой обмотке изменение потоков рассеяния повлечет за собой возникновение трех э. д. с., а именно:  $-S_1\frac{di_1}{dt}$ ,  $-S_{12}\frac{di_2}{dt}$ ,  $-S_{31}\frac{di_3}{dt}$ . Поэтому нам придется ввести в рассмотрение шесть коэффициентов индукции:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{23}$ ,  $S_{31}$ . Следует иметь в виду, что в связи с приведением второй и третьей обмоток трансформатора к числу витков первой обмотки приведенные сопротивления  $r_2$  и  $r_3$  и приведенные коэффициенты индукции  $S_2$  и  $S_3$  второй и третьей обмоток должны быть получены путем умножения их истинных значений на квадраты соответствующих коэффициентов трансформации, т. е. на  $c_{12}^2 = \frac{w_1^2}{w_2^2}$  и на  $c_{13}^2 = \frac{w_1^2}{w_3^2}$ , а приведенные коэффициенты индукции  $S_{12}$ ,  $S_{23}$ ,  $S_{31}$  — путем умножения их истинных значений соответственно на  $c_{12} = \frac{w_1}{w_2}$ ,  $c_{12}c_{13} = \frac{w_1^2}{w_2w_3}$ ,  $c_{13} = \frac{w_1}{w_3}$ .

Приняв во внимание все сказанное, мы можем написать следующие уравнения э. д. с. для первой, второй и третьей обмоток трансформатора:

$$u_1 = r_1 i_1 + S_1 \frac{di_1}{dt} + S_{12} \frac{di_2}{dt} + S_{31} \frac{di_3}{dt} - e_0,$$

$$e_0 = r_2 i_2 + S_2 \frac{di_2}{dt} + S_{23} \frac{di_3}{dt} + S_{12} \frac{di_1}{dt} + u_2,$$

$$e_0 = r_3 i_3 + S_3 \frac{di_3}{dt} + S_{31} \frac{di_1}{dt} + S_{23} \frac{di_2}{dt} + u_3.$$

Для м. д. с.  $F_0$ , определяющей основной поток  $\Phi_0$  трансформатора, мы имеем:

$$F_0 = i_1 w_1 + i_2 w_1 + i_3 w_1 = w_1 (i_1 + i_2 + i_3) = w_1 i_0,$$

где  $i_0 = i_1 + i_2 + i_3$  — намагничивающий ток трансформатора.

Из уравнений э. д. с. можно найти выражения для падений напряжения  $u_{11}$ ,  $u_{22}$ ,  $u_{33}$  в каждой из обмоток, а именно:

$$u_{11} = u_1 + e_0, \quad u_{22} = e_0 - u_2, \quad u_{33} = e_0 - u_3,$$

и, пользуясь соотношением  $i_1 + i_2 + i_3 = i_0$ , привести их к виду:

$$u_{11} = r_1 i_1 + (S_1 - S_{12} + S_{23} - S_{31}) \frac{di_1}{dt} + (S_{12} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_3)}{dt} + S_{23} \frac{di_0}{dt} + (S_{31} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_2)}{dt},$$

$$u_{22} = r_2 i_2 + (S_2 - S_{12}) \frac{di_2}{dt} + (S_{12} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_3)}{dt} + S_{23} \frac{di_0}{dt},$$

$$u_{33} = r_3 i_3 + (S_3 - S_{31}) \frac{di_3}{dt} + S_{23} \frac{di_0}{dt} + (S_{31} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_2)}{dt}.$$

Из этих выражений, положив

$$S_1 - S_{12} - S_{31} = S_{11}, \quad S_2 - S_{23} - S_{12} = S_{22},$$

$$S_3 - S_{31} - S_{23} = S_{33},$$

найдем:

$$u_{11} = r_1 i_1 + (S_{11} + S_{23}) \frac{di_1}{dt} + (S_{12} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_3)}{dt} + S_{23} \frac{di_0}{dt} + (S_{31} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_2)}{dt},$$

$$u_{22} = r_2 i_2 + (S_{22} + S_{23}) \frac{di_2}{dt} + (S_{12} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_3)}{dt} + S_{23} \frac{di_0}{dt},$$

$$u_{33} = r_3 i_3 + (S_{33} + S_{23}) \frac{di_3}{dt} + S_{23} \frac{di_0}{dt} + (S_{31} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_2)}{dt}.$$

Из выражений для коэффициентов индукции  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$  следует, что каждый из них соответствует потоку рассеяния, сцепляющемуся только с первой, только со второй или только с третьей обмоткой.

Получив выражения для  $u_{11}$ ,  $u_{22}$ ,  $u_{33}$ , можно найти выражения для падения напряжения  $u_{12}$  от зажимов первой обмотки до зажимов второй обмотки и для падения напряжения  $u_{13}$  от зажимов первой обмотки до зажимов третьей обмотки

$$u_{12} = u_{11} - u_{22} = r_1 i_1 + (S_{11} + S_{23}) \frac{di_1}{dt} - (S_{22} + S_{23}) \frac{di_2}{dt} - r_2 i_2 + (S_{31} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_2)}{dt},$$

$$u_{13} = u_{11} - u_{33} = r_1 i_1 + (S_{11} + S_{23}) \frac{di_1}{dt} + (S_{12} - S_{23}) \frac{d(i_0 - i_3)}{dt} - r_3 i_3 - (S_{33} + S_{23}) \frac{di_3}{dt}.$$

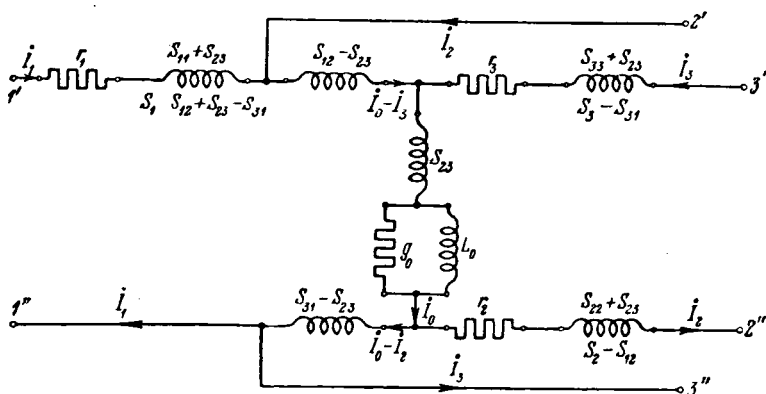


Рис. 2.

При синусоидальном режиме во все выше-приведенные уравнения вместо мгновенных значений напряжений и токов можно ввести соответствующие комплексы. Тогда, например, последние два уравнения примут вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{12} &= r_1 \dot{I}_1 + j\omega (S_{11} + S_{23}) \dot{I}_1 - j\omega (S_{22} + S_{23}) \dot{I}_2 - \\ &\quad - r_2 \dot{I}_2 + j\omega (S_{31} - S_{23}) (\dot{I}_0 - \dot{I}_2), \\ \dot{U}_{13} &= r_1 \dot{I}_1 + j\omega (S_{11} + S_{23}) \dot{I}_1 + \\ &\quad + j\omega (S_{13} - S_{23}) (\dot{I}_0 - \dot{I}_3) - r_3 \dot{I}_3 - j\omega (S_{33} + S_{23}) \dot{I}_3,\end{aligned}$$

где  $\omega$  — угловая частота напряжения, приведенного к первой обмотке трансформатора. Из рассмотрения уравнений э. д. с. и выражений для падений напряжения в обмотках нетрудно прийти к заключению, что трехобмоточный трансформатор с железным сердечником после приведения его обмоток к одному числу витков может быть заменен эквивалентной схемой, представленной на рис. 2. Действительно, схема рис. 2 удовлетворяет всем упомянутым уравнениям и выражениям. В средней части этой схемы имеется разветвление, состоящее из ветви с коэффициентом самоиндукции  $L_0$  и ветви с проводимостью  $g_0$ , причем первая ветвь служит для учета основного потока трансформатора, а вторая ветвь — для учета потерь в железе сердечника на гистерезис и на токи Фуко. При установленном режиме работы трансформатора коэффициент самоиндукции  $L_0$  индуктивной ветви определяется из соотношения  $L_0 = \frac{\Psi_{0m}}{I_{0m}}$ , где  $\Psi_{0m}$  и  $I_{0m}$  — максимальные значения основного потока и намагничивающего тока, а проводимость  $g_0$  активной ветви — из соотношения  $g_0 = \frac{P_{Fe}}{E_0^2}$ , где  $P_{Fe}$  — мощность, теряемая на гистерезис и на токи Фуко, а  $E_0$  — действующее значение э. д. с. индуктируемой в приведенных обмотках основным потоком трансформатора. Следует иметь в виду, что параметры  $L_0$  и  $g_0$  можно считать неизменными только для тех режимов работы трансформатора, в пределах которых допустимо с достаточной точностью считать неизменным максимальное значение основного потока трансформатора.

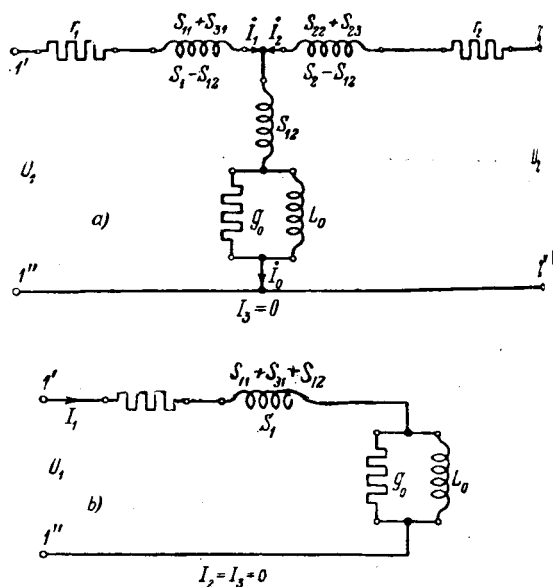


Рис. 3.

Заметим, что полученная нами эквивалентная схема по существу, как и следовало ожидать, состоит из шести элементов. Перед схемами, приведенными на рис. 1, она обладает тем преимуществом, что в ней явно выражены элементы, соответствующие основному потоку трансформатора и потерям на гистерезис и на токи Фуко в сердечнике.

В случаях, когда одна пара или две пары зажимов трехобмоточного трансформатора разомкнуты, схема рис. 2 значительно упрощается. На рис. 3, а приведена схема, получающаяся из схемы рис. 2 при холостом ходе, когда разомкнута одна пара зажимов (3'—3''), а на рис. 3, б — схема, получающаяся при «двойном холостом ходе», когда разомкнуты две пары зажимов (2'—2'' и 3'—3''). Схемы для «двойного холостого хода» полностью совпадают со схемой, эквивалентной двухобмоточному трансформатору при холостом ходе, а схемы для холостого хода отличаются от общепринятой эквивалентной схемы двухобмоточного трансформатора лишь наличием дополнительной реактивной катушки в ветви намагничивающего тока. Эта дополнительная реактивная катушка соответствует дважды сцепленному потоку рассеяния.

Схема рис. 2 может быть значительно упрощена, если в выражениях для падений напряжения  $\dot{U}_{12}$  и  $\dot{U}_{13}$  пренебречь соответственно членами  $j\omega (S_{31} - S_{23}) \dot{I}_0$  и  $j\omega (S_{13} - S_{23}) \dot{I}_0$ , которые малы по сравнению с прочими составляющими падений напряжения в обмотках трансформатора. При этом пренебрежении схема, эквивалентная трехобмоточному трансформатору с железным сердечником, приобретает вид, показанный на рис. 4. Параметры этой приближенной эквивалентной схемы с достаточной для практики точностью могут быть определены из одного опыта «двойного холостого хода» и трех опытов «короткого замыкания — холостого хода». Опыт двойного холостого хода дает возможность

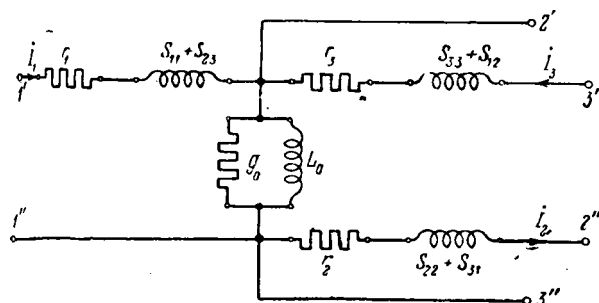


Рис. 4.

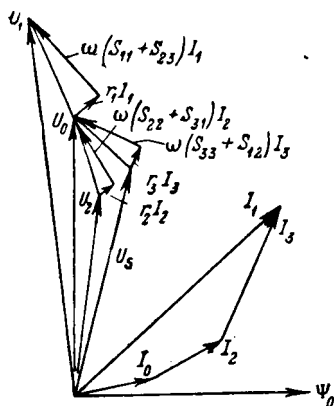


Рис. 5.

с достаточной точностью определить комплекс полной проводимости  $Y_0 = g_0 - jb_0 = g_0 - \frac{j}{\omega L_0}$  или соответствующий комплекс полного сопротивления  $Z_0 = r_0 + jx_0$ , так как комплексом  $Z_{1s} = r_1 + j\omega(S_{11} + S_{23})$  в случае, когда синусоидальное напряжение приложено к зажимам  $1'-1''$  можно пренебречь по сравнению с комплексом  $Z_0$ . В опытах „короткого замыкания—холостого хода“ намагничивающий ток  $I_0$  весьма мал по сравнению с токами в других частях схемы, и поэтому можно считать, что в условиях этих опытов комплекс  $Y_0$  равен нулю. Тогда, вводя для синусоидальных режимов обозначения

$$Z_{1s} = r_1 + j\omega(S_{11} + S_{23}), \quad Z_{2s} = r_2 + j\omega(S_{23} + S_{31}), \\ Z_{3s} = r_3 + j\omega(S_{33} + S_{12}),$$

для комплексов полных сопротивлений  $Z_{1k0}$ ,  $Z_{2k0}$ ,  $Z_{3k0}$ , определяемых из опытов „короткого замыкания—холостого хода“, имеем:

$$Z_{1k0} = Z_{1s} + Z_{2s}, \quad Z_{2k0} = Z_{2s} + Z_{3s}, \\ Z_{3k0} = Z_{3s} + Z_{1s},$$

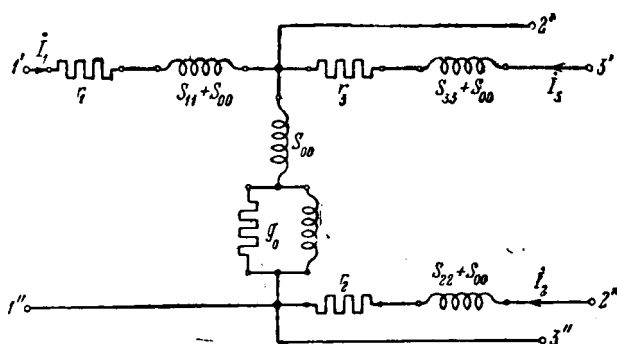


Рис. 6.

откуда, как известно, получим:

$$Z_{1s} = \frac{1}{2}(Z_{1k0} - Z_{2k0} + Z_{3k0}),$$

$$Z_{2s} = \frac{1}{2}(Z_{2k0} - Z_{3k0} + Z_{1k0}),$$

$$Z_{3s} = \frac{1}{2}(Z_{3k0} - Z_{1k0} + Z_{2k0}).$$

Для приближенной эквивалентной схемы можно построить векторную диаграмму, аналогичную векторной диаграмме для схемы, эквивалентной двухобмоточному трансформатору с железным сердечником. При этом для сосредоточения этой диаграммы в верхней полуплоскости направление токов  $I_2$  и  $I_3$ , а также напряжений  $\dot{U}_2$  и  $\dot{U}_3$ , принятое на схеме рис. 4, следует изменить на прямо противоположное. Тогда векторная диаграмма будет иметь вид, показанный на рис. 5, причем вектор  $\dot{U}_0$  изображает на этой диаграмме напряжение, равное и прямо противоположное э. д. с., индуцируемой в обмотках приведенного трансформатора его основным током.

В тех случаях, когда можно положить

$$S_{12} = S_{23} = S_{31} = S_{00},$$

шестиэлементная эквивалентная схема рис. 2, переходит в четырехэлементную схему, представленную на рис. 6, что полностью согласуется с выводами, к которым мы пришли при рассмотрении пассивного шестиполюсника в упомянутой выше работе.

#### Литература

1. Г. Н. Петров. Параллельная работа многообмоточных трансформаторов. Вестник электротехники, № 3, раздел 11, стр. 43, 1931.
2. П. Л. Калантаров. К теории пассивного шестиполюсника. Труды ЛПИ, № 2, 1947.
3. Г. Н. Петров. Трансформаторы, т. 1, Энергоиздат, стр. 77—79, 1934.





# Приведение сложных сетей к простейшим эквивалентным схемам

Доктор техн. наук, проф. А. А. ГОРЕВ и кандидат техн. наук, доц. М. В. КОСТЕНКО

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В различных расчетах приходится сталкиваться с необходимостью определить токораспределение и напряжения в разветвленных электрических сетях при нормальных или аварийных режимах. Эквивалентную схему сложной электрической сети всегда можно представить в виде многоугольника, между вершинами которого включены некоторые активные и реактивные проводимости.

В частных случаях могут отсутствовать некоторые стороны или диагонали такого многоугольника (их проводимости равны нулю, а сопротивления — бесконечности). Применяя к таким схемам несколько последовательных преобразований треугольника в звезду и обратно [Л. 1], иногда удается упростить сложную схему, в частности, представить ее в виде простейшей эквивалентной схемы рис. 1, вычислить в ней ток и путем ряда обратных преобразований вычислить без особых затруднений ток и напряжения в сложной исходной схеме.

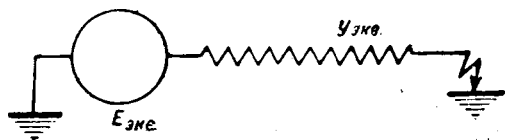


Рис. 1. Простейшая эквивалентная схема.

Преобразование же полного многоугольника со всеми диагоналями до настоящего времени рассматривалось только как преобразование его в многолучевую звезду, которое возможно лишь в исключительных случаях, когда проводимости сторон и диагоналей многоугольника удовлетворяют ряду ограничительных условий, причем расчетные формулы такого преобразования имели весьма сложный вид [Л. 2].

Однако, многолучевая звезда во все не является единственной простой

В статье уточнены условия возможности преобразования многоугольника в эквивалентную звезду и получены расчетные формулы для такого преобразования; рассмотрено преобразование полного четырехугольника с произвольными проводимостями в четырехугольник без диагоналей с сохраненными узловыми точками и получены расчетные формулы такого преобразования; намечены способы для преобразования более сложных многоугольников с произвольными проводимостями к простейшим эквивалентным схемам.

эквивалентной схемой [Л. 6]. Расчет токов и напряжений в полном многоугольнике можно значительно упростить, если представить его в виде менее сложной схемы, которую после ряда последовательных преобразований тре-

угольника в звезду и обратно можно упростить до схемы рис. 1, а путем обратных преобразований вычислить ток и напряжения в сложной исходной схеме.

Поэтому рассмотренные в настоящей работе способы преобразования полного многоугольника к более простым схемам могут оказаться полезными в практических расчетах.

**Преобразование полного многоугольника в звезду.** Как известно [Л. 3], для того чтобы преобразование полного  $n$ -угольника в звезду было возможно, необходимо, чтобы его проводимости удовлетворяли  $\frac{n(n-3)}{2}$  ограничительным условиям. В случае полного четырехугольника эти условия, как показано одним из авторов [Л. 3], имеют вид:

$$V_{12}Y_{31} = Y_{13}Y_{21} = Y_{14}Y_{23}. \quad (1)$$

При соблюдении этих условий четырехугольник рис. 2 можно преобразовать в эквивалентную четырехлучевую звезду (рис. 3).

Ограничительные условия и формулы преобразования в общем случае  $n$ -угольника опубликованы [Л. 2], однако даны в столь сложном виде, что использование их в практических расчетах оказывается затруднительным и может привести к ошибкам. Это обуславливает необходимость уточнить ограничительные условия, полученные инж. А. П. Новиковым [Л. 2] путем обобщения на случай многоугольника простых и ясных условий (1), а также получить формулы преобразования, удобные для практических расчетов.

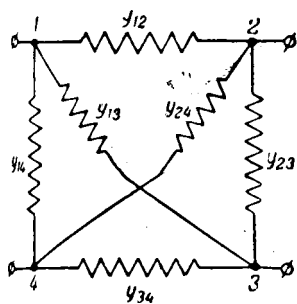
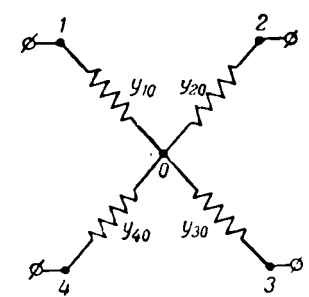


Рис. 2. Схема полного четырехугольника.

Рис. 3. Схема четырехлучевой звезды, эквивалентной полному четырехугольнику в случае  $y_{12} y_{34} = y_{13} y_{24} = y_{14} y_{23}$ .

Формулы обратного преобразования  $n$ -лучевой звезды в  $n$ -угольник, полученные А. Розен [Л. 4], имеют вид [Л. 3,5]:

$$y_{ik} = a_i a_k; \quad y_{im} = a_i a_m; \quad y_{km} = a_k a_m \quad (2)$$

и т. д., где  $i \neq k \neq m \neq i$  принимают все значения от 1 до  $n$ ,

$$a_k = \frac{y_{k1}}{\sqrt{\Sigma y}}; \quad \Sigma y = \sum_{i=1}^n y_{i0},$$

$y_{ik}$  — проводимость стороны (диагонали) многоугольника, соединяющей вершины  $i-k$ ;  
 $y_{i0}$  — проводимость луча звезды в вершину  $i$ .

Перемножив выражения для  $y_{ik}$  и  $y_{im}$  и разделив произведение на выражение для  $y_{km}$ , имеем:

$$a_i^2 = \frac{y_{ik} \cdot y_{im}}{y_{km}} = y_{ii} = \text{const}, \quad (3)$$

где  $i \neq k \neq m \neq i = 1, 2, \dots, n$ .

Очевидно,  $a_i$ , вычисленное по (3), при любых  $k, m$  должно быть одинаковым. Поэтому условия (3) являются необходимыми условиями возможности преобразования многоугольника в звезду для вершины  $i$ . Общее число этих условий равно:

$$N = C_{n-1}^2 - 1 = \frac{n(n-3)}{2},$$

где  $C_{n-1}^2$  — число сочетаний из  $n-1$  элементов по два.

Система условий (3) оказывается одновременно и достаточной для возможности выполнения всего преобразования многоугольника в звезду. Действительно, из (3) имеем:

$$\frac{y_{ik} \cdot y_{im}}{y_{km}} = \frac{y_{ik} y_{ie}}{y_{ke}}; \quad y_{ik} = y_{ki}; \quad \frac{y_{ki} y_{ke}}{y_{ie}} = \frac{y_{ki} y_{km}}{y_{im}} = a_k^2.$$

Применяя аналогичные рассуждения для каждой вершины и каждой комбинации значков  $i, k, e$ , нетрудно убедиться, что аналогичные условия для других вершин выполняются автоматически, если выполнены все условия системы (3) для одной из вершин.

Таким образом, для возможности преобразования полного  $n$ -угольника в  $n$ -лучевую звезду необходимо и достаточно, чтобы для одной из вершин многоугольника произведение двух проводимостей, выходящих из этой вершины, разделенное на проводимость, образующую с ними треугольник, было одинаковым для всех возможных сочетаний этих проводимостей.

В частном случае полного четырехугольника (рис. 2) имеем:

$$\frac{y_{12} y_{13}}{y_{21}} = \frac{y_{12} y_{14}}{y_{21}} = \frac{y_{13} y_{14}}{y_{24}}$$

или

$$y_{12} y_{24} = y_{14} y_{23} = y_{13} y_{34},$$

т. е. получаем условия (1).

Для нахождения формул преобразования многоугольника в звезду составим на основании (2) и (3) систему уравнений:

$$y_{i0} = a_i \sqrt{\Sigma y} = \sqrt{\frac{y_{ik} y_{in}}{y_{km}}} \sqrt{\Sigma y}, \quad (4)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Сложив уравнения (4) почленно и разделив на  $\sqrt{\Sigma y}$ , имеем:

$$\sqrt{\Sigma y} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{y_{ik} y_{im}}{y_{km}}}, \quad (5)$$

где  $i \neq k \neq m \neq i$ .

Подстановка (5) в (4) с учетом (2) дает:

$$y_{i0} = \sum_{k=1}^n y_{ik} = \sum_{k=1}^{i-1} y_{ik} + \sum_{k=i+1}^n y_{ik} + \frac{y_{ik} y_{im}}{y_{km}}. \quad (6)$$

Таким образом, если преобразование многоугольника в звезду возможно, то проводимость луча звезды равна сумме всех проводимостей, выходящих из рассматриваемой вершины многоугольника плюс произведение двух из этих проводимостей, разделенное на проводимость, образующую с ними треугольник.

Когда проводимость одного из лучей вычислена, то проводимости остальных лучей проще всего определить по формулам пересчета, получающимся при почленном делении двух формул системы (2):

$$\frac{y_{km}}{y_{im}} = \frac{a_k}{a_i} = \frac{y_{ki}}{y_{li}} \quad \text{или} \quad y_{i0} = \frac{y_{km}}{y_{im}} y_{i0}. \quad (7)$$

Очевидно, полученные соотношения значительно проще в практических расчетах, чем опубликованные [Л. 2].

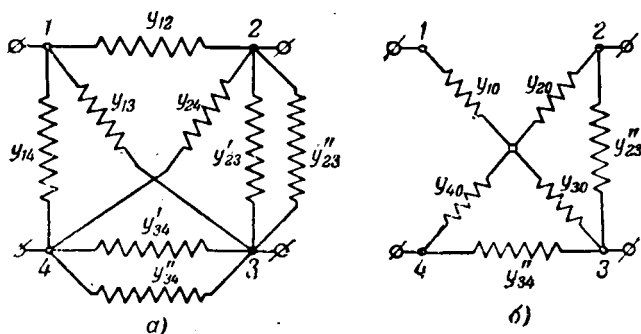


Рис. 4. Последовательные преобразования схемы полного четырехугольника.

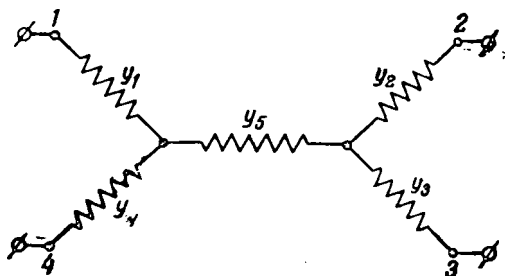


Рис. 5. Схема, эквивалентная полному четырехугольнику в общем случае.

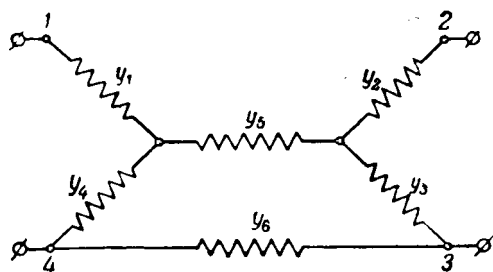


Рис. 6. Схема, эквивалентная полному четырехугольнику в случае  $y_{12} y_{34} = y_{13} y_{24}$ .

**Преобразование полного четырехугольника к более простой эквивалентной схеме.** В общем случае, когда ограничительные условия (3) не выполнены, преобразование многоугольника в звезду невозможно. Однако, в случае полного четырехугольника расчет можно значительно упростить. Для этого исходную схему рис. 2 представим в виде схемы рис. 4,а, причем

$$\left. \begin{aligned} y_{13} y_{24} &= y_{12} y_{34}' = y_{14} y_{23}', \\ y_{23}'' &= y_{23} - y_{23}'; y_{34}'' = y_{34} - y_{34}'. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Очевидно, полный четырехугольник, образованный проводимостями  $y_{12}, y_{13}, y_{14}, y_{23}', y_{24}, y_{34}'$ , удовлетворяет условиям (1) и может быть преобразован в четырехлучевую звезду по формулам (6) и (7). При этом получится схема рис. 4,б. Если теперь выполнить преобразование треугольника в звезду (например, для треугольника 0-2-3), то получится эквивалентная схема рис. 5, состоящая из четырехугольника без диагоналей с сохранившимися узловыми точками 1, 2, 3, 4. Выполнив эти преобразования, по-

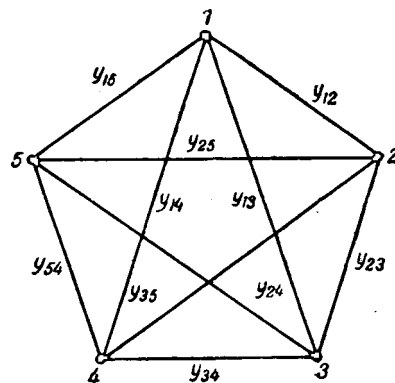


Рис. 7. Схема полного пятиугольника.

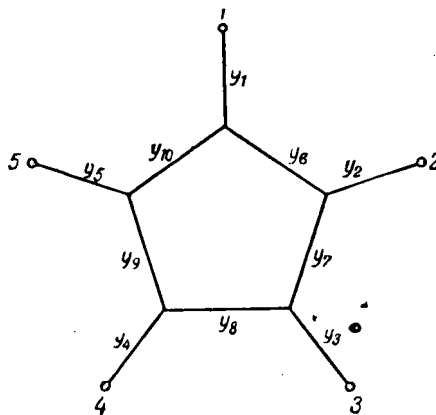


Рис. 8. Схема, эквивалентная полному пятиугольнику.

лучим следующие выражения для перехода от схемы рис. 2 к эквивалентной схеме рис. 5:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_{12} + y_{13} + y_{14} + \frac{y_{12} y_{14}}{y_{21}'}; \\ y_2 &= y_{12} + y_{23} + y_{24} + \frac{y_{12} y_{23}}{y_{13}}; \\ y_3 &= \frac{y_{13}}{y_{12}} y_2, y_4 = \frac{y_{24}}{y_{12}} y_1, y_5 = \frac{y_{12} y_{34} y_4}{y_{14} y_{23} - y_{13} y_{24}}; \\ y_6 &= \frac{y_{12} y_{34} - y_{13} y_{24}}{y_{12}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Полученная эквивалентная схема состоит из шести элементов, однако два из них ( $y_1$  и  $y_2$ ) складываются с последовательно соединенными внешними сопротивлениями, а дальнейшие преобразования четырехугольника без диагоналей к простейшей эквивалентной схеме рис. 1 не представляют затруднений. Порядок этих преобразований зависит от конкретных условий задачи, причем в схеме обычно исчезает один из узлов 1, 2, 3, 4.

В частном случае при выполнении в исходной схеме рис. 2 обоих условий (1) формулы (9) упрощаются ( $y_6 = 0, y_5 \rightarrow \infty$ ) и получается схема рис. 3. В случае, если выполнено только одно из условий (1), например, условие  $y_{12} y_{34} = y_{13} y_{24}$ , то  $y_6 = 0$  и эквивалентная схема оказывается разомкнутой — в виде двух трехлучевых звезд (рис. 6).

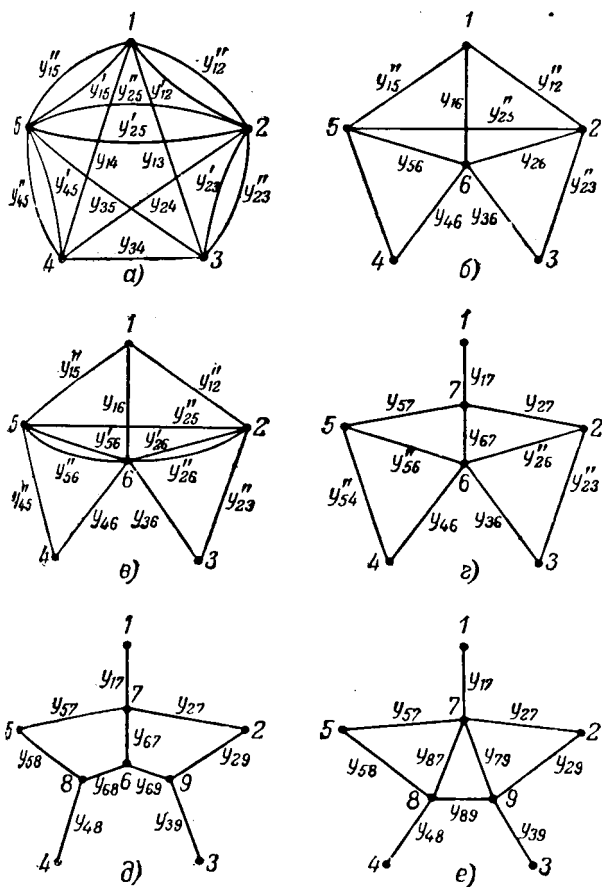


Рис. 9. Схема последовательных преобразований полного пятиугольника к пятиугольнику без диагоналей (к рис. 8).

**Преобразование полного пятиугольника к пятиугольнику без диагоналей.** Полный пятиугольник с произвольными проводимостями сторон (рис. 7) можно преобразовать в эквивалентной схеме в виде пятиугольника без диагоналей с сохраненными узловыми точками (рис. 8).

Для этого, аналогично преобразованию четырехугольника, схему рис. 7 представим в виде схемы рис. 9,а, причем

$$\frac{y_{12}y_{14}}{y_{34}} = \frac{y_{12}'y_{14}'}{y_{24}'} = \frac{y_{12}'y_{13}'}{y_{23}'} = \frac{y_{13}y_{15}'}{y_{35}'} = \frac{y_{14}y_{15}'}{y_{45}'} = \frac{y_{12}'y_{15}'}{y_{25}'}$$

Образовавшийся при этом полный пятиугольник  $y_{12}, y_{13}, y_{14}, y_{15}, y_{23}, y_{24}, y_{25}, y_{34}, y_{35}, y_{45}$  преобразуется в пятилучевую звезду и схема принимает вид рис. 9,б. Возникший при этом четырехугольник с диагоналями 1-2-6-5 преобразуем в соответствии с рис. 4 (рис. 9,в и 9,г). Затем треугольники 2-3-6 и 4-5-6 преобразуем в звезды (рис. 9,д), а звезду 7-6-8 в треугольник (рис. 9,е).

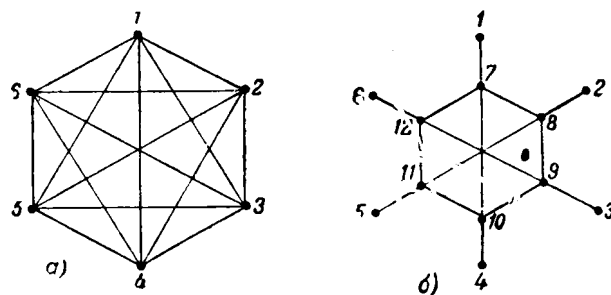


Рис. 10. Преобразование полного шестиугольника.

а—схема полного шестиугольника; б—эквивалентная схема.

9,е). Наконец, если преобразовать треугольники 2-7-9 и 5-7-8 в звезды, то получится эквивалентная схема, приведенная на рис. 8, состоящая, так же как и исходная, из десяти элементов. Однако, пять из них складываются с последовательно соединенными внешними сопротивлениями, а дальнейшее преобразование пятиугольника без диагоналей не представляет затруднений.

**Заключение.** Изложенную методику можно применить и к рассмотрению более сложных многоугольников. В частности, полный шестиугольник (рис. 10,а) можно представить в виде эквивалентной схемы (рис. 10,б), содержащей 6 сторон, 6 ответвлений и 3 диагонали, однако, такое преобразование оказывается мало пригодным для практических расчетов в силу своей сложности. В сравнительно редких случаях, когда оказывается необходимым анализировать работу столь сложной сети, проще произвести ее экспериментальное исследование на лабораторной модели.

В большинстве практических случаев сложную сеть удастся привести к полному пяти- или четырехугольнику или еще более простым схемам. При этом полученные преобразования многоугольников могут оказаться целесообразными в практических расчетах токов короткого замыкания, электрических режимов, устойчивости параллельной работы и др.

#### Литература

1. A. Kennelly. El. World and Engineering, т. 34, стр. 413, 1899.
2. А. П. Новиков. Преобразование электрического многоугольника в эквивалентную звезду. Электричество, № 10, стр. 59, 1946.
3. А. А. Горев. Приведение сложных сетей к простейшим эквивалентным схемам. Сборник ЛИИ, № 5, 1935.
4. A. Rosen. IEEE, т. 62, стр. 916, 1924.
5. П. Л. Калантаров. Теория переменных токов. Госэнергоиздат, изд. 2-е, стр. 116, 1940.
6. W. Ostendorf. ETZ, т. 60, № 28, стр. 831, 1939.



# Расчет заземлителей на нагрев при кратковременных электрических нагрузках

Кандидат техн. наук Л. Е. ЭБИН

Москва

Современные требования к заземлителям предусматривают проверку заземлителей на нагрев как одно из условий, обеспечивающих надежность их работы. Это нашло отражение в вышедших в свет «Правилах устройства заземлений в установках напряжением свыше 1 000 В» [Л. 1], в которых дана формула для проверки заземлителей на нагрев при кратковременных электрических нагрузках. Техническая литература, рассматривающая тепловой расчет заземлителей, не всегда правильно решает поставленную задачу. Ниже изложены выводы основных формул в том виде, в котором они в настоящее время представляются.

Сущность теплового эффекта при работе заземлителей заключается в следующем. Поле растекания (квазистационарное поле) в грунте определяет плотность тока в каждой точке поля. Нагрев грунта является функцией этой плотности. Очевидно, что температура грунта будет тем выше, чем больше плотность тока. Наибольшая температура будет в слое грунта, непосредственно прилегающем к поверхности заземлителя.

При кратковременном протекании тока (исчисляемого временем до нескольких секунд) теплопередачей в грунте можно пренебречь. Тогда для элементарного объема, выделенного в грунте, через сечение которого  $dq$  протекает ток  $dl$ , можно написать уравнение теплового баланса:

$$0,24 dl^2 \rho \frac{dl}{dq} t = \delta \varepsilon dl dq \Delta \tau. \quad (1)$$

Здесь  $dq$  — сечение элементарного цилиндра в грунте;

$dl$  — высота элементарного цилиндра;

$dl$  — ток, протекающий через сечение  $dq$  цилиндра, вдоль его высоты;

$t$  — время протекания тока, сек;

$\rho$  — удельное сопротивление грунта,  $\Omega \text{ см}$ ;

$\delta$  — удельный вес грунта,  $\text{г/см}^3$ ;

Рассматривается нагрев заземлителей при кратковременном протекании тока с учетом неравномерного распределения плотности тока на их поверхности, вызванного взаимным экранированием элементов сложного заземлителя. Дается вывод формулы для проверки заземлителей на термическую устойчивость, которая включена в «Правила устройства заземлений в установках напряжением выше 1 000 В».

$\sigma$  — удельная теплоемкость грунта,  $\text{cal/g}^\circ\text{C}$ ;  
 $\Delta \tau$  — повышение температуры,  $^\circ\text{C}$ .

Из этого уравнения легко получить следующее:

$$\Delta \tau = 0,24 \frac{i^2 t}{\delta \sigma}, \quad (2)$$

где  $i = \frac{dl}{dq}$  — плотность тока.

Обозначая, далее, через  $c$  теплоемкость грунта, выраженную в  $\text{W sec/}^\circ\text{C cm}^3$ , будем иметь  $c = \frac{\delta \sigma}{0,24}$ . Тогда

$$t = \frac{c \Delta \tau}{i^2 \rho}. \quad (3)$$

Допустимым считается нагрев грунта до температур ниже  $100^\circ\text{C}$ . При температуре в  $100^\circ\text{C}$  будет иметь место интенсивное испарение влаги, содержащейся в грунте. Снижение влажности грунта вызывает увеличение удельного сопротивления, выделение тепла возрастает: процесс носит нарастающий характер. Как показывают опыты, перегрузка заземлителей приводит очень быстро к резкому увеличению сопротивления заземлителя, и он перестает удовлетворять предъявляемым к нему требованиям.

Нормальная влажность грунта в слоях, прилегающих к заземлителю, будет восстановлена лишь по истечении определенного времени. При значительных перегрузках заземлителей возможны невосстанавливающиеся повреждения заземлителей, вызванные следующими причинами.

Скопляющиеся в грунте пары воды во многих случаях вырываются под давлением наружу, увлекая куски земли или разрушая заземлитель. При значительном повышении напряжения заземлителя относительно земли, вызванном нарастанием сопротивления слоев грунта, могут возникнуть вольтовые дуги, приводящие заземлитель к разрушению. Вследствие развивающихся при этом высоких температур происходит спекание грунта и нормальное сопротивление заземлителя не восстанавливается вовсе.

Таким образом, чтобы иметь термически устойчивый заземлитель, он должен быть рассчитан на нагрев до предельной температуры в  $100^\circ\text{C}$ . Начальная температура грунта на глубине заложения заземлителей может быть принята равной  $15^\circ\text{C}$ . Тогда повышение температуры  $\Delta\tau_{np} = 85^\circ\text{C}$ .

Для оценки термической устойчивости существенно определение температуры в слоях грунта, расположенных непосредственно у поверхности заземлителя.

Примем, что плотность тока на поверхности заземлителя постоянна; в дальнейшем будет показано, в какой мере это в действительности имеет место. Тогда формула (3) определяет так называемое «динамическое время» заземлителя, если под  $\Delta\tau$  понимать перепад температур, соответствующий предельной температуре  $\Delta\tau_{np}$ .

При принятых предположениях можно считать  $i = \frac{I}{S}$ , где  $I$  — полный ток, стекающий с заземлителя;  $S$  — поверхность соприкосновения заземлителя с почвой.

Подставляя это значение в формулу (3), получим:

$$S = I \sqrt{\frac{\rho t}{c \Delta\tau}} \quad (4)$$

Для теплоемкости  $c$  различные авторы дают значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Числовые значения теплоемкости  $c$  по данным различных авторов

Автор	Грунт	Значение теплоемкости
Оллендорф [Л. 2]	Средний . . . . .	1,75
Taylor [Л. 4]	Глина . . . . .	3,2
	Грунт с низким удельным сопротивлением . . . . .	1,56
Вайнер [Л. 3]	Средний . . . . .	2,0—2,5
Rüdenberg [Л. 6]	Средний . . . . .	1,75

Выбирая в качестве самой низкой величины  $c = 1,56 \text{ W sec}/^\circ\text{C cm}^3$ , подставим это значение, а также значение  $\Delta\tau = 85^\circ\text{C}$  в формулу (4), получим необходимую поверхность заземлителя

$$S = I \sqrt{\frac{\rho t}{1,56 \cdot 85}} \approx 0,085 I \sqrt{\rho t} \quad (5)$$

Формула (3) может быть представлена в другом виде. Входящая в нее плотность тока связана с напряженностью электрического поля соотношением

$$i = xE, \quad (6)$$

где  $x$  — электрическая проводимость грунта,

$$x = \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

Напряженность электрического поля выражается через потенциал в данной точке поля:

$$E = -\frac{1}{U} \frac{d\varphi}{du} \quad (8)$$

Здесь  $\varphi$  — электрический потенциал в рассматриваемой точке;

$u$  — криволинейная координата электрического поля;

$u = \text{const}$  представляют поверхности уровня;

$Udu$  является длиной дуги элемента, заключенного между двумя точками на «расстоянии»  $du$  в криволинейных координатах.

Подставляя значение (6) в формулу (3), получим:

$$\Delta\tau = \frac{x}{c} E^2 t. \quad (9)$$

Потенциал в какой-либо точке поля в криволинейных координатах для вертикально забитого трубчатого заземлителя с верхним концом на поверхности земли будет выражаться следующей формулой:

$$\varphi = \frac{I}{4\pi x l} \ln \frac{u+l}{u-l}, \quad (10)$$

где  $l$  — длина трубы.

В данном случае [Л. 2, стр. 21] функция

$$U = \sqrt{\frac{u^2 - v^2}{u^2 - l^2}}, \quad (11)$$

где  $v$  — вторая координата электрического поля. С учетом (10) и (11) по формуле (8) получим напряженность электрического поля трубчатого заземлителя:

$$E = \frac{I}{2\pi x} \frac{2}{\sqrt{(u^2 - l^2)(u^2 - v^2)}} \quad (12)$$

Формулы (10) и (12) выведены в предположении, что заземлитель является эллипсоидом вращения, совпадающим с одной из эквивалентных поверхностей, большая ось которого равна длине трубы, а меньшая — радиусу ее. Для определения сопротивления растекания заземлителя и распределения напряжения на поверхности земли такое предположение вполне приемлемо. При рассмотрении же электрического поля ниже уровня земли, непосредственно вблизи от поверхности заземления, замена цилиндрического заземлителя эллипсоидом вращения может привести к существенным ошибкам.

Из формулы (12) следует, что напряженность электрического поля на эквипотенциальной поверхности  $u = \text{const}$  (например, на поверхности заземлителя) растет с увеличением координаты  $v$ , т. е. по мере удаления от уровня земли соответственно возрастает и плотность тока. Это следует объяснить непостоянным по длине радиусом поперечного сечения заземлителя.

Напряженность электрического поля на поверхности заземлителя в виде эллипсоида вращения совпадает с напряженностью электрического

поля цилиндрического заземлителя только на уровне земли. Координаты поверхности заземлителя на уровне земли

$$v_1 = 0, u_1 = \sqrt{l^2 + \rho_0^2}, \quad (13)$$

где  $\rho_0$  — радиус трубы.

Подставляя эти значения в формулу (12), получим:

$$E_1 = \frac{I}{2\pi x} \frac{1}{\rho_0 \sqrt{l^2 + \rho_0^2}}. \quad (14)$$

При практических соотношениях  $l \gg \rho_0$  и, следовательно, с достаточной точностью можно принять:

$$E_1 \approx \frac{I}{2\pi x l \rho_0}. \quad (15)$$

Это значение напряженности электрического поля совпадает со средней напряженностью на поверхности цилиндрического заземлителя:

$$E_1 = E_{cp}.$$

Таким образом, напряженность электрического поля на поверхности цилиндрического заземлителя можно принять постоянной. Повышение напряженности поля наблюдается лишь непосредственно вблизи острых краев углубленного конца заземлителя, однако это не имеет существенного значения для рассматриваемого вопроса.

Легко также показать, что условие  $E_1 = E_{cp}$  сохраняется для трубы с верхним концом ниже уровня земли.

Приведенные соображения показывают, что плотность тока на поверхности заземлителя практически можно считать равной средней плотности, как это было принято ранее.

Рассмотрим также влияние взаимного экранирования заземлителей на напряженность электрического поля на их поверхности. Напряженность поля трубчатого заземлителя на поверхности земли на расстоянии  $\rho_x$  от него определяется при условии  $v = 0$ ;  $u = \sqrt{l^2 + \rho_x^2}$ . Подставляя эти значения в (12), получим:

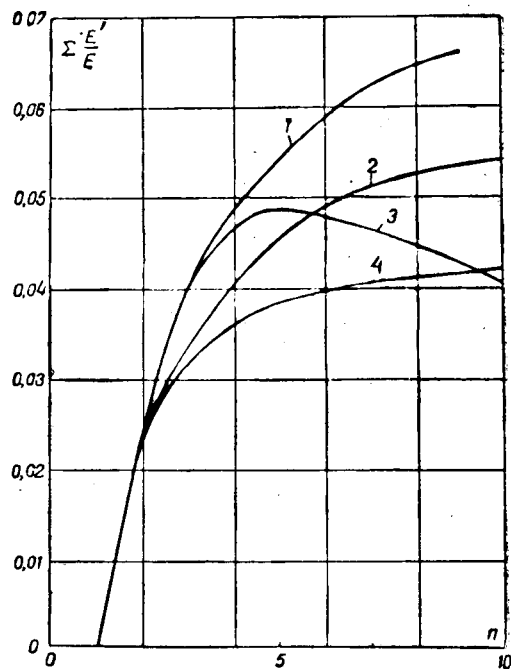
$$E_x = \frac{I_x}{2\pi x \rho_x} \frac{1}{\sqrt{l^2 + \rho_x^2}}. \quad (16)$$

В месте расположения рассматриваемого заземлителя находящиеся вблизи от него другие заземлители создают напряженность поля, равную геометрической сумме значений по формуле (16):

$$\Sigma E'_x = \Sigma \frac{I_x}{2\pi x \rho_x} \frac{1}{\sqrt{l^2 + \rho_x^2}}. \quad (17)$$

Эта сумма может быть равна нулю при условии, что заземлители расположены симметрично по отношению к рассматриваемому заземлителю и токи в них при этом равны между собой. В других случаях эта сумма даст дополнительную напряженность в месте расположения рассматриваемого заземлителя, которая на одной стороне заземлителя арифметически складывается с напряженностью поля этого заземлителя, определяемой по формуле (15), и вычитается на противоположной стороне. Напряженность поля на поверхности заземлителя будет неодинакова.

На рисунке для различных расположений заземлителей приведены отношения  $\frac{\Sigma E'}{E}$  в зависимости от числа труб  $n$ , причем  $\Sigma E'$  — определено по формуле (17), а  $E$  — по формуле (15). При этом принято: расстояние



Отношение  $\frac{\Sigma E'}{E}$  при различных расположениях заземлителей.

1 — расположение труб под углом  $60^\circ$  (угловая труба); 2 — под углом  $90^\circ$  (угловая труба); 3 — по окружности; 4 — по прямой линии (крайняя труба).

ание между соседними заземлителями  $\rho = l$ , радиус трубы  $\rho_0 = \frac{1}{30} l$ ; токи во всех заземлителях одинаковы. При больших соотношениях между радиусом трубы и длиной  $\frac{\Sigma E'}{E}$  соответственно снижается.

При расположении труб в ряд увеличение напряженности поля в соответствии с рисунком имеет место на крайней трубе на поверхности, обращенной в сторону, обратную расположению остальных труб; на поверхности же трубы, обращенной в сторону остальных труб, напряженность будет соответственно ниже. При расположении труб под углом такая повышенная напряженность имеет место для угловой трубы в направлении биссектрисы наружного угла; при расположении по окружности — на каждой трубе, на внешней по отношению окружности поверхности трубы.

Таким образом, кривые рисунка характеризуют степень неравномерности распределения тока по поверхности рассматриваемой трубы. Введем коэффициент

$$\gamma = \frac{\left(\frac{dI}{dS}\right)_{\max}}{\frac{I}{S}} = \frac{i_{\max}}{i_{кр.тр}}. \quad (18)$$

С учетом кривых можно принять для наихудших условий  $\gamma = 1,1$ .

Помимо неравномерности распределения плотности тока по поверхности трубы более существенное значение имеет неравномерное распределение тока между трубами сложного заземлителя. При расположении труб в ряд отношение тока в средних трубах к току в крайней трубе

$$\eta_2 = \frac{I_{ср.тр}}{I_{кр.тр}} \quad (19)$$

приведено по данным Вайнера [Л. 3, стр. 87] для различного числа труб в табл. 2 ( $\frac{\rho}{l} = 1$ ).

Таблица 2

Значения коэффициента  $\eta_2$ 

Число труб	$\eta_2$	Число труб	$\eta_2$
2	1	5	0,88
3	0,96	8	0,84
4	0,91	12	0,83

$\eta_2$  можно рассматривать как отношение средней плотности тока на поверхности средних труб к средней плотности тока на поверхности крайних труб

$$\eta_2 = \frac{i_{cp. mp}}{i_{кр. тр}} \quad (20)$$

Сравнительно с расположением труб в ряд более благоприятное распределение тока между трубами достигается при расположении труб по прямоугольнику; при размещении же труб на равном расстоянии друг от друга по кругу распределение тока вообще равномерное.

Менее благоприятным может быть распределение тока в сложных заземлителях, в которых часть труб находится внутри контура, например, когда один замкнутый контур находится внутри другого. Следует отметить, что в литературе нет достаточно подробных данных о численных значениях неравномерности распределения тока между элементами сложного заземлителя. Необходимость проверки термической устойчивости возникает преимущественно для заземлителей не слишком сложных, с не очень низким сопротивлением, поэтому пока нет более подробных данных о значениях коэффициента  $\eta_2$  для различных типов сложных заземлителей, можно ограничиться предельными значениями для труб, расположенных в ряд. С некоторым запасом примем  $\eta_2 = 0,78$ .

Рассматривая наиболее загруженный элемент сложного заземлителя, наибольшая плотность тока на его поверхности  $i_{max}$  выражается в соответствии с (18) и (20) в следующем виде:

$$i_{max} = \frac{\gamma}{\eta_2} i_{cp. mp} \quad (21)$$

Можно принять с некоторым запасом среднюю плотность тока на поверхности средней трубы  $i_{cp. mp}$  в качестве средней плотности всего сложного заземлителя  $i_{cp}$ . Подставляя значение (21) вместо  $i$  в формулы (3) и (4), получим:

$$t = \frac{c \Delta \tau}{\left(\frac{\gamma}{\eta_2}\right)^2 i_{cp}^2 \rho}; \quad (22)$$

$$S = \frac{\gamma}{\eta_2} I \sqrt{\frac{\rho t}{c \Delta \tau}}. \quad (23)$$

Для принятых условий  $\frac{\gamma}{\eta_2} = \frac{1,1}{0,78} = 1,41$ .

С учетом этого окончательно имеем:

$$S = 0,12 I \sqrt{\rho t}. \quad (24)$$

Эта формула приведена в «Правилах устройства заземлений в установках напряжением выше 1 000 В [Л. 1].

При определении численного коэффициента в этой формуле не рассматривались заземлители, в которых элементы расположены очень близко друг к другу  $\left(\frac{\rho}{l} < 1\right)$ .

Такие заземлители следует считать нераационально устроенными. Не учитывались также полосы, связывающие трубы.

Приведенные выше соображения не могут распространяться на естественные заземлители, расположение и форма которых могут вызывать большую неравномерность плотности тока на их поверхности.

#### Литература

1. „Правила устройства заземлений в установках напряжением выше 1 000 В“, Госэнергоиздат, 1946.
2. Ф. Оллендорф. Токи в земле. ГНТИ, 1932.
3. А. Л. Вайнер. Заземления. ГНТИ Украины, Харьков, 1938.
4. H. G. Taylor. The Current—Loading Capacity of Earth Electrodes. J. of IEE, т. 77, стр. 542, 1935.
5. E. Tawssett, H. W. Grimmitt, G. F. Shottter, H. G. Taylor. Practical Aspects of Earthing, J. of IEE, т. 87, стр. 357, 1940.
6. R. Rüdénberg. Grounding Principles and Practice. Fundamental Considerations on Ground Currents. El. Eng. № 1, 1945.
7. Н. К. Кюнер. Термическая устойчивость заземлителей. Электричество, № 10, 1938.





### Расчет на нагрев асинхронного прокатного двигателя

Доц. Г. М. КАЯЛОВ

Новочеркасский индустриальный институт

Постановка здесь задачи разработки аналитического метода расчета на нагрев по величине средних потерь, исходя из нагрузочной диаграммы двигателя нерегулируемого прокатного стана, имеет целью устранить необходимость в построении графика  $M = \Phi(t)$  нагрузки двигателя с последующим кропотливым вычислением  $M_e$  по точкам этого графика, а равно устранить некоторые принципиальные неточности самого метода расчета по величине эквивалентного момента.

В данной работе также предлагается достаточно точное общее аналитическое выражение  $M_e = F(T_m)$  для зависимости эквивалентного момента двигателя от инерционной постоянной времени  $T_m$ , позволяющее вычислять  $M_e$  для любого заданного значения  $T_m$  непосредственно по данным нагрузочной диаграммы стана, без предварительного расчета нагрузочной диаграммы двигателя.

Эта задача имеет значение для общего тео-

ретического исследования изменения свойств электропривода нерегулируемого прокатного стана в зависимости от величины инерционной постоянной времени  $T_m$ , а равно и для целей предварительного выбора величины  $T_m$  по условиям нагрева. Действительно, знание достаточно точного выражения зависимости  $M_e = F(T_m)$  делает излишним расчет нагрузочной диаграммы двигателя  $M = \Phi(t)$  с целью определения  $M_e$  для промежуточных вариантных значений  $T_m$ , позволяя отнести этот расчет, в качестве контрольного, к самому концу для окончательно принятого значения  $T_m$ .

**Состояние вопроса и предлагаемые решения.** Наиболее общим опубликованным результатом в отношении решения первой из поставленных задач в настоящее время является известная формула, предложенная В. А. Шубенко для эквивалентного момента асинхронного прокатного двигателя, работающего с контакторным регулятором скольжения [Л. 1 и 2], имеющая вид:

$$M_e = \sqrt{M_{sz}^2 - \frac{1}{t_r} \sum_{k=1}^N (M_{sk} - M_0) t_k (T_{kon} M_{kon} - T_{нач} M_{нач})} \quad (1)$$

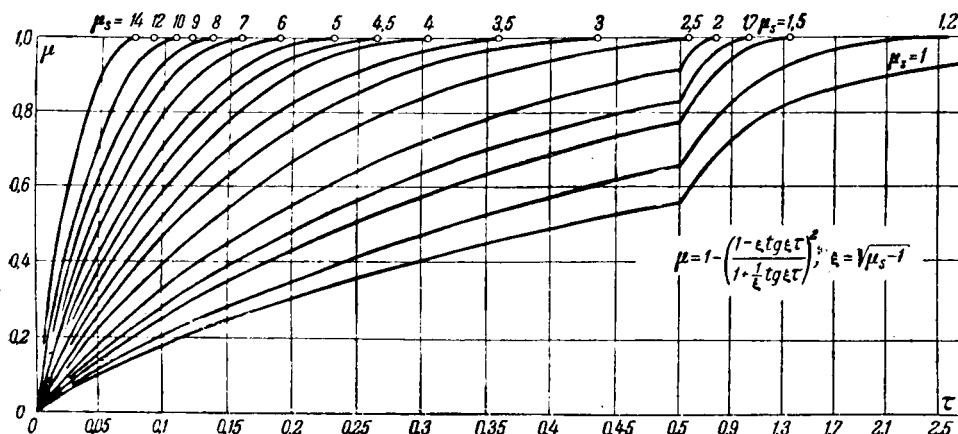


Рис. 1. Универсальные графики возрастания во времени момента асинхронного двигателя для различных значений момента статической нагрузки  $\mu_s = \text{const} \geq 1$ .

здесь  $M_{se}^2 = \frac{1}{t_z} \int_0^{t_z} M_s^2 dt$ ;  $T_{нач}$  и  $T_{кон}$  — значения

инерционной постоянной времени  $T_n = \frac{GD^2 n_0 s_n}{375 M_n}$ ,

отвечающие тем ступеням скольжения, на которых двигатель входит и выходит из  $k$ -го пропуска (всего имеется  $N$  пропусков  $M_{sk} = \text{const}$ , чередующихся со столькими же паузами холостого хода  $M_0 = \text{const}$ );  $M_{нач}$  и  $M_{кон}$  — моменты на валу двигателя в начале и конце  $k$ -го пропуска.

Формула (1) имеет следующие принципиальные и существенные по величине обуславливаемой погрешности дефекты: 1) механическая характеристика асинхронного электродвигателя предполагается прямойлинейной, что приводит к грубым ошибкам в расчете (погрешность достигает 50% в определении величины  $M_{max}$  и 35% в определении  $M_e$  [Л. 3]); 2) метод расчета на нагрев по величине  $M_e$  для асинхронного двигателя уступает в точности расчету по методу средних потерь.

Ввиду этого формула (1) не может быть признана в качестве удовлетворительного или практически приемлемого решения задачи.

Предлагаемое ниже решение заключается в следующем. С помощью построенных в относительных единицах стандартных графиков изменения во времени момента асинхронного двигателя (рис. 1 и 2) рассчитывается нагрузочная диаграмма, учитывающая криволинейный характер механической характеристики. После этого величина средних потерь в меди двигателя за один цикл прокатки определяется по формуле:

$$P_{м.ср} = I_m^2 \left[ (R_s + R_r') - \frac{R_s(1 - j_0^2) + R_r'}{t_z} \sum T_r \Delta\psi \right]. \quad (2)$$

Величина  $\Delta P_{м.ср}$  не должна превосходить потерь в меди<sup>1</sup> двигателя при номинальной нагрузке, равных  $I_n^2(R_s + R_r')$ .

Если не представляется возможным выяснить активные сопротивления обмоток статора и ротора  $R_s$  и  $R_r'$ , вместо (2) может быть предложена для проверки на нагрев весьма простая формула для эквивалентного тока статора:

$$I_e = I_m \sqrt{1 - \frac{(1 - j_0^2)}{t_z} \sum T_r \Delta\psi}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) приняты следующие обозначения:  $I_m$  — ток в статоре для точки опрокидывания ( $M_m$ ,  $s_m$ ) механической характеристики

$$I_m = \sqrt{I_0^2 + \lambda(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})(I_n^2 - I_0^2)}, \quad (4)$$

<sup>1</sup> Номинальные потери в обмотке ротора приняты несколько повышенными, см. сноску 4.

<sup>2</sup> Электричество, № 3.

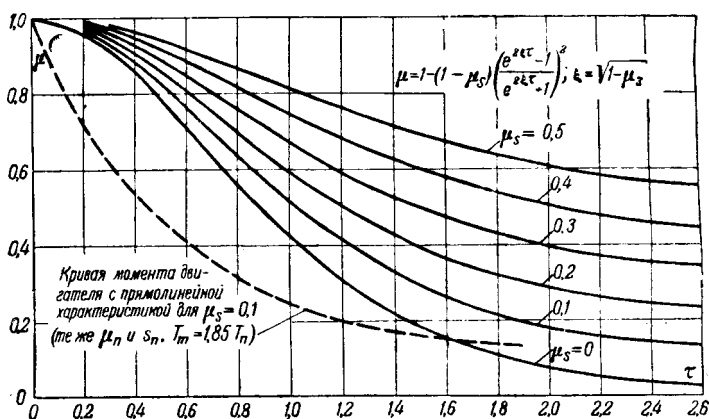


Рис. 2. Универсальные графики убывания во времени момента асинхронного двигателя для различных моментов статического сопротивления  $\mu_s = \text{const}$ .

причем  $\lambda = \frac{M_n}{M_m}$  есть кратность опрокидывающего момента;  $I_0$  — ток холостого хода двигателя;  $R_s$  и  $R_r'$  — активные сопротивления обмоток статора и ротора;  $j_0 = \frac{I_0}{I_m}$  — относительная величина тока холостого хода двигателя;  $T_r = \frac{GD^2 n_0 s_{nr}}{375 M_m}$  — значение инерционной постоянной времени  $T_m$  на некоторой  $r$ -ой ступени скольжения, когда опрокидывающее скольжение составляет  $s_{mr}$ ;  $\psi$  — некоторая функция от  $\mu_s$  и  $\mu$ , графики которой даны ниже на рис. 4 (для  $\mu_s \geq 1$ ) и для  $\mu_s \leq 1$  и убывающего  $\mu$  на рис. 5.

Вся диаграмма нагрузки  $M_s = f(t)$  нереверсивного прокатного стана разбивается, не различая пропусков и пауз, на ряд последовательных ступеней, для каждой из которых не только  $M_s = M_{sk} = \text{const}$ , но и  $T_m = T_r = \text{const}$ . Если на некоторой ступени момента  $M_s = M_{sk}$  срабатывает реле скольжения и  $T_r$  принимает значение  $T_{r+1}$ , то данную ступень момента  $M_{sk} = \text{const}$  надо разбить на две, из коих для первой  $T_m = T_r$ , а для второй  $T_m = T_{r+1}$ .

Зная конечное  $\mu_2 = \frac{M_2}{M_m}$  и начальное  $\mu_1 = \frac{M_1}{M_m} > \mu_2$  относительные значения момента двигателя для данной ступени  $\mu_{sk} = \frac{M_{sk}}{M_m}$ , определяем непосредственно по рис. 4 и 5 величину  $\Delta\psi = \psi(\mu_{sk}; \mu_2) - \psi(\mu_{sk}; \mu_1)$  (всегда  $> 0$ ); сумма  $\sum T_r \Delta\psi$  распространяется на все ступени нагрузочной диаграммы.

Основные допущения, принятые в формулах (2) и (3), излагаются ниже вместе с их выводом.

Для второй поставленной выше задачи единственным опубликованным результатом является

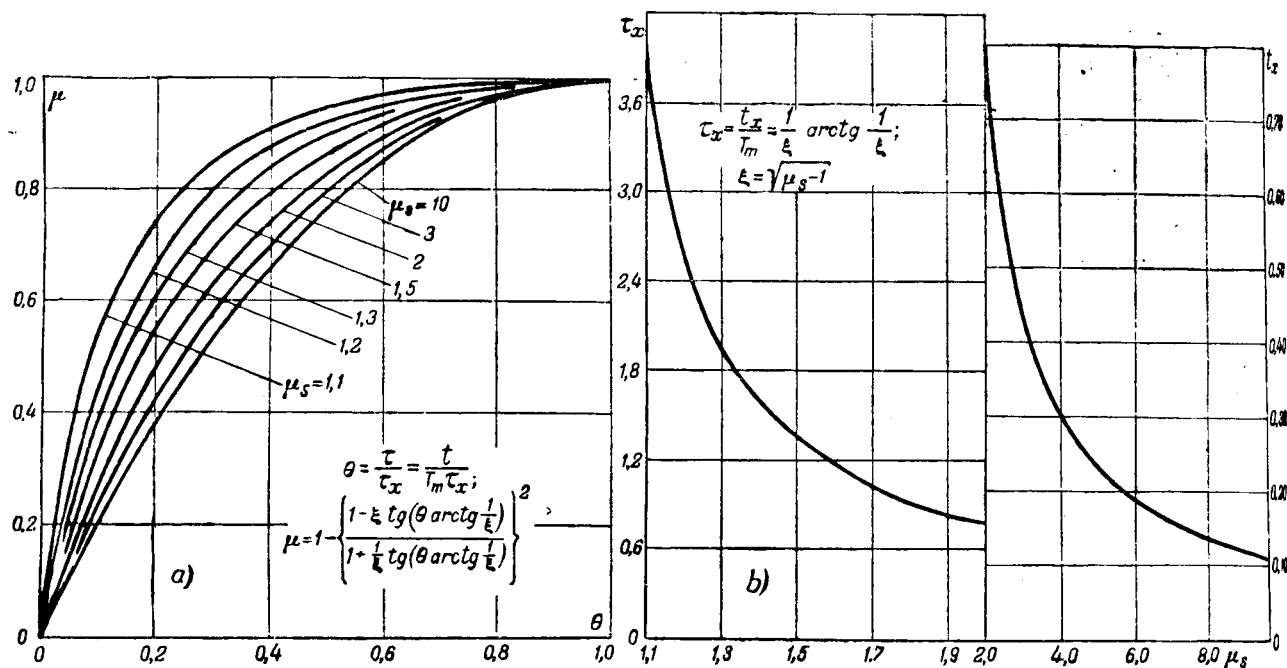


Рис. 3. Графики для расчета нагрузочной диаграммы асинхронного прокатного двигателя за время пропуска.

$a$  — относительный момент при постоянном моменте статической нагрузки  $\mu_s$  в функции удельного времени  $\theta = \frac{\tau}{\tau_x}$ ;  $b$  — время  $\tau_x$ , потраченное на возрастание момента асинхронного двигателя от нуля до огрокидывающего значения при заданном значении  $\mu_s$ .

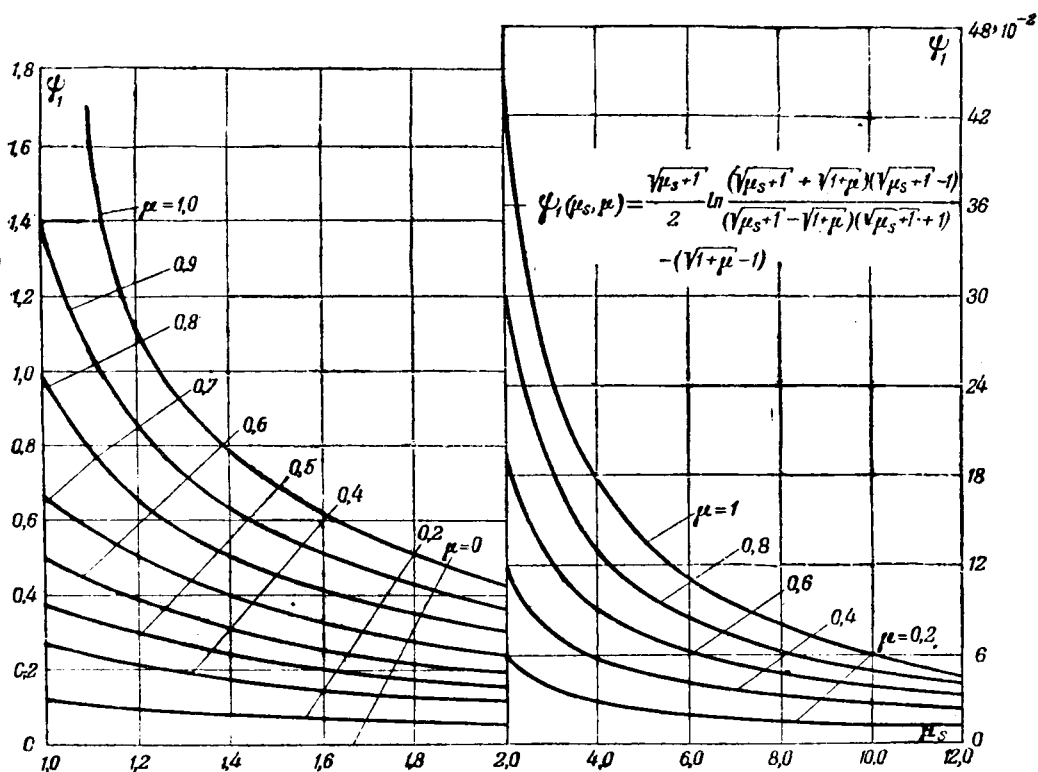


Рис. 4. График функции  $\psi_1(\mu_s, \mu)$ , определяющий эквивалентный тск асинхронного прокатного двигателя при возрастании момента  $\mu$ .

попытка решения ее Л. Б. Гейлером с помощью формулы [Л. 1, Л. 4]

$$M_e = M_{co} + (M_{se} - M_{cp})^{-cT_n}, \quad (5)$$

где

$$T_n = \frac{GD^2 n_0 s_n}{375 M_n};$$

$$c = \frac{1}{2t_z} \cdot \frac{\Sigma(M_{sk} - M_0)^2}{M_{se}(M_{se} - M_{cp})}. \quad (5a)$$

Как видно из обоснования этой формулы [Л. 4], аналитическая структура ее выбрана произвольно, а следовательно, не отражает подлинного характера искомой зависимости  $M_e = F(T_m)$ . В частности, вопрос о форме механической характеристики двигателя в формуле (5) вообще игнорируется. Во всяком случае не может быть и речи об учете ею той криволинейной формы, которая имеет место для механической характеристики асинхронного двигателя в отличие, скажем, от характеристики компаундного двигателя постоянного тока.

В силу изложенного очевидно, что эмпирическая формула (5) не может быть признана удовлетворительным или приемлемым решением. Действительно, опыт показывает, что формула (5) может давать погрешность до 20% в сторону уменьшения действительной величины  $M_e$ .

Вместо формулы (5) предлагается [Л. 6] теоретически обоснованная приближенная формула, гораздо более простая и дающая более точные результаты:

$$\mu_e = \frac{M_e}{M_{se}} = \sqrt{1 - m \frac{T_m}{T_m + t_x}}. \quad (6)$$

где

$$m = 1 - \left(\frac{M_{cp}}{M_{se}}\right)^2; \quad t_x = \frac{\Sigma(M_{sk} - M_0)(M_{sk} - M_{cp})t_k}{\Sigma(M_{sk} - M_0)^2}. \quad (6a)$$

Формула учитывает криволинейную форму механической характеристики асинхронного электродвигателя<sup>2</sup> и весьма удобна как для расчетов, так и для теоретического исследования вопросов нерегулируемого электропривода, поскольку приближенно пропорциональные  $M_e^3$

<sup>2</sup> Формула, аналогичная (6), но исходящая из прямой механической характеристики (шунтовой двигатель постоянного тока), имеет вид [Л. 8 и 9]:

$$\mu_e = \frac{M_e}{M_{se}} = \sqrt{1 - m\theta \left(1 - \varepsilon^{-\frac{1}{\theta}}\right)},$$

где

$$\theta = \frac{T_n \Sigma(M_{sk} - M_0)^2}{t_z m M_{se}^3}; \quad T_n = \frac{GD^2 n_0 s_n}{375 M_n}.$$

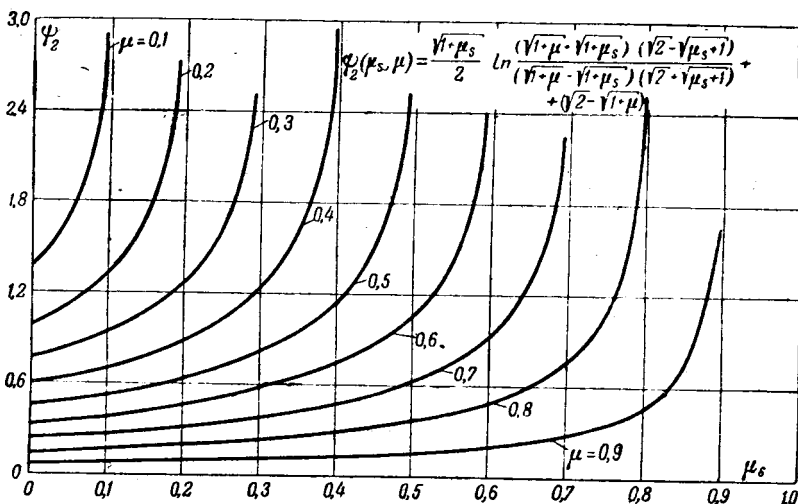


Рис. 5. График функции  $\psi_2(\mu_s, \mu)$ , определяющий величину эквивалентного тока  $I_e$  асинхронного прокатного двигателя при убывании момента  $\mu$ .

переменные потери в двигателе с ее помощью удастся выразить в виде простейшей дробной линейной функции  $T_m$ . Ввиду относительной обширности надлежаще обоснованного вывода формулы (6) указывает лишь ход его (подробно см. [Л. 6 и 8]).

Формула (6) предполагает, что регулятор скольжения отсутствует. Противоположный случай может быть сведен к формуле (6). Более подробные указания по этому поводу выходят за рамки статьи.

Вывод формулы (6), так же как и (5), предполагает, что в нагрузочной диаграмме  $M_s = f(t)$  стана одноступенчатые пики  $M_{sk} = \text{const}$  чередуются с паузами  $M_s = M_0 = \text{const}$ . Если диаграмма  $M_s = f(t)$  отличается от этого типа, то ее можно предварительно заменить соответственной эквивалентной диаграммой, по методу, предложенному автором [Л. 8].

Изменение во времени момента и тока асинхронного прокатного двигателя. Достаточно простое и точное решение уравнения движения электропривода в относительных единицах

$$\mu - \mu_s = -\frac{d\sigma}{d\tau}$$

может быть получено [Л. 3] путем замены точной механической характеристики асинхронного двигателя

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2+q}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + q} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

или

$$\mu = \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2}$$

на весьма близкую к ней приближенную характеристики [Л. 3]

$$\mu = \sigma(2 - \sigma) = 1 - (1 - \sigma)^2.$$

Решение имеет вид [Л. 3,5]:

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{\mu_s - 1}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{\mu_s - 1}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1 - \mu}{\mu_s - 1}} \right], \quad (\mu_s > 1), \quad (7a)$$

$$\tau = \frac{1}{2\sqrt{1 - \mu_s}} \ln \frac{\sqrt{1 - \mu_s} + \sqrt{1 - \mu}}{\sqrt{1 - \mu_s} - \sqrt{1 - \mu}}, \quad (\mu_s < 1). \quad (7b)$$

В (7a)  $\tau = \frac{t}{T_m}$  — относительное время возрастания момента двигателя при данном  $\mu_s = \text{const} > 1$  от 0 до  $\mu$ ; в (7b)  $\tau$  — время убывания момента при данном  $\mu_s < 1$  от опрокидывающего значения  $\mu = 1$  до заданного значения  $\mu$ .

Для получения прямой зависимости  $\mu$  от  $\tau$  достаточно решить уравнения (7a) и (7b) относительно  $\mu$ , что дает:

$$\mu = 1 - \left( \frac{1 - \xi \operatorname{tg} \xi \tau}{1 + \frac{1}{\xi} \operatorname{tg} \xi \tau} \right)^2; \quad \xi = \sqrt{\mu_s - 1}, \quad \mu_s > 1, \quad (8a)$$

$$\mu = 1 - \xi^2 \left( \frac{e^{2\xi\tau} - 1}{e^{2\xi\tau} + 1} \right)^2, \quad \xi = \sqrt{1 - \mu_s}, \quad \mu_s < 1. \quad (8b)$$

Стандартные кривые изменения  $\mu = \frac{M}{M_m}$  в функции

от  $\tau = \frac{t}{T_m}$  построены на рис. 1 для случая возрастания  $\mu$  (при  $\mu_s > 1$ ) и на рис. 2 — для случая убывания  $\mu$  (при  $\mu_s < 1$ ).

Кривые позволяют без особых затруднений построить нагрузочную диаграмму  $\mu = \Phi(\tau)$  двигателя. При наличии регулятора скольжения переход с одной ступени скольжения на другую отражается лишь на значениях базисной величины  $T_m$  относительного времени, пропорциональных величине опрокидывающего скольжения при данном внешнем сопротивлении

$$T_r = \frac{GD^2 n_0}{375 M_m} s_{mr}, \quad \text{где } s_{mr} = \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}}{\lambda} s_{nr}.$$

Необходимо подчеркнуть, что в диаграмме  $\mu = \Phi(\tau)$  значения момента двигателя требуется определить лишь в начале и конце ( $\mu_{1k}$  и  $\mu_{2k}$ ) каждого отдельного интервала времени  $\tau_k$ , для которого<sup>3</sup>

$$\mu_{sk} = \text{const}, \quad T_r = \text{const}.$$

Переходя к определению закона изменения тока двигателя, прежде всего укажем, что, имея нагрузочную диаграмму двигателя  $M = \Phi(t)$ , нет надобности рассчитывать аналогичную диаграмму  $I = \Phi(\tau)$ . Достаточно использовать зависимость между  $M$  и  $I$ . Эта зависимость дается для асинхронного электродвигателя предложенной Л. Б. Гейлером [Л. 7] формулой

$$i = \frac{I}{I_n} = \sqrt{i_0^2 + \lambda(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})(1 - i_0^2)(1 - \sqrt{1 - \mu^2})}, \quad (9)$$

<sup>3</sup> Для более точного определения величины  $\mu_{1k}$  и  $\mu_{2k}$  для значений  $\mu_s$ , промежуточных к принятым для кривых семейства рис. 1, можно воспользоваться графиком другого (рис. 3,а) семейства кривых, также зависящих от параметра  $\mu_s$ , а именно  $\mu = \varphi(\mu_s; \theta)$ . В этих кривых за аргумент принята вспомогательная величина  $\theta = \frac{\tau}{\tau_x}$ , где  $\tau_x$

без труда определяется из стандартной графической зависимости (рис. 3, б)

$$\tau_x = \frac{1}{\sqrt{\mu_s - 1}} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{\mu_s - 1}}.$$

В силу (7a)  $\tau_x$  есть время изменения  $\mu$  от 0 до 1 при данном  $\mu_s = \text{const}$ , благодаря чему все кривые  $\mu = \varphi(\mu_s; \theta)$  для любого  $\mu_s$  в отличие от кривых рис. 1 проходят через две фиксированные точки ( $\mu = 0, \theta = 0$ ) и ( $\mu = 1, \theta = 1$ ), что весьма сближает эти кривые, существенно облегчая интерполяцию значений  $\mu$  для промежуточных значений  $\mu_s$ .

где  $i_0 = \frac{I_0}{I_n}$  — относительная (в долях номинального тока)

величина тока холостого хода двигателя;  $\mu = \frac{M}{M_m}$ . С учетом отношения между векторами тока статора  $\dot{I}$  и ротора  $\dot{I}_r$

$$\dot{I} = \dot{I}_0 + \dot{I}_r.$$

Величину приведенного тока ротора  $I_r$  можно получить из (9), положив  $I_0 = 0$  [Л. 7], что дает<sup>4</sup>:

$$i_r = \frac{I_r}{I_n} = \sqrt{\lambda(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})(1 - \sqrt{1 - \mu^2})}. \quad (10)$$

Мы несколько видоизменим эти формулы, приведя их к более удобному для практики виду, для чего за базисную величину тока примем ток  $I_m$  в точке опрокидывания характеристики, равный согласно (10) при  $\mu = 1$

$$I_m = I_n \sqrt{\left(\frac{I_0}{I_n}\right)^2 + \lambda(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \left(1 - \left(\frac{I_0}{I_n}\right)^2\right)}. \quad (10a)$$

Тогда как нетрудно видеть, формулы (9) и (10) примут следующий простой вид:

$$i = \frac{I}{I_m} = \sqrt{1 - (1 - j_0^2) \sqrt{1 - \mu^2}}, \quad (11)$$

$$j_r = \frac{I_r}{I_m} = \sqrt{1 - \sqrt{1 - \mu^2}} = \sqrt{\frac{1 + \mu}{2}} + \sqrt{\frac{1 - \mu}{2}}. \quad (11a)$$

Из (11) закон изменения тока во времени за пропуск ( $\mu_s > 1$ ) с учетом (8a) получается в виде:

$$j = \sqrt{1 - (1 - j_0^2) \sqrt{2 - a^2}};$$

$$a = \frac{1 - \xi \operatorname{tg} \xi \tau}{1 + \frac{1}{\xi} \operatorname{tg} \xi \tau}.$$

**Определение средних за цикл потерь.** Благодаря очень малой величине воздушного зазора в междужелезном пространстве активные части статора и ротора асинхронного электродвигателя находятся в весьма близком тепловом взаимодействии. В асинхронном двигателе отсутствует коллектор, нагревание которого требует особого учета. Эти обстоятельства позволяют считать, что условия нагревания асинхронного двигателя по сравнению с другими электрическими машинами наименее отличны от идеализированных условий нагревания однородного тела. С другой стороны в условиях работы неререверсивного прокатного стана наибольшее допустимое скольжение составляет не более 12—15%, причем двигатель не имеет в работе остановки. Таким образом, даже при отсутствии обычно применяемой искусственной вентиляции условия охлаждения двигателя остаются в течение всей его работы неизменными. Наконец, продолжительность одного цикла работы  $t_z$ , обычно не превышающая несколько минут, значительно меньше постоянной времени нагрева электродвигателя  $T$ , равной нескольким часам.

<sup>4</sup> Для относительно больших значений  $\mu$  формула (10) дает повышенные значения  $I_r$ .

Вышеизложенное дает основание считать реально обоснованным применение для асинхронного прокатного двигателя в качестве уточненного метода метод расчета на нагрев по величине суммарных потерь в статоре и роторе двигателя. Применение принципиально более точного метода расчета по максимальной температуре перегрева фактически не дает никакого повышения точности расчета, а потому нецелесообразно.

Примем в дальнейшем, что потери в железе статора и ротора остаются приближенно одинаковыми при любой величине нагрузки на валу двигателя. Кроме того, будем пренебрегать величиной дополнительных потерь в меди двигателя, возникающих при работе двигателя в качестве универсального трансформатора в условиях потери мощности во внешних сопротивлениях ступеней скольжения в цепи ротора. Эти два допущения дают погрешности произвольных допущений зависимость тока в статоре и роторе двигателя от величины момента на валу (как известно, ток асинхронного двигателя по сравнению с номинальным режимом работы непропорционально велик как при недогрузке, так и при перегрузке двигателя).

С помощью последних формул возможно вычислить эквивалентные токи<sup>5</sup>  $I_e$  и  $I'_{re}$ . Основным является вычисление интеграла

$$Q_{kr} = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} j^2 dt = \Delta t - (1 - j_0^2) T_r \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sqrt{1 - \mu^2} d\tau, \quad (12)$$

взятого за интервал времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ , в течение которого электродвигатель работает на  $r$ -ой ступени скольжения в  $k$ -ой ступени  $M_{sk} = \text{const}$  нагрузочной диаграммы. Замечая, что в силу (7а) и (7б) при  $\mu_s \geq 1$  будет:

$$d\tau = \frac{d\mu}{2(\mu_s - \mu) \sqrt{1 - \mu^2}},$$

и положив в (12)  $\sqrt{1 + \mu} = y$ , находим:

$$Q_{kr} = \int_{t_1}^{t_2} j^2 dt = \Delta t - (1 - j_0^2) T_r \times \left[ \frac{\sqrt{\mu_s + 1}}{2} \ln \frac{y + \sqrt{\mu_s + 1}}{y - \sqrt{\mu_s + 1}} - y \right]_{y = \sqrt{1 + \mu_1}}^{y = \sqrt{1 + \mu_2}}. \quad (13)$$

Введем функцию  $\phi(\mu_s, \mu)$ , определяемую соотношением

$$\Delta t - \int_{t_1}^{t_2} j^2 dt = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} (1 - j^2) dt = (1 - j_0^2) T_r \Delta \phi, \quad (14)$$

или в силу (13)

$$\Delta \phi(\mu_s, \mu) =$$

$$= \left[ \frac{\sqrt{\mu_s + 1}}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \mu} + \sqrt{\mu_s + 1}}{\sqrt{1 + \mu} - \sqrt{\mu_s + 1}} - \sqrt{1 + \mu} \right]_{\mu = \mu_1}^{\mu = \mu_2}. \quad (15a)$$

Правая часть этого равенства, как легко убедиться, всегда вещественна, хотя, если  $\mu_s > \mu$ , то в принятой в (15а) записи каждая из двух величин  $\phi(\mu_s, \mu_2)$  и  $\phi(\mu_s, \mu_1)$ , взятая в отдельности, предстанет в комплексном виде. Для устранения этого неудобства, используя очевидное тождество

$$\left[ \ln \frac{y + a}{y - a} \right]_{y=y_1}^{y=y_2} = \left[ \ln \frac{a + y}{a - y} \right]_{y=y_1}^{y=y_2},$$

достаточно, сохраняя формулу (15а) лишь для значений  $\mu_s < \mu$ , для случая  $\mu_s > \mu$  переписать ее в виде:

$$\Delta \phi(\mu_s, \mu) = \left[ \frac{\sqrt{\mu_s + 1}}{2} \ln \frac{\sqrt{\mu_s + 1} + \sqrt{1 + \mu}}{\sqrt{\mu_s + 1} - \sqrt{1 + \mu}} - \sqrt{1 + \mu} \right]_{\mu = \mu_1}^{\mu = \mu_2}. \quad (15b)$$

Разностные соотношения (15а) и (15б) определяют для функции  $\phi(\mu_s, \mu)$  в (14) два аналитических выражения, соответственно  $\phi_2$  и  $\phi_1$ , каждое с точностью до некоторой постоянной, зависящей лишь от  $\mu_s$ , но не от  $\mu$ . Эти постоянные, как оказывается, наиболее целесообразно выбрать так, чтобы

$$\phi_1(\mu_s, 0) = 0; \quad \phi_2(\mu_s, 1) = 0. \quad (15c)$$

Окончательно находим следующие выражения для функции  $\phi(\mu_s, \mu)$  в (14):

$$\mu_s > \mu;$$

$$\phi = \phi_1 =$$

$$= \frac{\sqrt{\mu_s + 1}}{2} \ln \frac{(\sqrt{\mu_s + 1} + \sqrt{1 + \mu})(\sqrt{\mu_s + 1} - 1)}{(\sqrt{\mu_s + 1} - \sqrt{1 + \mu})(\sqrt{\mu_s + 1} + 1)} - (\sqrt{1 + \mu} - 1), \quad (16a)$$

$$\mu_s < \mu,$$

$$\phi = \phi_2 =$$

$$= \frac{\sqrt{1 + \mu_s}}{2} \ln \frac{(\sqrt{1 + \mu} + \sqrt{1 + \mu_s})(\sqrt{2} - \sqrt{1 + \mu_s})}{(\sqrt{1 + \mu} - \sqrt{1 + \mu_s})(\sqrt{2} + \sqrt{1 + \mu_s})} + (\sqrt{2} - \sqrt{1 + \mu}). \quad (16b)$$

Для практически важных значений  $\mu_s \geq 1$  на рис. 4 и 5 даны стандартные графики функций  $\phi_1(\mu_s, \mu)$  и  $\phi_2(\mu_s, \mu)$ , представляющие семейства кривых, зависящие от параметра  $\mu$ , заключенного в пределах  $0 \leq \mu \leq \mu_1$ .

Суммируя выражения типа (13) последовательно на всей диаграмме для различных ступеней моментов ( $\mu_{sk} = \text{const}$ ) и ступеней скольжения ( $T_r = \text{const}$ ), получаем следующую простую формулу для эквивалентного тока статора:

$$I_e^2 t_z = I_m^2 \sum_k \sum_r Q_{kr} = I_m^2 [t_z - (1 - j_0^2) \sum_r T_r \Delta \phi] \quad (17)$$

или

$$j_e = \frac{I_e}{I_m} = \sqrt{1 - \frac{1 - j_0^2}{t_z} \sum_r T_r \Delta \phi}. \quad (17a)$$

<sup>5</sup> Точная общая формула для  $M_e$  имеет вид [Л. 5 и 8]:

$$\mu_e = \frac{M_e}{M_m} = \sqrt{\mu_{se}^2 - \frac{1}{t_z} \sum_{k=1}^N \left\{ (\mu_{sk} - \mu_0) \sum_r T_r (\sqrt{1 - \mu_{r \min}} - \sqrt{1 - \mu_{r \max}}) \right\}}$$

где  $\mu_{r \min}$  и  $\mu_{r \max}$  — начальное и конечное значения момента двигателя на  $r$ -ой ступени регулятора скольжения при  $M_s = M_{sk}$ .

Величины  $\Delta\psi = \psi(\mu_s, \mu_2) - \psi(\mu_s, \mu_1)$  для каждого интервала времени при  $M_{sk} = \text{const}$ ,  $T_r = \text{const}$  определяются из нагрузочной диаграммы двигателя по граничным значениям момента двигателя  $\mu_1$  и  $\mu_2$  с помощью кривых рис. 4 (при  $\mu_2 > \mu_1$ ) или рис. 5 (при  $\mu_2 < \mu_1$ ).

Формула (17а) уже может служить для проверки двигателя на нагрев по эквивалентному току. Однако, если известны величины  $R_s$  и  $R'_r$  активных сопротивлений статора и ротора, нетрудно применить более точный метод средних потерь. Полагая в (17)  $j_0 = 0$ , получим для цепи ротора

$$I'_{re}^2 t_z = I_m^2 (t_z - \Sigma T_r \Delta\psi). \quad (18)$$

Отсюда для величины средних потерь в меди двигателя  $\Delta P_{м.ср}$  за время цикла  $t_z$  получаем формулу:

$$\Delta P_{м.ср} = I_m^2 \left[ (R_s + R'_r) - \frac{R_s (1 - j_0^2) + R'_r}{t_z} \Sigma T_r \Delta\psi \right]. \quad (19)$$

Эта величина не должна превосходить потерь в меди двигателя при номинальной нагрузке, равных

$$\Delta P_{мн} \approx I_n^2 (R_s + R'_r). \quad (19a)$$

Здесь для номинальных потерь в меди ротора принято повышенное значение с учетом сказанного в сноске 4. Формула (19) исчерпывает вопрос о проверке мощности асинхронного прокатного двигателя по условиям нагревания в наиболее общем случае его работы с контакторным регулятором скольжения.

Вывод формулы для зависимости  $M_e = F(T_m)$ . Для формулы (6) ограничиваемся указаниями о ходе ее вывода. Величина эквивалентного момента  $M_e$  асинхронного прокатного двигателя при отсутствии регулятора скольжения определяется следующей точной формулой [Л. 5], являющейся частным случаем формулы, указанной в сноске 5:

$$\mu_e = \frac{M_e}{M_m} = \sqrt{\mu_{se}^2 - \frac{T_m}{t_z} \sum_{k=1}^N (\mu_{sk} - \mu_0) (\sqrt{1 - \mu_{1k}} - \sqrt{1 - \mu_{2k}})}, \quad (20)$$

где  $\mu_{k1}$ ,  $\mu_{k2}$  — начальное и конечное значения  $\mu$  для  $k$ -го пропуска  $\mu_{sk} = \text{const}$ , длительностью  $t_k = T_m \tau_k$  (всего имеется  $N$  пропусков, чередующихся со столькими же паузами). Для вывода (6) прежде всего выражаем в (20) все величины  $\mu_{2k}$  через соответственные  $\mu_{1k}$  с помощью формул (7а), после чего  $\mu_e$  оказывается возможным с большей точностью представить в виде:

$$\mu_e = \sqrt{1 - \frac{T_m}{t_z} \sum \frac{(\mu_{sk} - \mu_0) \frac{\mu_{sk} - \mu_{1k}}{\sqrt{1 - \mu_{1k}}}}{1 + \frac{T_m}{t_k \sqrt{1 - \mu_{1k}}}}}. \quad (21)$$

Заменяя сумму под знаком корня одним усредненным выражением того же типа, приходим предварительно к следующему виду приближенной формулы для  $\mu_e$ :

$$\mu_e = \sqrt{1 - \frac{T_m}{t_z} \frac{\mu_x^2}{1 + \frac{T_m}{t_x}}}. \quad (22)$$

В первом приближении принимаем неизвестные параметры  $\mu_x^2$  и  $t_x$  постоянными, причем  $\mu_x^2$  исключаем с помощью условия  $\lim_{T_m \rightarrow \infty} \mu_e = \mu_{ср}$ , которое дает:

$$\mu_x^2 = m \frac{t_z}{t_x}; \quad m = 1 - \left( \frac{M_{ср}}{M_{se}} \right)^2. \quad (23)$$

Но получаемое тогда для  $t_x$  из (22) и (23) выражение оказывается функцией первой степени от  $T_m$ ; поэтому в качестве второго приближения полагаем:

$$t_x = \alpha T_m + \beta,$$

причем  $\alpha$  и  $\beta$  определяются из условий

$$\alpha = \lim_{T_m \rightarrow \infty} \frac{t_x}{T_m}; \quad \beta = \lim_{T_m \rightarrow 0} t_x.$$

Подстановка полученного линейного выражения для  $t_x$  в (22) с учетом (23) приводит к выражению

$$\mu_e = \sqrt{1 - \frac{m T_m}{(\alpha + 1) T_m + \beta}}. \quad (24)$$

В целях сохранения при осуществляемом переходе от первого приближения ко второму условия  $\lim_{T_m \rightarrow \infty} \mu_e = \mu_{ср}$

в выражение под знаком радикала необходимо ввести корректирующий множитель  $k$ , который оказывается равным  $k = \alpha + 1$ .

Окончательно находим:

$$\mu_e = \sqrt{1 - m \frac{T_m}{T_m + t_x}},$$

где

$$t_x = \frac{\beta}{\alpha + 1} = \frac{\Sigma (M_{sk} - M_0) (M_{sk} - M_{ср}) t_k}{\Sigma (M_{sk} - M_0)^2},$$

т. е. приходим к формуле (6).

## Литература

1. Н. П. Кунцкий. Электрооборудование прокатных и термических цехов. М., 1938
2. В. А. Шубенко. Работа электродвигателя с маховыми массами. Электричество, № 15—16, 1936.
3. Г. М. Каялов. Работа асинхронного электродвигателя при вращающем моменте, близком к опрокидывающему. Вестник электропромышленности, № 7, 1937.
4. Л. Б. Гейлер. Новая формула для расчета привода с маховыми массами. Электричество, № 22, 1937.
5. Г. М. Каялов. К теории работы главных приводов нерегулируемых прокатных станков. Технический бюллетень Ростовского проектного управления „Кавэлектромонтаж“, № 2, 1946.
6. Г. М. Каялов. Общее выражение для зависимости эквивалентного момента асинхронного прокатного двигателя от инерционной постоянной времени. НИИ Новочеркасского индустриального института, 1946.
7. Л. Б. Гейлер. К вопросу о выборе мощности асинхронного двигателя по эквивалентному моменту. Технический бюллетень Ростовского проектного управления „Кавэлектромонтаж“, 1944.
8. Г. М. Каялов. Введение в теорию электрического привода неререверсивных прокатных станков. НИС Новочеркасского индустриального института, 1946.
9. Г. М. Каялов. Новая формула для эквивалентного момента прокатного двигателя, работающего с маховиком. Технический бюллетень Ростовского проектного управления „Кавэлектромонтаж“, № 1, 1945.

# Расхождение характеристик тяговых двигателей и использование сцепного веса на электровозах постоянного тока

Кандидат техн. наук А. В. БЫЧКОВСКИЙ

Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта

Как известно, скоростные характеристики современных тяговых электродвигателей одного и того же типа не являются строго идентичными.

Согласно ОСТ НКМ 4320, действовавшего в СССР до 1945 г., заводам разрешалось выпускать тяговые двигатели с отклонением характеристик в пределах  $\pm 5\%$  от средней гарантийной; ГОСТ 2582-44 введенный с 1 января 1945 г., уменьшил пределы отклонения до  $\pm 4\%$ . Однако, в процессе эксплуатации характеристики двигателей изменяются и расхождение возрастает.

На рис. 1 представлены диаграммы распределения тяговых двигателей советских магистральных электровозов по градациям характеристик; на рис. 2 изображены диаграммы изменения скорости вращения этих же двигателей при реверсировании. Эти диаграммы получены в ЦНИИ железнодорожного транспорта путем анализа опытных характеристик около 900 двигателей. (В данной работе участвовал инж. Б. В. Забродин).

На рис. 2 видно, что около 92% обследованных двигателей (типа ДПЭ-340) при правом вращении (т. е. при вращении по часовой стрелке, если смотреть со стороны коллектора) имеют большую скорость, чем при левом вращении, в среднем на 1,2%.

Такое закономерное изменение скорости вращения при реверсировании является характерной особенностью двигателей ДПЭ-340 производства завода «Динамо» им. Кирова; теоретически такое явление может быть объяснено наличием, например, неправильного расположения коллектора по отношению к пазам якоря, неправильного размещения щеткодержателей.

В случае индивидуального привода сила тяги одной оси электровоза при серийном соединении всех двигателей может быть выражена формулой

$$F_i = \frac{F_{cp} m}{\beta_i D_i \sum_{i=1}^m \frac{1}{\beta_i D_i}}, \quad (1)$$

где  $F_i$  — сила тяги данной оси;

$F_{cp}$  — средняя сила тяги одной оси электровоза;

$m$  — число двигателей (осей) на электровозе;

$D_i$  — диаметр колес данной оси по кругу качания;

$\beta_i$  — относительное отклонение характеристики двигателя данной оси от средней. При расхождении характеристик двигателей в пределах  $\pm 5\%$ ,  $0,95 \leq \beta_i \leq 1,05$ .

Ясно, что наибольшая сила тяги  $F_{max}$  при серийном соединении будет у того двигателя, у которого произведение  $\beta_i D_i$  наименьшее; при этом отношение максимальной силы тяги к средней будет равно:

$$\Delta' F_{max} = \frac{F_{max}}{F_{cp}} = \frac{m}{(\beta_i D_i)_{min} \sum_{i=1}^m \frac{1}{\beta_i D_i}}. \quad (2)$$

Величина  $\Delta' F_{max}$  характеризует неравномерность распределения силы тяги электровоза по отдельным осям.

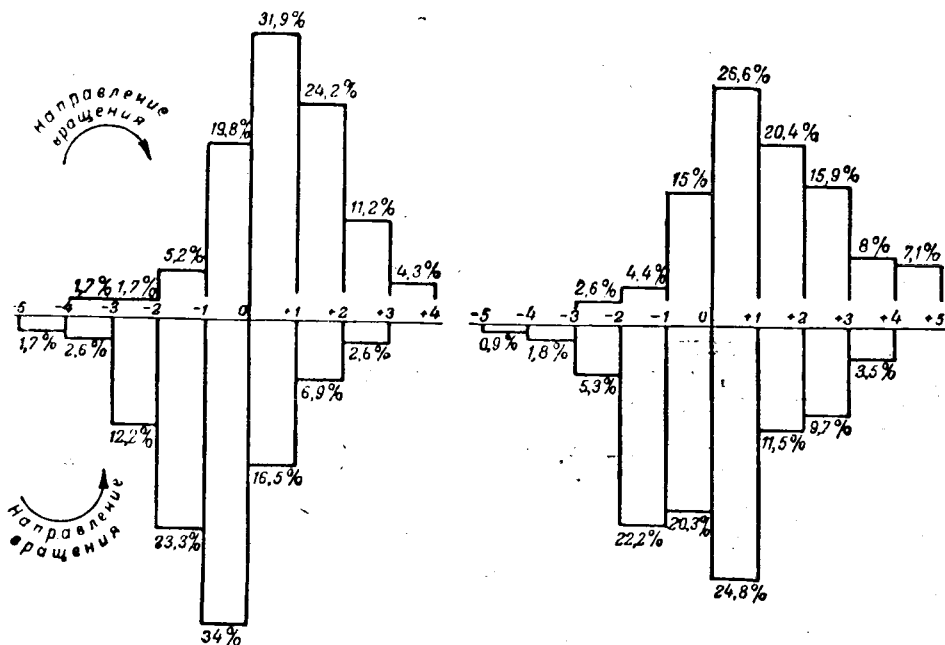


Рис. 1. Распределение тяговых двигателей по градациям характеристик. По горизонтальным осям отложены отклонения характеристик от средней в %; высоты прямоугольников — количество двигателей в %. Стрелки — направление вращения; левый рисунок — новые двигатели, правый — ремонтные двигатели.



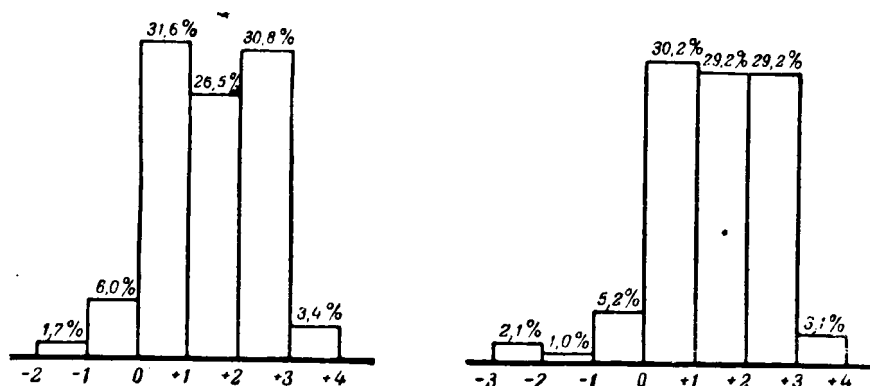


Рис. 2. Изменения характеристик двигателей при реверсировании. По горизонтальным осям отложено расхождение оборотов правого вращения по отношению к левому в %; высоты прямоугольников—количество двигателей в %; левый рисунок—новые двигатели, правый—ремонтные двигатели.

Для параллельного соединения всех двигателей электровоза можно получить:

$$F_i = F_{cp} \frac{m \alpha_i \left( \beta_i \frac{D_i}{D_{cp}} \right)}{\sum_{i=1}^m \alpha_i \left( \beta_i \frac{D_i}{D_{cp}} \right)} \quad (3)$$

и

$$\Delta' F_{\max} = \frac{m \alpha_i \left( \beta_i \frac{D_i}{D_{cp}} \right)_{\max}}{\sum_{i=1}^m \alpha_i \left( \beta_i \frac{D_i}{D_{cp}} \right)} \quad (4)$$

где

$$\alpha_i = \frac{I_i}{I_{cp} \left( \beta_i \frac{D_i}{D_{cp}} \right)} \quad (5)$$

В формулах (3)–(5)  $D_{cp}$ —среднее значение диаметра колес на данном электровозе;

$I_i$ —ток данного двигателя;

$I_{cp}$ —ток, который был бы при данной скорости у двигателя, имеющего  $\beta=1$ , и средний диаметр колес.

Величина  $\alpha_i$  определяется путем графического построения характеристик двигателей с разными значениями  $\beta_i D_i$ ; при практических расчетах величина  $\alpha_i$  для каждого типа двигателей может быть выражена с достаточной точностью эмпирической формулой; так, для двигателей типа ДПЭ-340 в интервале нагрузки 250–400 А

$$\alpha_i = 3,5 - \frac{2,5}{\beta_i} \quad (6)$$

Для смешанного соединения двигателей, когда мы имеем  $m_n$  параллельных цепей, в каждой из которых  $m_c$  последовательно соединенных двигателей, получается:

$$F_i = F_{cp} \frac{m \alpha_{ci} \beta_{ci}^3}{\left[ \beta_i D_i \sum_{i=1}^m \frac{1}{D_i} \right] \beta_{ci} \sum_{i=1}^m \alpha_{ci} \beta_{ci}} \quad (7)$$

$$\Delta' F_{\max} = \frac{m \alpha_{c \max} \beta_{c \max}^3}{\left[ (\beta_i D_i)_{\min} \sum_{i=1}^m \frac{1}{D_i} \right] \beta_{c \max} \sum_{i=1}^m \alpha_{ci} \beta_{ci}} \quad (8)$$

где

$$\beta_{ci} = \frac{\sum_{i=1}^{m_c} \frac{1}{D_i}}{\sum_{i=1}^{m_c} \frac{1}{\beta_i D_i}} \quad (9)$$

Величина  $\beta_{ci}$  определяет отклонение одной сводной характеристики группы последовательно соединенных двигателей от средней характеристики двигателя (с учетом диаметра бандажей). В выражении (8) величина  $(\beta_i D_i)_{\min}$  принадлежит двигателю, находящемуся в цепи с  $\beta_{c \max}$ .

Пользуясь полученными нами формулами, можно установить, что на шестиосном электровозе расхождение характеристик двигателей в пределах  $\pm 5\%$  при одинаковых диаметрах колес может обусловить теоретические предельные значения неравномерности тяги, указанные в таблице 1; в этой же таблице приведены опытные данные, полученные при испытании некоторых электровозов серии ВЛ-19 и Сс-11.

Неравномерность распределения силы тяги на шестиосных электровозах

Соединение двигателей	Неравномерность тяги $\Delta' F_{\max}$ в %	
	предельная теоретическая	опытная
Сериесное ( $m_c = m_n = 6$ )	8	3
Сериес-параллельное ( $m_n = 2; m_c = 3$ )	20	8
„Параллельное“ на электровозах 3 000 В ( $m_n = 3; m_c = 2$ )	25	10
Параллельное на электровозах 1 500 В ( $m_n = m = 6$ )	32	20

Таким образом, в зависимости от схемы соединения двигателей, предельная теоретическая неравномерность тяги колеблется от 8 до 32%; на практике же наблюдалась неравномерность от 3 до 20%. Расхождение между теоретическими и опытными данными объясняется тем, что количество двигателей с предельными отклонениями характеристик сравнительно мало (рис. 1) и поэтому на один электровоз практически не попадают двигатели с крайними отклонениями характеристик. Следует заметить, что при режи-

мах шунтировки поля неравномерность тяги может быть больше указанной в случае наличия неодинаковой величины шунтирующих сопротивлений у разных двигателей.

Небезынтересно отметить, что при испытаниях электровазов ВЛ-19 на серийно-параллельном и параллельном соединениях была обнаружена закономерная перегрузка двигателей задней по ходу тележки (благоприятная в отношении использования сцепного веса) и недогрузка двигателей передней тележки; это объясняется вышеуказанной закономерностью изменения характеристик двигателей при реверсировании (фиг. 2) и неодинаковым направлением вращения двигателей, установленных на разных тележках; двигатели задней тележки имеют правое вращение, передней—левое.

Исследование вопроса о влиянии неравномерности тяги осей на использование сцепного веса электровазов привело к следующим основным выводам.

При равномерной статической развеске осей, у тех электровазов, у которых нагрузка осей не изменяется под действием силы тяги (например, у электровазов типа ПБ), коэффициент использования сцепного веса  $\eta_c$  может быть выражен формулой

$$\eta_c = \frac{1}{\Delta F_{\max}}. \quad (10)$$

Если на серийном соединении двигателей величина  $\Delta F_{\max}$  равна 1,03, то  $\eta_c \approx 0,97$ ; на параллельном соединении при  $\Delta F_{\max} = 1,10$  имеем  $\eta_c \approx 0,91$  и т. д., в то время как при отсутствии неравномерности тяги  $\eta_c = 1$ .

Таким образом, на электровазе данного типа при равномерной статической развеске осей любое расхождение характеристик двигателей и размеров осевых бандажей ухудшает использование сцепного веса. В случае неравномерной развески иногда неравномерность тяги может улучшать использование сцепного веса на одном определенном соединении двигателей.

На электровазах же, у которых под действием силы тяги происходит изменение нагрузки осей, неравномерность тяги может не только ухудшать использование сцепного веса, но иногда и улучшать его.

Расчеты, произведенные для электровазов серий ВЛ-19 и ВЛ-22, показали, что в некоторых теоретически предельных случаях величина  $\eta_c$  может снижаться примерно до 0,65 и повышать-

ся до 0,97, в то время как при равномерной тяге  $\eta_c$  около 0,90.

Кроме того, выяснилось, что при перестановке одних и тех же двигателей с разными характеристиками по осям электроваза величина  $\eta_c$  на серийном соединении может меняться на 10%, а на параллельном на 20%; при этом оптимальное размещение двигателей применительно к серийному соединению не соответствует такому для параллельного, и наоборот.

Рациональное разрешение этого противоречия заключается в размещении двигателей применительно к параллельному соединению, так как на этом соединении происходит движение электроваза на подъемах.

Установлено также, что расхождение характеристик двигателей, как правило, обуславливает неодинаковое использование сцепного веса в разных направлениях движения; например, на электровазе ВЛ-19 при одном направлении движения может быть  $\eta_c = 0,96$ , а при обратном—  $\eta_c = 0,87$ .

Однако, на электровазе ВЛ-19 можно установить двигатели с разными характеристиками таким образом, что на параллельном соединении значения  $\eta_c$  будут примерно одинаковы в обоих направлениях движения; для этого должно быть:

$$\beta_1 D_1 + \beta_2 D_2 \approx \beta_3 D_3 + \beta_4 D_4 \approx \beta_5 D_5 + \beta_6 D_6, \quad (11)$$

но более рациональна установка двигателей по следующей формуле:

$$\beta_5 D_5 > \beta_6 D_6 > \beta_2 D_2 > \beta_1 D_1 > \beta_3 D_3 > \beta_4 D_4. \quad (12)$$

В случае соблюдения условия (12) при одном направлении движения величина  $\eta_c$  будет примерно такая же, как и при условии (11), в другом же направлении движения  $\eta_c$  будет значительно выше.

В формулах (11) и (12) индексы означают номера осей. Нумерация осей на электровазах ВЛ-19 должна соответствовать наиболее трудному направлению движения; на электровазах ВЛ-22 и Сс нумерация осей должна начинаться с тележки, имеющей поперечный балансир.

Формулы (11) и (12) справедливы только для случая строго равномерной статической развески осей. Для неравномерной же развески в каждом конкретном случае может быть найдено свое частное наивыгоднейшее размещение двигателей.



# Барретыеры

Инж. Д. Я. АШКЕНАЗИ

Завод „Электрoлампa“

Баррeтeрoм нaзывается прибор с помещенным в газовую среду металлическим проводником, ток через который при изменениях наложенного на него напряжения остается почти неизменным.

Баррeтeрeы применяются, главным образом, в радиоаппаратуре для стабилизации тока накала радиолaмп, например для бeстрaнсфoрмaтoрных приемников, а также для стабилизации тока в шунтовой обмотке генераторов постоянного тока и т. п.

Следует различать два вида баррeтeрeв:

1. Приборы, в которых вследствие роста температуры проводника при прохождении электрического тока и соответствующего роста сопротивления ток увеличивается в значительно меньшей степени, чем напряжение (баррeтeрeы с поднимающейся характеристикой).

2. Приборы, в которых имеет место неравномерное распределение температуры вдоль проводника, вследствие чего ток даже уменьшается с ростом напряжения (баррeтeрeы с падающей характеристикой).

До последнего времени баррeтeрeы изготовлялись только с железной нитью. В настоящее время приобретают права гражданства баррeтeрeы с вольфрамoвoй нитью. Участок баррeтирoвaния их несколько уже, чем у железно-водородных баррeтeрeв, зато они отличаются простотой конструкции и дешевизной, устойчивостью работы, способностью выдерживать значительные перенапряжения и длительным сроком службы. Если баррeтeрy приходится выдерживать хотя бы кратковременную перегрузку, то можно использовать только баррeтeрeы с вольфрамoвoй нитью. Баррeтeр с железной нитью должен быть защищен в таком случае термистором.

В СССР до войны было выпущено всего 4 типа баррeтeрeв. В настоящее время номенклатура их быстро расширяется.

**Выбор баррeтeрa для стабилизации тока в электрической цепи.** Так как баррeтeрeы могут обладать вольтамперными характеристиками как с положительным, так и с отрицательным наклоном, то, очевидно, возможно и такое положение, когда характеристика почти параллельна оси напряжений. Разработка приборов с подобными характеристиками представляет значительные трудности. Тем не менее для различного рода специальных схем желательно применить и такие баррeтeрeы. Обычно выгоднее всего применять баррeтeрeы с положительным наклоном вольтамперной характеристики. В самом деле, если под напряжение  $E$  последовательно включены прибор с активным сопротивлением  $R$  и баррeтeр, то

$$U = U_0 + IR,$$

где  $U_0$  — напряжение на баррeтeрe;  $I$  — ток в цепи.

При изменении питающего напряжения от  $U_1$  до  $U_2$  будем иметь:

$$E_1 = U_{01} + I_1 R; \quad E_2 = U_{02} + I_2 R.$$

Если  $E_2 > E_1$ , то  $U_{02} > U_{01}$  и в случае положительного наклона вольтамперной характеристики  $I_2 > I_1$ . Если баррeтeр поддерживает почти неизменный ток при изменении напряжения на нем  $U_{02} - U_{01}$ , то допустимое изменение напряжения сети (область регулировки) равно

$$U_2 - U_1 = U_{02} - U_{01} + (I_2 - I_1)R.$$

Таким образом область регулирования расширяется за счет изменения падения напряжения на сопротивлении  $R$ . Поэтому для практически устройств желательно применять баррeтeрeы с положительным наклоном вольтамперной характеристики, причем наклон следует допускать, исходя из условий работы данной схемы.

Если приходится использовать имеющиеся баррeтeрeы, то в том случае, когда ток одного баррeтeрa мал, можно объединить несколько баррeтeрeв в параллельную группу. Если же ток баррeтeрa слишком велик, можно установить параллельно рабочему сопротивлению шунт.

**Определение параметров баррeтeрeв.** При выборе баррeтeрa для заданной электрической цепи приходится исходить как из данных цепи, так и из свойств баррeтeрeв.

Введем обозначения:

$U_0$  — номинальное напряжение прибора, в котором нужно стабилизировать ток;

$\Delta = \pm \frac{\Delta U_0}{U_0}$  — допустимое относительное отклонение напряжения от номинального;

$I$  — номинальный ток прибора;

$i = \pm \frac{\Delta I}{I} = \varphi(\Delta)$  — допустимое относительное отклонение тока от номинального;

$U_{np \min} = IR_x$ , где  $R_x$  — „холодное“ сопротивление прибора (например, у подогревных катодов);

$E_0$  — среднее напряжение сети;

$\delta = \pm \frac{\Delta E_0}{E_0}$  — относительное отклонение напряжения сети от среднего значения;

$E_{\max} = E_0 (1 + \delta)$  — максимальное напряжение сети;

$E_{\min} = E_0 (1 - \delta)$  — минимальное напряжение сети;

$U_{00}$  — номинальное напряжение баррeтeрa;

$U_{\delta \max}$  — максимальное рабочее напряжение барретера;

$U_{\delta \min}$  — минимальное рабочее напряжение барретера (пределы барретирования);

$$\sigma = \frac{U_{\delta \max} - U_{\delta 0}}{U_{\delta 0}} = \frac{U_{\delta 0} - U_{\delta \min}}{U_{\delta 0}} = f(j) \text{ — коэффициент барретирования;}$$

$U_{\delta \text{ пер}}$  — максимальное напряжение перегрузки вольфрамового барретера, более высокое, чем верхний предел барретирования;

$$m = \frac{U_{\delta \text{ пер}}}{U_{\delta 0}} \text{ — коэффициент перегрузки, зависящий от свойств барретера (только для вольфрамовых барретеров).}$$

Величина  $\sigma$  характеризует ширину рабочего участка и определяется свойствами барретера. На рис. 1 представлены средние значения  $\sigma$  в функции от  $j$  для разных типов барретеров. При изменении конструктивных и технологических данных барретеров  $\sigma$  может изменяться в пределах  $\pm 15\%$  от величин, данных на рис. 1. Величина  $m$  в зависимости от выбора рабочего участка меняется от 3 до 4,5 и в среднем может быть принята равной 3,75.

Рабочие условия электрической цепи могут быть заданы тремя различными способами. Приведем определяющие данные барретера для каждого из этих случаев расчетные формулы, выведенные автором совместно с доц. Г. А. Тягуновым.

Случай 1. Дано:  $U_0, \Delta, I, j, \delta, U_{\text{пр. min}}$ . Требуется определить  $E_0, U_{\delta 0}, U_{\delta \max}$  и  $U_{\delta \min}$ .

Находим  $\sigma$  по графику рис. 1. В зависимости от величины напряжения перегрузки выбираем  $m$ . Общее уравнение электрической цепи в нашем случае

$$E_0 = U_0 + U_{\delta 0} \quad (1)$$

Исходя из определения параметров, получим:

$$E_0(1 + \delta) = U_0(1 + \Delta) + U_{\delta 0}(1 + \sigma). \quad (2)$$

Исключая  $U_{\delta 0}$  из (1) и (2), имеем:

$$E_0 = U_0 \frac{\sigma - \Delta}{\sigma - \delta}; \quad (3)$$

$$U_{\delta 0} = E_0 - U_0. \quad (4)$$

Проверяем перегрузочную способность барретера:

$$E_0(1 + \delta) - U_{\text{пр. min}} \leq U_{\delta \text{ пер}} = m U_{\delta 0}. \quad (5)$$

Если условие (5) соблюдено, то барретер пригоден для данной схемы.

Пределы барретирования:  $U_{\delta \max} = U_{\delta 0}(1 + \sigma)$ ,  
 $U_{\delta \min} = U_{\delta 0}(1 - \sigma)$ .

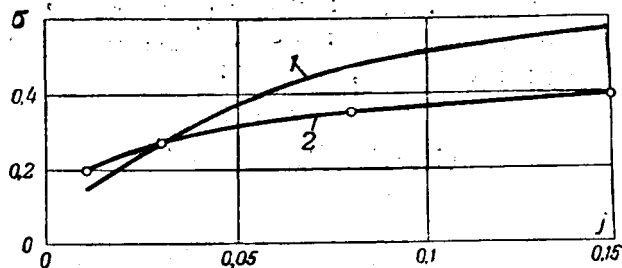


Рис. 1. Зависимость  $\sigma = f(j)$  для железных (кривая 1) и вольфрамовых (кривая 2) барретеров.

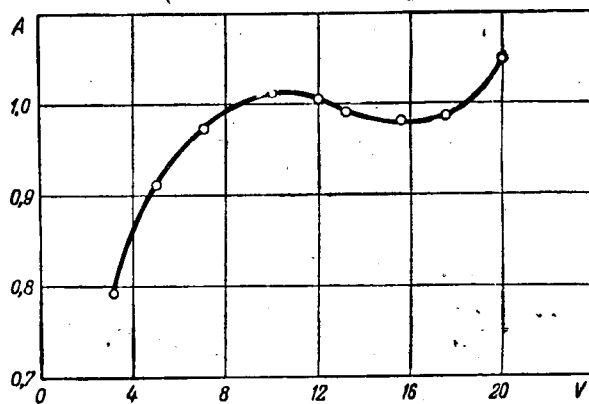


Рис. 2. Характеристика барретера типа 1Б10-17.

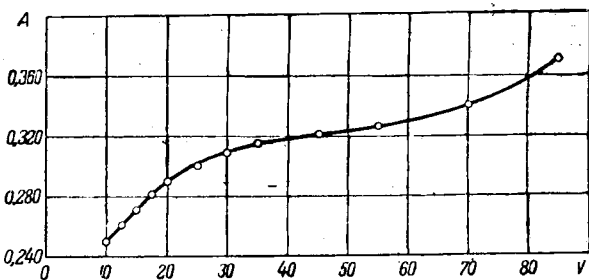


Рис. 3. Характеристика барретера типа 0,35Б17-35.

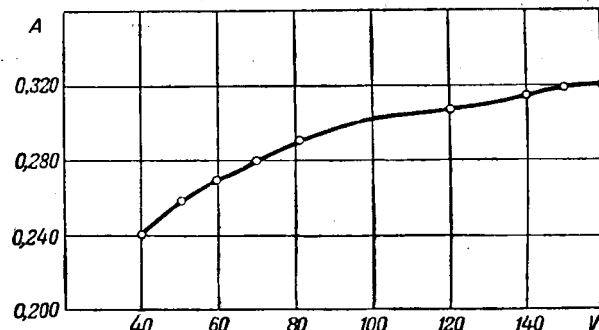


Рис. 4. Характеристика барретера типа 0,35Б65-135.

Случай 2. Дано:  $E_0$ ,  $U_0$ ,  $\Delta$ ,  $U_{np \min}$ ,  $I$ ,  $j$ .  
Требуется определить:  $\delta$ ,  $U_{60}$ ,  $U_{6 \max}$  и  $U_{6 \min}$ .

Как и в случае 1, находим:

$$U_{60} = E_0 - U_0; \quad (4)$$

$$E_0(1 + \delta) - U_{np \min} \leq mU_{60}; \quad (5)$$

$$\delta = \sigma - \frac{U_0}{E_0} (\sigma - \Delta), \quad (6)$$

$$U_{6 \max} = U_{60}(1 + \sigma); \quad U_{6 \min} = U_{60}(1 - \sigma).$$

Случай 3. Дано:  $E_{\max}$ ,  $U_0$ ,  $\Delta$ ,  $U_{np \min}$ ,  $I$ ,  $j$ .  
Требуется определить:  $\delta$ ,  $E_{\min}$ ,  $U_{60}$ ,  $U_{6 \max}$ ,  $U_{6 \min}$ .

$$\delta = \frac{\sigma - \frac{U_0}{E_{\max}} (\sigma - \Delta)}{1 + \frac{U_0}{E_{\max}} (\sigma - \Delta)}; \quad (7)$$

$$U_{60} = \frac{E_{\max}}{1 + \delta} - U_0, \quad (4')$$

$$E_{\max} - U_{np \min} \leq mU_{60}; \quad (5')$$

$$E_{\min} = \frac{E_{\max}}{1 + \delta} (1 - \delta). \quad (8)$$

В том случае, когда  $U_{60}$  выбирают из условий перегрузки,  $E_{\min}$  определяется по формуле:

$$E_{\min} = U_0(1 - \Delta) + U_{60}(1 - \sigma). \quad (9)$$

При этом выгодно брать  $m$  возможно большим, чтобы уменьшить  $U_{60}$ .

**Пример.** Определим параметры барретеров для приемника "Москвич" при включении его в сеть 120 В.

Расчет барретера для включения на 120 В;

Дано:  $E_{\max} = 130$  В;  $U_0 = 99$  В;  $\Delta = 0,125$ ;  $U_{np \min} = 22$  В;  $I = 0,3$  А;  $j = 0,08$  (случай 3 расчета). По рис. 1 для данного  $j$  берем  $\sigma = 0,35$ ; принимаем  $m = 3,75$ . Имеем из (7):

$$\delta = \frac{0,35 - \frac{99}{130} (0,35 - 0,125)}{1 + \frac{99}{130} (0,35 - 0,125)} = 0,153.$$

Подставляя это значение  $\delta$  в (4'):

$$U_{60} = \frac{130}{1 + 0,153} - 99 = 14$$
 В.

Проверяем на перегрузку по (5'):  $130 - 22 = 108$  В;  $mU_{60} = 3,75 \cdot 14 = 53$  В. Условие (5') не выполняется, поэтому приходится выбирать  $U_{60}$ , исходя из условий перегрузки. Берем  $m = 4,2$ ;  $mU_{60} = 108$ , откуда  $U_{60} = \frac{108}{4,2} = 26$  В.

Из определения:  $U_{6 \max} = (1 + 0,35) \cdot 26 = 35$  В;

$U_{6 \min} = (1 - 0,35) \cdot 26 = 17$  В. Из (9)

$$E_{\min} = 99(1 - 0,125) + 26(1 - 0,35) = 104$$
 В.

Итак, при включении на 120 В требуется изменить барретер с пределами барретирования  $17 \div 35$  В и областью регулировки  $104 \div 130$  В.

Расчет барретера для включения на 220 В.

Дано:  $E_0 = 200$  В;  $U_0 = 99$  В;  $\Delta = 0,125$ ;  $U_{np \min} = 22$  В;  $I = 0,3$  А;  $j = 0,08$ . По рис. 1 берем  $\sigma = 0,35$ ; примем  $m = 3,75$ .

Из (4) (случай 2 расчета) имеем:

$$U_{60} = 200 - 99 \approx 100$$
 В.

Из (6)

$$\delta = 0,35 - \frac{99}{200} (0,35 - 0,125) = 0,24.$$

Проверяем по (5):

$$E_0(1 + \delta) - U_{np \min} = 200(1 + 0,24) - 22 = 226$$
 В.

Напряжение перегрузки:

$$mU_{60} = 3,75 \cdot 100 = 375 > 226$$
 В.

Условие (5) соблюдено; теперь находим:

$$U_{6 \max} = 100(1 + 0,35) = 135$$
 В;

$$U_{6 \min} = 100(1 - 0,35) = 65$$
 В.

Итак, для включения того же приемника на 220 В требуется барретер с пределами барретирования  $65 \div 135$  В.

В заключение приведем данные некоторых из выпускаемых в настоящее время в СССР барретеров.

Тип	Параметры				Нить	Срок службы, ч
	$U_{6 \max}$ , В	$U_{6 \min}$ , В	$j$	$U_{6 \text{ пер.}}$ , В		
1Б5-9	9	5	0,04	—	Сталь 10-10	4000
1Б10-17	17	10	0,04	—	Сталь 10-10	4000
0,3Б17-35	35	17	0,08	105	Вольфрам	4000
0,3Б65-135	135	65	0,1	200	Вольфрам	1000

На рис. 2—4 даны характеристики  $I = f(U)$  советских барретеров.

При выполнении настоящей работы автор получил ряд ценных указаний от доцента Г. А. Тягунова.



# Метод разложения рабочих характеристик в ряд Фурье

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

Ленинградский институт связи

В инженерной практике встречаются рабочие характеристики, у которых независимая переменная изменяется по гармоническому закону; в процессе исследования бывает желательным их быстро разложить в ряд Фурье. Особенно часто с подобными задачами сталкиваются радиотехники при определении нелинейных искажений усилителя, расчета гармонических токов электронной лампы и пр.; существующие же методы оценки гармонических по заданным характеристикам либо сложны, либо дают достаточно точные результаты лишь в частных случаях практики.

В настоящей работе предлагается весьма простая, достаточно общая и многократно проверенная методика, впервые примененная нами в 1934 г. для определения малых искажений модуляционных характеристик [Л. 1], позволяющая с требуемой точностью определить величину каждой высшей гармонической, представляющей практическое значение. Методика пригодна при отсутствии сдвига фаз между функцией и аргументом, т. е. при нулевых фазах всех гармонических. Рекомендательный способ основан на замене исследуемой характеристики ломаной линией из нескольких линейных участков различной крутизны, что при аргументе, изменяющемся по закону синуса, обуславливает воспроизведение функции в виде кривой, составленной из отрезков синусоиды. По существу, частной формой этого метода является идеализация импульса анодного тока, применяемая в учебной литературе [Л. 2]. Легко убедиться, что состав гармоник подобной «эквивалентной» кривой количественно весьма мало отличается от истинного, поскольку ее ординаты отличаются от истинных на величины, лежащие в пределах точности измерений.

Для получения весьма большой точности обычно достаточно, если характеристика заменяется ломаной линией, содержащей от двух до пяти линейных участков различной крутизны.

Поясним изложенную методику на примерах.

Пусть требуется определить гармоники симметрично искаженной кривой рис. 1. Кривая заменяется с достаточной точностью ломаной линией, состоящей из трех участков — среднего  $AB$ , с крутизной  $s$ , верхнего  $BC$  с пониженной крутизной  $s_1$  и нижнего  $AD$  с пониженной крутизной  $s_2$ .

Продолжим линейную часть  $AB$  до длины отрезка  $KF$ , т. е. на ширину раствора характеристики, и предположим, что аргумент последней изменяется по закону  $U_m \sin \omega t$ . Если бы характеристика была линейной, то функция содержала бы только первую гармоническую с амплитудой

$$EF = sU_m, \quad (1)$$

определяемую продолжением средней линейной части характеристики  $KF$ , нанесенную пунктиром на рис. 2,а. Однако, вследствие пониженной крутизны верхнего и нижнего участков из «идеальной» амплитуды  $EF$  как бы вырезаются остроконечные усеченные импульсы косинусоидальной формы (рис. 2,б) высотой

$$FC = (s - s_1)U_m \cos \theta_a, \quad (2)$$

$$DK = (s - s_2)U_m \cos \theta_n, \quad (3)$$

где «углы отсечки»  $\theta_a$  и  $\theta_n$  определяют момент начала соответственно верхней и нижней нелинейности; функция получается двусторонне уплощенной (рис. 2,а—сплошная кривая), причем импульсы  $FC$  и  $DK$  (рис. 2,б) обуславливают уменьшение ее первой гармонической и появление высших гармонических, создающих искажения в радиопередаче.

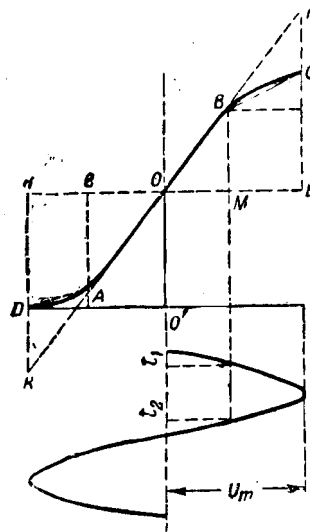


Рис. 1.

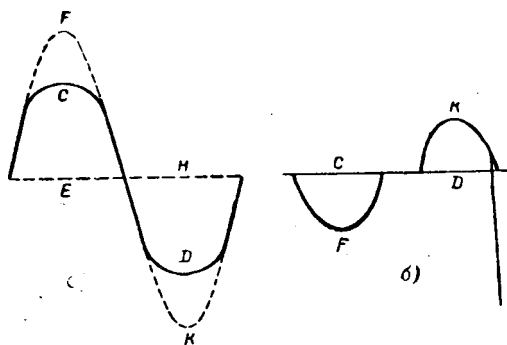


Рис. 2.

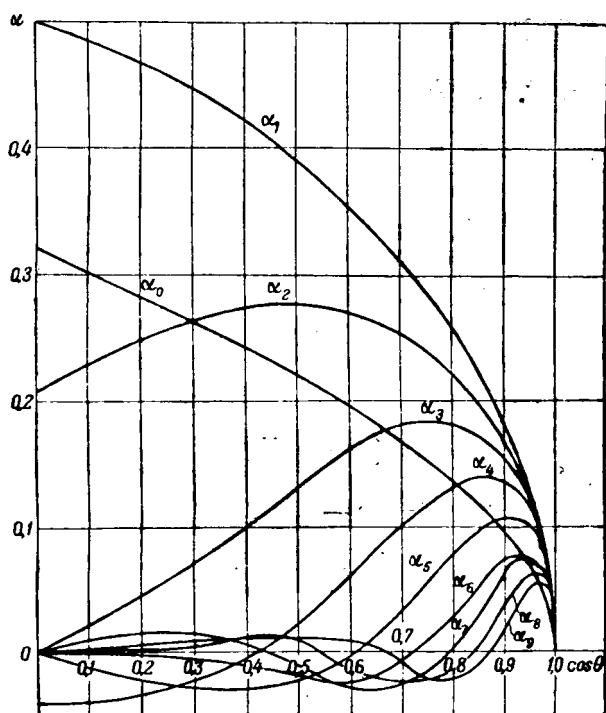


Рис. 3.

Для вычисления указанного содержания гармонических определяем углы отсечки соответственно для верхнего участка с уменьшенной крутизной

$$\cos \theta_a = \frac{OE}{OF} \quad (4)$$

и для нижнего участка

$$\cos \theta_n = \frac{OG}{OH} \quad (5)$$

На рис. 3 приведены коэффициенты постоянной составляющей и гармоник разложения (до девятой включительно) в ряд Фурье усеченного косинусоидального импульса в функции от косинуса угла отсечки  $\cos \theta$ . Если рис. 3 отсутствует, то его всегда легко почти полностью восстановить, воспользовавшись широко распространенной монографией А. И. Берга [Л. 1], где приведены коэффициенты косинусоидального импульса (для 6 гармоник) в функции от угла отсечки.

После определения требуемых коэффициентов гармоник для (4) и (5) их следует привести к общему масштабу с «идеальной» амплитудой  $EF$ , путем умножения на «относительные высоты», т. е. на отношение высот импульсов к некоторой постоянной величине, например, максимальному значению функции. На ту же величину следует разделить и амплитуду  $EF$ . При расчете коэффициента нелинейных искажений удобно принимать «идеальную амплитуду»  $EF$  за единицу масштаба, а гармонические импульсы умножить на отношение  $\frac{FC}{EF}$  и  $\frac{DK}{EF}$ . Получившимися величинами пользуются в дальнейших вычислениях.

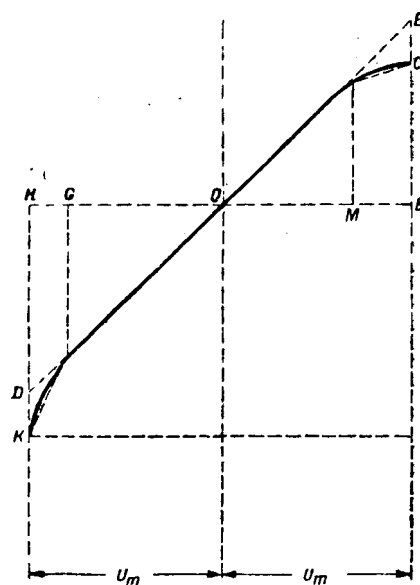


Рис. 4.

Поскольку характеристика рис. 1 отличается пониженной крутизной как верхнего, так и нижнего участка, то функция получится симметричной, следовательно, ее четные гармоники определяются как разность соответствующих гармоник верхнего и нижнего импульсов, нечетные же — как сумма их; первая гармоника определяется как разность «идеальной» амплитуды  $EF$  и суммы первых гармонических импульсов  $EC$  и  $DK$ . При полной симметричности последних ( $\cos \theta_a = \cos \theta_n$ ,  $FC = DK$ ) четные гармонические обращаются в нуль, нечетные удваиваются.

Если нелинейность характеристики асимметрична, как, например, на рис. 4, где крутизна верхнего участка уменьшена, а нижнего увеличена, то при определении результирующих гармоник функции четные гармоники импульсов складываются, а нечетные вычитаются. При этом первая гармоника импульса участка с большей крутизной (на рис. 4 нижнего) увеличивает основную гармоническую, а участка с меньшей крутизой (на рис. 4 — верхнего) уменьшает ее.

При более сложных формах кривых надлежит увеличить число участков различной крутизны эквивалентной ломаной линии, причем все участки каждой стороны продолжают до перпендикуляра, построенного на соответствующей границе раствора характеристики (рис. 5—8). В этом случае нелинейность каждой стороны характеристики разлагается как сумма гармонических нескольких соответствующих косинусоидальных импульсов, амплитуда каждого из последних определяется расстоянием между соседними точками пересечений с перпендикулярами на границах раствора характеристики, а углы отсечки — моментами изменения крутизны. Все коэффициенты гармонических приводятся к одному масштабу с величиной «идеальной» амплитуды  $EF$ .

Суммирование гармонических производится по следующим правилам: если производная крутизны участков каждой стороны характеристики с

увеличением абсолютного значения аргумента сокращает знак (т. е. крутизна каждого участка последовательно монотонно увеличивается или уменьшается, как, например, на рис. 4), то гармонические односторонних импульсов алгебраически складываются. В противном случае (т. е. если, например, продолжением участка с увеличенной крутизной является участок с уменьшившейся крутизной, как в нижней части характеристики рис. 6) гармонические отдельных односторонних импульсов вычитаются. При определении результирующих гармонических функции поступают как в предыдущем случае, т. е. если с обеих сторон преобладают гармоники участков с симметричным отступлением от линейности, то нечетные гармоники складываются, а четные вычитаются, в противном случае поступают наоборот.

Ниже дается ряд примеров практического применения предлагаемого метода. В первых четырех примерах требуется определить коэффициент нелинейных искажений нескольких модуляционных характеристик. Поскольку этот коэффициент определяется как

$$k_f = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n \beta_k^2}}{\beta_1}, \quad (6)$$

где  $k$  — номер высшей гармоники,  $\beta_1$  — первая гармоническая, то представляется возможным не определять высшие гармоники, амплитуда которых в 3,5—4 раза меньше самой большой из них. Обычно приходится вычислять гармонические не выше четвертой; ценность расчета повышает возможность определения абсолютного значения гармонических, что существенно с точки зрения восприятия искажений. Метод позволяет также с большой точностью определять весьма малые искажения.

При расчетах обозначим коэффициенты  $k$ -тых гармоник, полученные из кривых рис. 6, через  $\alpha_{1k}$  и  $\alpha_{2k}$  соответственно для верхнего и нижнего изгиба характеристики, и примем за единицу общего масштаба «идеальную» амплитуду  $EF$ .

**Пример 1.** Симметрично искаженная модуляционная характеристика, характерная при модуляции напряжением сеточного смещения [Л. 1] (рис. 1).

Характеристика заменяется ломаной линией из трех участков  $BA$ ,  $BC$  и  $AD$ .

Имеем для верхнего изгиба:

$$\frac{OM}{OE} = \cos \theta_s = 0,47; \quad \text{относительная величина импульса}$$

$$\frac{FC}{EF} = 0,36; \quad \text{по рис. 3 } \alpha_{1s} = 0,4; \quad \alpha_{2s} = 0,28; \quad \alpha_{3s} = 0,12;$$

$$\alpha_{4s} = 0,02;$$

для нижнего изгиба

$$\cos \theta_n = \frac{OG}{OH} = 0,57; \quad \frac{DK}{EF} = 0,36; \quad \alpha_{1n} = 0,36; \quad \alpha_{2n} = 0,27;$$

$$\alpha_{3n} = 0,17; \quad \alpha_{4n} = 0,05;$$

а) первая гармоническая

$$\beta_1 = 1 - \frac{FC}{EF} \alpha_{1s} - \frac{DK}{EF} \alpha_{1n} = 0,73;$$

б) вторая гармоническая

$$\beta_2 = \frac{FC}{EF} \alpha_{2s} - \frac{DK}{EF} \alpha_{2n} = 0,007;$$

в) третья гармоническая

$$\frac{FC}{EF} \alpha_{3s} + \frac{DK}{EF} \alpha_{3n} = 0,1;$$

г) коэффициент нелинейных искажений

$$k_f = \frac{\sqrt{\sum \beta_k^2}}{\beta_1} = 13,5\%.$$

Путем умножения полученных коэффициентов  $\beta_k$  на отношение  $\frac{EF}{HD} = 1,55$  можно определить абсолютное отношение гармонических к уровню несущей частоты.

**Пример 2.** Асимметрично искаженная модуляционная характеристика [Л. 1]; увеличенная крутизна нижнего изгиба характерна для модуляции на анод, верхний изгиб указывает на преждевременный переход в недонапряженный режим (рис. 4).

$$\text{Верхний изгиб } \cos \theta_s = 0,68; \quad \frac{FC}{EF} = 0,25; \quad \alpha_{1s} = 0,31;$$

$$\alpha_{2s} = 0,25; \quad \alpha_{3s} = 0,18; \quad \alpha_{4s} = 0,1.$$

$$\text{Нижний изгиб } \cos \theta_n = 0,8; \quad \frac{DK}{EF} = 0,25; \quad \alpha_{1n} = 0,26;$$

$$\alpha_{2n} = 0,22; \quad \alpha_{3n} = 0,18; \quad \alpha_{4n} = 0,13.$$

Следовательно,

$$\beta_1 = 1 - \frac{FC}{EF} \alpha_{1s} + \frac{DK}{EF} \alpha_{1n} = 0,99;$$

$$\beta_2 = \frac{FC}{EF} \alpha_{2s} + \frac{DK}{EF} \alpha_{2n} = 0,12;$$

$$\beta_3 = \frac{FC}{EF} \alpha_{3s} - \frac{DK}{EF} \alpha_{3n} = 0;$$

$$\beta_4 = 0,06$$

$$k_f = \frac{\sqrt{\beta_2^2 + \beta_4^2}}{\beta_1} = 14\%.$$

**Пример 3.** Симметрично искаженная характеристика рис. 5, заменяемая ломаной кривой из пяти участков, с монотонно уменьшающейся крутизной обоих изгибов, принимающей в одном из участков верхнего изгиба даже отрицательное значение (характерна для сеточной модуляции при переходе в перенапряженный режим).

Для двух верхних участков

$$\cos \theta_I = \frac{OM}{OE} = 0,38; \quad \frac{FS}{EF} = 0,42; \quad \alpha_{1s} = 0,43; \quad \alpha_{2s} = 0,27;$$

$$\alpha_{3s} = 0,095; \quad \alpha_{4s} = 0,04;$$

$$\cos \theta_{II} = \frac{OR}{OE} = 0,76; \quad \frac{SC}{OF} = 0,33; \quad \alpha'_{1s} = 0,28; \quad \alpha'_{2s} = 0,24;$$

$$\alpha'_{3s} = 0,18; \quad \alpha'_{4s} = 0,12.$$

Для двух нижних участков

$$\cos \theta_{III} = \frac{OG}{OH} = 0,42; \quad \frac{KT}{EF} = 0,4; \quad \alpha_{1n} = 0,2; \quad \alpha_{2n} = 0,27;$$

$$\alpha_{3n} = 0,1; \quad \alpha_{4n} = 0,005;$$

$$\cos \theta_{IV} = \frac{ON}{OH} = 0,71; \quad \frac{DT}{EF} = 0,1; \quad \alpha'_{1n} = 0,31; \quad \alpha'_{2n} = 0,25;$$

$$\alpha'_{3n} = 0,18; \quad \alpha'_{4n} = 0,1.$$



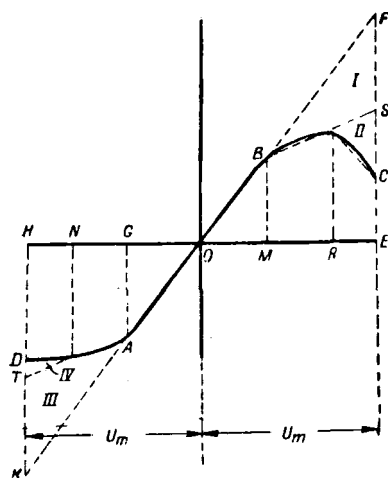


Рис. 5.

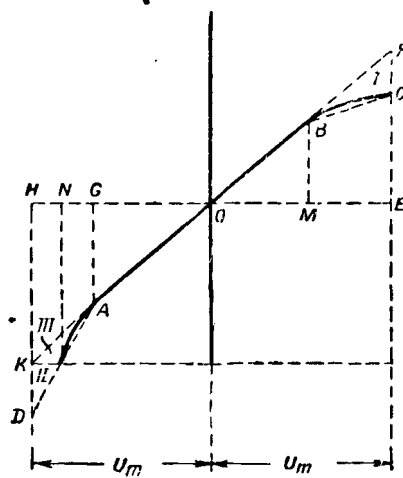


Рис. 6.

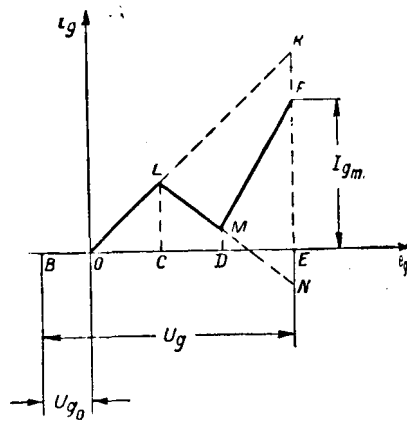


Рис. 7.

Гармоники I и II участков складываются, гармоники III и IV участков складываются. Суммарные четные гармоники верхнего и нижнего изгибов вычитаются, а нечетные складываются.

Имеем:

$$\beta_1 = 1 - \frac{FS}{EF} \alpha_{1s} - \frac{SC}{EF} \alpha'_{1s} - \frac{KT}{EF} \alpha_{1k} - \frac{DT}{EF} \alpha'_{1k} = 0,53;$$

$$\beta_2 = \frac{FS}{EF} \alpha_{2s} + \frac{SC}{EF} \alpha'_{2s} - \frac{KT}{EF} \alpha_{2k} - \frac{DT}{EF} \alpha'_{2k} = 0,07;$$

$$\beta_3 = \frac{FS}{EF} \alpha_{3s} + \frac{SC}{EF} \alpha'_{3s} + \frac{KT}{EF} \alpha_{3k} + \frac{DT}{EF} \alpha'_{3k} = 0,16;$$

$$\beta_4 = 0,001$$

$$k \approx \frac{\sqrt{\beta_2^2 + \beta_3^2}}{\beta_1} = 30\%.$$

**Пример 4.** Асимметрично искаженная модуляционная характеристика рис. 6 при резкой перемодуляции (модуляция на анод) [Л. 1] характерна увеличенной крутизной нижнего изгиба, резко уменьшающейся в области перемодуляции до 0. Гармоники, создаваемые нижним изгибом, вычисляются как разность гармоник двух противофазных импульсов (III и II) с одинаковыми образующими амплитудами  $KD$  и отличными углами отсечки ( $\cos \theta_{II} = \frac{OG}{OH}$ ;  $\cos \theta_{III} = \frac{ON}{OH}$ ).

Для верхнего изгиба

$$\cos \theta_I = \frac{OM}{OE} = 0,54; \quad \text{относительная высота } \frac{CF}{EF} = 0,29;$$

$$\alpha_{1s} = 0,37; \alpha_{2s} = 0,27; \alpha_{3s} = 0,15; \alpha_{4s} = 0,04.$$

Для нижнего изгиба

$$\cos \theta_{II} = \frac{OG}{OE} = 0,66; \quad \text{относительная высота } \frac{KD}{EF} = 0,25;$$

$$\alpha_{1k} = 0,33; \alpha_{2k} = 0,26; \alpha_{3k} = 0,17; \alpha_{4k} = 0,04;$$

$$\cos \theta_{III} = \frac{ON}{OE} = 0,83; \quad \frac{KD}{EF} = 0,25; \quad \alpha'_{1k} = 0,24; \quad \alpha'_{2k} = 0,2;$$

$$\alpha'_{3k} = 0,17; \alpha'_{4k} = 0,14;$$

$$\beta_1 = 1 - \frac{CF}{EF} \alpha_{1s} + \frac{KD}{EF} \alpha_{1k} - \frac{KD}{EF} \alpha'_{1k} = 0,92;$$

$$\beta_2 = \frac{CF}{EF} \alpha_{2s} + \frac{KD}{EF} (\alpha_{2k} - \alpha'_{2k}) = 0,1;$$

$$\beta_3 = \frac{CF}{EF} \alpha_{3s} - \frac{KD}{EF} (\alpha_{3s} - \alpha'_{3s}) = 0,04; \beta_4 = 0,01;$$

$$k_f \approx \frac{\sqrt{\beta_2^2 + \beta_3^2}}{\beta_1} = 12,5\%.$$

В следующих двух примерах разлагаются в ряд Фурье две характеристики, весьма часто встречающиеся в радиотехнике, как функция аргумента, изменяющегося по гармоническому закону.

**Пример 5.** Разложить в ряд Фурье импульс сеточного тока лампового генератора, работающего в классе В, по заданной характеристике рис. 7, с явно выраженным диатронным участком. Максимальный импульс тока  $I_{gm} = 3$  А. Амплитуда напряжения возбуждения на сетке  $U_g = 500$  В. Напряжение сеточного смещения  $U_{g0} = 100$  В.

Характеристика заменяется ломаной кривой с тремя участками различной крутизны, причем участки  $OL$  и  $MF$  имеют положительную крутизну, а  $LM$  — отрицательную. Функция существует только в течение части положительного полуцикла, причем ее гармоники являются суммой гармоник:

а) импульса I:

$$\text{относительная высота } \frac{EK}{EF} = 1,33; \cos \theta_I = \frac{OB}{BE} = 0,2;$$

$$\alpha_{1I} = 0,47; \alpha_{2I} = 0,245; \alpha_{3I} = 0,045; \alpha_{4I} = 0,035; \alpha_{0I} = 0,28;$$

б) отрицательного импульса II:

$$\text{относительная высота } \frac{NK}{EF} = -1,5; \cos \theta_{II} = \frac{BC}{BE} = 0,48;$$

$$\alpha_{1II} = 0,39; \alpha_{2II} = 0,275; \alpha_{3II} = 0,125; \alpha_{4II} = 0,015; \alpha_{0II} = 0,213;$$

в) импульса III:

$$\text{относительная высота } \frac{FN}{EF} = 1,2; \cos \theta_{III} = \frac{BD}{BE} = 0,7;$$

$$\alpha_{1III} = 0,31; \alpha_{2III} = 0,252; \alpha_{3III} = 0,18; \alpha_{4III} = 0,1; \alpha_{0III} = 0,166.$$

Таким образом, гармонические сеточного тока определяются как:

$$\beta_{g1} = \frac{I_{g1}}{I_{gm}} = \frac{FK}{EF} \alpha_{1I} - \frac{NK}{EF} \alpha_{1II} + \frac{FN}{EF} \alpha_{1III} = 0,41;$$

$$I_{g1} = 1,23 \text{ А};$$

$$\beta_{g2} = \frac{I_{g2}}{I_{gm}} = \frac{FK}{EF} \alpha_{2I} - \frac{NK}{EF} \alpha_{2II} + \frac{FN}{EF} \alpha_{2III} = 0,213;$$

$$I_{g2} = 0,64 \text{ А};$$

$$\beta_{g3} = \frac{I_{g3}}{I_{gm}} = 0,086; I_{g3} = 0,26 \text{ А}; \beta_{g4} = \frac{I_{g4}}{I_{gm}} = 0,05;$$

$$I_{g4} = 0,15 \text{ А}.$$

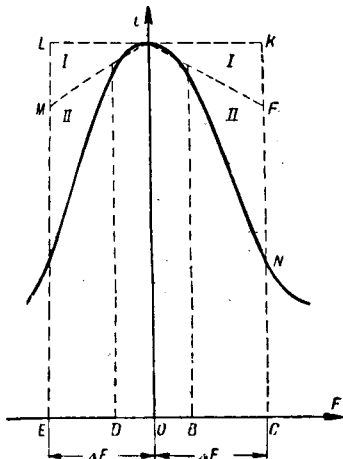


Рис. 8.

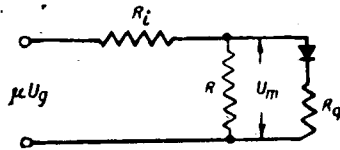


Рис. 9.

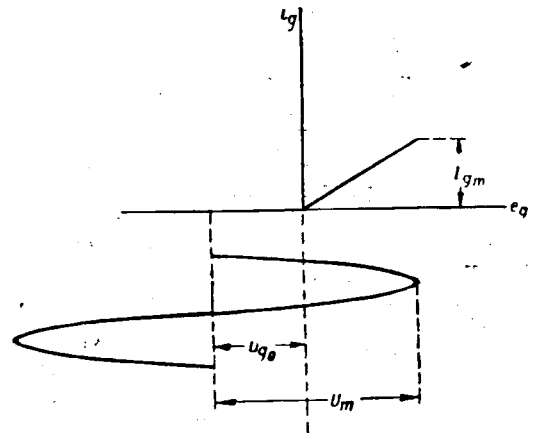


Рис. 10.

Постоянная составляющая сеточного тока

$$\beta_{0.0} = \frac{I_g}{I_{gm}} = \frac{FK}{EF} \alpha_{01} - \frac{NK}{EF} \alpha_{02} + \frac{FN}{EF} \alpha_{03} = 0,252;$$

$$I_g = 0,76 \text{ A.}$$

**Пример 6.** Разложить в ряд Фурье гармоники огибающей контурного тока при весьма медленном изменении частоты. Резонансная характеристика системы и амплитуда девиации частоты приведена на рис. 8.

Характеристика имеет чисто асимметричный характер, поскольку она при каждом одинаковом значении положительного и отрицательного аргументов имеет равную, но противоположную по знаку крутизну. Следовательно, все четные гармоники функции, в том числе и первая, равны нулю.

Таким образом, гармонические функции определяются удвоенной суммой четных гармонических косинусоидальных импульсов каждой стороны, т. е.:

а) импульса I:

$$\text{относительная высота } \frac{KT}{KC} = 0,17; \cos \theta_1 = 90^\circ; \alpha_{21} = 0,205; \alpha_{41} = -0,04; \alpha_{61} = 0.$$

б) импульса II:

$$\text{относительная высота } \frac{FN}{KC} = 0,42; \cos \theta_{II} = \frac{OB}{OC} = 0,33;$$

$$\alpha_{2II} = 0,265; \alpha_{4II} = -0,018; \alpha_{6II} = -0,006.$$

Гармоники огибающей модулированной амплитуды контурного тока определяются как:

$$\beta_2 = 2 \left( \frac{KF}{KC} \alpha_{21} + \frac{FN}{KC} \alpha_{2II} \right) = 0,29;$$

$$\beta_4 = 2 \left( \frac{KF}{KC} \alpha_{41} + \frac{FN}{KC} \alpha_{4II} \right) = -0,028;$$

$$\beta_6 = 2 \left( \frac{KF}{KC} \alpha_{61} + \frac{FN}{KC} \alpha_{6II} \right) = -0,006.$$

В последнем несколько более сложном примере предлагается метод расчета нелинейных искажений выходного напряжения усилителя, если в течение части периода он нагружается сеточными токами последующего каскада и реактивностями цепей можно пренебречь. Выходное напряжение усилителя при этом получает уплотнение, конформное импульсу сеточного тока нагрузочной цепи.

Расчет имеет практическое значение для области средних звуковых частот, когда переходную емкость в остатках усилителя можно считать бесконечно большой, а в трансформаторных усилителях принять бесконечно большой индуктивность холостого хода и бесконечно ма-

лой индуктивность рассеяния, причем предполагается, что внутреннее сопротивление лампы пересчитано во вторичную обмотку. Опыт подтверждает, что в этом случае расчет клирфактора может быть произведен для упрощенной эквивалентной схемы рис. 9, причем конечная формула дает достаточно точное представление о его истинной величине.

Здесь:

$R_i$  — эквивалентное сопротивление лампы усилителя;  
 $R$  — сопротивление активного неизменного нагрузочного сопротивления (шунта);

$R_g = \frac{U_m}{I_{gm}}$  — мгновенное сопротивление сеточной цепи;

$U_m$  — амплитуда выходного напряжения усилителя;

$I_{gm}$  — максимальная амплитуда сеточного тока последующего каскада;

$U_g$  — амплитуда сеточного напряжения усилителя.

Характеристика сеточного тока может быть также заменена ломаной штриховой.

Пусть характеристика сеточного тока приведена на рис. 10 в виде прямой линии.

В часть периода, когда сеточный ток отсутствует ( $R_g = \infty$ ), имеет место идеальная неискаженная амплитуда выходного напряжения:

$$U_m = \mu \frac{U_g R}{R_i + R} = \frac{s U_g}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R}}. \quad (7)$$

Часть положительного периода с углом отсечки сеточного тока (при характеристике рис. 10) выходное напряжение будет уплотнено, причем амплитуда его равна:

$$U'_m = \frac{s U_g}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R_g}}. \quad (7')$$

Амплитуда импульса уплотнения выходного напряжения

$$\Delta U_m = U_m - U'_m = U_m \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{R_i R}{(R_i + R) R_g}} \right] \quad (8)$$

при угле отсечки (рис. 10).

$$\cos \theta_g = \frac{U_g}{U_{gm}} \quad (8')$$

и обуславливает содержание гармоник, пропорциональных коэффициентам, ему соответствующим, из кривых рис. 3.

Тогда коэффициент нелинейных искажений может быть рассчитан по формуле:

$$k_f = \frac{\Delta U_m \sqrt{\beta_{g2}^2 + \beta_{g3}^2 + \beta_{g4}^2 + \dots}}{U_m - \Delta U_m \beta_{g1}} = \frac{\left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{R'_i R}{(R'_i + R) R_g}} \right] \sqrt{\beta_{g2}^2 + \beta_{g3}^2 + \dots}}{1 - \beta_{g1} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{R'_i R}{(R'_i + R) R_g}} \right]} \quad (9)$$

Если  $R'_i \ll R_g$ , то исключение радикально компенсируется. То же имеет место, когда  $R \ll R_g$ , но это, как известно, невыгодно в энергетическом отношении.

Легко убедиться, что уравнение (3) приемлемо для любой формы сеточного тока, которая всегда может быть заменена ломаной кривой из нескольких участков, причем в формулу (9) подставляется суммарное содержание гармоник сеточного тока.

Для двухтактного трансформаторного усилителя при симметричной нагрузке его плеч и, следовательно, симметричном утолщении кривой выходного напряжения формула (9) приводится к виду:

$$k_f = \frac{2 \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{R'_i R}{(R'_i + R) R_g}} \right] \sqrt{\beta_{g3}^2 + \beta_{g5}^2 + \dots}}{1 - 2\beta_{g1} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{R'_i R}{(R'_i + R) R_g}} \right]} \quad (10)$$

Обычно (при  $R'_i \ll R$ )

$$\frac{R'_i R}{(R'_i + R) R_g} \approx \frac{R'_i}{R_g}$$

и формула (10) может быть соответственно упрощена.

Учитывая наличие переходного трансформатора, в формулу (9) подставляется пересчитанное сопротивление лампы

$$R'_i = R_i n^2,$$

где  $n$  — коэффициент трансформации переходного трансформатора. В целях уменьшения нелинейных искажений трансформатор делается понизительным.

**Пример 7.** Рассчитать нелинейные искажения выходного напряжения симметричного пушпульного трансформаторного усилителя, работающего на сеточную цепь мощного двухтактного усилителя со следующими данными:

Импульс сеточного тока мощного усилителя  $I_{gm} = 1$  А.

Амплитуда напряжения сеточного возбуждения мощного усилителя  $U_m = 1000$  В.

Напряжение сеточного смещения  $U_g = 500$  В.

Сопротивление нагрузочного шунта  $R = 10000$  Ом.

Внутреннее сопротивление лампы каждого плеча усилителя  $R_i = 1000$  Ом.

Коэффициент трансформации переходного трансформатора  $n = 0,3$ .

Внутреннее сопротивление лампы, приведенное к вторичной обмотке,  $R'_i = R_i n^2 = 90$  Ом.

Согласно (8)

$$R_g = \frac{U_m}{I_{gm}} = \frac{1000}{1} = 1000 \text{ Ом}; \quad \cos \theta_g = \frac{U_g}{U_m} = 0,5;$$

$$\beta_{g1} = 0,39; \quad \beta_{g3} = 0,13; \quad \beta_{g5} = 0,022.$$

Согласно (10) коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения

$$k_f = \frac{2 \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{90}{1000}} \right] \sqrt{0,13^2 + 0,022^2}}{1 - 2 \cdot 0,39 \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{90}{1000}} \right]} = 2,1\%.$$

В одной из ближайших работ будет показано, что указанный метод значительно облегчает расчет искажений и при частотной модуляции.

Автор получил ряд ценных указаний от Г. А. Зейтла-нока.

#### Литература

1. С. В. Персон. Выбор режима ламп при модуляции. Научно-технический сборник Ленинградского института связи № 19 и 20, 1937.

2. А. И. Берг. Теория и расчет ламповых генераторов, 1935.



## К статье М. Ю. Шухатовича „Задачи развития электрического привода врубовых машин и конвейеров“

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 4, 1946)

Инж. В. С. ТУЛИН

Главный конструктор по горному электроприводу  
Проектно-восстановительного треста МЭП СССР

Вопросы дальнейшего развития электропривода в угольной промышленности привлекают в настоящее время большое внимание, что объясняется прежде всего большим объемом восстановительных работ, одновременно с которыми производится техническая реконструкция в угольной промышленности. Увеличение добычи угля в СССР, предусмотренное планом послевоенной пятилетки, невозможно без коренного повышения производительности труда. Само собой разумеется, что основой такого повышения производительности труда является более полная и мощная механизация всех рабочих процессов в шахте и в первую очередь процесса добычи угля в забое. Вопросы электропривода при этом играют решающую роль.

Перспективам развития электропривода врубовых машин и конвейеров, являющихся основными из угольных машин, была посвящена статья М. Ю. Шухатовича. Однако выводы и предложения М. Ю. Шухатовича вызывают возражения. К числу таких выводов относятся следующие:

1. Необходимо повысить допустимую продолжительность работы врубовых двигателей, которая в настоящее время составляет от 40% до 100%.

Этот вывод М. Ю. Шухатовича был обсужден по его докладу Всесоюзным совещанием по горному электроприводу в январе 1945 г., которое вынесло следующее решение:

«Совещание указывает, что основное направление, в котором должно проводиться совершенствование рабочих характеристик моторов для подземных механизмов, заключается в уменьшении пусковых токов при той же или несколько большей величине пускового момента, и несмотря на связанное с этим уменьшение максимального момента».

Таким образом, совещание не присоединилось к выводу о необходимости повысить до 100% номинальную продолжительность работы врубовых машин.

Фактическая продолжительность работы врубовых машин в настоящее время значительно менее 40%. Применение высококачественных зубков позволит несколько увеличить ее, но она останется ближе к 40%, чем к 100%. Поэтому необходимо повышать кратковременную, а не длительную мощность врубовых машин (повышение длительной мощности является побочным следствием повышения кратковременной мощности).

2. Необходимо повысить скольжение врубовых двигателей до 6%, что дает возможность одновременно повысить маховой момент ротора двигателя и в 4,6 раза увеличить возможную отдачу кинетической энергии системы. Повышение скольжения одновременно даст возможность автоматизировать подачу врубовой машины.

Этот вывод Ю. М. Шухатовича также был обсужден упомянутым совещанием, которое по этому вопросу вынесло следующее решение:

«Понижение пускового тока должно достигаться применением специальных пусковых клеток в роторе, а также некоторым увеличением номинального скольжения».

Таким образом, этим решением увеличение номинального скольжения принимается только постольку и в такой мере, поскольку и в какой мере это окажется целесообразным для основной цели — понижения пускового тока и повышения пускового момента. Сколько-нибудь значительное повышение скольжения для этой цели оказалось ненужным и нецелесообразным. Указанная М. Ю. Шухатовичем величина скольжения 6% привела бы к значительному понижению номинальной мощности врубового двигателя. Следует указать, что отдача кинетической энергии при работе врубовой машины чрезвычайно невелика. Даже полная величина запаса живой силы в роторе двигателя составляет только около 3 kW sec. Во время работы обычного врубового двигателя отдается около 4% этой величины, т. е. 0,12 kW sec. Увеличение этой ничтожной величины в 4,6 раза не может иметь никакого значения с точки зрения увеличения скорости производства вруба. В то же время с увеличением скольжения в 3 раза связано пропорциональное увеличение потерь в роторе и соответствующее снижение номинальной мощности двигателя. Повышенное скольжение такой относительно небольшой величины, как 6%, не может сколько-нибудь значительно облегчить решение задачи автоматизации подачи врубовой машины.

3. Необходимо повысить скольжение двигателей, применяющихся для привода качающихся конвейеров, в результате чего уменьшатся потери в статоре двигателя.

Обсудив этот вывод М. Ю. Шухатовича, то же совещание приняло следующее решение:

«Последнее мероприятие (т. е. повышение скольжения.—В. Т.) должно быть применено также к моторам для качающихся конвейеров, причем целесообразная величина повышения скольжения, при которой производительность конвейера еще не падает недопустимо, должна быть проверена экспериментально».

При вынесении этого решения имелось в виду, что увеличение скольжения конвейерного двигателя действительно приводит к уменьшению потерь в статоре двигателя, но потери в роторе при этом растут и увеличение потерь в роторе перевешивает уменьшение потерь в статоре. Одновременно падает производительность качающегося конвейера. Таким образом, энергетическая нецелесообразность повышения скольжения конвейерного двигателя совершенно ясна. Однако, имеются основания полагать, что повышенное скольжение конвейерного двигателя может привести к уменьшению аварийности того чрезвычайно несовершенного механизма, каким является качающийся конвейер. Это обстоятельство и имелось в виду проверить, если бы эксперимент доказал, что повышенное скольжение не вызвало недопустимого падения производительности конвейера. Экспериментальная проверка зависимости производительности качающегося конвейера от скольжения приводного двигателя не была произведена. В настоящее время этот вопрос потерял значительную долю актуальности в связи с тем, что несовершенные качающиеся конвейеры заменяются технически более совершенными скребковыми транспортерами, для которых двигатели повышенного скольжения явно не требуются.

4. Применять стеклянную электрическую изоляцию

при высоком длительном перегреве порядка 120—140° С.

Это предложение М. Ю. Шухатовича вытекает из предложения повысить скольжение угольных двигателей. Если повышение скольжения не принимается, то высокий перегрев изоляции перестанет быть необходимым. Тогда номинальная мощность двигателя определяется требованиями к рабочим характеристикам двигателя и вопросами надежности и экономичности его работы. Прибегать к перегреву, значительно превышающему перегрев по классу В, перестанет быть необходимым.

Единственным выводом М. Ю. Шухатовича, не вызывающим возражений, является вывод о целесообразности изготовления нескольких размеров врубовых машин: высотой около 300 мм и высотой 350 ÷ 400 мм. Мы полагаем, что может оказаться необходимым изготавливать также машины высотой около 500 мм. Двигатели высотой 350 мм не должны применяться для вновь проектируемых врубовых машин. Таким образом, ряд врубовых двигателей должен состоять из трех двигателей высотой (с округлением) 300, 400 и 500 мм.

### Кандидат техн. наук М. Ю. ШУХАТОВИЧ

В. С. Тулин выступает с возражениями против некоторых предложений, изложенных в моей статье.

В частности, В. С. Тулин возражает против предложения о повышении длительной мощности врубовых двигателей и предлагает взамен этого повысить временную (часовую) мощность. Хотя понятие о часовой мощности часто применяется при характеристике врубовых двигателей, но оно применяется всегда одновременно с понятием о длительной мощности. Понятие длительной мощности гораздо больше соответствует тому характеру нагрузки, который является идеальным для врубовой машины и который стремятся осуществить угольщики-эксплуатационники, добиваясь увеличения эксплуатационной продолжительности работы.

В. С. Тулин неправильно приписывает мне предложение увеличить ПР до 100%. Такого предложения в моей статье нет. В настоящее время уже достигнута эксплуатационная продолжительность работы (ПР) 40%. Несомненно, что уже в ближайшие годы будет достигнута ПР = 60 ÷ 70%. Как известно из теории электропривода, подобные режимы (ПР = 60 ÷ 70%) правильнее считать длительными, чем временными или прерывистыми. При рассмотрении перспектив развития правильнее ориентироваться на будущее угольной промышленности, а не на ее прошлое. Вообще же говоря, этот спор беспредметен, так как нельзя повысить временную мощность без повышения длительной, разве только за счет сокращения ПР. Но в этом случае получается явный разрыв между стремлением угольщиков-эксплуатационников повысить ПР и стремлением электромашиностроителей снизить расчетную (допустимую) ПР.

Правда, некоторые работники угольной промышленности и до сих пор думают, что мощность врубовой машины определяется той цифрой, которая стоит на ее марке, забывая при этом о том, что марочная мощность является величиной условной, соответствующей определенному расчетному режиму работы. Отсюда наблюдающаяся в последнее время у некоторых работников тенденция к повышению часовой мощности врубового двигателя.

Что касается повышения номинального скольжения врубовых двигателей, то В. С. Тулин не заметил, что среди моих предложений имеется также и предложение «продолжать работы по созданию рациональных электрокинематических схем автоматизации врубовой машины».

Так как режим работы врубовой машины весьма нерегулярен, то фундамен-

тальным решением вопроса является: в данном случае электропривод с автоматическим регулированием скорости подачи, что и отмечено в моей статье.

Применение двигателей повышенного скольжения и выравнивания нагрузки врубовой машины является пассивным решением, которое подкупает, однако, своей конструктивной простотой, обеспечивающей эксплуатацию надежностью системы. Это одно из решающих преимуществ применения двигателей повышенного скольжения для динамического выравнивания нагрузочной диаграммы. Возможно, что благодаря конструктивной простоте подобных систем смогут конкурировать с электрокинематическими системами для автоматического регулирования подачи врубовой машины. Окончательное решение вопроса о какой из способов выравнивания нагрузочной диаграммы автоматизации подачи, как я указал в статье, принадлежит практике, и до осуществления и длительного испытания в условиях эксплуатации различных систем выравнивания нагрузочной диаграммы нельзя сделать окончательный вывод.

Что касается применения двигателей повышенного скольжения для привода качающихся конвейеров, то В. С. Тулин необоснованно приписывает мне мысль о том, что это предложение имеет своей целью снижение статической потери. В моей статье нет такой мотивировки. Я предлагал применить двигатели повышенного скольжения для уменьшения пиковых и среднеквадратичных моментов на валу двигателя, т. е. для выравнивания нагрузочной диаграммы. Подобный метод иногда применяется в приводах с дополнительными маховиками.

Выравнивание нагрузочной диаграммы снизит аварийность качающихся конвейеров, которая является одной из их основных недостатков. Напрасно В. С. Тулин беспокоится о снижении номинальной (марочной) производительности качающегося конвейера при динамическом уравнивании. Номинальная часовая производительность действительно снизится в этом случае на 14-15%, но она без особого труда может быть повышена чисто кинематическими способами в 1,5 раза. В то же время эксплуатационная (длительная) производительность значительно повысится благодаря уменьшению аварийных простоев.

Энергетическая сторона вопроса, о которой говорит В. С. Тулин, при малой мощности конвейерного двигателя вообще не имеет значения. Тем не менее следует указать, что в случае качающегося конвейера снижается не эксплуатационный, а номинальный к. п. д. Нам всегда интересуют именно эксплуатационный к. п. д.

Что касается замечания о замене качающихся конвейеров более совершенными скребковыми транспортерами, то не следует забывать, что современные скребковые транспортеры имеют высоту головки 740 мм и могут применяться лишь на пластах высотой более 0,9 м. Между тем в Донбассе большое количество эксплуатируемых пластов имеет меньшую высоту. К тому же производство качающихся конвейеров в СССР не прекращено, и подобное замечание В. С. Тулина лишь дезориентирует читателя.

Далее В. С. Тулин возражает против повышения расчетного перегрева до 120° С. Можно только пожалеть, чтобы конструкторам удалось решить задачу о повышении мощности врубовых двигателей без повышения расчетного перегрева.

В. С. Тулин возражает также против установления стандартной высоты врубового двигателя в 350 мм. Поскольку с эксплуатационной точки зрения установление рациональной шкалы габаритов врубовых двигателей поддается точному расчету, можно не настаивать на увеличении указанной высоты врубового двигателя.

# К статье А. М. Кугушева „О выборе частоты при индукционном нагреве“

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 12, 1946)

Кандидат техн. наук А. В. НЕТУШИЛ

В статье А. М. Кугушева затронуты вопросы, связанные с выбором оптимальной частоты при высокочастотном нагреве различных материалов. Однако, приведенные в статье материалы далеко не полно и подчас спорно освещают некоторые из затронутых вопросов.

1. В статье слабо освещена природа явлений при нагреве материалов токами высокой частоты.

Индукционный нагрев вызывается в основном потерями проводимости за счет токов, наведенных в материале в результате изменения магнитного поля. Распределение токов и, следовательно, нагрев происходят неравномерно по сечению материала.

Диэлектрический нагрев определяется потерями, вызванными напряженностью электрического поля. Электрическое поле плоского конденсатора, а следовательно, и диэлектрический нагрев в довольно широком диапазоне частот равномерны по всему сечению материала, уложенного между пластинами конденсатора. Выбор частоты в этом случае обуславливается наилучшим решением вопроса подвода электрического тока к материалу, и выделения тепла в последнем. Так как контакт между полупроводящим материалом и электродом никогда не может быть одинаковым по всей поверхности, то под электродами получаются воздушные включения. При низких частотах они искажают электрическое поле вблизи электродов, что приводит к перепреву околоэлектродных зон. Увеличение частоты снижает величину переходного сопротивления этих зон и дает возможность току проходить через материал даже при наличии воздушного зазора по всей поверхности электрода.

Различная физическая природа явлений приводит к различным практическим выводам. Поэтому объединение различных процессов под общим термином «индукционный нагрев» вряд ли можно считать удачным.

2. При выводе формул для предельных частот при диэлектрическом нагреве автор принимает, что угол потерь  $\delta$  не зависит от частоты.

Известно, что для диэлектриков  $\delta$  сильно меняется в зависимости от частоты. Для полупроводящих материалов, содержащих значительное количество влаги, с которыми приходится встречаться при высокочастотной сушке, проводимость материала  $\gamma$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  незначительно зависят от частоты и, следовательно, величина

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \epsilon \epsilon_0}$$

в известном диапазоне частот оказывается обратно пропорциональной частоте.

Таким образом, для этих случаев все рассуждения автора о выборе частоты несправедливы.

3. В статье принимается, что предельно допустимое напряжение на электродах не зависит от частоты и что любой определяется напряженностью электрического поля в материале. Однако, многочисленные эксперименты по высокочастотному нагреву показывают, что электрический разряд между электродами большей частью возникает не в толще прогреваемого материала, а в воздушном зазоре между поверхностью электрода и материалом.

Напряженность поля в воздухе  $D_a$  (принимая для напряженности то же нестандартное обозначение, что и А. М. Кугушева) связана с напряженностью поля в материале  $D_m$  соотношением

$$D_a = D_m \epsilon (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)$$

и при больших  $\operatorname{tg} \delta$ , что имеет место в полупроводниках, сильно зависит от частоты, уменьшаясь с увеличением последней. Именно этим обстоятельством объясняется тот факт, что при более высокой частоте удается применить без возникновения разряда на поверхности электродов более высокие напряженности электрического поля в материале и получить значительно более интенсивное выделение тепла. Таким образом, допустимое напряжение на зажимах конденсатора сильно зависит от частоты.

Попутно следует отметить, что с изменением влажности и температуры материала  $\epsilon$  сильно меняется, уменьшаясь с уменьшением влажности. Благодаря этому по мере сушки материала допустимое  $D_m$  сильно растет и, следовательно, между электродами может быть допущено значительно большее напряжение. Это также необходимо для поддержания теплового режима неизменным.

4. Формула для диэлектрических потерь, приведенная в начале статьи (стр. 43, левый столбец, строка 3 сверху),

$$P = I^2 / \operatorname{tg} \delta \cdot 2\pi f C$$

в общем случае неверна. Действительно, как принимает и сам автор,

$$P = U^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 2\pi f C.$$

Выражение для тока (для параллельной схемы соединения емкости и активной проводимости)

$$I = U \cdot 2\pi f C \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}.$$

Отсюда

$$P = \frac{I^2 \operatorname{tg} \delta}{2\pi f C (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}.$$

Таким образом, формула, приведенная автором, справедлива лишь при  $\operatorname{tg} \delta \gg 1$ .

5. При принятых автором предпосылках [уравнения (1) и (2)] формула (5) определяет значение частоты не минимальное, а единственно возможное при заданном  $D_{\text{доп}}$  и тепловом режиме  $P = kB$ .

Действительно, решая совместно уравнения (1), (2) и (3) и подставляя  $D_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{доп}}}{l}$ , получим:

$$f = \frac{k}{2\pi \epsilon \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta D_{\text{доп}}^2}.$$

Вывод формулы (7), повидимому, основан на недоразумении. Значения  $k$  или  $D_{\text{доп}}$  в формулах (5) и (7) должны быть различными.

Повышение частоты при неизменных напряженности поля  $D$  и параметрах нагрузки  $\epsilon$  и  $\delta$  обязательно приводит к повышению удельного расхода мощности  $k$ , а следовательно, и интенсивности нагрева материала.

6. На основании изложенного следует, что выводы и практические рекомендации автора по выбору частоты при диэлектрическом нагреве неполно решают поставленный вопрос.

Помимо этого выбор частоты диэлектрического нагрева нельзя рассматривать оторванно от технологических условий нагрева и структурных особенностей материала.

Для обеспечения равномерного нагрева материала необходимо, чтобы частота была достаточно велика, чтобы исключался местный нагрев, вызванный лавинообразными процессами в неоднородных средах, и до-

# К статье А. М. Кугушева „О выборе частоты при индукционном нагреве“

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 12, 1946)

Кандидат техн. наук А. В. НЕТУШИЛ

В статье А. М. Кугушева затронуты вопросы, связанные с выбором оптимальной частоты при высокочастотном нагреве различных материалов. Однако, приведенные в статье материалы далеко не полно и подчас спорно освещают некоторые из затронутых вопросов.

1. В статье слабо освещена природа явлений при нагреве материалов токами высокой частоты.

Индукционный нагрев вызывается в основном потерями проводимости за счет токов, наведенных в материале в результате изменения магнитного поля. Распределение токов и, следовательно, нагрев происходят неравномерно по сечению материала.

Диэлектрический нагрев определяется потерями, вызванными напряженностью электрического поля. Электрическое поле плоского конденсатора, а следовательно, и диэлектрический нагрев в довольно широком диапазоне частот равномерны по всему сечению материала, уложенного между пластинами конденсатора. Выбор частоты в этом случае обуславливается наилучшим решением вопроса подвода электрического тока к материалу, выделения тепла в последнем. Так как контакт между полупроводящим материалом и электродом никогда не может быть одинаковым по всей поверхности, то под электродами получаются воздушные включения. При низких частотах они искажают электрическое поле вблизи электродов, что приводит к перепреву околоэлектродных зон. Увеличение частоты снижает величину переходного сопротивления этих зон и дает возможность току проходить через материал даже при наличии воздушного зазора по всей поверхности электрода.

Различная физическая природа явлений приводит к различным практическим выводам. Поэтому объединение различных процессов под общим термином «индукционный нагрев» вряд ли можно считать удачным.

2. При выводе формул для предельных частот при диэлектрическом нагреве автор принимает, что угол потерь  $\delta$  не зависит от частоты.

Известно, что для диэлектриков  $\delta$  сильно меняется в зависимости от частоты. Для полупроводящих материалов, содержащих значительное количество влаги, с которыми приходится встречаться при высокочастотной сушке, проводимость материала  $\gamma$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  незначительно зависят от частоты и, следовательно, величина

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \epsilon \epsilon_0}$$

в известном диапазоне частот оказывается обратно пропорциональной частоте.

Таким образом, для этих случаев все рассуждения автора о выборе частоты неприемлемы.

3. В статье принимается, что предельно допустимое напряжение на электродах не зависит от частоты и что любой определяется напряженностью электрического поля в материале. Однако, многочисленные эксперименты по высокочастотному нагреву показывают, что электрический разряд между электродами большей частью возникает не в толще прогреваемого материала, а в воздушном зазоре между поверхностью электрода и материалом.

Напряженность поля в воздухе  $D_a$  (принимая для напряженности то же нестандартное обозначение, что и А. М. Кугушева) связана с напряженностью поля в материале  $D_m$  соотношением

$$D_a = D_m \epsilon(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)$$

и при больших  $\operatorname{tg} \delta$ , что имеет место в полупроводниках, сильно зависит от частоты, уменьшаясь с увеличением последней. Именно этим обстоятельством объясняется тот факт, что при более высокой частоте удается применить без возникновения разряда на поверхности электродов более высокие напряженности электрического поля в материале и получить значительно более интенсивное выделение тепла. Таким образом, допустимое напряжение на зажимах конденсатора сильно зависит от частоты.

Попутно, следует отметить, что с изменением влажности и температуры материала  $\epsilon$  сильно меняется, уменьшаясь с уменьшением влажности. Благодаря этому по мере сушки материала допустимое  $D_m$  сильно растет и, следовательно, между электродами может быть допущено значительно большее напряжение. Это также необходимо для поддержания теплового режима неизменным.

4. Формула для диэлектрических потерь, приведенная в начале статьи (стр. 43, левый столбец, строка 3 сверху),

$$P = I^2 / \operatorname{tg} \delta \cdot 2\pi f C$$

в общем случае неверна. Действительно, как принимает и сам автор,

$$P = U^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 2\pi f C.$$

Выражение для тока (для параллельной схемы соединения емкости и активной проводимости)

$$I = U \cdot 2\pi f C \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}.$$

Отсюда

$$P = \frac{I^2 \operatorname{tg} \delta}{2\pi f C (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}.$$

Таким образом, формула, приведенная автором, справедлива лишь при  $\operatorname{tg} \delta \gg 1$ .

5. При принятых автором предположениях [уравнения (1) и (2)] формула (5) определяет значение частоты не минимальное, а единственно возможное при заданном  $D_{доп}$  и тепловом режиме  $P = kB$ .

Действительно, решая совместно уравнения (1), (2) и

(3) и подставляя  $D_{доп} = \frac{U_{доп}}{l}$ , получим:

$$f = \frac{k}{2\pi \epsilon \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta D_{доп}^2}.$$

Вывод формулы (7), по видимому, основан на недоразумении. Значения  $k$  или  $D_{доп}$  в формулах (5) и (7) должны быть различными.

Повышение частоты при неизменных напряженности поля  $D$  и параметрах нагрузки  $\epsilon$  и  $\delta$  обязательно приводит к повышению удельного расхода мощности  $k$ , а следовательно, и интенсивности нагрева материала.

6. На основании изложенного следует, что выводы и практические рекомендации автора по выбору частоты при диэлектрическом нагреве неполно решают поставленный вопрос.

Помимо этого выбор частоты диэлектрического нагрева нельзя рассматривать оторванно от технологических условий нагрева и структурных особенностей материала.

Для обеспечения равномерного нагрева материала необходимо, чтобы частота была достаточно велика, чтобы исключался местный нагрев, вызванный лавинообразными процессами в неоднородных средах, и до-

статочно низка, чтобы исключались явления стоячих волн в материале. Это важное условие выбора частоты совершенно не отражено в статье А. М. Кугушева.

В случае необходимости неравномерного нагрева, как, например, при склейке материалов, частота задается требуемой селективностью нагрева. Частоту следует выбирать такой, чтобы обеспечивался более интенсивный нагрев склеиваемого вещества и относительно малый нагрев основы.

Условие селективности нагрева, которое иногда является решающим при выборе частоты, совершенно игнорируется автором.

### Доц. А. М. КУГУШЕВ

По замечаниям А. В. Негушила о моей статье сообщаю:

1. В статье не ставилась задача дать описание физической природы потерь.

Термин «индукционный нагрев» не связывается мной с физической природой потерь; он определяет, по моему, общее для нагрева металлов и диэлектриков понятие о нагреве тела без контакта с электродами источника.

2. В статье оговорена зависимость тангенса угла потерь от частоты и сказано, как следует поступать в этом случае.

3. Разность потенциалов, дающая кистевой разряд, для широкого диапазона средних и коротких волн постоянна. Кроме того, по многим другим практическим обстоя-

тельствам ее значение свыше 5 kV нецелесообразно при любой частоте.

4. Замечание А. В. Негушила о формуле диэлектрических потерь основано на опечатке. Данные в начале статьи формулы

$$P = I^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 2\pi f C$$

и

$$P = U^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 2\pi f L$$

следует читать правильно в виде

$$P = I^2 \operatorname{tg} \delta / 2\pi f C$$

и

$$P = U^2 \operatorname{tg} \delta / 2\pi f L.$$

5. Так как  $U/l$  должно быть меньше  $D_{\text{доп}}$ , то, очевидно, что формула (5) действительно определяет минимальную частоту и вывод формулы (7) правилен;  $k$  и  $D_{\text{доп}}$  в (7) те же, что и в (5). Формула (7) показывает, какую максимальную частоту можно применить, если исходить только из физических характеристик нагреваемого тела. Длина последнего, однако, при максимальной частоте и при заданной разности потенциалов на пластинах конденсатора должна вычисляться по формуле (4).

6. На основании вышеизложенного следует, что все выводы статьи правильны и могут быть полезными в многих практических случаях.

### ОТ РЕДАКЦИИ

*Редакция считает необходимым отметить, что рекомендованный А. М. Кугушевым метод выбора частоты при индукционном нагреве справедлив для ограниченного диапазона частот, в котором  $\operatorname{tg} \delta$  много меньше единицы и практически не зависит от частоты. Для полупроводящих материалов, в которых  $\operatorname{tg} \delta$  достигает величин, близких к единице, предложенный А. М. Кугушевым метод, повидимому, не применим.*





## Новые нормы искусственного освещения промышленных предприятий

22 июля 1947 г. утвержден новый Государственный общесоюзный стандарт на нормы искусственного освещения промышленных предприятий (лампами накаливания).

Действовавший до войны стандарт ОСТ 90014-39 «Санитарные нормы и правила строительного проектирования промышленных предприятий», регламентировавший требования к устройству искусственного освещения, не содержал достаточного нормативного и руководящего материала ни для проектирования электроосветительных установок, ни для осуществления санитарного надзора над количеством и качеством промышленного освещения.

При соблюдении норм освещенностей по ОСТ 90014-38 условия видимости для грубых работ были более благоприятны, чем для точных работ. Например, максимальная норма освещенности по ОСТ для очень точных работ не могла превышать 200 лк, что было явно недостаточно для освещения производственных процессов, связанных с различением мелких деталей.

Помимо недостаточно конкретной дифференциации норм освещенностей в зависимости от степени зрительного напряжения для различения обрабатываемых деталей ОСТ не давал определенных указаний по проектированию осветительных установок для работ, производящихся под открытым небом, и не предусматривал никаких требований к мероприятиям по ограничению слепимости осветительных установок и по организации искусственного освещения в отношении качества освещения. Ввиду этого еще в 1940 г. Московским и Ленинградским институтами охраны труда ВЦСПС были начаты работы по разработке новых норм искусственного освещения промышленных предприятий.

Во время войны чрезвычайно напряженное положение с электроэнергией заставило пойти на значительное снижение требований к промышленным осветительным установкам, вследствие чего в 1942 г. Наркомстроем на период военного времени были разработаны временные нормы искусственного освещения, которые в 1944 г. были совместно с Наркоматом электростанций переработаны в «Правила устройства электроустановок промышленных предприятий». Установленные этими правилами нормы освещенности создавали весьма тяжелые условия для работающих, и с ними можно было мириться только в силу исключительных обстоятельств военного времени.

Было очевидно, что с переходом на послевоенное строительство нормы военного времени будут непригодны, исходя из чего Комитет стандартов еще в конце 1944 г. вынес решение о разработке новых норм с учетом реальных ресурсов нашей энергетической базы, современного состояния отечественной светотехнической промышленности и перспектив их развития в ближайшие годы.

Новый стандарт отменяет все существовавшие до сих пор ведомственные нормы и правила по устройству освещения промышленных предприятий и устанавливает единые общесоюзные нормы, обязательные для всех отраслей промышленности СССР.

Нормы предназначаются для применения их при проектировании новых, реконструируемых, а также восстанавливаемых промышленных предприятий. В отношении действующих предприятий стандарт дает указание, что искусственное освещение этих предприятий приводится в соответствие с новыми нормами в сроки, устанавливаемые министерствами и ведомствами по согласованию с ВЦСПС и Министерством здравоохранения СССР.

Для освещения промышленных предприятий стандартом устанавливаются две системы освещения: а) общее освещение — с равномерным или с локализованным размещением светильников и б) комбинированное освещение (общее + местное). Применение одного местного освещения согласно стандарту не допускается.

Все нормы освещенности принимаются в зависимости от точности работ, характера производства и условий зрительной работы.

Точность работ определяется размером деталей, требующих различения. Характеристика условий зрительной работы определяется степенью светлоты фона, на котором различается деталь (темный — с коэффициентом отражения до 0,2 и светлый — с коэффициентом отражения более 0,2) и степенью контраста детали с фоном (малый контраст и большой).

По степени требуемой освещенности стандарт устанавливает три категории помещений: к первой категории относятся производственные помещения, в которых производятся точные работы, требующие различения мелких деталей размером до 10 мм, ко второй категории относятся производственные помещения, в которых производятся грубые работы, требующие различения деталей размером более 10 мм, работы с самосветящимися предметами или материалами, а также складские помещения и, наконец, к третьей категории относятся административно-конторские, общественные и бытовые помещения, проходы, проезды, коридоры и лестницы в производственных помещениях. Каждая категория помещений в свою очередь по степени освещенности разделяется на несколько разрядов в зависимости от зрительной характеристики работ и назначения помещений.

Нормы освещенности для работ первой категории, т. е. для работ, требующих различения мелких деталей размером до 10 мм, стандарт устанавливает в значениях, приведенных в табл. 1.

Как видно из табл. 1, нормированная минимальная освещенность при системе комбинированного освещения в любом случае выше освещенности при системе одного общего освещения, что способствует применению при точных работах именно комбинированного освещения, создающего лучшие условия для работающих, чем одно общее освещение.

В тех же целях применение одного общего освещения допускается только в тех случаях, когда комбинированное освещение неосуществимо по технологическим условиям.

Нормы освещенности при системе одного общего освещения для работ, относящихся к разрядам I б-в, II а-б и III-а, стандартом разрешается увеличивать вдвое, если эти работы требуют зрительного напряжения в течение всего рабочего времени.

При комбинированном освещении освещенность от светильников общего освещения должна составлять не менее 10% указанных норм, но не ниже 10 лк; применение освещенности выше 30 лк необязательно.

Устанавливаемые стандартом нормы освещенности для работ II и III разрядов относятся к случаям, когда расстояние от глаза до рассматриваемого объекта менее 500 мм. Если это расстояние более 500 мм, то освещенность должна выбираться по соседнему более высокому разряду, причем в этом случае применение вышеупомянутого требования об увеличении норм освещенности при системе общего освещения вдвое допускаться не должно.

Таблица 1

Характеристика работ	Разряд работ	Подразряд	Фон, на котором различается деталь	Контраст детали с фоном	Минимальная освещенность, лк	
					при системе комбинированного освещения	при системе одного общего освещения
1. Требующие различения деталей размером менее 0,2 mm	I	a	Темный	Малый	500	Применение одного общего освещения не допускается
		б	Темный Свет- лый	Большой Малый	300	125
		в	Свет- лый	Большой	150	75
2. Требующие различения деталей размером от 0,2 до 1 mm	II	a	Темный	Малый	300	125
		б	Темный Свет- лый	Большой Малый	150	75
		в	Свет- лый	Большой	—	30
3. Требующие различения деталей от 1 до 10 mm	III	a	Темный	Малый	75	50
		б	Темный Свет- лый	Большой Малый	—	30
		в	Свет- лый	Большой	—	20

Нормы освещенности для работ второй категории, т. е. для грубых работ, требующих различения деталей размером более 10 mm, для работ с самосветящимися предметами или материалами (например, в кузницах, литейных, мартеновских цехах) и для складских помещений стандарт устанавливает согласно табл. 2.

В тех случаях, когда работы производятся при наличии в зоне рабочего места элементов оборудования, прикосновение к которым сопряжено с повышенной опасностью травматизма, указанные нормы освещенности при системе одного общего освещения для работ, относящихся к разрядам II в, III б-в, V и VI, согласно стандарту должны быть увеличены вдвое; однако увеличение освещенности свыше 50 лк необязательно.

Освещение административно-конторских помещений, общественных и бытовых, проходов, проездов, а также коридоров и лестниц в производственных помещениях стандарт нормирует согласно табл. 3.

Дополнительно к общему освещению стандартом рекомендуется в административно-конторских помещениях применять местное освещение.

Кроме количественного нормирования освещенностей новый стандарт предъявляет конкретные требования к мероприятиям по ограничению ослепленности, создаваемой светильниками общего освещения. Эти требования прежде всего регламентированы наименьшей высотой подвеса светильника над уровнем пола. Для ламп мощностью до 200 W эта высота принимается в пределах 2 ÷ 4 m и для ламп мощностью более 200 W — в пределах 3 ÷ 6 m, в

Таблица 2

Характеристика работ	Разряд работ	Минимальная освещенность при системе общего освещения, лк
1. С самосветящимися предметами или материалами	IV	50
2. Требующие различения предметов или деталей размером от 10 до 100 mm	V	20
3. Требующие различения предметов или деталей размером свыше 100 mm, а также работы, требующие общего наблюдения за ходом производственного процесса	VI	10
4. Работы в складах громоздких предметов и сыпучих тел	VII	5

Таблица 3

Наименование освещаемых площадей	Разряд работ	Минимальная освещенность при системе общего освещения, лк	Плоскость, к которой относится норма освещенности
1. Административно-конторские помещения, красные уголки, читальни, помещения общественных организаций	VIII	50	Поверхность столов
2. Комната для приема и приготовления пищи (столовые, буфеты, кухни)	IX	50	Поверхность столов
3. Душевые, умывальные, уборные, гардеробные	X	15	Поверхность пола
4. Главные проходы в производственных помещениях, проезды для внутрицехового транспорта, внутрицеховые лестницы, площадки для обслуживания агрегатов, главные коридоры и лестницы	XI	10	Поверхность пола
5. Прочие проходы, коридоры, лестницы и тамбуры	XII	5	Поверхность пола

зависимости от типа светильника, наличия рассеивателя и вида стекла, колбы и лампы и величины защитного угла.

В стандарте перечисляются конкретные случаи, когда высота подвеса светильников может быть снижена и когда она не регламентируется.

Так как в процессе эксплуатации освещенность с течением времени снижается, новые нормы устанавливают величину коэффициента запаса на требуемую мощность ламп, учитывающего загрязнение светильников и тому подобных факторов. Этот коэффициент регламентируется

сравнивается 1,5 — для помещений с значительным производственным выделением пыли, дыма и копоти (при очистке светильников 4 раза в месяц) и 1,3 — для помещений с незначительным производственным выделением пыли, дыма и копоти (при очистке 2 раза в месяц).

Стандарт устанавливает определенные требования к устройству аварийного освещения для продолжения работы или для эвакуации людей из помещения при аварийном отключении рабочего освещения. Согласно стандарту аварийное освещение для продолжения работы должно обеспечивать на рабочих поверхностях освещенности, составляющие не менее 10% норм, указанных выше, аварийное же освещение для эвакуации людей должно обеспечивать освещенности не менее 0,1 лк. Кроме того, устанавливается, в каких помещениях должно устраиваться аварийное освещение для продолжения работы и при каких условиях производственного режима устраивается аварийное освещение для эвакуации людей.

Аварийное освещение должно устраиваться в помещениях, в которых прекращение освещения недопустимо из-за возможности возникновения взрыва или пожара, длительного расстройства технологического процесса или нарушения питания целой группы потребителей. Аварийное освещение для эвакуации людей должно устраиваться в производственных помещениях, в которых произвольные действия людей в темноте могут вызвать пожар, взрыв, массовый травматизм и отравление, в проходных помещениях, пожарных проездах, коридорах и на лестницах, служащих для эвакуации людей в производственных зданиях с числом работающих более 50 чел. и т. д.

Новый стандарт впервые устанавливает нормы освещенности для работ, производящихся под открытым небом, а именно:

а) для точных работ при отношении минимального размера рассматриваемого предмета к расстоянию до глаза наблюдателя до  $1/200$  в пределах 10—20 лк (в зависимости от контраста детали с фоном);

б) для работ средней точности при вышеупомянутом отношении от  $1/200$  до  $1/50$  — в пределах 3—5 лк;

в) для работ малой точности, а также грубых ручных работ при вышеупомянутом отношении от  $1/50$  до  $1/20$  — в пределах 1—2 лк;

г) для работ, требующих различения крупных предметов, находящихся в непосредственной близости к работающему, или для работ, связанных с общим обзором рабочих поверхностей без выделения из них каких-либо деталей, — в пределах 0,5 — 1 лк.

В отношении освещения территории предприятий новый стандарт предусматривает 4 группы участков территории: главные проходы и проезды с минимальной освещенностью 0,5 ÷ 1 лк, прочие проходы и проезды — 0,2 лк, лестницы и переходы — 2 лк, и по линии границ территорий (охранное освещение) — 0,5 лк.

Для ограничения ослепленности, создаваемой осветительными приборами наружного освещения, новые нормы устанавливают определенные требования к высоте установки прожекторов и к расстоянию между светильниками и высоте их подвеса над уровнем земли. При определенных условиях ограничения ослепленности вышеприведенные нормы освещенности для наружных работ и для освещения территории могут быть снижены.

Для обеспечения постоянства освещения расчетные напряжения на лампах рабочего освещения должно быть не ниже 97% от номинального напряжения, введено требование минимального напряжения на лампах в процентах от номинального напряжения ламп.

В общем новый стандарт по сравнению с довоенными нормами создает в отношении освещенности лучшие санитарно-гигиенические условия для точных работ.

В целях сравнения новых норм освещенности с довоенными нормами, предусмотренными ОСТ 90014-39, Отделом строительства и стройматериалов Комитета стандартов была выполнена проектная работа по двум строящимся промышленным объектам — механо-сборочному цеху с общей площадью 5 632 м<sup>2</sup> и литейному цеху с общей площадью 8 406 м<sup>2</sup> со всеми производственными и вспомогательными цехами и помещениями.

В результате этих работ выяснилось, что по расходу электроэнергии установленная мощность по новым нормам близка к мощности по ОСТ 90014-39, причем по механо-сборочному цеху, в котором по характеру работ преобладает система комбинированного освещения, достигнуты более высокие технико-экономические и санитарно-гигиенические показатели, чем по литейному цеху, в котором преобладает система общего освещения.

Промышленное производство в больших масштабах ламп накаливания с высокой световой отдачей, рациональных осветительных арматур, газосветных (флюоресцентных) ламп, должно содействовать получению более высоких норм освещенностей в наших промышленных предприятиях без резкого увеличения потребления электроэнергии, а в некоторых случаях даже при экономии ее.

Новый стандарт разработан Московским институтом охраны труда ВЦОПС и Институтом гигиены труда и профзаболеваний Академии медицинских наук СССР при участии промышленных министерств и ведомств и крупнейших проектных организаций.

**Инж. Н. В. КОЗЛОВ**

**Всесоюзный комитет стандартов при Совете Министров СССР**



## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, СТАНЦИИ И СЕТИ И ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ

W. Borgquist. Линии электропередачи высокого напряжения в Швеции. *El. Times*, № 2898, стр. 573—585, 1947.

В то время как основные центры населения и промышленности Швеции расположены на юге страны, гидроэнергетические ресурсы сосредоточены в основном в средней и в северной части ее. Поэтому для передачи энергии на юг требуются линии длиной в среднем около 700 км, а в отдельных случаях — до 950 км.

Для обеспечения наиболее экономичного решения задачи передачи больших мощностей на столь дальние расстояния при минимальных потерях был проведен ряд экспериментов по применению сверхвысоких напряжений как переменного, так и постоянного тока. Предполагается применение трехфазных линий 380 kV с заземлением нейтралей через дугогасящие катушки. Линии будут защищены быстродействующими безмасляными выключателями с автоматическим повторным включением. Для обеспечения устойчивости передачи при аварийном отключении одной из линий будет одновременно отключаться соответствующая генерирующая мощность на передающем конце.

По системе передачи энергии постоянным током 400 kV не имеется эксплуатационного опыта; кроме того, ртутные преобразователи для обоих концов линий постоянного тока (особенно для инверторного) еще не доведены до требуемой степени надежности. Поэтому в Швеции на данном этапе еще не считают возможным ориентироваться на систему постоянного тока, несмотря на ее экономические преимущества. Опыты по передаче постоянным током 400 kV продолжаются.

Кандидат техн. наук Я. М. ЧЕРВОНЕНКИС

L. F. Ferris, C. S. Dayton. Применение конденсаторов для поддержания постоянства напряжения. *El. World*, № 13, стр. 66—69, 1947.

Для поддержания постоянства напряжения в сети 132 kV на открытой подстанции установлена группа конденсаторов. Конденсаторы соединены в звезду и потребляют реактивную мощность 10 800 kVA при линейном напряжении 12,47 kV и частоте 60 Hz и присоединены к специальной третьей обмотке понижающего трансформатора мощностью 33 330 kVA. Группа разделена на 4 одинаковые секции, присоединяемые через разъединители к шинам группы. Вся группа включается посредством выключателя. Грубое регулирование напряжения осуществляется изменением числа секций, точнее изменением ответвлений трансформатора.

Каждая секция мощностью 2 700 kVA состоит из 180 конденсаторов по 60  $\mu$ F в каждой фазе, соединенных по 3 последовательно и по 20 параллельно. Каждый отдельный конденсатор изготовлен на номинальное напряжение 2,4 kV. Все конденсаторы одной фазы установлены на общей стальной раме, потенциал которой равен потенциалу средних конденсаторов, что позволило применить конденсаторы с данным номинальным напряжением при напряжении фазы 7,2 kV.

Защита от повышения напряжения осуществляется с помощью реле индукционного типа, действующего на сигнал, а от коротких замыканий — токовой защитой с отсечкой, действующей на отключение. Каждый конденсатор защищен плавкой вставкой, встроенной в изолятор.

Инж. А. Б. ТИМОФЕЕВ

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

### Динамометрические вагоны для испытания электровозов

(Обзор)

В настоящем обзоре рассматривается оборудование некоторых действующих динамометрических вагонов.

На магистральных электрифицированных железных дорогах Швейцарии применяется постоянный ток напряжением 1 500—3 000 V, однофазный ток напряжением 11–15 kV, при частоте 16  $\frac{2}{3}$  Hz, а также однофазный ток 50 Hz, используемый на электровозах с преобразователями [Л. 1].

Методы измерения, применяемые при различных системах тока и напряжения в основном те же, но электрическое оборудование для различных видов тока имеет свои отличительные особенности. Значительные затруднения возникают при постоянном токе с питанием токов катушек и обмоток напряжения ваттметров. Требуется также специальная подводка к счетчикам электроэнергии высокого напряжения и проводов большого сечения к измерительным шунтам. Указанные затруднения отпадают при переменном токе.

Измерительное оборудование для электрических измерений швейцарского динамометрического вагона состоит из регистрирующих приборов для записи скорости движения, тягового усилия, мгновенных и длительных усилий, возникающих на сцепке испытуемого электровоза, а также ускорений и замедлений и параметров тормозной системы. Кроме того, определяются и фиксируются радиальные и тангенциальные усилия, испытываемые тормозными колодками. Бумажная лента регистрирующих приборов перемещается со скоростью, пропорциональной пройденному пути или времени движения. На ленте фиксируются также отметки времени и пройденного пути. Измеряют также изменения сопротивления движения, как самого динамометрического вагона, так и всего поезда.

Динамометрический вагон итальянских железных дорог [Л. 2] оборудован вольтметрами с пределами измерения от 0 до 4 000 V; амперметрами с пределом измерения от 0 до 500 A и от 0 до 1 000 A, ваттметрами для потребляемой и рекуперированной энергии с пределами измерения 0—3 000 kW, счетчиками как для потребляемой, так и для рекуперированной энергии, а также счетчиками энергии для вспомогательных машин. Подача ленты регистрирующих приборов производится в зависимости от времени или от скорости движения поезда.

Кроме регистрирующих приборов, на регистраторы предусматриваются электромагнитные отметчики времени, обеспечивающие постоянную фиксацию скорости подачи ленты, времени, пройденного пути и др. Для предупреждения возможности попадания высокого напряжения на металлические части стенда, привод отметчиков осуществляется от однофазного тока 40 Hz, вырабатываемого преобразователем, питаемым от аккумуляторной батареи напряжением 24 V. Преобразователь снабжается отдельным изолирующим трансформатором. Все цепи переменного тока управляются с измерительного стола с помощью реле, питаемого от напряжения постоянного тока 12 V.

В одном из разделов серии статей по электродинамометрическим вагонам приводятся также результаты испытаний электровозов, проведенные с помощью динамометрических вагонов [Л. 3, 4].

Австрийские железные дороги [Л. 5] эксплуатируются на однофазном переменном токе напряжением 15 000 V при частоте 16  $\frac{2}{3}$  Hz. Динамометрический вагон австрийских железных дорог оборудован 2 пантографами. Для измерительных целей применяются измерительные трансформаторы — трансформаторы напряжения 15 000/100 V и трансформаторы тока 300/5 и 150/5 A, устанавливаемые на крыше вагона. Приборы для электрических измерений сосредоточиваются на отдельном стенде динамометрического вагона. Для температурных измерений предусматри-

вается отдельный стенд регистрирующих приборов. Имеется регистрирующий прибор для измерения потребляемой электровозом мощности как со стороны высокого, так и со стороны низкого напряжения, а также устанавливаются счетчики энергии для измерения энергии, потребляемой основными и вспомогательными агрегатами. Пределы измерения регистрирующих приборов, включаемых в первичную цепь силового трансформатора: вольтметр  $0 \div 18\,000$  В; амперметр  $0 \div 150$  и  $0 \div 300$  А; ваттметр активной мощности  $0 \div 2\,000$  и  $0 \div 4\,000$  кВт; ваттметр реактивной мощности  $0 \div 1\,200$  и  $0 \div 2\,400$  кВА. На динамометрическом столе предусматривается 8 измерительных систем. Перемещение ленты для записи регистраторов осуществляется только пропорционально времени от асинхронного двигателя, питаемого через трансформатор 15 000/100 В. Высоковольтное оборудование заключено в стальную камеру, имеющую блокировку дверей с пантиграфом.

В Англии до настоящего времени для испытания локомотивов использовались динамометрические вагоны, прицепляемые к испытываемому поезду между локомотивом и вагонным составом [Л. 6, 7]. Установка для испытания локомотивов состоит из специального тендера, динамометрического вагона и трех тормозных транспортных единиц. Каждая тормозная подвижная единица способна поглотить при торможении 1 500 л. с., что соответствует по эффективности торможения электровозу с электрическим торможением. На тормозных прицепах передача нагрузки генератору имеет следующие конечные значения: 80; 145 и 193 км/ч. Максимальное тормозное усилие каждого тормозного прицепа составляет 23 т. Тормозной режим всех тормозных прицепов регулируется мастер-контроллером, расположенным у стенда с измерительными приборами динамометрического вагона. Измерительные приборы на измерительном щите фиксируют при этом тормозную нагрузку каждого из тормозных прицепов. Электрическая энергия, развиваемая при торможении, поглощается в тормозных сопротивлениях, охлаждаемых специальным вентиляционным агрегатом мощностью 100 л. с. Каждый тормозной прицеп имеет по 2 тележки с установленными на них двумя тормозными генераторами по 375 л. с. каждый. Тормозной генератор соединяется с осями специальной эластичной передачей. На тормозных прицепах устанавливается также дизельный агрегат, предназначенный для вращения генератора, заряжающего аккумуляторную батарею емкостью 120 Ач, а также для ряда вспомогательных генераторов, обеспечивающих возбуждение главного тормозного генератора и генераторов переменного тока собственных нужд. Тахометрический генератор, установленный на динамометрическом вагоне, регулирует нагрузку главного тормозного генератора путем обеспечения напряжения, пропорционального скорости движения поезда, воздействующего на возбуждение главного тормозного генератора.

**Примечание референта.** Применение динамометрических вагонов в СССР получило весьма широкое распространение, в частности для испытаний электровозов и мотор-вагонных секций и пригородных электрических железных дорог постоянного тока.

К числу весьма совершенных конструкций современных динамометрических вагонов, имеющих существенные преимущества перед зарубежными типами, относятся, например, динамометрические вагоны ЦНИИ Министерства путей сообщения, оборудованные комбинированными динамометрическими стендами отечественного производства, обеспечивающими комплексные измерения электрических, скоростных, динамических и координирующих показателей, с одновременной записью на одной ленте до 12 измеряемых величин.

### Литература

1. F. Dubois и др. *Railw. G.*, т. 84, стр. 219—222, № 9 1946.
2. *Railw. G.*, т. 84, стр. 353—357, № 13, 1946.
3. *Railw. G.*, т. 84, стр. 458—461, № 17, 1946.
4. *Railw. G.*, т. 84, стр. 682—683, № 25, 1946.
5. *Railw. G.*, т. 85, стр. 67—69, № 3, 1946.
6. *Electrician*, стр. 473—474, № 3609, 1947.
7. *El. Rev.*, № 3639, стр. 290—292, 1947.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

**Экспериментальный трамвайный вагон.** *El. Rev.*, стр. 380, № 3641, сентябрь, 1947.

Новый двухэтажный трамвайный вагон имеет 72 места для сидения и предусматривает вход через передние двери, с выходом через задние. Расположение лестницы в пассажирский салон второго этажа в задней части вагона (вместо размещения ее в средней части вагона в вагонах ранее выпускавшегося типа) обеспечивает лучшее использование места и более удобную посадку и высадку пассажиров.

Вагон нового типа оборудован многоступенчатой системой пуска и торможения системы «Vambal», предусматривающей применение быстроходных тяговых двигателей облегченного типа. Вагон имеет 4 тяговых двигателя с приводом через карданный вал и червячную передачу на все четыре оси вагона. Мощность каждого тягового двигателя составляет 41 л. с. Схема коммутации предусматривает возможность последовательно-параллельного соединения тяговых двигателей. Пусковые сопротивления тяговых двигателей используются также и в качестве тормозных. Изменение пусковых или тормозных сопротивлений осуществляется небольшим серводвигателем, скорость вращения которого, а вместе с тем и скорость введения пускотормозных сопротивлений, контролируется непосредственно системой управления, обслуживаемой вагоновожатым. Указанная полуавтоматическая система управления обеспечивает возможность сохранения во время пуска почти неизменной величины пускового тока и гарантирует плавность ускорения вагона при пуске и плавное торможение без рывков.

Контролер и все пневматическое оборудование вагона располагаются под сидением вагоновожатого и управляются им с помощью рычагов (левый рычаг для управления и правый—для реверсирования).

Питание всех вспомогательных цепей и цепей управления вагоном осуществляется от напряжения 36 В, независимого от контактной сети, обеспечиваемого аккумуляторной батареей.

Освещение обоих пассажирских салонов осуществляется флюоресцирующими лампами. Для освещения верхнего пассажирского салона применяются лампы 1 215 мм длины, а для нижнего—длиной 920 мм. Источники света располагаются по обе стороны вагона вдоль его оси.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

### ЭЛЕКТРОПРИВОД

**L. H. Berkley. Выбор электродвигателя для прокатного стана.** *El. Eng.*, № 5, стр. 444—447, 1947.

Небольшой стан для прокатки латунных заготовок, был первоначально оборудован для привода от паровой машины, присоединенной к валу с маховиком на 82 об/мин (см. схему расположения на рис. 1). В дальнейшем паровая машина была заменена асинхронным короткозамкнутым двигателем 250 л. с., 580 об/мин, 60 Hz, 2 200 В, в связи с чем был добавлен редуктор 600/82 об/мин. В настоящее время возник вопрос о замене этого двигателя, причем были предложены четыре варианта: 1) короткозамкнутый асинхронный двигатель нормального типа, т. е. с «жесткой» характеристикой (номинальное скольжение 3,33%); 2) короткозамкнутый асинхронный двигатель с «мягкой» характеристикой (номинальное скольжение 7%); 3) асинхронный двигатель с фазовым ротором и контактными кольцами; 4) синхронный двигатель.

Асинхронный двигатель с контактными кольцами был сразу исключен из рассмотрения из-за его относительно высокой стоимости (с учетом аппаратуры) и повышенных эксплуатационных расходов. Синхронный двигатель с опережающим  $\cos \varphi = 0,8$  при номинальной нагрузке по цене лишь немного превосходит асинхронный короткозамкнутый двигатель нормального типа, но зато потребляет из сети опережающую реактивную мощность в 150 кВА, в то время как асинхронный двигатель потребляет отстающую мощность в 100 кВА. Однако, синхронный двигатель оказался непригодным для тех толчков нагрузки, которые создаются при поломке муфты и закли-

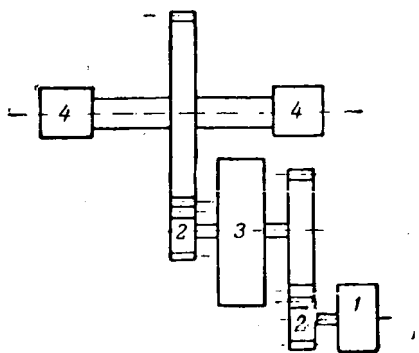


Схема расположения привода прокатного стана.

1—электродвигатель 600 об/мин; 2—промежуточные шестерни; 3—маховик 82 об/мин; 4—валики прокатного стана—12 1/2 об/мин.

нивании заготовки между валиками, когда эти толчки целиком передаются демпферной обмотке. По этой причине был отвергнут и синхронный двигатель, и оставалось только сделать выбор между короткозамкнутыми асинхронными двигателями с «мягкой» и «жесткой» характеристикой.

Испытания, произведенные с существующими электроприводами, и предварительные расчеты показали, что при двигателе с «мягкой» характеристикой, т. е. с повышенным скольжением: 1) маховик используется почти в два раза лучше, в связи с чем происходит лучшее выравнивание графика нагрузки двигателя; 2) зубчатая передача между двигателем и маховиком удешевляется, так как маховик принимает на себя большую долю нагрузки; 3) пики тока уменьшаются, вследствие чего уменьшаются колебания напряжения в сети. Это обстоятельство для вновь проектируемых установок позволяет выбрать облегченную коммутационную аппаратуру и меньшее сечение проводов питающей линии.

Продолжительность пребывания заготовки между валиками из-за понижения средней скорости при двигателе с повышенным скольжением возрастает примерно на 5%. Однако, было признано, что это не отражается существенно на производительности стана и не говорит против применения двигателя с повышенным скольжением.

Расчеты показали, что для рассматриваемого привода требуется короткозамкнутый двигатель с «жесткой» характеристикой мощностью 200 л. с., с опрокидывающим моментом не менее  $2\frac{1}{2}$ -кратного от номинального. При «мягкой» характеристике достаточным является двигатель в 150 л. с. с  $3\frac{1}{2}$ -кратным опрокидывающим моментом, стоимость его приблизительно на 15% выше стоимости двигателя нормального типа, т. е. с «жесткой» характеристикой.

Автор делает решительные выводы в пользу двигателя с «мягкой» характеристикой и указывает, что приведенные здесь методология и подход к выбору типа и величины приводного двигателя сохраняют свое значение и при проектировании электропривода для других более мощных прокатных станов.

Примечание референта. Хотя приведенный в статье анализ работы электропривода с маховиком является достаточно примитивным, статья интересна, как отражение подхода к выбору двигателя для прокатных станов. Кроме того, статья дает пример применения короткозамкнутого двигателя в до сих пор несвойственной ему области электропривода прокатных станов, а также указывает на расширение предела мощности для двигателей с повышенным скольжением до 150 л. с., в то время как известная до сих пор предельная мощность таких двигателей была 70—80 л. с. (в приводе прессов и ковочных машин).

Кандидат техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Я. Н. Pickels, W. H. Wills. Применение однофазной системы электроснабжения в сельском хозяйстве. ЛЕЕ, т. 93, декабрь, стр. 501—516, 1946.

В Англии электроснабжение сельских районов осуществляется, как правило, по обычной трехфазной системе распределения электроэнергии. Однако, в одном из районов осуществлена однофазная система электроснабжения. Опыт работы этой системы был посвящен доклад в Английском институте инженеров-электриков и следовавшая широкая дискуссия.

В районе проведено 80 км трехфазных линий передачи напряжением 33 кВ и 510 км трехфазных распределительных сетей 11 кВ на деревянных опорах со сталеалюминиевыми проводами. Линии 11 кВ трехфазные: изолированной нулевой точкой. От этих линий питаются крупные населенные пункты и промышленные предприятия по обычным трехфазным кабельным и воздушным сетям 400/230 В. Для питания мелких потребителей имеется 375 км однофазных двухпроводных ответвлений 11 кВ. Они выполнены также на деревянных опорах с стальными проводами, защищенными от коррозии битумным покрытием. Максимальный пролет между опорами—150 м. Изоляторы дисковые диаметром 250 мм. Стоимость однофазных линий на 25% ниже трехфазных.

Линии низкого напряжения 230 В (210 км) и  $2 \times 230$  В (450 км) выполняются медными проводами сплошным сечением до 37,5 мм<sup>2</sup> и многопроволочными до 62,5 мм<sup>2</sup>. Вертикальное расстояние между проводами не менее 225 мм. Максимальная величина пролета между опорами 45—54 м.

В сети установлено 818 однофазных трансформаторов 11/0,23 кВ или  $11/2 \times 0,23$  кВ мощностью 10—15 кВА, 58 мощностью 25 кВА и 12 мощностью 50 кВА, подвешенных на обычных опорах. Общая мощность их 10 700 кВА. Специальные сельскохозяйственные однофазные трансформаторы отличаются пониженными потерями в железе. Успешно работают более двух лет однофазные трансформаторы с кожухом из фарфора или литого камня. Их преимущества—отсутствие выводных изоляторов, меньший вес, отсутствие коррозии корпуса и окисления масла. В общем однофазные трансформаторы на 20% дешевле трехфазных, имеют суммарные потери меньше на 10% и общий вес меньше на 15—25%. Предохранители высокого напряжения ставятся только на однофазных ответвлениях, если на них не более 6—8 трансформаторов; при большем количестве трансформаторов предохранители ставятся дополнительно.

В деревнях и хуторах на трансформатор приходится в среднем 24 потребителя, а на фермах—3 потребителя. Все малые деревни питаются от однофазных трансформаторов мощностью 25 и 50 кВА с трехпроводной линией  $2 \times 230$  В. В деревнях имеется сравнительно немного электродвигателей. Авторы считают, что однофазное питание выгодно при мощности до 100 кВА, так как легче распределять нагрузку между средними и двумя крайними проводами трехпроводной сети. Мощность трехфазных трансформаторов часто оказывается большей, чем однофазных, так как определяется мощностью наиболее загруженной фазы.

723 из 737 ферм с площадью более 20 га имеют однофазное питание с отдельными трансформаторами 10—15 кВА. На 520 фермах имеется 691 однофазный электродвигатель с максимальной мощностью 15 л. с. Большинство из них используется на приводе доильных машин, жерновых и молотковых мельниц и молотилок. Двигатели часто обслуживают несколько рабочих машин поочередно, но использование их очень низкое и составляет несколько десятков часов в год.

Из промышленных потребителей однофазное питание имеют лесопилки и мельницы с мощностью главного двигателя до 25 л. с., кузницы со сварочными аппаратами мощностью до 25 кВА, столярные мастерские и водопроводные станции. Для привода большинства больших машин используются двигатели с реостатным пуском; они наиболее дешевы, а малый пусковой момент их не имеет существенного значения, так как пуск осуществляется вхолостую. Стоимость однофазных электродвигателей—135—160% от стоимости трехфазных.

Сравнительная стоимость оборудования для распределения электроэнергии в районе по трехфазной и однофазной системе в довоенных ценах приведена в нижеследующей таблице.

Сравнительная стоимость распределения электроэнергии в сельском районе (в фунтах стерлингов)

Наименование	Трехфазная система	Однофазная система
Линии высокого напряжения .	94 000	69 700
Трансформаторы и аппаратура	48 300	39 300
Линии низкого напряжения . .	84 300	60 300
Вводы и счетчики . . . . .	23 000	20 000
Всего . . . . .	249 600	189 300

Авторы рекомендуют широко применить однофазную систему распределения электроэнергии для малых деревень, ферм и отдельных зданий. При обсуждении доклада был высказан ряд сомнений о целесообразности применения однофазной системы, главным образом вследствие несовершенства и дороговизны однофазных электродвигателей. Однако, большинство выступавших рекомендовали применение этой системы в сельских районах с малой плотностью нагрузки.

Примечание референта. В статье А. Г. Захарина и И. А. Будзко (Электричество, № 1, 1939) был освещен вопрос о применении смешанной (однофазной и трехфазной) системы распределения электроэнергии в сельскохозяйственных районах. Эта система разработана ВИМЭ. В результате применения смешанной системы распределения электроэнергии возможно снизить стоимость распределения электроэнергии, как показала практика сельской электрификации СССР, на 15—25% при снижении расхода металла на провода в два раза.

Кандидат с.-х. наук И. А. БУДЗКО

D. R. Pattison. Повышение надежности электроснабжения с помощью закорачивающего контактора. *El. World*, стр. 100, № 23, 1946.

Подстанция 22/4 kV (см. рисунок) питала в сельской местности сеть напряжением 4 kV, длиной свыше 20 km. Вследствие кратковременных повреждений линии происходили частые перегорания предохранителей. Это было недопустимо особенно потому, что в точке В находился молоч-

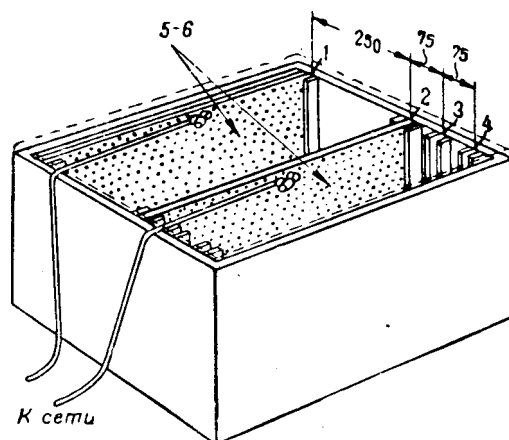
ный завод, не допускающий перерывов в подаче электроэнергии. Для обеспечения бесперебойности электроснабжения сеть была отключена от подстанции А разъединителем С и сооружена подстанция Е, масляный выключатель Е которой был снабжен АПВ. Однако при замыканиях на линии часто до срабатывания выключателя перегорали предохранители. Для избежания этого был установлен закорачивающий линию контактор D. Этот контактор через половину периода от начала короткого замыкания закорачивает все три фазы линии и таким образом предотвращает перегорание предохранителей, давая возможность сработать АПВ масляного выключателя. В период между первым отключением и действием АПВ контактор размыкает свои контакты. Если на линии возникает устойчивое замыкание, то при втором отключении выключателя контактор не закорачивает линии и перегорает соответствующий предохранитель.

По описанной схеме сеть работает свыше пяти лет. За это время контактор срабатывал около 500 раз, причем перегорания предохранителей происходили только два раза.

Кандидат с.-х. наук И. А. БУДЗКО

T. S. Parkinson. Электрическая стерилизация почвы. *El. Rev.* № 3629, стр. 977—978, 1947.

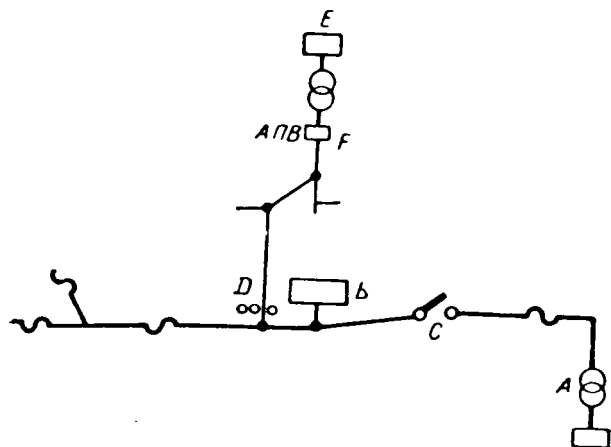
В статье описывается трехлетний опыт электрической стерилизации почвы для выращивания томатов, винограда и хризантем. В начале каждого сезона старая почва удаляется из теплиц. Свежая почва, смешанная с навозом в отношении 4 : 1, перед закладкой увлажняется с целью повышения проводимости и помещается в открытый деревянный ящик (рисунок) с пазами 1, 2, 3, 4, в которые вставляются две стальные пластины 5 и 6 размером 600×300 mm.



В зависимости от проводимости почвы пластины могут вставляться в различные пазы, чем изменяется расстояние между ними. При установке пластин в пазы 1 и 3 емкость ящика составляет 0,0565 m³ и для описываемой теплицы с объемом почвы 4,35 m³ процесс стерилизации приходится повторять почти 80 раз. К пластинам подводится напряжение 230 V переменного тока 50 Hz. Величина тока от 2 А возрастает до 14—15 А, причем температура почвы достигает 90°С. При этой температуре погибают все вредные бактерии, насекомые-вредители и семена сорняков. Процесс стерилизации длится от 2 до 2,5 h; расход энергии на одну загрузку ящика составляет около 4 kWh.

Результаты выращивания упомянутых выше культур на почве, подвергшейся электрической стерилизации, очень хорошие.

Кандидат с.-х. наук И. А. БУДЗКО



Сельская сеть с закорачивающим линию контактором.

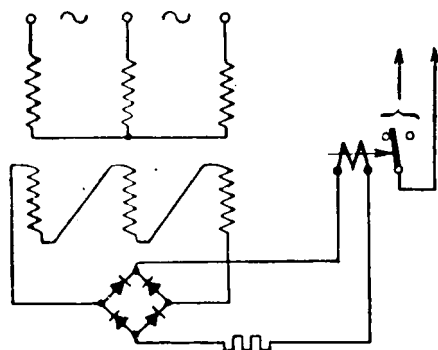


## АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА, ТЕХНИКА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И НИЗКОВОЛЬТНАЯ АППАРАТУРА

Индикатор понижения напряжения. *ASEA J*, № 10, т. 20, стр. 156, 1947.

Устройство состоит из трех миниатюрных однофазных трансформаторов, первичные обмотки которых соединены в звезду, а вторичные—в треугольник. В разрыв треугольника включен сухой выпрямитель, соединенный в однофазную мостовую схему. Выпрямитель питает последовательно соединенные регулировочные сопротивления и реле.

Устройство действует следующим образом. Трансформаторы выполнены с большим насыщением магнитной цепи. Существующая вследствие насыщения в цепи соединенных в треугольник вторичных обмоток резко выраженная третья гармоническая напряжения выпрямляется (для удобства питания реле). При сильном насыщении небольшая посадка напряжения (порядка нескольких процентов) влечет за собой резкое снижение тока в цепи реле. Случай выпадения одной фазы сопровождается при идеальной симметрии двух здоровых фаз исчезновением тока в цепи реле, так как индуктируемые в треугольнике этими фазами напряжения будут находиться в противофазе.



Однако, устройство имеет тот существенный недостаток, что оно не показывает выпадения фазы в случае контроля им источника трехфазного напряжения, питающего моторную нагрузку, и при одновременном отсутствии в пускателе двигателя реле перегрузки (в режиме холостого хода наличие реле перегрузки не изменяет положения).

Сопротивление служит для установки точки срабатывания реле. Устройство можно отрегулировать для работы на включение при любом значении напряжения, лежащем в пределах 75—100% номинального напряжения, или на отключении при любом значении в пределах от 100 до 56% номинального.

Потребляемая устройством мощность составляет около 4 Вт.

Инж. И. И. РАТГАУЗ

Автоматизированное выпрямительное устройство питания телефонных станций. *ASEA J*, № 9, т. 20, стр. 136, 1947.

Устройство размещено в четырех блоках. В двух блоках смонтирован автостатно управляемый сухой выпрямитель, предназначенный для непрерывной работы. В двух других блоках размещен второй выпрямитель, управляемый дросселями насыщения, который вступает в работу, когда нагрузка превышает номинальную. К каждому из выпрямителей подключена батарея. Батареи в свою очередь соединены в параллель. Батареи обеспечивают бесперебойность работы станции в случае кратковременного выпадения источника питания. Выпрямители непрерывно

поддерживают батареи в полностью заряженном состоянии. На станции также имеется мотор-генераторная установка с приводом от бензинового двигателя на случай сравнительно длительного отключения главного источника питания.

Установкой двух выпрямителей, батарей и мотор-генератора обеспечена полная бесперебойность работы станции. В случае большой телефонной станции стоимость такого устройства, содержащего два выпрямителя, сравнительно не на много превышает стоимость установки одного выпрямительного агрегата на ту же полную мощность.

В устройстве имеются две системы шин постоянного тока—одна для питания нагрузки, другая для заряда батарей. Каждый из выпрямителей и каждая из батарей могут быть подключены к любой системе шин.

Инж. И. И. РАТГАУЗ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Е. М. Irish, J. R. Stirrat. Свойства и применение силиконовой резины. *Product Engineering*, т. 18, № 4, стр. 146—150, 1947.

Силиконовая резина отличается от обычной, изготовленной на основе натурального или синтетического каучука, прежде всего тем, что основными связями в ее молекулах являются связи между атомами кремния и кислорода, вместо обычных для органических веществ углеродных связей<sup>1</sup>. Это резко повышает нагревостойкость силиконовой резины и придает ей особые электрические и химические свойства.

Силиконовая резина допускает длительное использование при температуре 150 ÷ 170° С. Испытание при температуре 150° С показало, что доброкачественная резина из СК по истечении 36 h отвердевает и делается хрупкой; в этих же условиях силиконовая резина по истечении целого года не показала заметных изменений. После нескольких часов нагрева до 270° С силиконовая резина не дает растрескивания или появления липкости, которые имеют место в случае резин из СК или НК уже при 150° С. На практике известны случаи успешного применения силиконовой резины в условиях кратковременного нагрева даже до температуры 315° С.

При медленном охлаждении силиконовой резины до —55° С эластичность ее меняется лишь незначительно, причем повышение температуры до —50° С дает восстановление эластичности. Твердость и гибкость силиконовой резины остаются практически без изменения в широком диапазоне температур от —50 до +150° С. Некоторые свойства четырех сортов силиконовой резины приведены в таблице.

Изготовление изделий из силиконовой резины производится шприцеванием или прессованием. Шприцевание ведут в холодном или слегка подогретом состоянии. Прессование проводят при температуре 60 ÷ 70° С, с выдержкой изделия в прессформе в течение 2 ÷ 10 min. В зависимости от типа прессформы удельное давление составляет от нескольких единиц до десятков кг/см<sup>2</sup>. Как шприцеванные, так и прессованные изделия подвергают затем «запеканию» при высокой температуре в течение 72 h, после чего силиконовая резина приобретает высокие свойства, указанные выше. В процессе запекания происходит усадка изделий на 6% (по сечению).

В настоящее время силиконовая резина находит применение в виде прокладок и уплотнений, в тех случаях, когда требуется сочетание высокой нагревостойкости с гибкостью и упругостью. В частности, из силиконовой резины изготавливаются детали для прожекторных установок

<sup>1</sup> См. статью К. А. Андрианова и др. «Новые теплостойкие диэлектрики — силиконы» (*Электричество*, № 4, стр. 39, 1946).



Наименование характеристик	Обозначения сортов резины			
	12300	12301	12602	12603
Плотность, $g/cm^3$ . . . .	1,75	2,04	1,40	1,50
Твердость по Шору . . . .	40	60	70	80
Сопротивление разрыву, $kg/cm^2$ . . . . .	14	31,5	45,5	35
Удлинение, % . . . . .	225	150	110	100
Пробивная напряженность, $kV/mm$ при быстром подъеме напряжения при 25°C . . . .	13	11,5	18	18
То же при 150°C . . . .	13,8	13,8	27,2	20,2
То же при 1 МГц в сухом состоянии . . . . .	0,0007	0,0004	0,0030	0,0037
То же после увлажнения в течение 7 суток . . . .	0,0142	0,0182	0,0045	0,0082
То же при 1 МГц в сухом состоянии . . . . .	3,8	7,4	3,2	3,4
То же после увлажнения в течение 7 суток . . . . .	4,4	11,3	3,2	3,6
Удельное объемное сопротивление, $\Omega \cdot cm$ . . . . .	$1,5 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$
Водопоглощаемость за 7 суток при 25°C, % . . . .	2,4	0,64	0,66	0,54

для сушильных устройств, использующих инфракрасное излучение. Уплотняющие прокладки из силиконовой резины применяются при масляном уплотнении, в кранах с горячей водой, а также для уплотнения дверей в термостатах. Морозостойкость силиконовой резины делает ее пригодной для уплотнения также дверей холодильников. Иногда силиконовую резину применяют в виде тонкого листового материала в сочетании со стеклотканью или с хлопчатобумажной тканью. Листовая силиконовая резина, в частности, применяется в качестве прокладки между листами обычной резины и пластинами пресса в процессе вулканизации или предотвращения «привулканизирования» обычной резины к металлу пластин. В данном случае используется свойство силиконовой резины не давать сцепления с другими материалами: металлами, пластмассами, стеклом, тканью и т. д. даже при высоких температурах.

Кандидат техн. наук **В. Т. РЕННЕ**

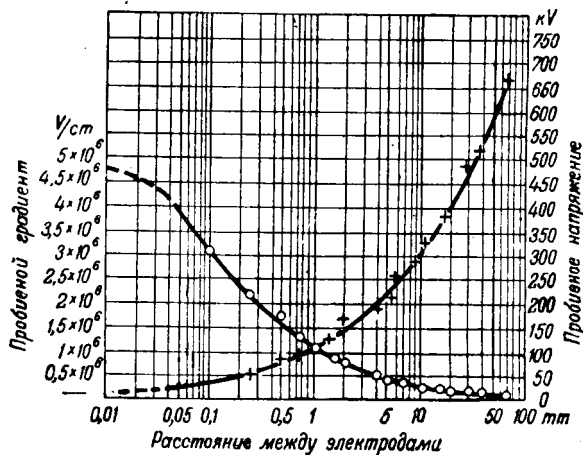
## ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

G. Trump, R. J. van de Graaff. Изоляция высоких напряжений в вакууме. *J. Appl. Phys.*, т. 18, № 3, стр. 327—332, 1947.

Достижения последних лет в области вакуумной техники привели к тому, что «высокий вакуум» можно сейчас рассматривать как пригодную для технического использования электроизолирующую среду, обладающую уникальными свойствами. Между тем, электроизолирующие свойства вакуума изучены в гораздо меньшей мере, чем свойства твердых, жидких и газообразных диэлектриков.

Ранние исследования показали, что при сравнительно низких напряжениях (до 20 kV) электрический разряд в вакууме происходит при достижении у поверхности катода градиента потенциала в несколько миллионов  $V/cm$  и вызывается автоэлектронной эмиссией. До последнего времени предполагалось, что при более высоких напряжениях

механизм разряда в вакууме остается тем же. На этом основании делался вывод о возможности изоляции напряжений порядка 3—4 млн. V в вакууме при расстоянии между электродами в 1 см.



Пробивные напряжения и градиенты между шаром из нержавеющей стали диаметром 2,5 см и стальным диском диаметром 5 см в вакууме.

Для проверки этого предположения авторами были исследованы условия возникновения разряда в вакууме между стальными электродами (шар диаметром 25,4 мм — пластина) при напряжениях от 20 до 650 kV. Результаты измерений изображены на рисунке. Опыты показывают, что о сколько-нибудь определенном пробивном градиенте можно говорить только для напряжений до 50 kV. При дальнейшем повышении напряжения пробивной градиент быстро падает и составляет при 650 kV только 100 kV/cm. Такое значение градиента явно недостаточно для возникновения автоэлектронной эмиссии. Очевидно, при высоких напряжениях действует иной механизм разряда, зависящий в основном от полного напряжения между электродами и лишь во вторую очередь от градиента потенциала на катоде. Этот механизм не может быть связан с ионизацией остатков газа в промежутке, так как дальнейшее снижение остаточного давления почти не влияет на результаты.

Авторы полагают, что механизм разряда в вакууме при очень высоких напряжениях заключается в следующем: электрон, вылетевший по какой-либо причине из катода и накопивший в электрическом поле большую скорость, может при ударе о поверхность анода вызвать эмиссию как положительного иона, так и фотона. Положительные ионы и некоторая часть фотонов возвращаются затем к катоду и вызывают у его поверхности вторичную электронную эмиссию. Самостоятельный разряд возникает в том случае, если этот процесс нарастает лавинообразно, т. е. если

$$AB + CD > 1,$$

где  $A$  (и соответственно  $C$ ) — среднее число положительных ионов (и соответственно фотонов), эмиттируемых под действием одного электрона;

$B$  (и соответственно  $D$ ) — среднее число вторичных электронов, производимых одним ионом (и соответственно фотоном).

По мнению авторов, при постоянном токе и при промешленной частоте решающее значение имеет действие положительных ионов, а при частотах в тысячи МГц — действие фотонов.

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  зависят от напряжения между электродами, градиента потенциала, материала электродов и состояния их поверхности. Экспериментальное определение зависимости коэффициента  $A$  от напряжения для стали при расстоянии 2 см показало, что в диапазоне от 40 до 190 kV  $A$  имеет значение от 2 до  $4 \cdot 10^{-4}$ , а при приближении к пробивному напряжению

быстро возрастает, достигая при 225 kV величины  $20 \cdot 10^{-4}$ . Коэффициент вторичной электронной эмиссии тем больше, чем больше энергия положительных ионов, падающих на катод. При 225 kV каждый положительный ион производил в среднем 2,1 вторичных электронов. В условиях данного опыта градиент потенциала у катода был близок к нулю; поэтому истинное значение коэффициента  $B$  может быть в несколько раз выше полученного, так как наличие высокого градиента у поверхности катода существенно повышает интенсивность вторичной эмиссии.

Эмиссия вторичных электронов имеет место также и у анода при ударе первичных электронов о его поверхность. Часть вторичных электронов обладает малой энергией (до 20 V), большинство остальных — энергией не менее 800 V. Число вторичных электронов второй группы тем больше, чем выше энергия первичных частиц и особенно чем выше атомный номер материала анода. Падая обратно на поверхность анода, быстрые вторичные электроны в свою очередь могут привести к образованию положительных ионов и тем самым содействовать возникновению разряда.

Сильная зависимость коэффициентов вторичной эмиссии от ряда факторов, допускающих достаточно точное количественное определение, позволяет надеяться, что в ходе дальнейшего изучения разряда в вакууме будут найдены пути для существенного повышения электрической прочности промежутков в вакууме. Такими путями могут, в частности, оказаться: покрытие электродов слоем материала с низким атомным номером, специальная обработка поверхности электродов, выбор геометрической конфигурации электродов, препятствующая фокусировке заряженных частиц, магнитное отклонение заряженных частиц.

Кандидат техн. наук Я. М. ЧЕРВОНЕНКИС

## КАБЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

А. Posen. Концевая утечка в кабеле при измерении коэффициента мощности. *IEEE*, т. 93, № 34, стр. 383, 1946.

В статье рассматривается влияние концевой утечки на результат измерения  $\text{tg} \delta$  кабеля, в особенности погруженного в воду, и дается приспособленный для измерения  $\text{tg} \delta$  метод экранирования концов кабеля. Предполагая, что утечка на концах кабеля вызывается наличием полупроводящих пленок на поверхности кабеля и емкостей, обусловленных размерами кабеля, можно результат концевой утечки представить в виде схемы линии передачи с равномерно распределенными емкостью и сопротивлением, т. е. так, как показано на рис. 1, а, что соответствует эквивалентной схеме б. Здесь  $C_0$  и  $G_0$  — соответственная емкость и утечка части кабеля, погруженной в воду,  $l$  — длина от каждого конца, на которую распространяются пленки. Предполагая, что поверхностное сопротивление равномерно распределено и имеет на единицу длины величину  $r$ , а емкость кабеля  $c$  на единицу длины, получаем выражение для проводимости на каждом конце кабеля.

$$y = Y_0 \text{th} \theta l,$$

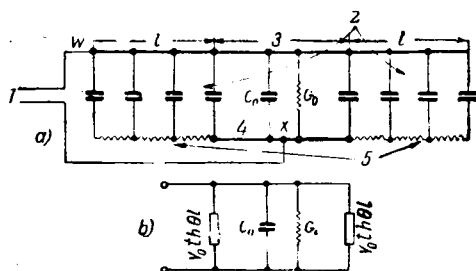


Рис. 1.

1 — измерительная цепь; 2 — распределенная емкость  $c$  на единицу длины; 3 — погруженная часть кабеля; 4 — наружный электрод; 5 — поверхностные пленки (распределенное сопротивление на единицу длины); 6 — внутренний электрод.

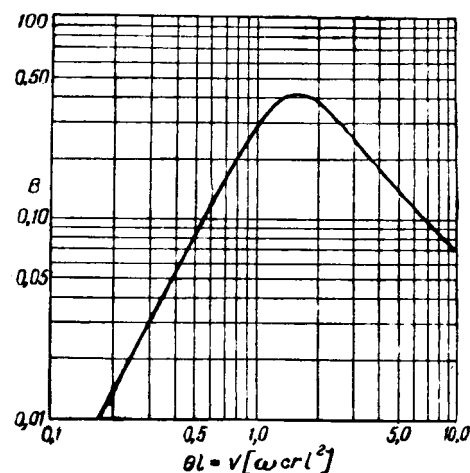


Рис. 2. Изменение мнимой части  $\frac{\text{th} \theta l}{\theta l}$  (при изменении:

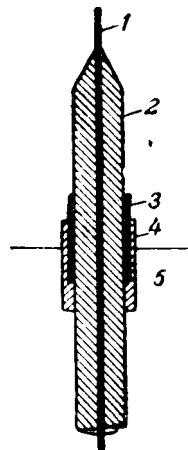


Рис. 3.

1 — внутренний электрод; 2 — диэлектрик; 3 — подводящее защитное кольцо; 4 — слой изоляции; 5 — вода.

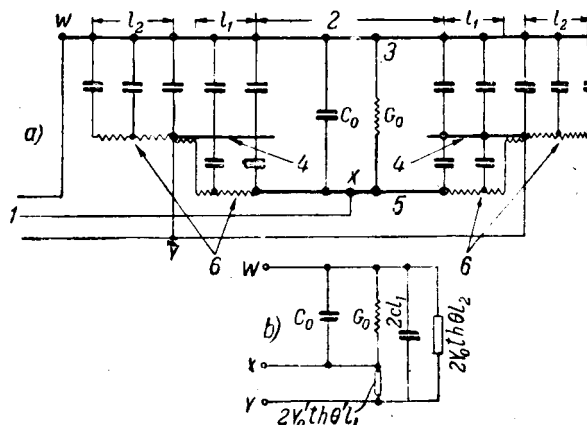


Рис. 4.

1 — измерительная цепь; 2 — погруженная часть кабеля; 3 — внутренний электрод; 4 — защита; 5 — наружный электрод; 6 — поверхностные пленки.



## Комиссия по светотехнике при Отделении технических наук Академии наук СССР

Президиумом Академии наук СССР организована при Отделении технических наук Комиссия по светотехнике.

Научно-исследовательские работы по светотехнике проводятся в СССР во многих институтах, лабораториях и высших учебных заведениях. Комиссия создана для координации этих работ, для разрешения некоторых теоретических вопросов светотехники и консультации промышленности.

Председателем Комиссии назначен член-корр. Академии наук СССР М. А. Шателен. В состав Комиссии входят академики: С. И. Вавилов, В. С. Кулебакин, В. Ф. Миткевич, члены-корр. Академии наук СССР С. В. Кравков, К. А. Круг, член-корр. Академии медицинских наук СССР А. В. Лебединский, профессора: Л. Д. Белькинд, Н. Г. Болдырев, А. А. Гершун (зам. председателя), М. М. Гуревич, А. П. Иванов, Н. А. Карякин, С. О. Майзель (зам. председателя), В. В. Мешков, В. В. Новиков, М. В. Соколов (ученый секретарь), П. М. Тиходеев, Л. А. Тумерман, В. А. Фабрикант, Б. Ф. Федоров, Н. Т. Федоров, И. А. Хвостиков, В. В. Шаронов, кандидаты техн. наук З. М. Горев, Д. Н. Лазарев, И. Б. Левитин, Р. А. Нилендер и Е. С. Ратнер.

25 ноября 1947 г. в Москве состоялось пленарное заседание Комиссии, на котором кроме членов Комиссии присутствовал ряд московских светотехников. Комиссия заслушала доклад доктора техн. наук, проф. П. М. Тиходеева «О новом государственном световом эталоне СССР». Докладчик сообщил о результатах длительной работы по установлению нового светового эталона в виде полного излучателя («абсолютно черного тела») при температуре затвердевания платины. Работа была выполнена на протяжении 1937—1947 гг. в фотометрической лаборатории Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии им. Менделеева (см. Электричество, № 10, 1947). В результате Советский Союз обладает новым государственным световым эталоном, выполненным с предельной степенью точности. Этот эталон изготовлен полностью из советских материалов и измерен советскими приборами.

Фотометрическая лаборатория ВНИИМ имеет задачи: создать в дальнейшем вторичные эталоны при различных цветовых температурах, разработать световой эталон в виде полного излучателя при температуре затвердевания иридия, а также повысить точность измерения лучистой энергии. Удовлетворительное разрешение последней задачи сделает возможным поставить вопрос об использовании объективных (физических) методов при эталонных световых измерениях.

В прениях академик С. И. Вавилов высказал пожелание о том, чтобы были изучены возможности применения в качестве практических (рабочих) эталонов приборы, использующие явления люминесценции, или фотоэлемент с соответственно подобранным светофильтром.

Доклад «Теоретические основания фотометрии» сделал доктор техн. наук, проф. С. О. Майзель.

Излучение новых источников света по спектральному составу в значительной мере отличается от излучения температурных источников, в связи с чем перед фотометрией возникли новые задачи. Решение их по выработанной долой практикой с температурными источниками системе не может дать полного удовлетворения. По этой системе глаз рассматривался, в сущности, как фотоэле-

мент с постоянными свойствами (в области «дневного зрения»), т. е. с неизменяющейся функцией видности  $v(\lambda)$ . Но  $v(\lambda)$  не остается неизменной при изменении яркости и вследствие этого обычное выражение для яркости  $B = \int k(\lambda) v \lambda d\lambda$  должно быть заменено новым:

$$\beta = \int k(\lambda) v(\lambda, \beta) d\lambda,$$

где  $\beta$  — величина «видимой яркости».

Однако, такая формальная трактовка изменчивых свойств глаза не может считаться вполне удовлетворительной. Для получения правильных результатов необходимо пользоваться схемой возникновения зрительных ощущений, построенной на базе работ С. И. Вавилова, Хелмгольда, Гартлайна и Грания.

В заключение был обсужден план работы Комиссии на ближайшие годы. Предварительные проекты плана обсуждались на заседаниях инициативных групп в Москве и Ленинграде и включали такие темы: 1) сбор материалов об основных, ведущихся в СССР, научно-исследовательских работах по светотехнике и разработка рекомендаций по дальнейшему направлению и координации этих работ; 2) разработка материалов о перспективах развития новых источников света и, в частности, люминесцентных ламп (совместно с Комиссией по люминесценции Академии наук СССР); 3) разработка общих научных принципов нормирования естественного и искусственного освещения; 4) выбор типов светоизмерительных приборов и колориметров, которые должны изготавливаться отечественной промышленностью; 5) разработка теории вопроса о методах испытания светооптических приборов и составление проекта положения о правилах испытания; 6) установление рекомендуемых для светотехнических расчетов средних значений зрительных функций (совместно с Комиссией по физиологической оптике при Академии наук СССР); 7) разработка научной терминологии по светотехнике и ряд других тем.

Академик С. И. Вавилов обратил внимание Комиссии на издательскую деятельность, на разработку проекта создания Института светотехники, а также на необходимость оказывать помощь промышленности путем консультаций и составления заключений о качестве продукции.

В декабре 1947 г. состоялось несколько заседаний Московского и Ленинградского отделений Комиссии. На одном из них был рассмотрен проект положения о световых единицах, составленный Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии им. Менделеева. Московское отделение заслушало доклад В. С. Баркова (Московский художественный театр им. Горького) «Некоторые вопросы театральной светотехники». На заседаниях Ленинградского отделения обсуждался доклад проф. А. Я. Гуткина «Состояние искусственного освещения ленинградских школ и мероприятия по его улучшению».

Комиссия выделила из своей среды ряд групп, которые совместно с привлеченными научными работниками светотехниками приступили к разработке отдельных вопросов, включенных в план работ 1948 г.

Доктор техн. наук, проф. М. В. СОКОЛОВ  
Ученый секретарь комиссии

## Научно-техническая сессия по электрическому приводу

В период с 8 по 13 декабря 1947 г. в Ленинграде работала научно-техническая сессия по электрическому приводу, созданная секцией электропривода и промэлектрооборудования Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетики.

Сессия имела актуальное значение в связи с задачей, поставленной перед учеными и инженерами, работающими в области электропривода, планом первой послевоенной пятилетки — «...обеспечить широкое внедрение в промышленности индивидуального автоматизированного электрического привода и осуществить постепенный переход к электроприводу, органически связанному с исполнительными механизмами рабочих машин».

На сессию прибыли 268 делегатов и 59 гостей от 33 основных индустриальных районов СССР.

На сессии было поставлено 60 докладов. На пленарных заседаниях были заслушаны доклады: доктора техн. наук, проф. Е. В. Нигусова (МЭИ) «Основные задачи в теории и практике электропривода», кандидата техн. наук В. А. Шубенко (Уральский индустриальный институт) «Метод обобщенного определения и исследования эквивалентных (среднеквадратичных) моментов приводных электродвигателей» и инж. Е. А. Лейбовича (ЦБСН МЭП) «Графические символы в элементных схемах электропривода», а также доклады ведущих проектно-монтажных организаций, работающих в области электропривода: Проектно-восстановительного треста МЭП (инж. П. Г. Чернышев), Центроэлектромонтажа (инж. И. Л. Людмирский) и Уралэлектромонтажа (инж. П. М. Чудновский).

В период сессии работали секции: 1) теоретических и общих вопросов, 2) электропривода в металлургии, 3) электропривода механизмов по холодной обработке металлов и механизмов других отраслей промышленности, 4) аппаратуры управления и 5) корабельного электропривода.

Наибольшее внимание участников сессии было привлечено к следующей тематике: а) непрерывное управление электроприводами с помощью электромашинных усилителей, б) инженерные методы расчета сложных систем, в) моделирование, г) ионный привод, д) электронные регуляторы, е) выбор мощности электродвигателей, ж) привод станов холодной прокатки, з) учет потерь в механических передачах и выбор передаточного числа, и) аппаратура управления.

На тему о непрерывном электромашинном управлении электроприводами было заслушано 6 докладов. Наибольшее внимание в них было уделено анализу переходных процессов для различных случаев, встретившихся на практике, выбору рациональной схемы управления, введению обратных стабилизирующих связей, вопросу о целесообразном числе ступеней усиления и т. п. Кандидат техн. наук М. И. Романов (ИАТ АН СССР) в докладе «К теории управления электроприводами с помощью машин поперечного поля» указал на возможность использования тензорного анализа для исследования переходных процессов, отметив его наглядность и другие положительные стороны. Кандидат техн. наук М. В. Мееров (ВЭИ, ИАТ АН СССР) в докладе «Результаты экспериментального исследования системы управления и регулирования скорости главного двигателя реверсивного прокатного стана с амплитудами» сообщил об особенностях этой установки и ее схемы, и остановился на вопросах выбора необходимого значения коэффициента усиления, устойчивости, а также методов стабилизации, расчета стабилизирующих цепей и влияния положительной обратной связи. Доклад инж. А. Т. Блажжина (УЭМ) «Анализ переходных процессов в схеме амплитудного управления «амплитуд-возбудитель» был посвящен, предлагаемому им, приближенному методу расчета переходных режимов, подтвержденному экспериментом. Инж. О. А. Сеницын (ЦЭМ) в докладе «Оптимальные возможные переходные процессы в схеме Леонарда с питанием цепей

возбуждения от амплитуды» отметил недостатки кубичной системы возбуждения, обусловленные большой инерционностью возбудителя и в связи с этим указал на желательность разработки машин-усилителей с поперечным полем большой мощности. Кроме того, докладчик привел некоторые соображения о выборе параметров якорной цепи машин с поперечным полем. Инж. Н. М. Филин (ПВТ) в докладе «Новая амплитудная квадратичная система управления двигателями» дал сравнение приводов прокатных станов с контактно-релейным и непрерывным электромашиным управлением и указал пути создания схемы, обеспечивающей оптимальный график работы стана. Докладчик также сообщил о разработке схемы управления приводом прокатного стана с параллельным использованием двух амплитуд для возбуждения генератора, которая дает возможность отказаться от возбудителя. Кандидат техн. наук В. П. Бычков (МЭИ) в докладе «О форсировке процессов возбуждения» рассмотрел различные способы форсировки возбуждения в системах с непрерывным управлением и указал на целесообразность использования положительных обратных связей и задержанных обратных связей, отсекающих процесс форсировки.

При обсуждении этих докладов было выявлено мнение большинства делегатов о необходимости ограничиться на данном этапе применением машин-усилителей с поперечным полем, освоенных отечественной промышленностью, не прекращая, однако, исследования других возможных систем. Сессия сочла целесообразным уменьшать число каскадов систем, увеличивая одновременно усиление отдельных звеньев. Сессия установила реальную возможность стабилизации практически любой системы с помощью рационально выбранных связей.

К этой же группе докладов примыкает доклад кандидата техн. наук Ю. Е. Ефремовича (Центральная лаборатория автоматики Министерства черной металлургии) «Сравнение релейно-контактных и электромеханических (с амплитудом, регуляком и рототролем) систем автоматического управления электродами дуговых печей», в результате обсуждения которого сессия нашла возможным рекомендовать практическое использование для управления электродами системы с электромеханическими усилителями с регулируемой обратной связью.

Ряд докладов был посвящен инженерным методам расчета сложных систем, и в частности их переходных режимов. Проф. В. И. Полонский (Военно-морская академия кораблестроения и вооружения) в докладе «Метод критерияльных характеристик для расчета переходных режимов электроприводов постоянного тока с шунтовыми и серийными электродвигателями» сообщил о разработанном им методе анализа переходных процессов электроприводов с двигателями постоянного тока, основанном на принципе электромеханического подобия, который не требует интегрирования дифференциальных уравнений и дает возможность учета насыщения, реакции якоря и других нелинейных факторов. Доклад кандидата техн. наук В. А. Шубенко (УИИ) «Электромеханические переходные режимы асинхронного электропривода, обусловленные приемом и сбросом нагрузки» был посвящен вопросу о возможности приближенной оценки переходных процессов приводов с асинхронными двигателями с учетом происходящих электромагнитных процессов. Кандидат техн. наук С. А. Воробьев (УИИ) в докладе «Динамическое торможение двигателей переменного тока» на основе обобщенной теории этого вопроса, которая базируется на теории синхронной машины, показал практические методы расчета переходных тормозных режимов с использованием относительных единиц и номограмм. Доклад инж. В. К. Эйберга (ПВТ)

«Инженерные методы расчета амплитудных систем управления» был посвящен приближенному расчету электромашиных систем непрерывного управления методом конечных разностей. Инж. М. С. Ворошилов (ЛПИ) в докладе «Возможности установления критерия оптимальности переходных процессов систем сложного электропривода станков» сообщил о разработанном им методе расчета сложных приводов и выбора параметров отдельных звеньев, задавая наиболее благоприятным характером переходных процессов.

Несмотря на высокий теоретический уровень этой группы докладов и стремление их авторов к широким обобщениям, предложенные методы не могли претендовать на всеобщее признание и применение. Сессия сочла этот круг вопросов, подлежащим дальнейшему изучению для нахождения практически приемлемых обобщенных способов расчета сложных систем.

Сессия заслушала сообщения о моделировании: кандидата техн. наук Т. Н. Соколова (ЛПИ) «Моделирование следящего электропривода» и кандидата техн. наук М. В. Беляева (УИИ) «Электрическое моделирование амплитудных схем управления системой Леонарда». В докладах были изложены теоретические обоснования моделирования как метода расчета сложных систем электропривода и указаны технические средства для воспроизведения основных нелинейностей, как-то: насыщения в электрических машинах, сухого трения, люфтов в механических передачах и т. п.

В докладе доктора техн. наук, проф. Р. Л. Аронова (ХЭТИ) «Переходные процессы в цепях с железом» был изложен разработанный докладчиком метод аналитического расчета неустановившихся процессов на основе формул, аппроксимирующих кривую намагничивания. Также большой интерес у аудитории вызвал доклад доктора техн. наук, проф. Г. И. Штурмана (ХЭТИ) «Индукционные машины с разомкнутым магнитопроводом», в котором были сформулированы основные положения теории этих машин и дана методика их расчета.

Ряд докладов был посвящен ионному приводу. В докладе кандидата техн. наук Ю. А. Сабинина (ЛПИ, ИАТ АН СССР) «Анализ ионного привода постоянного тока» и кандидата техн. наук В. Б. Петрова (УИИ) «Переходные режимы в системе: управляемый ртутный преобразователь — двигатель» были рассмотрены, подвергнуты анализу, основные характеристики ионного привода, дана методика расчета переходных процессов и выявлены пределы применимости ионного привода. Кандидат техн. наук С. З. Барский (ВЭИ) в докладе «Регулируемый электропривод постоянного тока с управляемым ртутным выпрямителем для шахтной подъемной машины» остановился на конкретной установке, смонтированной на одной из шахт СССР. В докладе «Электроионный привод для машиностроительной промышленности» кандидат техн. наук К. В. Урнов рассмотрел разработанный при его участии в ЦНИЛЭПС вариант автоматизированного ионного привода с серийным двигателем, обеспечивающий жесткие механические характеристики при диапазоне регулирования скорости 1:40.

Сессия подтвердила целесообразность наладки серийного выпуска комплектов автоматизированных ионных приводов малой мощности и указала на необходимость скорейшего эксплуатационного освоения мощных опытных установок для прокатных станов и шахтных подъемников.

Вопросам, связанным с электронными системами управления и электронными регуляторами, были посвящены доклады инж. В. Д. Барышникова (СЗЭМ) «Новая электронная аппаратура, разработанная научно-исследовательской лабораторией треста «Севзапэлектромонтаж» и кандидата техн. наук Л. В. Карношина (ЛЭТИ) «Устойчивость работы электропривода дефибрера при автоматическом поддержании постоянства нагрузки главного синхронного электродвигателя».

Рассмотренные отечественные системы регулирования не имели прецедента в зарубежной практике, должны в некоторой мере заменить электромашиное регулирование. Применение электронных регуляторов должно быть распространено за пределы бумажной промышленности.

Вопросы приводов бумажной промышленности частично были рассмотрены в докладе кандидата техн. наук П. К. Куликовского (СЗЭМ) «Пуск электродвигателей постоянного тока с постоянным ускорением». Докладчик сопоставил различные методы пуска секционных двигателей бумагоделательной машины и указал на положительные и отрицательные стороны этих методов.

Много докладов было посвящено выбору мощности электродвигателя. Кандидат техн. наук Л. Б. Гейлер (ВЭИ) сделал доклад: «Новый метод расчета электроприводов с ударной нагрузкой в частности прокатных станов». Для этого метода характерно: учет криволинейности механической характеристики, введение расчета по продолжительности времени пика и широкое использование относительных единиц. Во втором докладе «О выборе асинхронного двигателя по среднему квадрату пиковому моменту и току, в частности для пиковых приводов» тот же докладчик показал, что мощность двигателя для привода, работающего в режиме, при котором двигатель доводится до опрокидывающего момента, может быть выбрана по обычной формуле: среднеквадратичного момента, практически почти без повышения мощности, несмотря на наличие больших пиков тока. Кандидат техн. наук Г. М. Каялов (Новочеркасский индустриальный институт) в докладе «Основы расчета на максимальную перегрузку и на нагрев регулируемых и нерегулируемых прокатных электроприводов с маховиком» рассмотрел методику расчетов электроприводов с различными типами электродвигателей и дал ряд новых расчетных формул. Доклад инж. А. И. Шейнмана (ЦЭМ) «Особенности расчета мощности приводных двигателей прокатных станов по теоретическим и опытным кривым» был посвящен сопоставлению различных существующих методов расчета, в результате которого докладчик пришел к выводу о необходимости отказа от аналитических методов и рекомендовал пользоваться опытными кривыми. Кандидат техн. наук Я. Н. Шпунберг (УИИ) в докладе «Принципы рационального расчета и построение графиков нагрузки нереверсивных станов горячей прокатки» сообщил о большой теоретической и экспериментальной работе, проводимой Уральским индустриальным институтом по исследованию энергетических режимов прокатных станов, в результате которой удалось разработать упрощенный метод определения момента прокатки, базирующийся на экспериментальных данных и влиянии различных технологических факторов на расход энергии.

Эти доклады показали, что вопросы выбора мощности двигателей не получили еще окончательного разрешения, особенно применительно к прокатным станам. Ряд полезных приемов и методов, предложенных в докладах, несомненно найдет применение в инженерной практике. К ним относятся: формула Г. М. Каялова для эквивалентного момента асинхронного двигателя, работающего с маховиком; обобщенное выражение В. А. Шубенко для эквивалентного момента двигателя (доклад на пленуме сессии); зависимость между током и моментом асинхронного двигателя, предложенная Л. Б. Гейлером; методика Г. М. Каялова для расчета электродвигателей на перегрузку и, в частности, определение наиболее тяжелого пуска; методика Я. Н. Шпунберга для построения графиков нагрузки прокатных станов и пр.

На секции электропривода в металлургии были заслушаны доклады, касающиеся электропривода станов холодной прокатки: кандидата техн. наук Ю. М. Файнберга (ЮЭМ) «Регулирование натяжения и коррекция повышения скорости при холодной прокатке», кандидата техн. наук Е. А. Розенмана (ПВТ) «Анализ переходных электро-механических процессов при холодной прокатке», инж. Н. Н. Дружинина (ЦНИИТМАШ) «Исследование режима работы электро-

привода и процесса регулирования при годной прокатке на экспериментальном стане» и инж. Ф. Ф. Олсфир (ПВТ) «Амплитудное управление для стана тандем Запорожстали и реверсивных станов Минцветмета». В результате детального обсуждения этих четырех докладов было установлено несколько важных положений, отмеченных в резолюции сессии: а) в практических расчетах допустимо не учитывать временные зависимости между скоростями элементов стана и натяжением полосы; б) повышение производительности станов увеличением скорости прокатки и сокращением длительности процессов разгона и замедления не ограничивается условиями поддержания заданного значения натяжения.

Сессия также отметила, что для дальнейшего успешного разрешения задачи создания высокопроизводительных станов необходим быстрейший переход к системам управления, построенным на принципе контроля технологических факторов, т. е. поддержания постоянства натяжения полосы.

В докладе «Электрооборудование линий электролитического лужения белой жести» инж. М. М. Брозголь (ЦЭМ) рассмотрел различные технологические способы лужения непрерывно движущейся полосы, остановился на источниках постоянного тока низкого напряжения, на требованиях, предъявляемых к электроприводам механизмов линий и на способах нагрева полосы.

Работы в области крановых электроприводов были представлены докладами: инж. Е. А. Лейбовича (завод «Динамо») «Современные приводы подъемно-крановых механизмов», инж. С. Н. Вешеневского (ЦЭМ) «Выбор рода тока для электроприводов кранов мартеновского цеха» и инж. А. И. Шейнмана (ЦЭМ) «Современные усовершенствованные системы контакторного управления электроприводами крановых механизмов на постоянном токе».

Эти работы позволили сделать несколько ценных практических выводов, в частности о целесообразности более широкого применения переменного тока и о необходимости модернизации панелей контакторного управления завода «Динамо». Инж. С. М. Лившиц (ЦЭМ) в докладе «О новом стандарте на двигателя постоянного и переменного токов для повторно-кратковременного режима работы» остановился на требованиях, предъявляемых к современным крановым и металлургическим двигателям.

По вопросам электропривода металлорежущих станков было заслушано два доклада. Доктор техн. наук, проф. С. А. Пресс (Ленинградский военно-механический институт) в докладе «Серийные асинхронные электродвигатели в свете требований электропривода» сформулировал основные условия, которым должен удовлетворять современный короткозамкнутый двигатель и отметил, что для станкостроения весьма существенным является возможное уменьшение габаритов, вследствие чего при конструировании новых типов двигателей необходимо идти по пути улучшения вентиляции и использования теплостойкой изоляции. Доклад инж. И. Л. Шапиро (ПВТ) «Современные системы автоматизации электроприводов металлорежущих станков» касался новейших типов электроприводов и схем управления, причем докладчик в основном базировался на работах в этой области Проектно-восстановительного треста.

В докладе инж. В. В. Рудакова (ИАТ АН СССР) «Учет потерь трения в промежуточных зубчатых передачах электропривода» была дана уточненная методика решения дифференциального уравнения движения электропривода с учетом потерь в отдельных звеньях передачи.

В двух докладах были рассмотрены вопросы применения гидропривода — доц. Максимова (Ленинградский горный институт) «Гидроэлектродвигатель в горном деле» и инж. В. С. Тулина (ПВТ) «Применение гидроагрегатов в современном электроприводе». Сессия отметила, что в горной промышленности, где вопросы взрывобезопасности имеют ос-

новное значение, гидропривод может быть весьма целесообразным.

В области аппаратуры управления электроприводами следует отметить доклады: доктора техн. наук, проф. О. Б. Брон (завод «Электросила») «Пути усовершенствования коммутационных элементов автоматической аппаратуры управления» и доц. П. В. Сахарова (Министерство электропромышленности) «Низковольтная коммутационная и пускорегулирующая аппаратура». Проф. О. Б. Брон в основном остановился на дугогасящих системах и на вопросе износоустойчивости элементов контакторов. Доц. П. В. Сахаров сообщил о номенклатуре аппаратуры, выпускаемой заводами Министерства электропромышленности, и о дальнейших перспективах низковольтного аппаратостроения в СССР.

Кандидат техн. наук С. В. Крауз (ВЭИ) в докладе «Подмагничиваемые феррореакторы и их применение» рассмотрел теорию работы феррореакторов, указал на основные зависимости между токами и напряжениями, сообщил о серии магнитных усилителей, изготавливаемой ВЭИ, и кроме того остановился на перспективах их применения в системах автоматического управления электроприводами. Инж. Я. М. Бер в своем докладе сообщил об аппаратуре, изготавливаемой научно-исследовательской лабораторией треста «Севзапэлектромонтаж». О надежности систем управления и необходимости установления соответствующего объективного критерия сделал доклад доц. В. А. Розенберг (СЗЭМ) «Элементы управления соленоидными механизмами постоянного тока».

Вопросам эксплуатации и восстановления электроприводов были посвящены два доклада. Инж. В. И. Петрикеев познакомил участников сессии с организацией эксплуатации электрического привода на Кузнецком металлургическом комбинате. Он указал на те требования, которые предъявляет металлургия к отдельным видам электрического оборудования и дал эксплуатационную оценку различным типам двигателей и аппаратуры управления отечественного и иностранного производства. Инж. Б. М. Энштейн (ПВТ) сообщил об огромной работе, сделанной коллективом ПВТ на заводах Запорожсталь по восстановлению электрооборудования и модернизации отдельных конструктивных узлов и систем управления. Для выполнения огромного объема работ были созданы на месте крупнейшие электротехнические мастерские, которые изготавливали недостающую аппаратуру.

Инж. А. Б. Челюстин (лаборатория автоматики Министерства черной металлургии) в кратком сообщении «Модернизация схем управления блоками инверторов» отметил, что для увеличения эффективности существующих приводов в ряде случаев желательна частичная модернизация систем управления и, в частности, указал на целесообразность более рационального использования форсировки возбуждения в контакторно-релейных схемах.

С информационным докладом «Характеристики электроприводов современных самолетов» выступил кандидат техн. наук Д. А. Попов (НИИ ВВС).

На сессии были определены некоторые принципиальные положения, устанавливающие направленность дальнейших исследовательских и проектных работ. Так, для успешного развития отечественного электропривода было признано необходимым: 1) внедрение технологического контроля в схемы управления электроприводами; 2) возможное упрощение проектируемых схем с целью обеспечения высокой эксплуатационной надежности; 3) разработка правил для электропривода и, в частности, системы обозначений для схем управления электроприводами; 4) пересмотр существующих стандартов и 5) промышленная реализация проводимых научно-исследовательских работ и проектов новых типов электроприводов.

Сессия обратила внимание Министерства электропромышленности на необходимость наладить серийный выпуск ряда изделий, как например: двигателей с теплостойкой изоляцией, двигателей переменного тока на большее число включений в час, комплектных ионных приводов, электронных регуляторов, электрических датчиков неэлектрических величин и т. д.



Сессия отметила также необходимость решить ряд организационных вопросов, касающихся электротехнического производства в области привода, а именно: а) о координации работы электротехнических предприятий различных министерств и установлении номенклатуры выпускаемых ими изделий; б) об уточнении понятия комплектности электропривода и его отдельных узлов и установлении порядка поставки комплектного оборудования; в) о налаживании непрерывного выпуска технической информации о производящемся оборудовании: каталогов, ценников и инструкций.

Проведение научно-исследовательских работ и проектирования требует организационных мероприятий. Следует координировать тематику научно-исследовательских и проектных работ, проводимых различными научно-исследовательскими институтами, проектными организациями и конструкторскими бюро, а также организовать ряд конкурсов на разработку новых экономических систем электропривода, типовых узлов и схем, инженерных методов расчета переходных процессов в сложных системах и т. п.

Сессия в своих решениях рекомендует правлению ВНИТОЭ поставить вопрос о создании постоянно

действующего Бюро электропривода, в задачи которого должно входить: а) организация междокомитетных совещаний по отдельным вопросам электропривода; б) координация научно-исследовательских работ в области электропривода; в) сбор и предоставление информации о технических материалах об изготовляемом оборудовании для электропривода; г) издание журналов «Электропривод»; д) организация, подготовка и оформление проекта правил по электроприводу.

Сессия признала необходимость организации в ближайшее время узких совещаний по электроприводу и электрооборудованию текстильной, резиновой, станкостроительной, горнорудной и обогащательной промышленности, а также периодического созыва совещаний по номенклатуре изделий для электропривода.

Перед закрытием сессии делегаты с большим подъемом приняли приветствие товарищу И. В. Сталину.

*Председатель сессии доц. В. А. РОЗЕНБЕРГ*

*Ученый секретарь сессии канд. техн. наук  
Ю. А. САБИНИН*



## Новые районные электростанции

**Закончено восстановление первой очереди Днепрогэс им. Ленина.** Пуском третьего агрегата завершены грандиозные работы по восстановлению первой очереди варварски разрушенной гитлеровцами крупнейшей гидроэлектростанции Европы — Днепрогэс им. Ленина.

На Днепрогэсе полностью восстановлена гигантская плотина, шитовая стена, аванкамерный мост, мосты по гребню плотины, здание гЭС в объеме первой очереди агрегатов станции, судоходный шлюз, речной порт и пр. В короткий срок были произведены все восстановительные, электромонтажные работы по гидрогенераторам, распределительному устройству 3 кВ собственных нужд, открытой высоковольтной подстанции, шлиту управления, линиям электропередачи. Заключаются работы по монтажу и вводу в эксплуатацию группы мощных трансформаторов 120 тыс. кВА.

Специальная комиссия Министерства электростанций под руководством академика Г. О. Графтио установила на месте хорошее качество всех восстановительных работ и надежность гидросооружений, устойчиво удерживающих полный проектный напор вод Днепра.

За время работы восстановленного шлюза через него прошли 715 судов с грузом и 162 тыс. м<sup>3</sup> леса, десятки пассажирских пароходов. К сезону навигации будут закончены электромагнитные работы по центральному шлиту управления всеми устройствами шлюза, с укладкой 70 км силового и контрольно-измерительного кабеля.

Восстановители Днепростроя поставили своей задачей досрочно завершить полное восстановление Днепрогэс им. Ленина. При этом будут заменены масляные выключатели мощными воздушными, внедрено флюоресцентное освещение главного щита управления и проведена полная автоматизация управления агрегатами и механизмами станции.

**Храмская гидроэлектростанция.** В декабре 1947 г. вошел в промышленную эксплуатацию первый агрегат строящейся в Грузинской ССР районной Храмской гидроэлектростанции.

Эта гидроэлектростанция представляет одно из замечательных сооружений послевоенной сталинской пятилетки.

При сооружении Храмгэс был выполнен большой объем сложных работ. На Храмгэс сооружена набросная плотина высотой 30 м из огромных камней и покрытая металлическим экраном из отечественной нержавеющей стали. Деривационный тоннель имеет протяжение 8 000 м. На крутом горном склоне смонтирован металлический напорный трубопровод с диаметром труб 1,75 м. Гидротурбина

Храмгэс—мощная вертикальная турбина четырехсепельного типа.

Линия электропередачи 110 кВ, связывающая Храмгэс с Грузинской энергосистемой, местами проходит на высоте 1 600 м над уровнем моря.

Масштабы произведенного строительства характеризуются следующими данными о выполненных работах. Было вынуто до 0,5 млн. м<sup>3</sup> скальных пород и более 1,5 млн. м<sup>3</sup> скалы и грунта для сооружения 220 км новых горных дорог. Грузооборот по транспортировке потребных стройке материалов и оборудования превысил 35 млн. т·км. Было уложено более 200 тыс. м<sup>3</sup> бетона и железобетона, изготовлено и смонтировано до 26 тыс. т арматуры и металлоконструкций.

Храмгэс обеспечит надежное электроснабжение промышленности Грузии в осенне-зимний период, когда действующие гидроэлектростанции (Загэс и Рионгэс) снижают нагрузку из-за резкого обмеления горных рек. В эти периоды маловодья Храмгэс, обладающая искусственно созданным в природной впадине гигантским высокогорным водохранилищем (озеро, вмещающее 200 млн. м<sup>3</sup> воды, площадью 36 км<sup>2</sup> и глубиной до 27 м), будет почти круглогодично работать с полной нагрузкой.

Огромное, помещение машинного зала высотой с пятиэтажный дом, имеет все новейшие приспособления для удобства обслуживания агрегатов.

Вывод энергии Храмгэс осуществляется группами однофазных блоктрансформаторов на линии электропередачи 110 кВ.

**Первая Астраханская районная электростанция.** В конце 1947 г. состоялся пуск турбогенератора и котла первой очереди Астраханской электростанции на угле. Астраханская электростанция полностью приняла на себя всю промышленную и бытовую нагрузку города. После ввода второй очереди Астраханская станция обеспечит и электроснабжение предприятий области по линиям электропередачи 35 кВ. В настоящее время отпуск энергии производится с полюс генераторного напряжения по кабелю 6,6 кВ.

В период подготовки станции к пуску был успешно применен новый способ сушки генератора без его вращения.

Пуск Астраханской электростанции обеспечивает дальнейший рост астраханской промышленности.

*Инж. Ф. Л. ВЕЙТКО*





## ДИССЕРТАЦИИ

## Московский энергетический институт им. Молотова

В Московском ордена Ленина энергетическом институте им. Молотова за период с января по декабрь 1947 г. защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук:

**Г. М. Нейфак** защитил 3 января 1947 г. диссертацию на тему «Работа гидроагрегата в компенсаторном режиме».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Г. Л. Золотарев и доктор техн. наук, проф. П. С. Жданов.

Исследован вопрос работы гидроагрегата в качестве синхронного компенсатора. Разработан метод построения специальных диаграмм, которые дают возможность определить выгодный режим агрегатов, приводящий к минимуму расхода воды, а также установить, при каких активных и реактивных нагрузках следует переводить агрегат из одного режима в другой.

**Д. В. Разевиг** защитил 17 января 1947 г. диссертацию на тему «Анализ схем защиты от атмосферных перенапряжений вращающихся машин, работающих на воздушные линии через кабельные вставки».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. В. Бургсдорф и кандидат техн. наук А. И. Долгинов.

Исследованы защитные свойства кабельных вставок в схемах защиты от атмосферных перенапряжений вращающихся машин. Показано, что простая схема защиты во всех случаях обеспечивает совершенную защиту генераторов. Исследовано несколько новых схем устраняющих недостатки простой схемы. Предложена схема замещения, пригодная для практических расчетов; даны четкие рекомендации возможных затуханий для кабелей 6 kV в приближенные—для кабелей на другие напряжения.

**С. Г. Смелынский** защитил 17 января 1947 г. диссертацию на тему «Кольцевой регулятор скорости».

Официальные оппоненты: доктор физико-матем. наук Ю. Н. Работнов и кандидат техн. наук В. Н. Веллер.

На основе приближенного метода определения больших деформаций тонкого упругого кругового кольца разработана методика расчета кольцевого регулятора и выбор его основных размеров для двух возможных вариантов регулирования. На базе теоретических исследований разработана и выполнена система регулирования с кольцевым регулятором скорости для турбин ВВС лаборатории тепловых двигателей МЭИ.

Испытания этой системы дали положительные результаты, поэтому приступлено к разработке и внедрению первых промышленных образцов.

**И. И. Иванов** защитил 17 января 1947 г. диссертацию на тему «Физико-электрические свойства высокочастотных пластмасс со слюдами наполнителями».

Официальные оппоненты: лауреат Сталинской премии, доктор техн. наук, проф. К. А. Андрианов и кандидат техн. наук В. И. Калитвянский.

Исследуется возможность повышения показателей по теплостойкости, морозостойкости и механической крепости электроизоляционных изделий из применяющихся в радиотехнике пластмасс, при одновременном сохранении ими их диэлектрических свойств.

**Н. И. Булгаков** защитил 17 января 1947 г. диссертацию на тему «Геометрия трансформатора минимальной стоимости».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. А. Трапезников и кандидат техн. наук М. В. Лилковский.

Исходя из заданных параметров (мощность, потери, индукция, плотность тока и т. п.) трансформатора, дан расчет геометрических размеров трансформатора минимальной стоимости.

**М. Ф. Попов** защитил 17 января 1947 г. диссертацию на тему «Работа импульсных рентгеновских трубок в конденсаторных схемах».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. П. Иванов и доктор техн. наук В. В. Ясинский.

Показано, что при горячем катоде в импульсном режиме могут быть достигнуты анодные токи в несколько десятков и сотен ампер. Изучен эффект изменения величины и формы фокусного пятна в зависимости от условий импульсного разряда и конструкции катода трубок. Впервые показано наличие в рентгеновских трубках влияния на размеры фокуса магнетронного эффекта. Проведены ионизационные и рентгенографические измерения интенсивности излучения различных типов трубок в условиях импульсного разряда и дана их сравнительная оценка.

**Б. В. Малевинский** защитил 28 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Исследование давления в дугогасящих конструкциях высоковольтных выключателей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. К. М. Поливанов и кандидат техн. наук, доц. Г. С. Борчанинов.

Анализируются методы регистрации давления в выключателях и описываются приборы для этой цели, разработанные и исследованные автором, с переменным индуктивным сопротивлением и с угольным сопротивлением. Излагается метод теоретического анализа явления и способ расчета давления в выключателях, а также экспериментальная проверка этого метода на основании опытов гашения дуги высокого напряжения при помощи элементарного дугогасящего устройства и испытания выключателей МГФ-11, МГФ-13 и выключателя с твердым газогенерирующим веществом конструкции ВЭИ.

**Е. М. Лолухина** защитила 28 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование асинхронных двигателей с ротором в виде полого немагнитного цилиндра».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук Е. М. Синельников.

Приведен расчет асинхронного двигателя с ротором в виде полого немагнитного цилиндра в диапазоне мощностей от 0,01 до 30 W для 50 и 500 Hz.

Выведена формула для пускового момента двигателей, у которых длина ротора больше длины стали статора. Исследованы поля в них, выявлен и оценен эффект вытеснения вихревого тока по толщине цилиндра. Графоаналитическим путем произведен расчет двигателя с учетом краевого эффекта, подсчитаны параметры и пусковой момент машины. Даны выводы о распределении поля в машине и распределении вихревых токов в роторе, о рациональной конструкции двигателя и произведена оценка его эксплуатационных свойств.

**Г. В. Дер-Шварц** защитил 28 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Расчет высокочастотных токопроводов».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. А. Жекулин и доктор техн. наук В. Ю. Ломоносов.

Даны формулы для подсчета омических потерь в различных токопроводах к печам высокой частоты. Доказывается, что в «идеальном» проводнике распределение плотности тока по периметру поперечного сечения характеризуется потенциальной функцией и что сам периметр становится магнитной силовой линией. Для практических расчетов даны графики.

**В. А. Гольцов** защитил 14 марта 1947 г. диссертацию на тему «Расчет вторично электронных умножителей в зависимости от частоты».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. П. Иванов и кандидат техн. наук Г. А. Тягунов.

Рассмотрена лампа с одним каскадом вторично электронного усиления, рассчитанная на усиление широкой полосы частот, вплоть до 500 мегагиклов. Разобрана конструкция лампы и отдельных ее электродов, приведены

характеристики и параметры лампы, схема и метод измерения коэффициента усиления лампы и ее частотной характеристики, на частотах, близких к 500 мегациклам.

Т. Х. Стефанович защитила 14 марта 1947 г. диссертацию на тему «Исследование режимов работы синхронного двигателя при кратковременном выпадении его из синхронизма».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Городский и доктор техн. наук, проф. Ю. С. Чет.

Рассмотрены процессы, возникающие в синхронном двигателе в случае, когда под воздействием кратковременного удара на валу он переходит в асинхронный режим.

Разработаны методы расчета, позволяющие произвести такой выбор соотношений между параметрами двигателя и факторами, определяющими нагрузку на валу, при котором максимальное изменение скорости вращения ротора не превысило бы 5—6% и было бы обеспечено втягивание в синхронизм после уменьшения нагрузки без применения каких-либо специальных приспособлений.

Б. И. Яхинсон защитил 14 марта 1947 г. диссертацию на тему «Исследование дифференцирующих и усредняющих пассивных контуров».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Ю. Ишлинский и кандидат техн. наук Б. И. Станиславский.

Приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования ряда пассивных контуров, применяющихся в комплексных электрических приборах специального назначения. Разработана методика определения «идеальных», переходных характеристик, которые соответствуют схемам, точно выполняющим надлежащую операцию, и найдены «идеальные» характеристики для различных режимов изменения входной величины. Характеристики переходных режимов реальных дифференцирующих и усредняющих контуров сравнены с «идеальными». Рассмотрены методы приближения воспроизводимых схем к «идеальным».

В. Л. Козис защитил 4 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Фильтровая максимальная токочная защита генераторов и фидеров».

Официальные оппоненты: проф. П. Г. Грудинский и кандидат техн. наук И. А. Сыромятников.

Разработана максимальная токочная защита генераторов от сверхтоков, исполненная с одним реле максимального тока, действующим на сигнал, и одним реле максимального тока, действующим на отключение. Произведен анализ вопросов согласования защиты фидеров с фильтровой защитой генераторов и разработана методика согласования указанных защит. Дана методика расчета элемента фильтровой защиты и приведены результаты лабораторных испытаний разработанных схем защиты.

Т. А. Глаголева защитила 11 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Метод учета энергетической значимости естественного освещения».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. В. Мешков и кандидат техн. наук Б. И. Луговской.

Разработана методика определения эквивалентной оценки световых режимов с переменными значениями освещенности. Найдено количественное соотношение величин освещенности естественного и искусственного освещения, которое при отступлении от нормируемых значений коэффициента естественной освещенности обеспечивает эквивалентный световой режим внутри помещения.

В. А. Балагуров защитил 11 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Высоковольтный серийный конденсатор во вторичной цепи многоцилиндровых авиационных магнето».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Н. Ларионов и кандидат техн. наук, инженер-полковник Ю. М. Галкин.

Проведено аналитическое и экспериментальное исследование рабочего процесса на всех его стадиях для схемы магнето без включенного серийного конденсатора и с конденсатором во вторичной цепи. Найдены критерии для определения оптимальной величины емкости конденсатора

и выяснена область применения его в зависимости от частоты цилиндров двигателя и скорости вращения его. Предложены упрощенные формулы, описывающие переходные процессы, для заводского использования.

Я. И. Эфрусс защитил 11 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Пьезо-электрический полосовой фильтр».

Официальные оппоненты: проф. Е. С. Анцелович и инж. А. П. Антипов.

Рассмотрено построение полосовых фильтров из пьезоэлектрических пластин так, как они строятся для колебательных контуров. Произведен расчет характеристик пьезоэлектрических фильтров из двух пластин, предназначенных для радиотелеграфного приема, и произведена экспериментальная проверка этого расчета. Изложена теория неустановившегося режима рассматриваемого типа фильтров. Произведено сравнение работы полосовых фильтров (при разной регулировке их) с работой обычного фильтра из одной пластины.

П. А. Виноградов защитил 25 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Переключающие элементы в системе радиотелеизмерения».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. В. Крагельский и доктор физико-матем. наук Ю. В. Работнов.

Рассмотрены переключающие устройства с твердыми металлическими контактами для радиотелеметрических цепей. В результате обобщения приведенного материала рекомендуется тип переключателя и форма контактов. Приведены результаты динамического и экспериментального анализа трех переключателей, подтверждающие теоретические выводы.

Г. М. Страховский защитил 25 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Рентгеноимпульсный метод использования быстро протекающих процессов».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов и кандидат техн. наук Г. А. Тягунов.

Изложены результаты исследования новых разработок рентгеноимпульсных установок для получения рентгеновских снимков за миллионные доли секунды при напряжении до 500 кВ. Предложен новый принцип конструирования высоковольтных рентгеновских установок для просвечивания, в которых применен импульсный режим, аналогичный режиму анодного питания ламп радиолокационных передатчиков.

Г. В. Говоров защитил 25 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Электромагнитный тормоз».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Ю. С. Чет и кандидат техн. наук М. С. Михайлов-Микуллинский.

Приведен метод расчета и опытное исследование электромагнитного тормоза со стальным диском. Найдены наименьшие диаметры диска, при которых можно построить тормоз с естественно-воздушным охлаждением при заданной индукции в диске.

А. А. Чунихин защитил 25 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Анализ существующих методов расчета восстанавливающегося напряжения и новый метод расчета для схем с распределенными постоянными».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. А. Бабиков и кандидат техн. наук А. И. Долгинов.

Рассмотрен практический метод расчета восстанавливающегося напряжения в схемах с распределенными постоянными. Работа может быть использована для создания моделей схем, эквивалентных с точки зрения переходных процессов при отключении, что даст возможность при расчете восстанавливающегося напряжения учесть целый ряд факторов, влиянием которых обычно пренебрегают.

Л. И. Столов защитил 25 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Пуск и торможение короткозамкнутого асинхронного двигателя под нагрузкой».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. В. Горюхов и кандидат техн. наук А. С. Сандлер.

Рассмотрен универсальный метод определения продолжительности процессов пуска и торможения электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями.

применимый при любых формах механических характеристик исполнительных механизмов и при любых отклонениях механических характеристик двигателей от уравнения Люсса.

А. И. Сандлер защитил 16 мая 1947 г. диссертацию на тему «Экономически целесообразное напряжение собственных нужд тепловых электрических станций».

Официальные оппоненты: проф. П. Г. Грудинский и проф. В. Н. Степанов.

Дан анализ схем коммутации и источников питания собственных нужд тепловых электрических станций в их исторической последовательности. Предложена общая методика технико-экономических сравнений по собственным нуждам станций различных мощностей, а также устанавливается экономически целесообразная величина напряжения для агрегатов собственных нужд электрических станций Советского Союза.

Разработаны вопросы питания электрической энергией двигателей механизмов собственных нужд котельной, машинного зала и центральной насосной электрических станций мощностью 12—25—50—100 тыс. kW.

Г. А. Голостенев защитил 23 мая 1947 г. диссертацию на тему «Светотехническое исследование излучения ламп сверхвысокого давления, применительно к использованию их в качестве источников света в осветительных кинопроекторах».

Официальные оппоненты: доктор физико-матем. наук В. А. Фабрикант и доктор техн. наук, проф. Н. А. Харякин.

Приведены основные светотехнические характеристики ламп газового разряда в парах ртути при различных давлениях. Даны основные параметры РЛСВД (экспериментальных и производственных образцов), отечественных и зарубежных разработок.

М. М. Бутслов защитил 23 мая 1947 г. диссертацию на тему «Исследование эмиссионных свойств и разработка технологии изготовления полупрозрачных кислородно-незевых фотокатодов».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. П. Иванов и кандидат техн. наук Г. А. Тягунов.

А. В. Разумов защитил 6 июня 1947 г. диссертацию на тему «Исследование схемы регулирования скорости асинхронного двигателя с помощью колебательного контура в роторе».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук В. Н. Архипов.

Показано, что рассматриваемая схема дает возможность получить жесткие механические характеристики с большой перегрузочной способностью двигателя.

По соображениям величины потребной емкости конденсаторов схема целесообразна для получения скоростей ниже 0,5 $\omega_0$  и может быть рекомендована в электроприводах, требующих наличия ползучих скоростей и фиксированного останова.

Д. А. Попов защитил 6 июня 1947 г. диссертацию на тему «Регулирование скорости электропривода самолетных механизмов».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и доктор техн. наук, проф. Б. П. Апанов.

Рассмотрена система Леонарда с регулятором, которая по сравнению с обычной ординарной системой Леонарда имеет более жесткие механические характеристики, большую стабильность статических режимов и требует наличия реостата меньших размеров. Даны результаты экспериментального и теоретического исследования схемы, которая позволяет добиться полной независимости скорости от нагрузки. Приведены результаты исследования системы Леонарда с амплидином.

Г. В. Шулейкин защитил 6 июня 1947 г. диссертацию на тему «Метод определения расчетных параметров опор электро- и радиосетей для получения уменьшения веса конструкций».

Официальные оппоненты: проф. С. С. Крюковский и доктор техн. наук И. В. Коптев.

Разработан метод нахождения оптимального решения при определении параметров опор.

Т. А. Татур защитила 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Методы расчета установившихся токов в линейных системах при несинусоидальных периодических напряжениях».

Официальные оппоненты: проф. Г. А. Левин и В. Н. Лавров.

Рассмотрен новый метод расчета установившегося режима электрических цепей при подаче на вход периодического напряжения любой формы, который дает решение в окончательном виде и требует знания только аналитического выражения прикладываемого напряжения и параметров цепи. В отличие от других методов указанный метод пригоден также для случая кратных корней.

К. И. Паневкин защитил 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Возбужденные атомы в положительном столбе разрядов люминесцентной лампы».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. П. Петров и доктор физико-матем. наук, проф. П. В. Тимофеев.

Разработан новый экспериментальный метод определения продолжительности жизни возбужденных атомов в газовом разряде по спаду абсорбции излучения после выключения разряда. Этот метод основан на применении фотоэлектронного умножителя и катодного осциллографа для измерения интенсивностей спектральных линий (электронно-лучевой спектрофотометр).

Е. Л. Сиротинский защитил 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Электромоделирование гидроэнергетических систем с напорными устройствами».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Т. Л. Золотарев и доктор техн. наук, проф. В. В. Бургсдорф.

Детально рассмотрены все количественные соотношения, необходимые для практического осуществления моделирования; дана методика расчета предлагаемых электронных схем и подвергнуты сравнению различные методы расчета искусственных линий, моделирующих напорные сооружения. Принцип действия важнейших узлов модели (схемы электрического перемножения и возведения в дробную степень, схемы истечения воды в турбину) проверен экспериментально.

П. Г. Туровская защитила 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Разработка и исследование включающей аппаратуры для люминесцентных ламп».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. К. М. Поливанов и доктор техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич.

Дан анализ параметров включающей аппаратуры, с использованием  $\cos \varphi$  для одиночной люминесцентной лампы и для двухламповой схемы. Выполнен ряд экспериментов и расчетов, на основании которых разработаны конструкции включающих аппаратов и установлено совпадение результатов расчета и эксперимента.

В. С. Стефанов защитил 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Синтез и исследование нагревостойких электроизоляционных композиций на основе стеклянного волокна и совтола».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. В. Александров и кандидат техн. наук, Ю. В. Корицкий.

Разработаны методы получения совтола, трихлорбензола и совтола, выявлены свойства и особенности этих жидкостей, как диэлектриков. Обращено внимание на методику измерения диэлектрических потерь и разработаны специальные электроды, дающие при измерениях стабильные результаты и ускоряющие процесс измерения. Произведен выбор и синтез высокомолекулярных веществ с вводом компонентов, повышающих нагревостойкость.

Н. А. Ульяновский защитил 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Комплексы технических вопросов передачи токов высокой частоты по высоковольтным линиям и разработка

аппаратуры частотной модуляции для телефонов».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. А. Дьяков и кандидат техн. наук, Я. Л. Быховский.

Сопоставлены преимущества частотной модуляции и системы однополосной передачи без несущей частоты применительно к связи по линиям передачи и приведены экспериментальные данные о помехоустойчивости метода узкополосной частотной модуляции сравнительно с амплитудной.

Разобран вопрос о комбинированном многократном использовании несущих частот для различных служб в энергетических системах.

В. М. Петров защитил 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Исследование динамических процессов в электроприводах при неустойчивом движении».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Т. Голован и кандидат техн. наук Н. П. Куницкий.

Изложен метод определения крутящих моментов, действующих в отдельных звеньях привода при движении с ускорением; изложен также метод решения уравнений движения электропривода с учетом потерь энергии в механизмах привода. Дан новый метод анализа и расчета динамических процессов электроприводов с шунтовой характеристикой. Определены величины действующих в приводе крутящих моментов при рассмотрении привода как системы твердых тел, соединенных упругими связями.

А. А. Федоров защитил 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Основные вопросы технической эксплуатации электрооборудования промышленных предприятий».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Т. Голован и кандидат техн. наук, доц. Б. А. Князевский.

М. М. Соколов защитил 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование асинхронно-синхронного каскада».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Т. Голован и кандидат техн. наук, доц. К. В. Урнов.

Исследованы: эквивалентная схема каскада, векторная и круговая диаграммы, механические характеристики главных приводных двигателей, выбор мощности машин, входящих в каскад, статическая и динамическая устойчивость каскада, коэффициент мощности системы и некоторые другие вопросы.

В. А. Полевой-Мансфельд защитил 25 июня 1947 г. диссертацию на тему «Принцип расщепления обмоток и его применение на электрических установках».

Официальные оппоненты: проф. П. Г. Грудинский и кандидат техн. наук Н. И. Булгаков.

Дано обобщение теории многообмоточных трансформаторов, на основе которой в дальнейшем рассмотрены агрегаты с расщепленными обмотками. Установлены их эквивалентные схемы замещения и проведен анализ условий работы электрических установок с использованием в них указанного принципа. В результате выявлены области целесообразного применения принципа расщепления обмоток для эффективного ограничения токов короткого замыкания, локализации аварии и повышения степени надежности работы электрических станций и подстанций.

А. В. Красилов защитил 20 июня 1947 г. диссертацию на тему «Методология испытания приемно-усилительных ламп».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов и кандидат техн. наук В. К. Витторский.

Даны анализ свойств приемно-усилительных ламп и систематизация параметров, характеризующих лампы, разработана программа испытания разных видов ламп этого класса, выбраны статистические методы обработки данных испытаний и разработана методика установления норм на ламповые параметры.

А. А. Глазунов защитил 25 июня 1947 г. диссертацию на тему «Методика выбора и использова-

ния средств регулирования напряжений в электросетях простейших конфигураций».

Официальные оппоненты: проф. А. Я. Рябков и проф. В. Н. Степанов.

Исследованы различные методы выбора мощности компенсирующих устройств по условиям регулирования напряжения. Выведены формулы и уравнения, определяющие режимы работы средств регулирования напряжений соответствующие минимальным потерям энергии в электрической сети. Предложена новая методика выбора и использования средств регулирования напряжения.

Е. А. Кострова защитила 25 июня 1947 г. диссертацию на тему «Вопросы устойчивости при пофазном и трехфазном АПВ».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Городский и кандидат техн. наук В. А. Венников.

Исследованы пределы устойчивости при пофазном и трехфазном АПВ для случаев связи станции с системой бесконечной и конечной мощности. Установлена возможная область применения выключателей типа МКП, для пофазного АПВ и быстродействующих воздушных выключателей для трехфазного и пофазного АПВ. Дана методика учета несимметрии емкостей при отключении одной фазы длинной линии. Рассмотрено влияние заземления нейтрали трансформатора через активное сопротивление на устойчивость при пофазном АПВ после однофазного и двухфазного повреждений на землю.

Л. А. Солдаткина защитила 26 сентября 1947 г. диссертацию на тему «Системы распределения электроэнергии в сельских районах».

Официальные оппоненты: проф. В. Н. Степанов и доц. Ф. П. Лашков.

Дан обзор электрификации сельского хозяйства в СССР, США, Франции, Великобритании и Германии. Рассмотрены методика расчета местных воздушных сетей с несимметричной нагрузкой отдельных фаз и методики предварительных расчетов для выбора рациональных вариантов различных систем распределения электроэнергии. Сделан технико-экономический анализ различных систем распределения электроэнергии и даны рекомендации по их выбору.

С. В. Тельнов защитил 26 сентября 1947 г. диссертацию на тему «Исследование работы тяговых двигателей при электрическом спаривании осей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук Л. М. Трахман.

Исследованы «противобоксовочные» схемы подвижного состава, предусматривающие электрическое спаривание осей электровоза, снабженного серийными двигателями постоянного тока и имеющего индивидуальный привод.

Установлены методы и даны расчетные формулы для построения скоростных характеристик боксования. Указаны зависимости, необходимые для проектирования электрокомотивов с электрическим спариванием осей.

Г. М. Каспржак защитил 24 октября 1947 г. диссертацию на тему «Регулируемый асинхронный короткозамкнутый микросервопривод».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. В. Горохов и доктор техн. наук, проф. А. Н. Ларионов.

И. М. Динабургский защитил 10 октября 1947 г. диссертацию на тему «Общая асимметрия трехфазных цепей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. В. Горохов, доктор техн. наук, проф. В. Ю. Ломосов и кандидат техн. наук С. А. Ульянов.

Произведен анализ существующих критериев асимметрии; предложены две новые системы уравнений для решения задач по общей асимметрии; показан способ расчета высших гармоник в случае несимметричной нагрузки асимметричных генераторов; предложены новые схемы для трансформации одних последовательностей в другие; предложены системы несимметричных составляющих, имеющие ряд преимуществ перед составляющими Эдит Кларк и Кимбарка.

Ю. С. Шиманский защитил 24 октября 1947 г. диссертацию на тему «Расчет комплексной магнитной проницаемости трансформаторной стали по статическим константам».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. С. Кантер и доктор техн. наук, проф. К. М. Полянов.

Дан метод, с помощью которого можно для трансформаторной стали, предназначенной для работы в малых магнитных полях звуковой частоты, получить необходимые для расчетов трансформаторов и дросселей динамические магнитные характеристики (индуктивность и потери в железе) из нескольких статических магнитных констант. Выведены формулы для разделения потерь на гистерезис и от вихревых токов.

Е. И. Розенфельд защитил 10 октября 1947 г. диссертацию на тему «Исследование системы с обратной связью и зависимость их от общих свойств четырехполюсников».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Я. Х. Невяжский и кандидат техн. наук В. Г. Вольянов.

Рассмотрен коэффициент передачи произвольного линейного устойчивого четырехполюсника. Установлены общие свойства, которыми обладает частотно-фазовая характеристика такой системы, на основании которых получается общий критерий устойчивости: а) для систем устойчивых и неустойчивых без обратной связи — при включении обратной связи; б) для систем устойчивых и неустойчивых с обратной связью — при выключении обратной связи; в) для произвольного устойчивого двухполюсника, соединенного с отрицательным сопротивлением.

Дан метод определения числа неустойчивых корней характеристического уравнения.

П. А. Вишневский защитил 21 ноября 1947 г. диссертацию на тему «Электрический метод контроля капиллярных каналов фильера».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. Д. Белькинд и кандидат техн. наук П. И. Глуценко.

Изложен новый метод контроля отверстий фильера, применяемый в промышленности искусственного волокна,

и приведено обоснование этого метода. На основании результатов экспериментальных исследований доказана возможность и целесообразность осуществления аналогичной электрической контрольной установки для использования ее в фабрично-заводских условиях. Описан метод измерения, устраняющий влияние помех на точность измерения.

Н. Г. Соколов защитил 21 ноября 1947 г. диссертацию на тему «Исследование свойств серийного двигателя, питаемого от серийного генератора».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов, проф. С. А. Погожев и кандидат техн. наук Н. П. Куницкий.

Рассмотрена система электропривода, предусматривающая использование серийного двигателя, питаемого от серийного генератора для приводов малой мощности, регулируемых при постоянном моменте. Такая система электропривода может быть рекомендована для приводов механизмов подачи металлорежущих станков (шлифовальных, фрезерных, карусельных), привода цепных решеток, пылеприготавливающих устройств, всякого рода механизмов трения и т. п.

Н. М. Некрасова защитила 19 декабря 1947 г. диссертацию на тему «Основы расчета нагревательных элементов высокотемпературных электрических печей сопротивления».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. В. Мешков, доц. Э. Г. Удерман и кандидат техн. наук Н. В. Окороков.

Дан анализ процесса теплопередачи от нагревателя к изделию и к поверхности стенки печи в электрической печи сопротивления.

Приведена методика расчета нагревательных элементов по ваттной нагрузке при заданной допустимой температуре нагревателя и удельная мощность стенки для конкретных конструктивных исполнений нагревательных элементов. Дано сравнение эффективности излучения ленточных зигзагообразных и ленточных тонкопослосных нагревателей.

Доц. А. С. СЕРГЕЕВ

Ученый секретарь Ученого совета МЭИ



## Конференция читателей журнала „Электричество“

В целях выявления запросов читателей к журналу „Электричество“ редакция намерена провести совместно с организациями ВНИТОЭ в ближайшее время однодневные читательские конференции в Москве, в Ленинграде и в некоторых других городах.

Читательская конференция журнала „Электричество“ в Москве состоится в пятницу 9 апреля с. г. в конференц-зале Отделения технических наук Академии наук СССР (Мал. Харитоньевский пер., 4).

Открытие конференции в 7 час. вечера.

Редакция журнала „Электричество“

## Научная сессия Киевского политехнического института

В конце октября 1947 г. в Киевском политехническом институте состоялась научная сессия, посвященная 30-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции. Электротехнический факультет института представил на сессию 7 докладов.

Проф. Н. Н. Васильев в докладе «Автоматика на службе сталинских пятилеток» остановился на значении электропривода и его автоматизации в народном хозяйстве. Советские исследователи создали ряд весьма совершенных систем автоматического управления производственными механизмами и процессами в различных отраслях промышленности.

Доктор техн. наук, проф. А. Д. Нестеренко в докладе «Электроизмерительная техника в СССР и задачи советского электроприборостроения» остановился на роли электроизмерительной техники и достижениях в этой области за истекшие 30 лет. Большое внимание в докладе уделено работам ведущих научно-исследовательских и учебных институтов, созданных и развившихся при Советской власти в нашей стране.

Проф. П. В. Окулов в докладе «Развитие промышленности электроизоляционных пластиков в СССР» подробно рассмотрел достижения советских институтов и отдельных ученых в разработке этих материалов.

Кандидат техн. наук И. К. Федченко представил доклад «Теория динамического уровня нулевого потенциала земли при распространении по линии электромагнитной волны сверхкритического напряжения». Формальная и искусственная теория Бьюли (США), которая вводит различные уровни нулевого потенциала для электрического и магнитного полей, была уже подвергнута критике со стороны советских ученых (Л. И. Сиротинского, И. С. Стекольников и др.). Докладчик изложил предложенную им новую теорию динамического уровня нулевого потенциала, позволяющую определить глубину залегания

плоскости нулевого потенциала от поверхности земли, с учетом влияния ряда физических факторов. Полученные докладчиком на основе математического анализа расчетные выражения достаточно просты и удобны для пользования.

Кандидат техн. наук В. Г. Холмский в докладе «Расчет реверсивных линий электропередачи при применении регулируемых трансформаторов» рассмотрел особенности работы реверсивных связей между системами и сформулировал требования, которые можно предъявить к методу расчета таких связей. Докладчиком изложен аналитический метод расчета напряжений, потерь мощности и пропускной способности линии при применении регулируемых трансформаторов на обоих концах. Исследование показывает, что применение таких трансформаторов значительно повышает гибкость и маневренность связи. В заключение были приведены результаты расчетов, выполненных применительно к условиям линии Днепр—Донбасс.

На пленарных заседаниях сессии выступили с докладами доктор техн. наук, проф. И. И. Гребень и проф. А. В. Орловский. И. И. Гребень в докладе «Автоматизация в народном хозяйстве СССР» подробно остановился на достижениях советских ученых и советской промышленности в области автоматизации и телемеханики, уделив особое внимание автоматизации и телеуправлению в энергетических системах СССР.

В докладе «30 лет электрификации СССР» А. В. Орловский осветил основные этапы электрификации СССР от плана ГОЭЛРО до 30 годовщины Октября и отметил крупнейший вклад русских ученых в развитии электротехники. Особенно докладчик подчеркнул историческую роль величайших деятелей в области электрификации СССР В. И. Ленина и И. В. Сталина.

*Кандидат техн. наук В. Г. ХОЛМСКИЙ*

*Кандидат техн. наук К. В. ЧЕРТОРЫЖСКИЙ*

## Всесоюзный заочный энергетический институт

В конце 1947 г. в Москве организован Всесоюзный заочный энергетический институт с филиалами в Ленинграде, Киеве, Баку, Ташкенте, Свердловске и Новосибирске.

Целью института является подготовка высококвалифицированных инженеров-энергетиков широкого профиля и усовершенствование знаний уже работающих дипломированных инженеров на основе новейших достижений науки и техники в области энергетики.

Институт имеет 7 факультетов: электрофизический, электроэнергетический, электромеханический, радиотехнический, теплоэнергетический, гидроэнергетический и факультет усовершенствования инженеров.

Продолжительность обучения на факультетах подготовки инженеров составляет, включая дипломное проектирование, 5 лет и 10 месяцев.

Учебные занятия в институте начались. Однако прием студентов будет продолжаться в течение всего 1948 г.

Как указывалось выше, помимо подготовки инженеров, Всесоюзный заочный энергетический институт проводит также работу по усовершенствованию знаний специалистов, имеющих законченное высшее техническое образование. Инженеры-производственники, работники проектных

и конструкторских бюро, научно-исследовательских институтов и др. организаций могут заочно повысить свою квалификацию по всем энергетическим специальностям, указанным выше, путем поступления в институт на факультет усовершенствования.

Продолжительность обучения на факультете усовершенствования в зависимости от выбранного цикла (специальности), составляет от 1 года до 1,5 лет.

Прием заявлений на факультет усовершенствования производится в течение всего 1948 г. по представлению предприятий и организаций.

При Всесоюзном заочном энергетическом институте организована аспирантура, имеющая целью дать возможность инженерам-энергетикам подготовиться к защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Все справки о порядке поступления в Институт можно получить ежедневно с 11 до 19 часов в помещении института (Москва, 135, Авиамоторная ул., 109-а. Телефон Ж 4-35-19 и Ж 4-26-42).

*И. И. ПЕТРОВ*

*Зам. директора по научной и учебной работе ВЭИ*





## Основы теории электричества

**И. Е. ТАММ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.** Издание третье, совершенно переработанное. *Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для университетов.* Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1946, 660 стр., тираж 15 000 экз., ц. 18 руб.

Книга И. Е. Тамма высоко ценится и пользуется большой популярностью среди электротехников, интересующихся основами учения об электричестве. Хотя в книге не излагаются технические приложения теории, но автор «стремился по возможности подготовить читателя к непосредственному переходу к изучению прикладной теории электричества» (стр. 3), и это ему в значительной мере удалось. Поэтому, естественно, что книга И. Е. Тамма, вышедшая как учебное пособие для университетов, фактически рекомендуется в качестве учебного пособия для электротехнических факультетов электротехнических и энергетических институтов (например, в Московском энергетическом институте им. Молотова) и на сегодня может быть признана лучшим пособием для инженеров и аспирантов, изучающих теорию электрического поля. Правда, для таких читателей некоторые разделы книги изложены с чрезмерными подробностями (например, параграфы, относящиеся к тензору натяжений); другие разделы, наоборот, могут вызвать упрек за чрезмерную сжатость (например, слишком кратко изложены современные представления о ферромагнетизме, отсутствует рассмотрение движения зарядов в поле и др.). Можно высказать, конечно, много и других пожеланий с точки зрения интересов читателя-инженера. Так, желательно было бы иметь в этой книге более подробный анализ, хотя бы в примерах и задачах, процессов в реальных диэлектриках с неоднородными  $\epsilon$  и  $\lambda$ , рассмотрение кинетики этих процессов; рассмотрение эффекта близости наряду со скин-эффектом; более подробное освещение вопроса о различных видах скорости—фазовая, групповая, скорость фронта; рассмотрение понятия о волноводах и т. п.

Приводя примеры тех вопросов, которые хотелось бы видеть освещенными в книге И. Е. Тамма, мы сознательно не касаемся ни комплекса вопросов, относящихся к молекулярной, электронной и квантовой физике, ни комплекса вопросов, относящихся к расчетам полей, так как в рассматриваемой книге оба эти комплекса вопросов затронуты лишь как смежные с областью физической теории поля, являющейся основным предметом изложения.

Наиболее привлекательным в книге является хорошее разрешение той задачи, которую, как основную цель, ставил перед собой автор, а именно «выяснение физического смысла и содержания основных положений теории электричества» (стр. 3). Последовательно выдержанная концепция теории поля как физической реальности не только декларируется с самого начала («мы убедимся, что понятие поля имеет глубокий физический смысл и что электромагнитное поле есть физическая реальность», стр. 21) и оговаривается в одном из заключительных параграфов («понятие поля из ранга понятия вспомогательного... в конечном счете возводится в ранг физической реальности», стр. 558), но пронизывает все изложение и во всей полноте ощущается каждым читателем, который возьмет на себя труд внимательного отношения к тексту, требующему, конечно, полного понимания того не очень сложного, математического языка, которым должен уметь владеть как физик, так и инженер.

Подробно и с предельной ясностью изложена роль вещества с его носителями связанных зарядов и токов, учитываемых в макроскопической теории введением новых векторных величин  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{I}$ , наряду с основными векторами

$\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B} = \mathbf{H}_{\text{микро}}$ , введенными при рассмотрении поля в вакууме и, характеризующими собственно электромагнитное поле.

Лишь после этого вводятся вспомогательные векторы  $\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi \mathbf{I}$  и  $\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P}$ , операции с которыми практически очень удобны, так как позволяют в формулировку основных законов в явном виде вводить только свободные заряды и токи.

Такая точка зрения, хотя и является принципиально общепринятой (со времен Лоренца), однако далеко не всегда проводится с достаточной ясностью и последовательностью. Так, при рассмотрении магнитного поля в поляризуемых средах с указанной точки зрения, конечно, следует считать, что роль восприимчивости играет коэффициент пропорциональности между  $\mathbf{I}$  и  $\mathbf{B}$ , а не между  $\mathbf{I}$  и  $\mathbf{H}$ , как на это и указывает автор (см. конец § 63, а также § 74). Хотя это логически вытекает со всей очевидностью из принятой концепции, однако такое изложение можно встретить достаточно редко (с наибольшей последовательностью оно проведено в «Электродинамике» Я. И. Френкеля, т. 2, стр. 16, 39 и др.).

Очень интересные разделы (в значительной мере переработанные и дополненные для нового издания), относящиеся к энергии поля. Сказанное в особенности относится к ясному изложению трудных вопросов об энергии поляризованного вещества в поле, о свободной энергии и об энергии поля в собственном смысле слова (в частности §§ 31, 82 и 108). Именно говоря об энергии, автор оговаривается, что «в §§ 70 и 71, мы считали, что на атомы магнетика действует поле  $\mathbf{H}$ , тогда как правильнее было бы считать, что на них действует поле  $\mathbf{H}_{\text{микро}}$ » (стр. 401),

после чего приобретает отчетливый физический смысл известное равенство (стр. 402)

$$\frac{1}{8\pi} \mathbf{B} \mathbf{H} = \frac{1}{8\pi} \mathbf{B}^2 - \frac{1}{2} \mathbf{I} \mathbf{B}.$$

Очень хорошо вводится понятие потенциальной функции токов и разобраны все энергетические соотношения при движении контуров тока.

Нельзя не отметить, как особенное достоинство книги, ее ясный, точный и сжатый язык. Выражения, даже просто не совсем точные или допускающие неверное толкование, встречаются исключительно редко.

К числу их относятся следующие:

а) на стр. 394 говорится, что «Уравнения (81,8) представляют собой *наиболее общее*, годное при  $\mu \neq \text{const}$ , определение коэффициентов индукции». Здесь подразумевается, что  $\mu$  есть функция координат, т. е.  $\mu = f(x, y, z)$ , остающаяся постоянной и независимой от  $\mathbf{H}$  (т. е.  $\mu = \text{const}_{\mathbf{H}}$ ). Для того, чтобы не возникало недоразумений, было бы лучше так и сказать годное для неоднородной среды, в каждой точке которой  $\mathbf{B}$  пропорционально  $\mathbf{H}$ .

б) на стр. 278 приводятся принципиально очень важные выражения

$$\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A} = \text{rot } \frac{[\mathbf{M}\mathbf{R}]}{R^3} \quad (57,12)$$

$$\mathbf{H} = -\text{grad } \frac{\mathbf{M}\mathbf{R}}{R^3} \quad (57,13)$$

и говорится, «что эти выражения отличаются друг от друга лишь по внешнему виду». Это совершенно справедливо, поскольку рассматривается «поле системы токов на расстояниях от этой системы, значительно превышающих ее размеры». Здесь было бы желательно указать различие между (57, 12) и (57, 13), существующее при определении по ним поля в точках, где  $M \neq 0$ , а именно

$$H_{\text{микро}} = \text{rot} \int \frac{[MR]}{R^3} dV = -\text{grad} \int \frac{MR}{R^3} + 4\pi M.$$

Это тем более важно, что в литературе встречается неправильное отождествление (57,12) и (57,13) при определении  $H$  в области, где  $M \neq 0$ .

в) В сноске на стр. 228 автор говорит, что «магнитное поле токов, как и всякое вихревое поле, однозначным скалярным потенциалом не обладает». Можно было бы сказать точнее, что оно вообще никаким скалярным потенциалом не обладает там, где  $\text{rot } H \neq 0$  и обладает неоднозначным потенциалом только в той области, где  $\text{rot } H = 0$ . Конечно, это с полной ясностью следует из дальнейшего текста и здесь приводится только как пример не совсем точного выражения.

г) С предельной сжатостью и ясностью автор излагает в нескольких строках основы комплексного метода в теории переменных токов (стр. 386). Однако, не пользуясь хорошо разработанной в электротехнике системой обозначений, автор приходит к неотчетливым и формально неверным выражениям. В самом деле, из записи

$$I'_0 = \frac{\epsilon'_0}{R' + i\omega L'},$$

а также из прямого указания на той же странице, следует, что  $I'_0$  и  $\epsilon'_0$  суть комплексные амплитуды, но в уравнении (80,10) выражающем среднюю мощность, напечатано

$$\frac{1}{2} \epsilon'_0 I'_0 \cos \varphi,$$

где те же буквы с теми же значками ( $\epsilon'_0$  и  $I'_0$ ) обозначают, разумеется, уже не комплексы, а абсолютные значения амплитуд.

Можно найти и еще несколько примеров, допущенных неточностей, но в общем их очень мало и часто они носят характер опечаток (которых, кстати, немного, хотя и больше, чем замечено при чтении корректур: на стр. 437  $i_2$  вместо  $j_2$ , не на месте скобка в формуле 46\* на стр. 642, индекс  $S_2$  вместо  $S_1$  на стр. 143 в строке 11 см. и др.).

Остановлюсь на двух замечаниях более общего характера. Первое из них относится к изложению теории скин-эффекта (поверхностного эффекта) (§ 90). Хотелось бы видеть несколько более широкое и обобщенное рассмотрение явлений, связанных со скин-эффектом.

В теории скин-эффекта очень существенным является определение активного и внутреннего реактивного сопротивлений проводов. Они соответственно равны действительной и мнимой части отношения вектора напряженности электрического поля на поверхности проводника к току (разумеется при их выражении в комплексной форме), т. е.

$$R_0 + jX_0 = E/I.$$

Такое определение  $R_0$  и  $X_0$  много проще, чем определение тех же величин из интеграла плотности джоулевых потерь и плотности магнитной энергии, а в некоторых случаях подобное определение с расчетной стороны практически является единственно возможным (например, определение комплексного значения коэффициента взаимной индукции при расчете влияния на провода связи тока замыкания на землю).

Неудачны в этом параграфе обозначения и терминология, расходящиеся с принятыми в настоящее время у электротехников; автор обозначает через  $Q$  активную мощность  $Q = I^2 R$ , тогда как в технике ее принято обозначать буквой  $P$ , а буквой  $Q$  принято обозначать мощность реактивную, т. е.  $I^2 X$ ; автор говорит, что «в технике эту величину  $R$  принято называть омическим или *ваттным* сопротивлением проводника», тогда как в технике термин *ваттное* прямо не рекомендуется, а омическим

иногда называют сопротивление проводника при постоянном токе, в отличие от сопротивления *активного*, о котором здесь идет речь. Может привести к недоразумениям и утверждение автора о том, что «по мере концентрации тока на поверхности проводника», т. е., скажем, по мере роста частоты, «самоиндукция проводника» стремится к пределу  $L''$ , равному внешней самоиндукции. При этом важно было бы заметить, что хотя при расхождении частоты внутренняя индуктивность ( $L'$ ) стремится к нулю, внутреннее реактивное сопротивление  $X' = \omega L'$  стремится к величине, равной активному сопротивлению проводника, т. е. полное реактивное сопротивление  $X = X' + X''$  стремится к  $R + \omega L''$ , где  $R$  — активное сопротивление, а  $L''$  — внешняя индуктивность (самоиндукция). Этот факт ( $X' \rightarrow 0$ ) непосредственно следует из того, что «поле быстропеременных токов в глубь проводников не проникает», а следовательно, на поверхности проводников связь между векторами  $H$  и  $E$  устанавливается такая же, как на поверхности бесконечного (проводящего) полупространства, где фазовый угол между векторами  $H$  и  $E$  всегда стремится к  $\pi/4$ .

К вопросу о скин-эффекте автор возвращается еще дважды при рассмотрении вопроса о потоке энергии (стр. 452) и при рассмотрении волн в проводящей среде (стр. 515). Высказанные здесь положения говорят о самом существе дела и очень интересны. Некоторое развитие позволило бы дать более полную теорию скин-эффекта как электрического, так и магнитного.

В том же разделе (стр. 515) автор приводит таблицу, которая должна иллюстрировать «глубину проникновения в медь полей различной частоты». Ошибочные цифры этой таблицы являются результатом редакционного несмотрения.

Еще одно замечание относится к изложению закона электромагнитной индукции. И. Е. Тамм, как это вполне достаточно распространено, исходит (гл. VI) из рассмотрения сторонней напряженности поля  $E' = \frac{1}{c} [vB]$  в

жущемся проводнике. Вычисляя э. д. с.,  $\epsilon^{und}$ , который определяется как циркуляция вектора  $E$ , автор находит, что

$$\epsilon^{und} = \oint_L E' ds = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int H_n dS = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$$

(речь идет о магнитном поле в вакууме). В дальнейшем обобщая закон электромагнитной индукции для движущегося проводника на общий случай изменения магнитного поля, автор не находит нужным оговорить, что в общем случае выражение для  $E$  должно содержать еще одну

составляющую —  $\frac{\partial A}{\partial t}$ , которую казалось бы естественно ввести в § 85, как непосредственное следствие (85,2) определения векторного потенциала.

При этом, по мнению рецензента, следовало бы именно здесь привести максвелловское выражение для напряженности электрического поля

$$E = -\text{grad } \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t} + [vB],$$

в котором первые два члена выражают составляющую, независимую от скорости. Но выражение для напряженности поля  $E = -\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \varphi$  (94,2) без слагающей  $[vB]$  вводится только в § 94 (стр. 456) и может казаться, что

рассмотрение слагающей  $-\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}$  оказывается нужным

только для анализа дифференциальных уравнений, связанных с распространением электромагнитных волн.

В то же время приведенное полное выражение для  $E$  является исключительно важным при изучении явлений, связанных с поведением заряженных частиц (скажем



микронов) в переменном электромагнитном поле. Оно также является бы хорошей иллюстрацией того смысла, который имеет векторный потенциал.

В заключение хотелось бы обратить внимание на то, что книга И. Е. Тамма помимо высоких научных качеств, обладает еще одним достоинством чисто методического характера: чтение книги оказывает глубокое дисциплинирующее воздействие благодаря тому, что она предъявляет читателю достаточно большие требования: эти требова-

ния относятся, однако, не только к сумме тех знаний в области физики и математики, которыми должен обладать читатель, но и к самому способу чтения научной литературы («решение многих задач, пишет И. Е. Тамм, необходимо для понимания последующего изложения»). Книга воспитывает, таким образом, строгое, серьезное отношение к изучаемому предмету.

Доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ



## Эффективность электрификации сельского хозяйства

Проф. Н. С. ВЛАСОВ. ЭКОНОМИКА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО КОЛХОЗА. Сельхозгиз, 84 стр., 11 рис., 1947 г., ц. 1 руб. 50 коп. — «105 ЛОШАДИНЫХ СИЛ». Документальный фильм производства Новосибирской киностудии. Автор сценария Н. Щелкова, режиссер Н. Чуриков.

Книга и фильм посвящены колхозу «Заря» Ачитского района Свердловской области. Этот колхоз завоевал себе широкую популярность тем, что он одним из первых по Свердловской области осуществил широкую электрификацию сельскохозяйственного производства и на базе электрификации быстро вырос в мощный колхоз-миллионер.

Проф. Н. С. Власов лично изучил на месте всю хозяйственную жизнь колхоза до и после его электрификации и собранный им богатый фактический материал лег в основу рецензируемой книги.

Колхоз осуществил электрификацию всех своих подсобных предприятий: механической мастерской, кузницы, лесопильного завода, сушилки для дерева, мельницы и засолочного пункта. В животноводческом хозяйстве электрифицированы: водокачка, силосорезка, соломорезка, кормоприготовительное отделение для грубых и сочных кормов на 300 голов скота. Из полевых машин на электрический привод переведены: молотилка, зерноочистка, установка по дождеванию и сушилка для зерна. Электрическое освещение имеют все производственные помещения, общественно-культурные и коммунальные помещения (школа, больница, детские ясли, клуб, контора колхоза, пекарня, столовая и др.), улицы и, наконец, все дома колхозников. Колхоз имеет также свой радиоузел и телефонную связь с райцентром и ближайшей железнодорожной станцией.

Наиболее интересным разделом в рецензируемой книге является раздел, посвященный анализу влияния электрификации на экономику колхоза.

Автор, будучи экономистом, с особым вниманием и тщательностью отнесся к исследованию всех тех сторон в жизни и в развитии колхоза, которые позволили ему наиболее убедительно показать благоприятное влияние электрификации на хозяйственную деятельность колхоза. Анализ экономики электрифицированного колхоза, проведенный автором, представляет собой первую научную работу такого рода, опубликованную в нашей печати, и в заслугу автору следует поставить, что эта работа сумела правильно отразить те значительные экономические сдвиги,

которые происходят в наших колхозах при внедрении электроэнергии в сельскохозяйственное производство.

В результате осуществления электрификации в колхозе экономия рабочей силы выразилась в 17% к общему числу колхозников, занятых на работах в колхозе. Экономия в живой тяге выразилась в 20% от общего количества рабочих лошадей.

Все это позволило расширить масштабы производства и организовать новые подсобные предприятия, например, крахмало-паточный завод и др.

Валовая продукция, приходящаяся на одного колхозника, выросла за период электрификации на 172%.

Книга проф. Н. С. Власова убедительно пропагандирует передовой опыт электрификации.

К недостаткам рецензируемой книги следует отнести некоторую сухость в изложении и перегруженность текста многочисленными цифровыми таблицами, что затрудняет доходчивость книги до массового читателя (книга издана тиражом в 30 000 экз.). В книгу вкрались досадные опечатки, например *квт* указываются там, где должны указываться *квтч* и т. п.

Кинофильм «105 лошадиных сил» правдиво и ярко рисует жизнь и достижения электрифицированного колхоза. Но, к сожалению, он не избежал и недостатков, присущих многим научно-популярным фильмам. Для зрителей, незнакомых с электротехникой, смысл многих кадров остается непонятным. Режиссер напрасно не воспользовался современными методами киносъемки, в частности, мультипликацией, для того, чтобы более выразительно показать внедрение электроэнергии в производственные процессы сельского хозяйства.

В дикторский текст также вкрались ошибки: смешиваются киловаттчасы с киловаттами, при объяснениях не выдержана техническая терминология и т. п.

Несмотря на отмеченные недостатки, книга проф. Н. С. Власова и кинофильм «105 лошадиных сил» являются интересными и ценными пособиями, популяризирующими сельскую электрификацию в СССР.

Кандидат с.-х. наук Н. А. САЗОНОВ



## „Молодой электротехник“ — журнал молодых электротехников Югославии

«Молодой электротехник» — орган молодых электротехников Югославии — издается в городе Загребе Союзом народной молодежи совместно с учащимися средней Технической школы в Загребе.

Полученный редакцией журнала «Электричество» номер пятый журнала «Молодой электротехник» (1947 г.) открывается обращением к соотечественникам-профессорам, инженерам, техникам и ко всем деятелям в области применения электричества с призывом всемерно содействовать успешному выполнению «Пятилетнего плана развития народного хозяйства Югославии». Содержание журнала проникнуто народно-демократическим духом, который характерен для всех областей государственного, хозяйственного и культурного строительства Югославской республики.

В номере напечатан ряд статей, вводящих молодых читателей в курс различных отраслей электротехники.

Проф. Велемиром Круж написана обзорная статья «Краткий исторический очерк развития электротехники». В статьях Ивана Уремовича «О постоянном токе», Звонимира Миклашевича «О переменном токе», Звонимира Вистричка «Приборы электротехники сильного тока» и Антона

Бильяна «Измерительная техника» читатель знакомится с современным состоянием этих вопросов. Радиолюбители даны в популярном изложении соответствующие начальные сведения по радиотехнике в статьях Владимира Полухова «Основы радиотехники», Альфреда Жидана «Радиолампы», Косты Томанича «Приборы для записи звука» и др.

В журнале имеется отдел задач и решений по основам электротехники. В отделе библиографии дается обзор электротехнических и радиотехнических журналов разных стран; в этом отделе приведен перечень статей, напечатанных в журнале «Электричество» (№№ 5 и 6, 1947). Имеются отделы «Из практики» и «Из школьной жизни в Югославии». Дается необходимая информация в частности об электрификации в СССР.

Оформление журнала удовлетворительное; хорошо выполнены чертежи и схемы.

Следует пожелать всемерного успеха этому интересному и хорошему начинанию молодых электротехников Югославии.

П. И. ВОЕВОДИН



### К обзору

## „Советская электротехническая периодика 1917—1947 гг.“

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 12, 1947)

В обзоре А. М. Лукомской «Советская электротехническая периодика 1917—1947 гг.» имеются неточности. Следует отметить некоторые из них:

1. Труды Ленинградского политехнического института в рассматриваемый период выходили не с 1936 г., как указано в статье, а с 1917 г. После разукрупнения Института (с 1930 г.) работы по электротехнике печатались в «Трудах ЛЭМИ», а с 1936 г. начали выходить «Труды ЛПИ», которые с 1941 г. снова стали называться «Труды ЛПИ им. Калинина». Издание их имело перерыв лишь во время войны (1943—1945 гг.).

2. Труды Ленинградского электротехнического института им. Ленина в статье вовсе не отмечены. Выходили они в течение всего 30-летия, хотя и не каждый год.

3. Поскольку в статье отмечены Труды Всесоюзной электротехнической ассоциации, не являвшиеся периодическими, следовало бы отметить также ряд непериодических изданий ВНИТОЭ: «Энергетический сборник», выходящий с 1944—1946 гг., Труды I-й Всесоюзной конференции по высоковольтной аппаратуре (1938 г.) и др.

Доктор техн. наук, проф. А. М. ЗАЛЕСКИЙ



**В. К. Попов**

*Редколлегия журнала «Электричество» с глубоким прискорбием извещает о смерти доктора техн. наук, проф. В. К. Попова — одного из старейших деятелей журнала, выдающегося ученого в области электрического привода.*

Редколлегия журнала «Электричество»



Сдано в пр-во 28/I 1948 г.

46330 тип. зн. в 1 п. л.

А - 02368

Подписано к печати 16/III 1948 г.

Объем 12 печ. листов

Тираж 10 500

Цена 8 руб.

Формат бумаги 60×92/16

16,4 уч.-авт. листа

Заказ 1022

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

---

Продолжается подписка  
на 1948 г.

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

Основан в 1880 году Русским техническим обществом

---

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области исследования и применения электричества и освещает основные теоретические и практические проблемы, связанные с развитием электротехники и электрификации СССР

---

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ НА ПОЧТЕ И В ОТДЕЛЕНИЯХ  
«СОЮЗПЕЧАТИ»

12

номеров в год  
по 12 печ.

листов

Подписная  
цена на год

96

рублей